

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по молодежной политике и
развитию образования

А. В. Легостев

2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ВОСПИТАНИЯ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

для всех направлений подготовки и специальностей

СОГЛАСОВАНО


Председатель Объединенного совета
обучающихся ФГБОУ ВО «УГГУ»
(протокол № 25 от 15.11.2023)

 А. А. Кухарева

Председатель Первичной профсоюзной
организации ФГБОУ ВО «УГГУ»
(протокол № 5 от 24.10.2023)

 П. А. Коновалов

Председатель Совета родителей
ФГБОУ ВО «УГГУ»

(протокол № 3/1 от 04.10.2023)
 В. А. Пивова

Составитель: начальник управления по внеучебной
и социальной работе Шехтман Д.А.

Екатеринбург

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Наименование программы

Рабочая программа воспитания ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (далее – УГГУ, университет).

Рабочая программа воспитания ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» представляет собой ценностно-нормативную, методологическую, методическую и технологическую основы организации воспитательной деятельности.

Рабочая программа воспитания (далее – Программа) ориентирована на организацию воспитательной деятельности субъектов образовательного и воспитательного процессов.

Воспитательная работа в университете направлена на создание благоприятных условий для личностного и профессионального развития студенческой молодёжи, формирование профессиональных и общекультурных/универсальных компетенций, таких как гражданственность, трудолюбие, ответственность, организованность, самостоятельность, инициативность, дисциплинированность.

Разработчик и координатор программы

Управление по внеучебной и социальной работе.

Нормативно-правовые основания программы

- Конституция Российской Федерации;
- Федеральный закон от 29.12.2012 №273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»;
- Федеральный закон от 05.02.2018 № 15-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам добровольчества (волонтерства)»;
- Указ Президента Российской Федерации от 19.12. 2012 г. № 1666 «Стратегия государственной национальной политики Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Указ Президента Российской Федерации от 24.12.2014 № 808 «Основы государственной культурной политики»;
- Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы»;
- Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»;
- Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»;
- Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400 «Стратегия национальной безопасности Российской Федерации»;
- Указ Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809 «Об утверждении основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей»;
- Постановление Правительства Российской Федерации от 26.12.2017 № 1642 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.11.2014 № 2403-р «Основы государственной молодежной политики Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.05.2015 № 996-р «Стратегия развития воспитания в Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.12.2018 № 2950-р «Концепция развития добровольчества (волонтерства) в Российской Федерации до 2025 года»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.11.2020 № 2945-р «Об утверждении Плана мероприятий по реализации в 2021-2025 годах Стратегии развития воспитания в Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Устав ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Сроки реализации программы - период реализации образовательной программы.

Ожидаемые результаты:

- исполнение положений Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» по вопросам воспитания обучающихся;
- реализация приоритетных направлений государственной молодежной политики по созданию условий для успешной социализации и эффективной самореализации обучающихся;
- привлечение к воспитательной работе в университете заинтересованных субъектов университетского сообщества;
- формирование у обучающихся духовных, социальных и профессиональных ценностей;
- обогащение личностного и социального опыта обучающихся;
- совершенствование форм и методов воспитательной работы;
- повышение степени вовлеченности обучающихся в организацию и проведение мероприятий воспитательного характера;
- совершенствование системы контроля и оценки воспитательной работы;
- расширение взаимодействия субъектов воспитательной работы с органами государственной власти и местного самоуправления, международными, всероссийскими, межрегиональными, региональными общественными объединениями, ключевыми стейкхолдерами;
- развитие традиций корпоративной культуры университета;
- повышение эффективности и качества реализуемых мероприятий;
- выпуск конкурентоспособных специалистов, обладающих высоким уровнем социально-личностных и профессиональных компетенций.

РАЗДЕЛ 1. ЦЕЛЕВОЙ

Воспитательная деятельность в университете, реализующем программы высшего и среднего профессионального образования, является одной из основных частей образовательного процесса, планируется и осуществляется в соответствии с приоритетами государственной политики в сфере воспитания.

Участниками образовательных отношений в части воспитания в университете являются:

- ректор;
- проректор по молодежной политике и развитию образования;
- начальник управления по внеучебной и социальной работе;
- заместители начальника управления по внеучебной и социальной работе;
- специалисты по социальной работе с молодежью;
- деканы факультетов;
- заведующие кафедрами;
- педагогические работники;
- академические кураторы;
- педагоги-психологи;
- члены Объединенного совета обучающихся;
- представители Совета родителей.

1.1 Цель и задачи воспитания обучающихся

Цель воспитания обучающихся ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» - развитие личности, создание условий для самоопределения и социализации на основе социокультурных, духовно-нравственных ценностей и принятых в российском обществе правил и норм поведения в интересах человека, семьи, общества и государства,

формирование у обучающихся чувства патриотизма, гражданственности, уважения к памяти защитников Отечества и подвигам Героев Отечества, закону и правопорядку, человеку труда и старшему поколению, взаимного уважения, бережного отношения к культурному наследию и традициям многонационального народа Российской Федерации, природе и окружающей среде.

Задачи воспитания:

- усвоение обучающимися знаний о нормах, духовно-нравственных ценностях, которые выработало российское общество (социально значимых знаний);
- формирование и развитие осознанного позитивного отношения к ценностям, нормам и правилам поведения, принятым в российском обществе (их освоение, принятие), современного научного мировоззрения, мотивации к труду, непрерывному личностному и профессиональному росту;
- приобретение социокультурного опыта поведения, общения, межличностных и социальных отношений, в том числе в профессионально ориентированной деятельности;
- подготовка к самостоятельной профессиональной деятельности с учетом получаемой квалификации (социально-значимый опыт) во благо своей семьи, народа, Родины и государства;
- подготовка к созданию семьи и рождению детей.

1.2 Направления воспитания

Рабочая программа воспитания УГГУ реализуется в единстве учебной и воспитательной деятельности с учётом направлений воспитания:

гражданское воспитание — формирование российской идентичности, чувства принадлежности к своей Родине, ее историческому и культурному наследию, многонациональному народу России, уважения к правам и свободам гражданина России; формирование активной гражданской позиции, правовых знаний и правовой культуры;

патриотическое воспитание — формирование чувства глубокой привязанности к своей малой родине, родному краю, России, своему народу и многонациональному народу России, его традициям; чувства гордости за достижения России и ее культуру, желания защищать интересы своей Родины и своего народа;

духовно-нравственное воспитание — формирование устойчивых ценностно-смысловых установок, обучающихся по отношению к духовно-нравственным ценностям российского общества, к культуре народов России, готовности к сохранению, преумножению и трансляции культурных традиций и ценностей многонационального российского государства;

эстетическое воспитание — формирование эстетической культуры, эстетического отношения к миру, приобщение к лучшим образцам отечественного и мирового искусства;

физическое воспитание, формирование культуры здорового

образа жизни и эмоционального благополучия — формирование осознанного отношения к здоровому и безопасному образу жизни, потребности физического самосовершенствования, неприятия вредных привычек;

профессионально-трудовое воспитание — формирование позитивного и добросовестного отношения к труду, культуры труда и трудовых отношений, трудолюбия, профессионально значимых качеств личности, умений и навыков; мотивации к творчеству и инновационной деятельности; осознанного отношения к непрерывному образованию как условию успешной профессиональной деятельности, к профессиональной деятельности как средству реализации собственных жизненных планов;

экологическое воспитание — формирование потребности экологически целесообразного поведения в природе, понимания влияния социально-экономических процессов на состояние окружающей среды, важности рационального природопользования; приобретение опыта эколого-направленной деятельности;

ценности научного познания — воспитание стремления к познанию себя и других людей, природы и общества, к получению знаний, качественного образования с учётом личностных интересов

и общественных потребностей.

1.3 Целевые ориентиры воспитания

1.3.1 Инвариантные целевые ориентиры

Согласно «Основам государственной политики по сохранению и укреплению духовно-нравственных ценностей» (Указ Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809) ключевым инструментом государственной политики в области образования, необходимым для формирования гармонично развитой личности, является воспитание в духе уважения к традиционным ценностям, таким как патриотизм, гражданственность, служение Отечеству и ответственность за его судьбу, высокие нравственные идеалы, крепкая семья, созидательный труд, приоритет духовного над материальным, гуманизм, милосердие, справедливость, коллективизм, взаимопомощь и взаимоуважение, историческая память и преемственность поколений, единство народов России.

В соответствии с Федеральным законом от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» воспитательная деятельность направлена на формирование у обучающихся чувства патриотизма, гражданственности, уважения к памяти защитников Отечества и подвигам Героев Отечества, закону и правопорядку, человеку труда и старшему поколению, взаимного уважения, бережного отношения к культурному наследию и традициям многонационального народа Российской Федерации, природе и окружающей среде».

Эти законодательно закреплённые требования в части формирования у обучающихся системы нравственных ценностей отражены в инвариантных целевых ориентирах воспитания выпускников университета и соотносятся с общими/универсальными компетенциями, формирование которых является результатом освоения образовательных программ в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов.

Инвариантные целевые ориентиры воспитания выпускников университета

Гражданское воспитание
<ul style="list-style-type: none">– Осознанно выражающий свою российскую гражданскую принадлежность (идентичность) в поликультурном, многонациональном и многоконфессиональном российском обществе, в мировом сообществе.– Сознательный своё единство с народом России как источником власти и субъектом тысячелетней российской государственности, с российским государством, ответственность за его развитие в настоящем и будущем на основе исторического просвещения, российского национального исторического сознания.– Проявляющий гражданско-патриотическую позицию, готовность к защите Родины, способный аргументированно отстаивать суверенитет и достоинство народа России и российского государства, сохранять и защищать историческую правду.– Ориентированный на активное гражданское участие в социально-политических процессах на основе уважения закона и правопорядка, прав и свобод сограждан.– Осознанно и деятельно выражающий неприятие любой дискриминации по социальным, национальным, расовым, религиозным признакам, проявлений экстремизма, терроризма, коррупции, антигосударственной деятельности.– Обладающий опытом гражданской социально значимой деятельности (в студенческом самоуправлении, добровольческом движении, предпринимательской деятельности, экологических, военно-патриотических и др. объединениях, акциях, программах).
Патриотическое воспитание
<ul style="list-style-type: none">– Осознающий свою национальную, этническую принадлежность, демонстрирующий приверженность к родной культуре, любовь к своему народу.

<ul style="list-style-type: none"> – Сознательный причастность к многонациональному народу Российской Федерации, Отечеству, общероссийскую идентичность. – Проявляющий деятельное ценностное отношение к историческому и культурному наследию своего и других народов России, их традициям, праздникам. – Проявляющий уважение к соотечественникам, проживающим за рубежом, поддерживающий их права, защиту их интересов в сохранении общероссийской идентичности.
<p>Духовно-нравственное воспитание</p> <ul style="list-style-type: none"> – Проявляющий приверженность традиционным духовно-нравственным ценностям, культуре народов России с учётом мировоззренческого, национального, конфессионального самоопределения. – Проявляющий уважение к жизни и достоинству каждого человека, свободе мировоззренческого выбора и самоопределения, к представителям различных этнических групп, традиционных религий народов России, их национальному достоинству и религиозным чувствам с учётом соблюдения конституционных прав и свобод всех граждан. – Понимающий и деятельно выражающий понимание ценности межнационального, межрелигиозного согласия, способный вести диалог с людьми разных национальностей и вероисповеданий, находить общие цели и сотрудничать для их достижения. – Ориентированный на создание устойчивой семьи на основе российских традиционных семейных ценностей, рождение и воспитание детей и принятие родительской ответственности. – Обладающий сформированными представлениями о ценности и значении в отечественной и мировой культуре языков и литературы народов России.
<p>Эстетическое воспитание</p> <ul style="list-style-type: none"> – Выражающий понимание ценности отечественного и мирового искусства, российского и мирового художественного наследия. – Проявляющий восприимчивость к разным видам искусства, понимание эмоционального воздействия искусства, его влияния на душевное состояние и поведение людей, умеющий критически оценивать это влияние. – Проявляющий понимание художественной культуры как средства коммуникации и самовыражения в современном обществе, значение нравственных норм, ценностей, традиций в искусстве. – Ориентированный на осознанное творческое самовыражение, реализацию творческих способностей, на эстетическое обустройство собственного быта, профессиональной среды.
<p>Физическое воспитание, формирование культуры здоровья и эмоционального благополучия</p> <ul style="list-style-type: none"> – Понимающий и выражающий в практической деятельности понимание ценности жизни, здоровья и безопасности, значение личных усилий в сохранении и укреплении своего здоровья и здоровья других людей. – Соблюдающий правила личной и общественной безопасности, в том числе безопасного поведения в информационной среде. – Выражающий на практике установку на здоровый образ жизни (здоровое питание, соблюдение гигиены, режим занятий и отдыха, регулярную физическую активность), стремление к физическому совершенствованию. – Проявляющий сознательное и обоснованное неприятие вредных привычек (курения, употребления алкоголя, наркотиков, любых форм зависимостей), деструктивного поведения в обществе и цифровой среде, понимание их вреда для физического и психического здоровья. – Демонстрирующий навыки рефлексии своего состояния (физического, эмоционального, психологического), понимания состояния других людей. – Демонстрирующий и развивающий свою физическую подготовку, необходимую для избранной профессиональной деятельности, способности адаптироваться к стрессовым ситуациям в общении, в изменяющихся условиях (профессиональных, социальных, информационных, природных), эффективно действовать в чрезвычайных ситуациях. – Использующий средства физической культуры для сохранения и укрепления здоровья в процессе профессиональной деятельности и поддержания необходимого уровня физической подготовленности.
<p>Профессионально-трудовое воспитание</p>

- Понимающий профессиональные идеалы и ценности, уважающий труд, результаты труда, трудовые достижения российского народа, трудовые и профессиональные достижения своих земляков, их вклад в развитие своего поселения, края, страны.
- Участвующий в социально значимой трудовой и профессиональной деятельности разного вида в семье, образовательной организации, на базе производственной практики, в своей местности.
- Выражающий осознанную готовность к непрерывному образованию и самообразованию в выбранной сфере профессиональной деятельности.
- Понимающий специфику профессионально-трудовой деятельности, регулирования трудовых отношений, готовый учиться и трудиться в современном высокотехнологичном мире на благо государства и общества.
- Ориентированный на осознанное освоение выбранной сферы профессиональной деятельности с учётом личных жизненных планов, потребностей своей семьи, государства и общества.
- Обладающий сформированными представлениями о значении и ценности выбранной профессии, проявляющий уважение к своей профессии и своему профессиональному сообществу, поддерживающий позитивный образ и престиж своей профессии в обществе.

Экологическое воспитание

- Демонстрирующий в поведении сформированность экологической культуры на основе понимания влияния социально-экономических процессов на природу, в том числе на глобальном уровне, ответственность за действия в природной среде.
- Выражающий деятельное неприятие действий, приносящих вред природе, содействующий сохранению и защите окружающей среды.
- Применяющий знания из общеобразовательных и профессиональных дисциплин для разумного, бережливого производства и природопользования, ресурсосбережения в быту, в профессиональной среде, общественном пространстве.
- Имеющий и развивающий опыт экологически направленной, природоохранной, ресурсосберегающей деятельности, в том числе в рамках выбранной специальности, способствующий его приобретению другими людьми.

Ценности научного познания

- Деятельно выражающий познавательные интересы в разных предметных областях с учётом своих интересов, способностей, достижений, выбранного направления профессионального образования и подготовки.
- Обладающий представлением о современной научной картине мира, достижениях науки и техники, аргументированно выражающий понимание значения науки и технологий для развития российского общества и обеспечения его безопасности.
- Демонстрирующий навыки критического мышления, определения достоверности научной информации, в том числе в сфере профессиональной деятельности.
- Умеющий выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам.
- Использующий современные средства поиска, анализа и интерпретации информации, информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности.
- Развивающий и применяющий навыки наблюдения, накопления и систематизации фактов, осмысления опыта в естественнонаучной и гуманитарной областях познания, исследовательской и профессиональной деятельности.

1.3.2 Вариативные целевые ориентиры

Вариативные целевые ориентиры воспитания обучающихся университета сформулированы с учётом этнокультурных и региональных особенностей и не противоречат инвариантным целевым ориентирам.

Вариативные целевые ориентиры воспитания

Гражданское воспитание

- Осознающий себя членом общества на региональном и локальном уровнях, имеющим представление о родном крае как субъекте Российской Федерации.

<ul style="list-style-type: none"> – Демонстрирующий понимание значимости выбранной профессии для развития страны, проявляющий уважение к своей профессии и профессиональному сообществу. – Знающий и соблюдающий нормы профессиональной этики работника, поддерживающий благоприятный образ профессии в обществе. – Разделяющий традиционные российские ценности, проявляющий активную гражданскую позицию, готовый к защите Родины. – Знающий государственные устои и символику России, родного края, города, района и муниципальных образований. – Проявляющий нетерпимость к коррупционному поведению, умеющий принимать решения и нести за них ответственность. – Обладающий культурой межнационального общения в студенческой среде и обществе в целом. – Проявляющий уважительное отношение к национальному достоинству людей, их чувствам, религиозным убеждениям.
Патриотическое воспитание
<ul style="list-style-type: none"> – Понимающий свою сопричастность к прошлому, настоящему и будущему родного края, своей Родины — России, Российского государства. – Понимающий значение гражданских символов (государственная символика России, своего региона), праздников, мест почитания героев и защитников Отечества, проявляющий к ним уважение. – Изучающий и владеющий знаниями по истории родного края и своей малой родины.
Духовно-нравственное воспитание
<ul style="list-style-type: none"> – Уважающий духовно-нравственную культуру своей семьи, своего народа, семейные ценности с учётом национальной, религиозной принадлежности. – Сознательный ценность каждой человеческой жизни, признающий индивидуальность и достоинство каждого человека. – Умеющий оценивать поступки с позиции их соответствия нравственным нормам, осознающий ответственность за свои поступки.
Эстетическое воспитание
<ul style="list-style-type: none"> – Проявляющий ценностное отношение к культуре и искусству, к культуре речи и культуре поведения, к красоте и гармонии. – Обладающий знаниями о культурном наследии родного края. – Способный воспринимать и чувствовать прекрасное в быту, природе, искусстве, творчестве людей, профессиональном мастерстве. – Проявляющий стремление к самовыражению в разных видах художественной деятельности, искусстве, профессиональной деятельности.
Физическое воспитание, формирование культуры здоровья и эмоционального благополучия
<ul style="list-style-type: none"> – Владеющий знаниями о физической культуре и спорте, их истории, современном развитии в родном крае. – Ведущий и пропагандирующий здоровый образ жизни. – Проявляющий интерес к самообучению умениям и навыкам физкультурно-оздоровительной и спортивно-оздоровительной деятельности. – Бережно относящийся к физическому здоровью, соблюдающий основные правила здорового и безопасного для себя и других людей образа жизни, в том числе в информационной среде. – Владеющий основными навыками личной и общественной гигиены, безопасного поведения в быту, природе, обществе. – Ориентированный на физическое развитие с учётом возможностей здоровья, занятия физкультурой и спортом
Профессионально-трудовое воспитание
<ul style="list-style-type: none"> – Проявляющий уважение к труду, людям труда, бережное отношение к результатам труда, ответственное потребление. – Проявляющий интерес к разным профессиям. – Участвующий в различных видах трудовой деятельности.

<ul style="list-style-type: none"> – Владеющий комплексом знаний, умений и навыков, качеств личности, обеспечивающих возможность профессионального роста. – Обладающий основами экономической культуры и финансовой грамотности.
Экологическое воспитание
<ul style="list-style-type: none"> – Понимающий ценность природы, зависимость жизни людей от природы, влияние людей на природу, окружающую среду. – Выражающий готовность в своей профессиональной деятельности придерживаться экологических норм. – Содействующий сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, эффективно действующий в чрезвычайных ситуациях. – Демонстрирующий экологическую культуру. – Проявляющий интерес к экологической обстановке в родном крае, вносящий свой вклад в ее улучшение.
Ценности научного познания
<ul style="list-style-type: none"> – Ориентированный на ценности непрерывного образования, в том числе и на самообразование. – Проявляющий интерес к участию в поисковой и исследовательской деятельности, техническому творчеству.

РАЗДЕЛ 2. СОДЕРЖАТЕЛЬНЫЙ

2.1 Уклад университета

Уральский государственный горный университет был учрежден 3 (16) июля 1914 года законом, утвержденным российским Императором Николаем II, как Екатеринбургский горный институт, который стал первым высшим учебным заведением на Урале.

Собранием Узаконений и Распоряжений Правительства, издаваемым при Правительствующем Сенате, от 27 января 1917 г. № 28 горный институт в городе Екатеринбурге был переименован в Уральский горный институт Императора Николая II, который приказом Главного управления учебными заведениями Народного Комиссариата тяжелой промышленности СССР от 18 декабря 1934 г. № 26/644 переименован в Свердловский горный институт, которому постановлением Совета Министров СССР от 13 января 1947 г, № 52 присвоено имя В.В. Вахрушева.

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 12 мая 1969 года Свердловский горный институт им. В.В. Вахрушева был переименован в Свердловский ордена Трудового Красного Знамени горный институт им. В.В. Вахрушева, который распоряжением Совета Министров РСФСР от 10 июля 1991 г. № 736-р и приказом Государственного Комитета СССР по народному образованию от 22 июля 1991 г. № 346 был переименован в Уральский ордена Трудового Красного Знамени горный институт имени В.В. Вахрушева, переименованный приказом Государственного Комитета Российской Федерации по высшему образованию от 28 октября 1993 г. № 298 в Уральскую государственную горно-геологическую академию.

11 февраля 2003 года Уральская государственная горно-геологическая академия была внесена в Единый государственный реестр юридических лиц как государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральская государственная горно-геологическая академия, которое приказом Федерального агентства по образованию от 5 октября 2004 г. № 156 было переименовано в государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет».

Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 мая 2011 г. № 1724 государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет» переименовано в федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального

образования «Уральский государственный горный университет», которое приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 октября 2015 г. №1261 переименовано в федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

За 106 лет своей деятельности вуз подготовил для работы на горнодобывающих и геологоразведочных предприятиях, в научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтах отрасли более 110 000 горных инженеров, талантом и трудом которых создавался Уральский горнопромышленный комплекс.

В 2024 году УГГУ - первый вуз Урала празднует 110 лет со дня учреждения.

Университет реализует программы высшего, среднего профессионального, дополнительного и послевузовского профессионального образования в области геологии, геофизики, горного дела, экологии, экономики, информатики, автоматизации, горного машиностроения, художественного проектирования и обработки материалов.

В университете представлены все уровни высшего образования: бакалавриат, специалитет, магистратура и аспирантура.

В университете обучаются около 10 000 студентов.

Отличительной особенностью университета являются сильные связи с производством. Вуз сотрудничает более чем с 300 предприятиями – партнерами со всей России, в их числе — крупнейшие компании горнодобывающей отрасли. Подписаны договоры о совместной работе в рамках подготовки кадров с крупнейшими отраслевыми предприятиями страны и региона: Русской медной компанией, Уральской горно-металлургической компанией, Уралмашзаводом, ЕВРАЗ-холдингом и др. Ведется системная подготовка специалистов для предприятий зарубежных стран: Китая, Гвинеи, Македонии, Узбекистана, Таджикистана, Туркменистана, Монголии, Казахстана и др.

Университет славится своим сильным профессорско-преподавательским составом. На 38 кафедрах работают более 350 педагогических работников, из них более 250 кандидатов наук, порядка 60 докторов наук.

Вековая история позволила университету создать не только мощные образовательные традиции, но и научные школы. Их коллективы регулярно участвуют в масштабных государственных программах. С 1976 г. в диссертационных советах вуза защищено свыше 750 диссертаций.

В университете выпускается два журнала, внесенных Высшей аттестационной комиссией в Перечень научных журналов, публикация в которых является обязательной для защиты диссертаций.

Студенты вуза регулярно побеждают на Всероссийских олимпиадах и инженерных соревнованиях. Горняки трижды становились триумфаторами Международного чемпионата по решению инженерных кейсов «Case-In». Свыше сорока студентов УГГУ каждый год удостоиваются стипендий Президента РФ, Правительства РФ и Губернатора Свердловской области. Одним из знаковых научных мероприятий УГГУ является Уральская горнопромышленная декада. Сотни специалистов из России и зарубежных стран ежегодно приезжают в Горный университет, чтобы обсудить актуальные вопросы отрасли и найти партнеров для решения производственных задач.

В университете есть свои корпоративные знаки отличия – это герб, гимн, флаг и форменная одежда, которые используются при проведении мероприятий в масштабах университета, городского, регионального и всероссийского уровней с целью формирования корпоративного сознания у обучающихся.

Наиболее значимыми традиционными мероприятиями, событиями, составляющими основу воспитательной системы, являются День знаний, День солидарности в борьбе с терроризмом, День первокурсника, День Героев Отечества, День матери, День студента, День защитников Отечества, конкурс красоты «Мисс и Мистер Горный университет» и многие другие.

2.2 Воспитательные модули: виды, формы, содержание воспитательной деятельности

Модуль «Образовательная деятельность»

Реализация воспитательного потенциала образовательной деятельности предусматривает:

- использование воспитательных возможностей содержания учебных дисциплин и профессиональных модулей для формирования у обучающихся позитивного отношения к российским традиционным духовно-нравственным и социокультурным ценностям, подбор соответствующего тематического содержания, текстов для чтения, задач для решения, проблемных ситуаций для обсуждений и т. п., отвечающих содержанию и задачам воспитания;
- привлечение внимания обучающихся к ценностному аспекту изучаемых на аудиторных занятиях объектов, явлений, событий и т. д., инициирование обсуждений, высказываний обучающимися своего мнения, выработки личностного отношения к изучаемым событиям, явлениям;
- использование учебных материалов (образовательного контента, художественных фильмов, литературных произведений и проч.), способствующих повышению статуса и престижа рабочих профессий, прославляющих трудовые достижения, повествующих о семейных трудовых династиях;
- инициирование и поддержка исследовательской деятельности при изучении учебных дисциплин и профессиональных модулей в форме индивидуальных и групповых проектов, исследовательских работ воспитательной направленности;
- реализация курсов, дополнительных факультативных занятий исторического просвещения, патриотической, гражданской, экологической, научно-познавательной, краеведческой, историко-культурной, туристско-краеведческой, спортивно-оздоровительной, художественно-эстетической, духовно-нравственной направленности, а также курсов, направленных на формирование готовности обучающихся к вступлению в брак и осознанному родительству;
- организация и проведение экскурсий (в музеи, картинные галереи, технопарки, на предприятия и др.), экспедиций, походов.

Модуль «Кураторство»

Реализация воспитательного потенциала кураторства как особого вида педагогической деятельности, направленной в первую очередь на решение задач воспитания и социализации обучающихся, предусматривает:

- организацию социально-значимых совместных проектов, отвечающих потребностям обучающихся, дающих возможности для их самореализации, установления и укрепления доверительных отношений внутри учебной группы и между группой и куратором;
- сплочение коллектива группы через игры и тренинги на командообразование, походы, экскурсии, празднования дней рождения, тематические вечера и т. п.;
- организацию и проведение регулярных родительских собраний, информирование родителей об академических успехах и проблемах обучающихся, их положении в студенческой группе, о жизни группы в целом; помощь родителям и иным членам семьи во взаимодействии с педагогическим коллективом и администрацией;
- работа со студентами, вступившими в ранние семейные отношения, проведение консультаций по вопросам этики и психологии семейной жизни, семейного права;
- планирование, подготовку и проведение праздников, фестивалей, конкурсов, соревнований и т. д. с обучающимися.

Модуль «Наставничество»

Реализация воспитательного потенциала наставничества как универсальной технологии передачи опыта и знаний предусматривает:

- разработку программы наставничества;
- содействие осознанному выбору оптимальной образовательной траектории, в том числе для обучающихся с особыми потребностями (детей с инвалидностью и ограниченными возможностями здоровья, одаренных, обучающихся, находящихся в трудной жизненной ситуации);
- оказание психологической и профессиональной поддержки наставляемому в реализации им индивидуального маршрута и в жизненном самоопределении;
- определение инструментов оценки эффективности мероприятий по адаптации и стажировке наставляемого;
- привлечение к наставнической деятельности признанных авторитетных специалистов, имеющих большой профессиональный и жизненный опыт (работников предприятий и организаций-партнеров).

Модуль «Основные воспитательные мероприятия»

Реализация воспитательного потенциала основных воспитательных мероприятий предусматривает:

- проведение общих для всей образовательной организации праздников, ежегодных творческих (театрализованных, музыкальных, литературных и т. п.) мероприятий, связанных с общероссийскими, региональными, местными праздниками, памятным датами;
- проведение торжественных мероприятий, связанных с завершением образования, переходом на следующий курс, а также совместных мероприятий с организациями-партнерами, направленных на знакомство и приобщение к корпоративной культуре предприятия, организации;
- разработку и реализацию обучающимися социальных, социально-профессиональных проектов, в том числе с участием социальных партнёров университета;
- организацию тематических мероприятий, нацеленных на формирование уважительного отношения к противоположному полу, понимания любви как основы таких отношений и готовности к вступлению в брак (День матери, День семьи, любви и верности и т. д.);

Модуль «Организация предметно-пространственной среды»

Реализация воспитательного потенциала предметно-пространственной среды предусматривает совместную деятельность педагогов, обучающихся, других участников образовательных отношений по её созданию, поддержанию, использованию в воспитании:

- организация в доступных для обучающихся и посетителей местах музейно-выставочного пространства, содержащего экспозиции об истории и развитии университета с использованием исторических символов государства, региона, местности в разные периоды, о значимых исторических, культурных, природных, производственных объектах России, региона, местности;
- размещение карт России, регионов, муниципальных образований (современных и исторических, точных и стилизованных, географических, природных, культурологических, художественно оформленных, в том числе материалами, подготовленными обучающимися) с изображениями значимых культурных объектов своей местности, региона, России; портретов выдающихся государственных деятелей России, деятелей культуры, науки, производства, искусства, военных деятелей, героев и защитников Отечества;
- размещение, обновление художественных изображений (символических, живописных, фотографических, интерактивных) объектов природного и культурного наследия региона, местности, предметов традиционной культуры и быта;
- организацию и поддержание в университете звукового пространства позитивной духовно-нравственной, гражданско-патриотической воспитательной направленности (звонки-мелодии, музыка, информационные сообщения), исполнение гимна Российской Федерации (в начале учебной недели);

- оформление и обновление «мест новостей», стендов в помещениях общего пользования (холл первого этажа, рекреации и др.), содержащих в доступной, привлекательной форме новостную информацию позитивного профессионального, гражданско-патриотического, духовно-нравственного содержания;
- размещение материалов, отражающих ценность труда как важнейшей нравственной категории, представляющих трудовые достижения в профессиональной области, прославляющих героев и ветеранов труда, выдающихся деятелей производственной сферы, имеющих отношение к УГГУ, предметов-символов профессиональной сферы, размещение информационных справочных материалов о предприятиях профессиональной сферы, имеющих отношение к профилю университета;
- размещение, поддержание, обновление на территории университета выставочных объектов, ассоциирующихся с профессиональными направлениями обучения;
- создание и обновление книжных выставок профессиональной литературы, пространства свободного книгообмена;
- оборудование, оформление, поддержание и использование спортивных и игровых пространств, площадок, зон активного и спокойного отдыха;
- совместная с обучающимися популяризация символики УГГУ (флаг, гимн, эмблема, логотип и т. п.), используемой как повседневно, так и в торжественных ситуациях;
- разработка и обновление материалов (стендов, плакатов, инсталляций и др.), акцентирующих внимание обучающихся на важных для воспитания правилах, традициях, укладе образовательной организации, актуальных вопросах профилактики и безопасности.

Модуль «Взаимодействие с родителями (законными представителями)»

Реализация воспитательного потенциала взаимодействия с родителями (законными представителями) обучающихся предусматривает:

- организацию взаимодействия между родителями обучающихся и преподавателями, администрацией в области воспитания и профессиональной реализации студентов;
- проведение родительских собраний по вопросам воспитания, взаимоотношений обучающихся и педагогов, условий обучения и воспитания;
- привлечение родителей к подготовке и проведению мероприятий воспитательной направленности.

Модуль «Самоуправление»

Реализация воспитательного потенциала самоуправления обучающихся в университете, реализующем образовательные программы высшего и среднего профессионального образования, предусматривает:

- организацию и деятельность в университете органов самоуправления обучающихся (совет обучающихся и др.);
- представление органами самоуправления интересов обучающихся в процессе управления образовательной организацией, защита законных интересов, прав обучающихся;
- участие представителей органов самоуправления обучающихся в разработке, обсуждении и реализации рабочей программы воспитания, в анализе воспитательной деятельности;
- привлечение к деятельности студенческого самоуправления выпускников, работающих по специальности, добившихся успехов в профессиональной деятельности и личной жизни.

Модуль «Профилактика и безопасность»

Реализация воспитательного потенциала профилактической деятельности в целях формирования и поддержки безопасной и комфортной среды предусматривает:

- организацию деятельности педагогического коллектива по созданию в университете безопасной среды как условия успешной воспитательной деятельности;
- вовлечение обучающихся в проекты, программы профилактической направленности, реализуемые в УГГУ и в социокультурном окружении (антинаркотические, антиалкогольные, против курения, вовлечения в деструктивные детские и молодёжные объединения, культуры, субкультуры, группы в социальных сетях; по безопасности в цифровой среде, на транспорте, на воде, безопасности дорожного движения, противопожарной безопасности, антитеррористической и антиэкстремистской безопасности, гражданской обороне и т. д.);
- сбор информации и регулярный мониторинг семей обучающихся, находящихся в сложной жизненной ситуации, профилактическая работа с неблагополучными семьями;
- организация психолого-педагогической поддержки обучающихся групп риска;
- организацию работы по развитию у обучающихся навыков саморефлексии, самоконтроля, устойчивости к негативному воздействию, групповому давлению;
- поддержку инициатив обучающихся, педагогов в сфере укрепления безопасности жизнедеятельности.

Модуль «Социальное партнёрство и участие работодателей»

Реализация воспитательного потенциала социального партнёрства университетом, реализующем образовательные программы высшего и среднего профессионального образования, в том числе во взаимодействии с предприятиями рынка труда, предусматривает:

- участие представителей организаций-партнёров, предприятий (организаций) и работодателей, в том числе в соответствии с договорами о сотрудничестве, в проведении отдельных производственных практик и мероприятий в рамках рабочей программы воспитания и календарного плана воспитательной работы (дни открытых дверей, ярмарки вакансий, государственные, региональные праздники, торжественные мероприятия и т. п.);
- участие представителей организаций-партнёров в проведении мастер-классов, аудиторных и внеаудиторных занятий, мероприятий профессиональной направленности;
- проведение на базе организаций-партнёров отдельных аудиторных и внеаудиторных занятий, презентаций, лекций, акций воспитательной направленности;
- проведение открытых дискуссионных площадок (студенческих, педагогических, родительских, совместных), куда приглашаются представители организаций-партнёров, на которых обсуждаются актуальные проблемы, касающиеся профессиональной сферы и рынка труда, жизни университета, муниципального образования, региона, страны;
- реализация социальных проектов, разрабатываемых и реализуемых обучающимися и педагогами совместно с организациями-партнёрами (профессионально-трудовой, благотворительной, экологической, патриотической, духовно-нравственной и т. д. направленности), ориентированных на воспитание обучающихся, преобразование окружающего социума, позитивное воздействие на социальное окружение.

Модуль «Профессиональное развитие, адаптация и трудоустройство»

Реализация воспитательного потенциала работы по профессиональному развитию, адаптации и трудоустройству в университете предусматривает:

- участие в конкурсах, фестивалях, олимпиадах профессионального мастерства (в т. ч. международных), работе над профессиональными проектами различного уровня (регионального, всероссийского, международного) и др.;
- циклы мероприятий, направленных на подготовку обучающихся к осознанному планированию своей карьеры, профессионального будущего (посещения центра содействия профессиональному трудоустройству выпускников, профессиональных выставок, ярмарок вакансий, дней открытых дверей на предприятиях и др.);
- экскурсии (на предприятия, в организации), дающие углублённые представления о выбранной специальности и условиях работы;

– организацию мероприятий, посвященных истории организаций/предприятий-партнёров; встреч с представителями коллективов, с работниками-стажистами, представителями трудовых династий, авторитетными специалистами, героями и ветеранами труда, представителями профессиональных династий;

– использование обучающимися интернет-ресурсов, способствующих более глубокому изучению отраслевых технологий, способов и приёмов профессиональной деятельности, профессионального инструментария, актуального состояния профессиональной области; онлайн курсов по интересующим темам и направлениям профессионального образования;

– консультирование обучающихся по вопросам построения ими профессиональной карьеры и планов на будущую жизнь с учётом индивидуальных особенностей, интересов, потребностей;

– проведение тренингов, нацеленных на формирование рефлексивной культуры, совершенствование умений в области анализа и оценки результатов деятельности.

Дополнительные модули

Модуль «Воспитание здорового образа жизни»

Реализация воспитательного потенциала работы по созданию условий для сохранения, укрепления и развития духовного, эмоционального, интеллектуального, личностного и физического здоровья обучающихся предусматривает:

– воспитание здоровой личности, формирование способности ставить цели и строить жизненные планы;

– формирование у обучающихся ответственного отношения к своему здоровью и потребности в здоровом образе жизни, физическом самосовершенствовании, занятиях спортивно-оздоровительной деятельностью, развитие культуры безопасной жизнедеятельности, профилактику наркотической и алкогольной зависимости, табакокурения и других вредных привычек;

– формирование бережного, ответственного и компетентного отношения к физическому и психологическому здоровью – как собственному, так и других людей, развитие культуры здорового питания.

Модуль «Художественно-эстетическое воспитание»

Реализация воспитательного потенциала работы по формированию культурно-эстетических взглядов, нравственных принципов обучающихся, повышению общего уровня культуры, формированию способности воспринимать и понимать произведения искусства во взаимосвязи с окружающим миром предусматривает:

– воспитание эстетического отношения к миру, включая эстетику быта, научного и технического творчества, спорта, общественных отношений;

– формирование способности к общему развитию, реализации творческого потенциала в учебной, профессиональной деятельности, самовоспитания и универсальной духовно-нравственной компетенции – «становиться лучше»;

– формирование чувства любви к Родине на основе изучения культурного наследия многонационального народа России;

– формирование художественно-эстетического мировоззрения, основанного на диалоге культур.

Модуль «Экологическое воспитание»

Реализация воспитательного потенциала работы по формированию экологической культуры, содействию сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, воспитанию и развитию у обучающихся любви к окружающей природе предусматривает:

- развитие у обучающихся экологической культуры, бережного отношения к родной земле, природным богатствам России и мира, понимание влияния социально-экономических процессов на состояние природной и социальной среды;
- воспитание чувства ответственности за состояние природных ресурсов, формирование умений и навыков разумного природопользования, нетерпимого отношения к действиям, приносящим вред экологии; приобретение опыта эколого-направленной деятельности.

Модуль «Волонтерское движение»

Реализация воспитательного потенциала работы по формированию готовности к добровольчеству (волонтерству) предусматривает:

- развитие навыков волонтерской деятельности через участие в подготовке и проведении социально-значимых мероприятий;
- развитие мотивации к активному и ответственному участию в общественной жизни страны, региона, университета, государственному управлению через организацию добровольческой деятельности;
- развитие способностей к сопереживанию и формированию позитивного отношения к людям, в том числе к лицам с инвалидностью и ограниченными возможностями здоровья;
- развитие компетенций сотрудничества со сверстниками, детьми младшего возраста, взрослыми в образовательной, общественно полезной, учебно-исследовательской, проектной и других видах деятельности.

РАЗДЕЛ 3. ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ

3.1 Кадровое обеспечение

Реализация рабочей программы воспитания осуществляется квалифицированными специалистами университета, в частности Управления по внеучебной и социальной работе, которое несёт ответственность за организацию воспитательной работы в университете; Студенческого культурного центра, Студенческого спортивного клуба «Горная машина», Студенческого центра патриотического воспитания «Святогор», Волонтерского центра УГГУ, которые проводят с обучающимися мероприятия воспитательного характера; психолого-педагогической службы, кураторами, педагогом-психологом, преподавателями, функционал которых регламентируется требованиями профессиональных стандартов, должностными инструкциями и иными нормативными документами.

3.2 Нормативно-методическое обеспечение

Нормативно-методическое обеспечение воспитательной деятельности осуществляется следующим образом: воспитательная деятельность ведется в соответствии с нормативно-правовыми документами федеральных органов исполнительной власти в сфере образования, требованиями федеральных государственных образовательных стандартов, Уставом университета и локальными актами университета с учетом сложившегося опыта воспитательной деятельности, и имеющимися ресурсами в университете.

3.3 Требования к условиям работы с обучающимися с особыми образовательными потребностями

В воспитательной работе с категориями обучающихся, имеющих особые образовательные потребности: обучающиеся с инвалидностью, ограниченными возможностями здоровья, из социально уязвимых групп (воспитанники детских домов, обучающиеся из семей мигрантов, билингвы и др.), одарённые, с отклоняющимся поведением, создаются особые условия.

В системе организации воспитательной деятельности с категориями обучающихся, имеющих особые образовательные потребности, устанавливаются сотрудничество преподавателей и обучающихся.

давателей, кураторов, педагогов-психологов, родителей (законных представителей) обучающихся с целью устранения нарушенных функций, развития функциональных систем обучающихся, коррекции поведения, формирования социально-значимых качеств.

При организации воспитательного пространства создаются благоприятные условия для развития социально значимых отношений обучающихся, и, прежде всего, ценностных отношений к семье, труду, своему отечеству, своей малой и большой Родине, природе, миру, знаниям, культуре, здоровью, окружающим людям, к самим.

Формирование доброжелательного отношения к обучающимся, имеющим особые образовательные потребности и их семьям со стороны всех участников образовательных отношений, а также индивидуальный подход позволяет получить им необходимые социальные навыки, знания и умения необходимые для дальнейшей профессиональной деятельности.

При организации воспитания обучающихся с особыми образовательными потребностями осуществляется ориентация на:

- налаживание эмоционально-положительного взаимодействия с окружающими для их успешной социальной адаптации и интеграции как в университете, так и в профессиональной деятельности;

- формирование доброжелательного отношения к обучающимся и их семьям со стороны всех участников образовательных отношений;

- построение воспитательной деятельности с учётом индивидуальных особенностей и возможностей каждого обучающегося;

- обеспечение психолого-педагогической поддержки семей обучающихся, содействие повышению уровня их педагогической, психологической, социальной компетентности;

- формирование личности обучающегося с особыми образовательными потребностями с использованием адекватных физическому и психическому состоянию методов воспитания;

- создание оптимальных условий совместного воспитания и обучения обучающихся с особыми образовательными потребностями и их сверстников, с использованием адекватных вспомогательных средств и педагогических приёмов, организацией совместных форм работы с педагогом-психологом и другими специалистами университета;

- личностно-ориентированный подход в организации всех видов деятельности обучающихся с особыми образовательными потребностями.

3.4 Система поощрения профессиональной успешности и проявлений активной жизненной позиции обучающихся

Поощрение профессиональной успешности и проявлений активной жизненной позиции обучающихся осуществляется следующим образом:

- выплачивается повышенная государственная академическая стипендия;
- предоставляются путевки на летний отдых и оздоровление;
- представляются кандидатуры обучающихся на стипендию Правительства Российской Федерации;

- представляются кандидатуры обучающихся на стипендию Губернатора Свердловской области;

- вручаются благодарственные письма, письма участников.

Основания для поощрения обучающихся:

- успехи в учебной деятельности;

- успехи научной деятельности;

- успехи в культурно-творческой деятельности;

- успехи в общественной деятельности;

- успехи в физкультурной деятельности;

- победы в конкурсах, олимпиадах, фестивалях, соревнованиях различного уровня;

- активное участие в культурно-массовых мероприятиях на уровне университета, округа, региона, Российской Федерации, на международном уровне;
- спортивные достижения на различных уровнях.

3.5 Анализ воспитательного процесса

Основные направления анализа воспитательного процесса:

3.5.1 Анализ условий воспитательной деятельности

Анализ воспитательной деятельности проводится по следующим позициям:

- кадровое обеспечение воспитательной деятельности (наличие специалистов, прохождение курсов повышения квалификации);
- наличие и количество студенческих объединений, клубов, предметных кружков, кружков технического творчества, спортивных секций и кружков;
- количество социальных партнеров, вовлечённых в воспитательную деятельность (предприятия, учреждения культуры, здравоохранения, правоохранительные органы, образовательные организации др.);
- участие педагогических работников университета в конкурсах, семинарах, конференциях, вебинарах по направлениям воспитательной деятельности;
- оформление предметно-пространственной среды университета.

3.5.2 Анализ состояния воспитательной деятельности

Анализ состояния воспитательной деятельности проводится по следующим позициям:

- проводимые в университете дела и реализованные проекты;
- уровень вовлеченности обучающихся в проекты и мероприятия на уровне университета, районном, городском, региональном и федеральном уровнях;
- включенность обучающихся и преподавателей в деятельность различных объединений;
- участие обучающихся в конкурсах различного уровня и направленности;
- профессионально-личностное развитие обучающихся (анализ портфолио);
- снижение негативных факторов (уменьшение числа обучающихся, состоящих на различных видах профилактического учета/контроля, снижение/отсутствие совершенных правонарушений и преступлений).

Основным способом получения информации являются: педагогическое наблюдение, анкетирование, тестирование, беседы с обучающимися и их родителями (законными представителями), педагогическими работниками, представителями студенческого совета.

Анализ проводится проректором по молодежной политике и развитию образования, начальником управления по внеучебной и социальной работе, педагогом-психологом, кураторами академических групп.

Итогом самоанализа является перечень выявленных проблем, над решением которых предстоит работать коллективу университета.

В ходе планирования воспитательной деятельности университет учитывает воспитательный потенциал участия обучающихся в мероприятиях, проектах, конкурсах, акциях, проводимых на уровне:

Российской Федерации, в том числе:

- «
Р «Большая перемена» <https://bolshayaperemena.online/>;
о «Лидеры России» <https://лидерыроссии.рф/>;
с «Мы Вместе» (волонтерство) <https://onf.ru/>;
с отраслевые конкурсы профессионального мастерства;
и движения «Ворлдскиллс Россия»;
я движения «Абилимпикс»;

субъектов Российской Федерации, а также **отраслевые профессионально значимые события и праздники.**

№	Модуль	Курсы, группы	Сроки	Ответственные
<i>1. Образовательная деятельность</i>				
1	Дисциплина «Основы российской государственности»	I,II,III	01.09.2024-31.05.2025	Зубов В. В.
<i>2. Кураторство</i>				
1	Воспитательное мероприятие «Час куратора»	I	01.09.2024-31.05.2025	Шехтман Д. А.
<i>3. Наставничество</i>				
1	Подготовка и проведение адаптационного мероприятия «Неделя первокурсника 2024»	I	30.08.2024 - 04.09.2024	Шехтман Д. А.
<i>4. Основные воспитательные мероприятия</i>				
1	Презентация студенческих общественных, спортивных, научных, творческих объединений	I	30.08.2024-04.09.2024	Шехтман Д. А.
2	Профориентационные мероприятия для студентов I курса	I	12.08.2024-17.08.2024	Коновалов П. А.
3	Спортивно-массовое мероприятие «Неделя футбола» и международный футбольный турнир к Дню народного единства	I-V	01.11.2024-05.11.2024	Сухомлин С. Д.
4	Культурно-массовое мероприятие «Новогодний ректорский прием»	I-V	23.12.2024	Нижников Е. В.
5	Празднование дня Российского студенчества, Молебен святой мученице Татьяне	I-V	25.01.2025	Бачинин И. В.
6	Организация игры «Патриот»	I-V	19.02.2025-23.02.2025	Комаров А. А.
7	Праздничный концерт «День защитника отечества»	I-V	22.02.2025	Нижников Е. В.
8	Праздничный концерт «Международный женский день»	I-V	07.03.2025	Нижников Е. В.

9	Участие в первомайской демонстрации	I-V	01.05.2025	Коновалов П. А.
10	Патриотическая акция «Бессмертный полк Горного»	I-V	08.05.2025	Комаров А. А.
11	Праздничные мероприятия, посвященные 80 годовщине Победы в ВОВ	I-V	09.05.2025	Нижников Е. В.
12	Легкоатлетическая эстафета «Горняк»	I-V	17.05.2025	Сидоров С. Г.
<i>5. Организация предметно-пространственной среды</i>				
13	Оформление и обновление новостных стендов	I-V	01.09.2024-30.05.2025	Пономарева Т. В.
14	Популяризация символики образовательной организации	I-V	01.09.2024-10.11.2024	Пономарева Т. В.
15	Подготовка и обновление тематических экспозиций в библиотеке университета	I-V	01.09.2024-30.05.2025	Справцева Е. А.
16	Разработка и реализация коворкинг зон для студентов	I-V	01.09.2024-30.05.2025	Коновалов П. А.
17	Оформление зданий университета, холлов, с использованием государственной символики России	I-V	10.09.2024	Комаров А. А.
<i>6. Взаимодействие с родителями (законными представителями)</i>				
18	Деятельность Службы примирения университета и работа с конфликтными ситуациями	I-V	01.09.2024 – 30.05.2025	Первушина А. А.
<i>7. Самоуправление</i>				
19	Обучающие мероприятия для студенческого актива УГГУ	I-V	01.09.2024-20.11.2024	Шехтман Д. А.
20	Обучающие мероприятия для активистов организационно-массовой комиссии ПСО УГГУ	I-V	14.09.2024-16.09.2024	Коновалов П. А.
21	Отчетно – выборные конференции профбюро факультетов	I-V	10.10.2024-25.10.2024	Коновалов П. А.
22	Проведение мероприятия среди студенческой молодежи, направленного на повышение уровня медиа грамотности "Медиадиктант"	I-V	18.10.2024	Пономарева Т. В.
23	Обучающее мероприятие «ПРОФшкола Горно-механического факультета»	I-V	08.11.2024-12.11.2024	Коновалов П. А.
24	Обучающие мероприятия для активистов ФГХ	I-V	08.11.2024-12.11.2024	Коновалов П. А.
25	Интеллектуальная игра для обучающихся УГГУ «Интуиция»	I-V	10.11.2024	Коновалов П. А.

26	Интеллектуальная игра для обучающихся УГГУ «Квиз-турнир»	I-V	16.12.2024	Коновалов П. А.
27	Новогодняя студенческая елка «Елка желаний»	I-V	24.12.2024	Коновалов П. А.
28	Традиционная новогодняя лотерея среди членов профсоюза	I-V	25.12.2024	Коновалов П. А.
29	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Турнир по киберспорту»	I-V	25.12.2024	Коновалов П. А.
30	Образовательный проект «MediaLife»	I-V	10.01.2025–28.03.2025	Сухомлин С. Д.
31	Интеллектуальная онлайн игра «Что? Где? Когда?», посвященная Всероссийскому дню студента	I-V	25.01.2025	Коновалов П. А.
32	Встреча ректора университета со студенческим активом	I-V	25.01.2025	Шехтман Д. А.
33	Традиционное исполнение студенческих желаний ректором УГГУ А.В. Душиным	I-V	25.01.2025	Шехтман Д. А.
34	Образовательный проект АССК.про	I-V	15.02.2025-01.04.2025	Сухомлин С. Д.
35	Образовательный проект «GM School» для студентов и активистов УГГУ	I-V	04.04.2025-08.04.2025	Сухомлин С. Д.
36	Очный этап образовательного проекта АССК.про	I-V	01.05.2025-30.05.2025	Сухомлин С. Д.
<i>8. Профилактика и безопасность</i>				
37	Подготовка к социально-психологическому тестированию (сбор сведений, проверка технических возможностей)	I-V	01.08.2024-31.08.2024	Первушина А. А.
38	Размещение информационных материалов по вопросам антитеррористической защищённости	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Волков С. А., Пономарева Т. В.
39	Профилактика деструктивных явлений в студенческой среде (подготовка и размещение публикаций на сайте ФГХ, в сообществе «Педагог-психолог УГГУ» и подготовка информационных листов-вкладышей)	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Первушина А.А.
40	Подготовка к социально-психологическому тестированию	I-V	01.09.2024-30.09.2024	Первушина А. А.

	(подготовка списков, генерация паролей, информационная кампания)			
41	Размещение информационных материалов об антикоррупционных мероприятиях и нормативной базе в сфере противодействия коррупции	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Волков С. А., Пономарева Т. В.
42	Патриотическая акция, посвященная Дню солидарности в борьбе с терроризмом	I-V	03.09.2024	Старостин А. Н. Суслонов П. Е
43	Проведение социально-психологического тестирования	I-V	01.10.2024-30.10.2024	Первушина А. А.
44	Основы безопасного общения и способы защиты от негативного влияния со стороны лиц и групп деструктивной и экстремистской направленности (беседа-тренинг с обучающимися)	I-V	01.10.2024-30.10.2024	Старостин А. Н. Суслонов П. Е
45	Подготовка документации по итогам социально-психологического тестирования	I-V	01.11.2024-30.11.2024	Первушина А. А.
46	Разговор на равных (Тема: профилактика межнациональных и межконфессиональных конфликтов)	I-V	12.11.2024	Старостин А. Н.
47	Организация процедуры получения результатов социально-психологического тестирования и подготовка плана работы с лицами «группы риска»	I-V	01.12.2024-30.12.2024	Первушина А. А.
48	Профилактика деструктивных явлений в период сессии: публикация «От сессии до сессии... Продолжение»	I-V	10.01.2025	Первушина А. А.
49	Профилактика деструктивных явлений в студенческой среде: публикации информационно-просветительского, профилактического характера на психологическую тематику: «Моя свобода и/или свобода другого?» (профилактика буллинга/кибербуллинга)	I-V	01.03.2025-31.03.2025	Первушина А. А.

50	Профилактика деструктивных явлений в студенческой среде: публикации информационно-просветительского, профилактического характера на психологическую тематику: «Кому выгодно кормить наше ЭГО?» (профилактика правонарушений и экстремистских проявлений)	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Первушина А. А.
<i>9. Социальное партнёрство и участие работодателей</i>				
51	Уральский горнопромышленный форум	I-V	01.10.2024-31.10.2024	Костюк П. А.
52	Экскурсионные мероприятия (Альфа-банк)	I-V	04.12.2024	Коновалов П. А.
53	VIII Международный инженерный чемпионат Case-in	I-V	01.03.2025-31.03.2025	Костюк П. А.
54	Экскурсионные мероприятия (Екатеринбургский метрополитен)	I-V	29.03.2025	Коновалов П. А., Коренькова М. А.
55	Всероссийский фестиваль по робототехнике	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Кухарева А. А.
56	Ярмарка студентов	I-V	20.04.2025	Коренькова М. А.
57	Уральская горнопромышленная декада	I-V	01.05.2025-30.05.2025	Валиев Н. Г. Лебзин М. С.
<i>10. Профессиональное развитие, адаптация и трудоустройство</i>				
58	Профорientационные презентации для абитуриентов	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Кухарева А. А.
59	Экскурсии по УГГУ для абитуриентов	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Кухарева А. А.
60	Культурно-массовое мероприятие «Межвузовский Since-Slame»	I-V	02.11.2024-03.11.2024	Шехтман Д. А.
61	День памяти погибших при исполнении служебных обязанностей сотрудников органов внутренних дел	I-V	08.11.2024	Мальцев Н. В.
62	Культурно-массовое мероприятие «Экскурсия в Уральский геологический музей»	I-V	17.11.2024	Иванова Н. С.
63	Отборочный этап студенческих проектов «Проектный конвейер»	I-V	19.11.2024	Шехтман Д. А.
64	Лекция от приглашенного спикера для обучающихся о развитии личностных качеств	I-V	24.11.2024	Коновалов П. А.
65	День юриста	I-V	03.12.2024	Мальцев Н. В.

66	Тематическая выставка «Пожарное и спасательное дело в России»	I-V	09.01.2025-31.01.2025	Справцева Е. А.
67	Конкурс профессионального мастерства «Студенческий лидер УГГУ»	I-V	25.03.2025	Коновалов П. А.
68	День открытых дверей УГГУ	I-V	26.03.2025	Гензель О. В.
69	Организация и проведение мероприятия «Встреча выпускников всех поколений и День геолога»	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Нижников Е. В.
70	Тематическая выставка «Нефтегазовая отрасль – поле для инноваций»	I-V	01.04.2025-15.04.2025	Справцева Е. А.
71	Поход студентов геологов «Тур де ФГиГ»	I-V	04.05.2025	Коновалов П. А.
72	Организация и проведение мероприятия «Торжественное вручение дипломов выпускникам УГГУ»	I-V	01.07.2025-10.07.2025	Нижников Е. В.
<i>II. Воспитание здорового образа жизни</i>				
73	Проект «Уральская студенческая баскетбольная лига»	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Сухомлин С. Д.
74	Психологическое консультирование	I-V	01.09.2024-25.06.2025	Первушина А. А.
75	Спортивно-массовое мероприятие «Турнир по Пейнтболу среди обучающихся УГГУ»	I-V	20.09.2024-24.09.2024	Сухомлин С. Д.
76	Осенний турслет	I-V	24.09.2024-26.09.2024	Комаров А. А.
77	Чемпионат УГГУ по стрельбе «Меткий стрелок»	I-V	25.10.2024-31.10.2024	Комаров А. А.
78	Спортивно-массовое мероприятие «День Рождение ССК УГГУ «Горная Машина»	I-V	07.11.2024	Сухомлин С. Д.
79	Профилактическое мероприятие «Экспресс-тестирование на ВИЧ»	I-V	18.11.2024-19.11.2024	Медяникова Н. Г.
80	Спортивно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Неделя баскетбола»	I-V	13.12.2024-20.12.2024	Сухомлин С. Д.
81	Студенческий спортивный баттл	I-V	17.12.2024	Сухомлин С. Д.
82	Фестиваль зимних видов спорта, посвященный Всемирному дню снега	I-V	15.01.2025-16.01.2025	Сухомлин С. Д.
83	Внутривузовский отборочный этап чемпионата АССК России по 5-и видам спорта	I-V	15.02.2025–01.03.2025	Сухомлин С. Д.

84	Спортивно-массовое мероприятие Турнир по страйкболу среди факультетов УГГУ, посвященный 23 февраля	I-V	21.02.2025	Коновалов П. А.
85	Спортивный турнир среди женских команд факультетов УГГУ, посвященный «Международному женскому дню»	I-V	04.03.2025	Коновалов П. А.
86	Проект «От Студзачета к знаку отличия ГТО»	I-V	14.03.2025-21.03.2025	Сухомлин С. Д.
87	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по баскетболу	I-V	15.03.2025	Коновалов П. А.
88	Профилактическое мероприятие для обучающихся УГГУ «Экспресс-тестирование на ВИЧ»	I-V	16.03.2025	Медяникова Н. Г.
89	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по настольному теннису	I-V	16.03.2025	Коновалов П. А.
90	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по стрельбе из пневматического ружья	I-V	17.03.2025	Коновалов П. А.
91	Спортивное мероприятие туристического клуба «Скалы Петра Гронского»	I-V	19.03.2025	Комаров А. А.
92	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по мини-футболу	I-V	22.03.2025	Коновалов П. А.
93	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по волейболу	I-V	23.03.2025	Коновалов П. А.
94	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по шахматам	I-V	24.03.2025	Коновалов П. А.
95	Оценка уровня информированности и отношение к проблеме эпидемии ВИЧ-инфекции среди студентов	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Медяникова Н. Г.
96	Поход туристического клуба «Авантюрин» - «Покорение скал»	I-V	02.04.2025-03.04.2025	Комаров А. А.
97	Мероприятие, приуроченное к Всемирному дню здоровья	I-V	07.04.2025	Коновалов П. А.
98	Профилактическая акция для обучающихся УГГУ «Что выберешь ты?»	I-V	14.04.2025	Коновалов П. А.
99	Фестиваль летних уличных видов спорта «Горный X-games»	I-V	06.06.2025	Сухомлин С. Д.
<i>12. Художественно-эстетическое воспитание</i>				

100	Культурно-массовое мероприятие «День знаний»	I-V	01.09.2024	Нижников Е. В
101	Участие университетской команды КВН в центральной/официальной лиге МС КВН (полуфинал)	I-V	01.09.2024 30.10.2024	Нижников Е. В
102	Участие коллектива УГГУ «ГрандМажор» в Международном фестивале по «Мажореткам»	I-V	01.10.2024- 30.10.2024	Нижников Е. В.
103	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Литературный вечер»	I-V	07.10.2024	Коновалов П. А.
104	Культурно-массовое мероприятие «День культуры африканских стран»	I-V	12.10.2024	Иванова Н. С.
105	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ – Флешмоб, посвященный Дню первокурсника	I-V	14.10.2024- 21.10.2024	Коновалов П. А.
106	Культурно-массовое мероприятие Смотр Художественной Самодеятельности для обучающихся первого курса	I-V	20.10.2024	Коновалов П. А.
107	Культурно-массовое мероприятие «День первокурсника»	I-V	21.10.2024	Нижников Е. В.
108	Международная просветительская акция «Большой этнографический диктант»	I-V	01.11.2024- 30.11.2024	Старостин А. Н., Суслонов П. Е.
109	Участие университетской команды КВН в центральной/официальной лиге МС КВН (финал)	I-V	01.11.2024- 30.11.2024	Нижников Е. В.
110	Фестиваль команд КВН «Уральские горы юмора»	I-V	25.11.2024	Нижников Е. В.
111	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Зимний бал 2024»	I-V	23.12.2024	Коновалов П. А.
112	Культурно-массовое мероприятие «Новый Год для детей работников УГГУ»	I-V	23.12.2024	Шехтман Д. А.
113	Культурно-массовое мероприятие «Новый год для иностранных студентов УГГУ». Конкурс рассказов о национальных новогодних традициях	I-V	24.12.2024	Иванова Н. С.
114	Конкурс красоты «Мисс и Мистер УГГУ-2025»	I-V	24.03.2025	Нижников Е. В.
115	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся	I-V	21.04.2025	Коновалов П. А.

	УГГУ «Смотр художественной самодеятельности»			
116	Отчетный концерт студенческого культурного центра	I-V	26.05.2025	Нижников Е. В.
<i>13. Экологическое воспитание</i>				
117	Экологическая акция по сбору отработанных батареек и пластиковых крышечек	I-V	01.09.2024-30.09.2024	Ершова А. А.
118	Реализация проекта «Экодворы» с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	01.09.2024-30.12.2024	Ершова А. А.
119	Проведение субботников, совместно с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	20.09.2024-20.10.2024	Ершова А. А.
120	Посадки саженцев деревьев с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	20.09.2024-20.11.2024	Ершова А. А.
121	Экологические занятия в школах г. Екатеринбург	I-V	01.01.2025-30.04.2025	Ершова А. А.
122	Выезд эковолонтеров университета ИЭФ-TRIP “Источники”	I-V	17.02.2025	Коновалов П. А.
123	Проведение субботников, совместно с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Ершова А. А.
124	Выезд эковолонтеров университета ИЭФ-TRIP «Челябинская область»	I-V	11.05.2025	Коновалов П. А.
<i>14. Волонтерское движение</i>				
125	Ежегодная благотворительная акция «Полезная макулатура»	I-V	01.11.2024-01.12.2024	Коновалов П. А., Ершова А. А.
126	День добровольца (волонтера) в России	I-V	05.12.2024	Ершова А. А.
127	Акция, приуроченная к национальному дню донора в России	I-V	26.04.2025	Коновалов П. А.
128	Посещение волонтерами ветеранов ВОВ и тружеников тыла, приуроченное ко «Дню Победы»	I-V	02.05.2025-11.05.2025	Ершова А. А.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Проректор по учебно-методическому
комплексу _____

УТВЕРЖДАЮ
С. А. Уноров



**ПРОГРАММА
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ**

Специальность

21.05.03 *Технология геологической разведки*

Специализация

***Технология и техника разведки
месторождений полезных ископаемых***


Автор: Кралина Л.И., Сердюков Ф.П.

Одобрена на заседании кафедры

Технологии и техники разведки МПИ

(название кафедры)

Зав. кафедрой


(подпись)

Фролов С.Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 21.09.2023

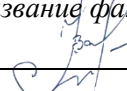
(Дата)

Рассмотрена методической комиссией
факультета

Геологии и геофизики

(название факультета)

Председатель


(подпись)

Вандышева К.В.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10.2023

(Дата)

Екатеринбург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ	3
1.1 Требования к выпускной квалификационной работе	
1.2 Порядок выполнения выпускной квалификационной работы	
2 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫПУСК- НОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ	16
3 ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	18
3.1 Тематика выпускных квалификационных работ	
3.2 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общекультурных компетенций	
3.3 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общепрофессиональных компетенций	
ПРИЛОЖЕНИЯ	21

ВВЕДЕНИЕ

Программа государственной итоговой аттестации по основной профессиональной образовательной программе по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, специализация Технология и техника разведки МПИ составлена в соответствии с требованиями:

- Порядка проведения государственной итоговой аттестации по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29.06.2015 № 636;

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - специалитет по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, утверждённый приказом Минобрнауки России от 12.08.2020 № 977;

- локальных нормативных актов университета, регламентирующих порядок проведения государственной итоговой аттестации.

Программа государственной итоговой аттестации включает:

I. Требования к выпускным квалификационным работам и порядку их выполнения (методические рекомендации по выполнению выпускных квалификационных работ);

II. Критерии оценки защиты выпускных квалификационных работ;

III. Оценочные материалы.

IV. Приложения

I МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1.1.1 Общие положения

Государственная итоговая аттестация представляет собой процесс итоговой проверки и оценки компетенций выпускника, полученных в результате обучения. Государственная итоговая аттестация выпускника высшего учебного заведения является обязательной и осуществляется после освоения образовательной программы в полном объеме. Цель итоговой государственной аттестации выпускников – установление уровня готовности выпускника к выполнению профессиональных задач.

Государственная итоговая аттестация выпускников, завершивших освоение основной профессиональной образовательной программы по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, специализация Технология и техника разведки МПИ осуществляется в форме подготовки к защите и защиты выпускной квалификационной работы. Выпускная квалификационная работа в соответствии с ОПОП выполняется в период прохождения преддипломной практики и представляет собой самостоятельную и логически завершённую квалификационную работу, связанную с решением задач того вида (видов) деятельности, к которым готовится специалист.

Трудоемкость государственной итоговой аттестации – 12 з.е.:

- подготовка к процедуре защиты выпускной квалификационной работы – 9 з.е.;

- процедура защиты выпускной квалификационной работы – 3 з.е.

Трудоемкость государственной итоговой аттестации				
кол-во з.е.	часы			
	общая	контактная работа	СР	
9	324	35	289	Подготовка к процедуре защиты выпускной квалификационной работы
3	108		108	Процедура защиты ВКР

1.1.2 Цели и задачи выпускной квалификационной работы

Цель выполнения выпускной квалификационной работы:

систематизация, закрепление и расширение теоретических и практических знаний по специальности и применение этих знаний при решении конкретных научных и производственных задач;

развитие навыков ведения самостоятельной работы и применения методик исследования и экспериментирования при решении разрабатываемых в выпускной квалификационной работе проблем и вопросов;

выяснение подготовленности обучающихся для самостоятельной работы по задачам профессиональной деятельности, определенных ФГОС ВО специальности и соответствующей ОПОП.

Выпускная квалификационная работа выполняется, как правило, на материалах организаций (баз практики) с учетом проблем, требующих решения в данной организации.

Основными задачами, которые должен решить обучающийся при выполнении выпускной квалификационной работы являются:

обоснование актуальности и значимости выбранной темы работы с точки зрения теории и практики управления деятельностью предприятия, составление программы исследования;

изучение теоретических положений по проблеме, составление литературного обзора по проблеме исследования;

обоснование необходимости и возможности применения определенных современных методик принятия управленческих решений по задачам, поставленным в работе;

сбор необходимой для проведения исследования информации с привлечением первичных и вторичных источников и использованием адекватных методов;

разработка практических рекомендаций и предложений, их экономическое и организационное обоснование, необходимое и достаточное для решаемой задачи;

обобщение результатов проведенных исследований, формулирование выводов о степени достижения целей, поставленных в работе, и возможности практического применения предложенных разработок;

оформление ВКР в соответствии с нормативными требованиями.

В ходе государственной итоговой аттестации проверяется сформированность следующих компетенций:

универсальных:

<i>Код и наименование компетенции</i>	<i>Код и наименование индикатора достижения компетенции</i>
УК-1. Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1.Выбирает информационные ресурсы для поиска информации в соответствии с поставленной задачей УК-1.2.Оценивает соответствие выбранного информационного ресурса критериям полноты и аутентичности УК-1.3.Систематизирует обнаруженную информацию, полученную из разных источников, в соответствии с требованиями и условиями задачи УК-1.4.Использует системный подход для решения поставленных задач.
УК-2. Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	УК-2.1 Разрабатывает план осуществления проекта на всех этапах его жизненного цикла с учетом потребностей в необходимых ресурсах, имеющихся ограничений, возможных рисков; УК-2.2 Осуществляет мониторинг реализации проекта на основе структуризации всех процессов и определения зон ответственности его участников. УК-2.3 Публично представляет результаты проекта, вступает в обсуждение хода и результатов проекта.
УК-3. Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	УК-3.1 Взаимодействует с другими членами команды для достижения поставленной задачи. УК-3.2 Вырабатывает стратегию командной работы и на ее основе организует отбор членов команды для достижения поставленной цели. УК-3.3 Организует и корректирует работу команды в том числе на основе коллегиальных решений.

<p>УК-4. Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия</p>	<p>УК-4.1. Ведет обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке. УК-4.2. Ведет обмен деловой информацией в устной и письменной формах не менее чем на одном иностранном языке. УК-4.3. Использует современные информационно-коммуникативные средства для коммуникации.</p>
<p>УК-5. Способен анализировать и учитывать различия культур в процессе межкультурного взаимодействия</p>	<p>УК-5.1. Толерантно воспринимает социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия УК-5.2. Анализирует современное состояние общества на основе знания истории. УК-5.3. Интерпретирует проблемы современности с позиций этики и философских знаний.</p>
<p>УК-6. Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки и образования в течение всей жизни</p>	<p>УК-6.1. Эффективно планирует собственное время. УК-6.2. Планирует траекторию своего профессионального развития и предпринимает шаги по ее реализации УК-6.3. Адекватно определяет свою самооценку, осуществляет самопрезентацию, составляет резюме</p>
<p>УК-7. Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности</p>	<p>УК-7.1. Использует основы физической культуры для осознанного выбора здоровьесберегающих технологий с учетом внутренних и внешних условий реализации конкретной профессиональной деятельности. УК-7.2. Выполняет индивидуально подобранные комплексы оздоровительной или адаптивной физической культуры. УК-7.3. Выбирает и применяет рациональные способы и приемы сохранения физического здоровья, профилактики заболеваний, психофизического и нервно-эмоционального утомления</p>
<p>УК-8. Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов</p>	<p>УК-8.1. Выявляет возможные угрозы для жизни и здоровья в повседневной и профессиональной деятельности. УК-8.2. Понимает, как создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов. УК-8.3. Демонстрирует приемы оказания первой помощи</p>
<p>УК-9. Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах</p>	<p>УК-9.1. Применяет базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах УК-9.2. Применяет навыки взаимодействия в социальной и профессиональной сферах с лицами из числа инвалидов и лицами с ограниченными возможностями здоровья</p>
<p>УК-10. Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности</p>	<p>УК-10.1. Понимает основные проблемы, базовые принципы и законы функционирования экономики, роль государства в экономическом развитии УК-10.2. Понимает поведение потребителей и производителей экономических благ, особенности рынков факторов производства. УК-10.3. Понимает цели, виды и инструменты государственной экономической политики и их влияние на субъектов экономики УК-10.4. Применяет методы личного финансового планирования, использует финансовые инструменты для управления собственным бюджетом, контролирует личные финансовые риски</p>
<p>УК-11. Способен формировать нетерпимое отношение к проявлениям экстремизма, терроризма, коррупционному поведению и противодействовать им в профессиональной деятельности</p>	<p>УК-11.1. Знает законодательство, направленное на борьбу с экстремизмом, терроризмом, коррупцией УК-11.2. Понимает правовые нормы, обеспечивающие борьбу с экстремизмом, терроризмом, коррупцией в различных областях жизнедеятельности</p>

общепрофессиональных:

<i>Код и наименование компетенции</i>	<i>Код и наименование индикатора достижения компетенции</i>
ОПК-1. Способен применять правовые основы геологического изучения недр и недропользования, обеспечения экологической и промышленной безопасности и уметь их учитывать при поисках, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а также строительстве	ОПК-1.1 Понимает правовые основы недропользования, обеспечение экологической и промышленной безопасности ОПК -1.2 Применяет правовые основы геологического изучения недр и их использования для оценки экологической и промышленной безопасности.
ОПК-2. Способен применять методы и способы геолого-экономической оценки минерально-сырьевой базы и месторождений полезных ископаемых	ОПК-2.1 Понимает методы и способы геолого-экономической оценки месторождений полезных ископаемых. ОПК-2.2 Применяет методику геолого-промышленной оценки месторождений полезных ископаемых. ОПК-2.3 Выбирает методы и способы геолого-экономической оценки минерально-сырьевой базы страны.
ОПК-3. Способен применять основные положения фундаментальных естественных наук и научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и воспроизводству минерально-сырьевой базы	ОПК-3.1 Выбирает основные положения естественных наук научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и освоению минерально-сырьевой базы. ОПК-3.2 Использует основные положения естественных наук при проведении научно-исследовательских работ по изучению и пополнению минерально-сырьевой базы.
ОПК-4. Способен применять методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ по геологическому изучению недр, поискам, разведке, добыче и переработке полезных ископаемых, промышленно-гражданскому строительству	ОПК-4.1 Определяет методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ по геологическому изучению недр, поискам, разведке, добыче и переработке полезных ископаемых. ОПК-4.2 Реализует методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ на всех стадиях по геологическому изучению недр и переработке полезных ископаемых.
ОПК-5. Способен применять навыки анализа горно-геологических условий при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве	ОПК-5.1 Анализирует горно-геологические условия при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве ОПК-5.2 Реализует на практике анализ горно-геологических условий при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве
ОПК-6. Способен работать с программным обеспечением общего, специального назначения, в том числе моделировать горные и геологические объекты	ОПК-6.1 Имеет представления о программном обеспечении общего и специального назначения. ОПК-6.2. Выбирает и применяет программное обеспечение общего, специального назначения, и создавать модели горные и геологические объекты
ОПК-7. Способен осуществлять техническое руководство горными и взрывными работами при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых, гражданском строительстве, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций	ОПК-7.1 Имеет представление о методике технического руководства горными и взрывными работами на всех стадиях геологических работ. ОПК-7.2 Осуществляет техническое руководство горными и взрывными работами при геологоразведочных работах, гражданском строительстве, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций
ОПК-8. Способен применять основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией	ОПК-8.1 Предлагает основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией ОПК-8.2 Выбирает и применяет основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией
ОПК-9. Способен ориентироваться на местности, определять пространственное положение объектов,	ОПК-9.1 Имеет представления об ориентировании на местности, определении пространственного положения объектов.

осуществлять необходимые геодезические и маркшейдерские измерения, обрабатывать и интерпретировать их результаты	ОПК-9.2 Свободно ориентируется на местности, определяет пространственное положение объектов, осуществляет необходимые геодезические и маркшейдерские измерения, обрабатывает и интерпретирует их результаты
ОПК-10. Способен планировать, проектировать, организовывать геологоразведочные и горные работы, вести учет и контроль выполняемых работ, анализировать оперативные и текущие показатели производства, обосновывать предложения по совершенствованию организации производства, оперативно устранять нарушения производственных процессов	ОПК-10.1 Планирует, проектирует организацию геологоразведочных и горных работ, ведения учета и контроля выполняемых работ. ОПК-10.2. Анализирует оперативные и текущие показатели производства, обосновывает предложения по совершенствованию организации производства, оперативно устраняет нарушения производственных процессов.
ОПК-11. Способен в составе творческих коллективов и самостоятельно, контролировать соответствие проектов требованиям стандартов, техническим условиям и документам промышленной безопасности, разрабатывать, согласовывать и утверждать в установленном порядке технические и методические документы, регламентирующие порядок, качество и безопасность выполнения поисковых, геологоразведочных, горных и взрывных работ	ОПК-11.1 Контролирует соответствие проектов требованиям стандартов, техническим условиям и документам промышленной безопасности. ОПК-11.2 Разрабатывает, согласовывает и утверждает в установленном порядке технические и методические документы, регламентирующие порядок, качество и безопасность выполнения поисковых, геологоразведочных, горных и взрывных работ.
ОПК-12. Способен проводить самостоятельно или в составе группы научный поиск, реализуя специальные средства и методы получения нового знания, участвовать в научных исследованиях объектов профессиональной деятельности и их структурных элементов	ОПК-12.1 Применяет специальные средства и методы получения нового знания. ОПК-12.3 Самостоятельно или в составе группы участвует в научных исследованиях объектов профессиональной деятельности и их структурных элементов.
ОПК-13. Способен изучать и анализировать вещественный состав горных пород и руд и геолого-промышленные и генетические типы месторождений полезных ископаемых при решении задач по рациональному и комплексному освоению минерально-сырьевой базы	ОПК-13.1. Демонстрирует знания вещественного состава горных пород и руд и геолого-промышленных и генетических типов месторождений полезных ископаемых. ОПК-13.2 Анализирует вещественный состав горных пород и руд и геолого-промышленные и генетические типы месторождений полезных ископаемых при решении задач по рациональному и комплексному освоению минерально-сырьевой базы.
ОПК-14. Способен выполнять маркетинговые исследования, проводить экономический анализ затрат для реализации процессов геологоразведочного производства в целом	ОПК-14.1 Имеет представление о маркетинговых исследованиях, с проведением экономического анализа затрат на геологоразведочные работы ОПК-14.2 Осуществляет маркетинговые исследования, проводит экономический анализ затрат для реализации процессов геологоразведочного производства в целом.
ОПК-15. Способен участвовать в разработке и реализации образовательных программ в сфере своей профессиональной деятельности, используя профессиональные знания	ОПК-15.1 Разрабатывает и реализует образовательные программы в сфере своей профессиональной деятельности.
ОПК-16. Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности	ОПК-16.1. Понимает принципы работы современных информационных технологий. ОПК-16.2. Использует для решения задач профессиональной деятельности современные информационные технологии.

профессиональных:

<i>Код и наименование профессиональной компетенции</i>	<i>Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции</i>
ПК-1.1 Способен отслеживать тенденции и направления развития эффективных технологий геологической разведки, проявлением профессионального интереса к развитию смежных областей	ПК-1.1.1 Представляет тенденции и направления развития эффективных технологий геологической разведки ПК-1.1.2 Проявляет профессиональный интерес к развитию смежных областей
ПК-1.2 Способен обеспечивать контроль за соблюдением установленной технологии бурения скважин, качеством проведения работ по бурению, креплению и опробованию скважин	ПК-1.2.1 Обеспечивает контроль за соблюдением установленной технологии бурения скважин ПК-1.2.2 Обеспечивает контроль качества проведения работ по бурению, креплению и опробованию скважин
ПК-1.3 Способен руководить непосредственно на объектах работ отдельными сложными и новыми технологическими процессами, контролировать внедрение разработанных технологических рекомендаций по установлению рациональных способов бурения и оптимальных параметров бурения; составлять оперативные планы на производство технологических операций (спуск обсадных колонн, цементирование, работа при осложнении ствола скважины, бурение наклонно-направленных скважин, ликвидация аварии)	ПК-1.3.1 Руководит непосредственно на объектах работ отдельными сложными и новыми технологическими процессами ПК-1.3.2 Контролирует внедрение разработанных технологических рекомендаций по установлению рациональных способов бурения и оптимальных параметров бурения ПК-1.3.3 Составляет оперативные планы на производство технологических операций (спуск обсадных колонн, цементирование, работа при осложнении ствола скважины, бурение наклонно-направленных скважин, ликвидация аварии)
ПК-1.4 Способен вести техническую документацию и проводить ее корректировку в связи с изменением технологии при сооружении скважин, участвовать в проведении опытно-экспериментальных работ по освоению новой техники и технологии производства	ПК-1.4.1 Ведет техническую документацию и проводит ее корректировку в связи с изменением технологии при сооружении скважин ПК-1.4.2 Участвует в проведении опытно-экспериментальных работ по освоению новой техники и технологии производства
ПК-1.5 Способен анализировать данные о состоянии бурового оборудования, инструмента, контролировать соблюдение правил технической эксплуатации оборудования и инструмента, отработку породоразрушающего инструмента	ПК-1.5.1 Анализирует данные о состоянии бурового оборудования, инструмента ПК-1.5.2 Контролирует соблюдение правил технической эксплуатации оборудования и инструмента, отработку породоразрушающего инструмента
ПК-1.6 Способен вести контроль процесса подсечения и отбора представительных проб, вскрытия продуктивных горизонтов, соблюдения проектных данных по режиму бурения в соответствии с геолого-техническим нарядом и выполнения инструкций по проведению работ связанных со строительством скважин; разрабатывать и внедрять в производство рациональные комплексы технологий геологической разведки применительно к конкретным природным и геологическим условиям районов работ	ПК-1.6.1 Контролирует процесс подсечения и отбора представительных проб, вскрытия продуктивных горизонтов, соблюдение проектных данных по режиму бурения в соответствии с геолого-техническим нарядом и выполнение инструкций по проведению работ связанных со строительством скважин ПК-1.6.2 Разрабатывает и внедряет в производство рациональные комплексы технологий геологической разведки применительно к конкретным природным и геологическим условиям районов работ

При выполнении выпускной квалификационной работы обучающиеся должны *показать*, опираясь на полученные знания, умения и полученные навыки:

сформированные универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции;

способность самостоятельно решать на современном уровне задачи своей профессиональной деятельности;

навыки постановки исследовательской проблемы, ее самостоятельного обсуждения, анализа возможных вариантов ее решения;

способность грамотно излагать специальную информацию, аргументировать и защищать свою точку зрения;

умение самостоятельного квалифицированного библиографического поиска, изучения и анализа научной литературы по теме;

навыки использования методологических, историко-философских и конкретных знаний, полученных в процессе обучения, для решения поставленной в работе проблемы;

умение написания профессионально грамотного текста и оформления его в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным публикациям;

использование в работе современных технологий.

1.1.3 Общие требования к выпускной квалификационной работе

Выпускная квалификационная работа должна отвечать следующим требованиям:

- быть актуальной (иметь теоретическое обоснование актуальности изучаемой проблемы в современных условиях хозяйственной деятельности);
- представлять самостоятельное исследование, демонстрирующее способность выпускника решать профессиональные проблемы, делать на основе анализа фактического материала, литературы соответствующие выводы и вносить предложения;
- отражать добросовестность студента в использовании опубликованных материалов других авторов.

Общие требования к выпускной квалификационной работе – целевая направленность; четкость построения; логическая последовательность изложения материала; глубина исследования и полнота освещения вопросов; убедительность аргументаций; доказательность выводов и обоснованность рекомендаций; грамотное оформление.

Текст выпускной квалификационной работы должен демонстрировать:

- знакомство автора с литературой вопроса;
- умение выделить проблему и определить методы ее решения;
- умение последовательно изложить существо рассматриваемых вопросов, грамотно цитировать ведущих исследователей, делать ссылки на использованные источники;
- умение собирать, обобщать, анализировать геологическую информацию, практические материалы, полученные в результате собственного исследования в организации;
- достоверность и конкретность изложения фактических и экспериментальных данных о работе организации;
- обоснование выводов и предложений по результатам исследования, их конкретный характер, практическую ценность для решения исследуемых проблем;
- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- четкость и логичность изложения мыслей, доказательность целесообразности и эффективности предлагаемых решений;
- приемлемый уровень языковой грамотности, включая владение функциональным стилем научного изложения.

1.1.4 Выбор, согласование и утверждение темы выпускной квалификационной работы

Выбор темы квалификационной работы осуществляется обучающимся по согласованию с научным руководителем и специалистами организации-базы практики, где будет проходить преддипломная практика. При выборе темы ВКР необходимо исходить из:

актуальности проблемы и значимости ее для научной и практической деятельности;

потребностей развития и совершенствования деятельности конкретной организации; интересов, склонностей в научно-исследовательской работе обучающегося, а также перспектив его будущей профессиональной деятельности; научной специализации выпускающей кафедры и ее преподавателей; возможности получения информации для проведения анализа и обоснования предлагаемых решений.

Примерный перечень тем выпускных квалификационных работ разрабатывается выпускающей кафедрой и доводится до сведения студентов. Студент может предложить свою тему, обосновав целесообразность ее разработки. Тема выпускной квалификационной работы может являться продолжением тем, ранее представленных студентом в рамках курсовых работ (проектов).

Для успешного выполнения выпускной квалификационной работы необходимо уже на первом этапе (выбор темы) четко сформулировать цель работы (отражающуюся в ее названии) и задачи.

После выбора темы, согласования ее с научным руководителем, студент подает заявление на имя заведующего кафедрой об утверждении темы выпускной квалификационной работы (**приложение Б**).

Закрепление тем выпускных квалификационных работ за студентами оформляется приказом по университету. Следует иметь в виду, что **тема, утвержденная приказом ректора университета, изменению не подлежит**. Исключение могут составить лишь случаи возникновения объективных непреодолимых препятствий к ее разработке. Изменение оформляется приказом по университету на основании письменного заявления студента и представления заведующего кафедрой.

1.1.5 Структура и содержание выпускной квалификационной работы

Структурные элементы выпускной квалификационной работы **перечислены ниже в порядке их расположения и брошюровки**.

1. Титульный лист (**приложение А**).
2. Сопроводительные документы к выпускной квалификационной работе:
 - 2.1 Задание на выполнение выпускной квалификационной работы (**приложение В**).
 - 2.2 Отзыв научного руководителя (**приложение Г**).
 - 2.3 Отзыв рецензента (**приложение Д**).
 - 2.4 Если результаты исследования нашли практическое применение, то прилагается документ, подтверждающий внедрение результатов исследования в практическую деятельность (**приложение Ж**).
 - 2.5 Справка на антиплагиат (**приложение М**).
3. Содержание (**приложение К**).
4. Введение.
5. Основная часть работы.
6. Заключение.
7. Список использованных источников (**приложение Л**).
8. Приложения.

Титульный лист должен содержать все необходимые идентификационные признаки, в частности, название работы, указание автора работы, руководителя.

На титульном листе подписью руководителя, консультанта (при наличии) подтверждается допуск выпускной квалификационной работы к защите.

Образец оформления титульного листа приведен в приложении А.

Титульный лист учитывается в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы, порядковый номер на титульном листе не ставится.

Сопроводительными документами к выпускной квалификационной работе являются: 1. задание на выполнение выпускной квалификационной работы (приложение В); 2. отзыв научного

руководителя (приложение Г); 3. отзыв рецензента ВКР (приложение Д); 4. документ, подтверждающий внедрение результатов исследования в практическую деятельность (приложение Ж).

Эти документы подшиваются следом за титульным листом работы, но в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы они не учитываются и порядковые номера на них не ставятся.

Цель составления задания на выполнение выпускной квалификационной работы – уяснение замысла работы и поставленных в ней основных проблем. Оформление задания на работу предполагает составление под контролем научного руководителя плана будущей работы. Пример составления задания на выпускную квалификационную работу приведен в приложении В.

Наличие содержания (плана работы) позволяет уйти от освещения вопросов, не относящихся к теме работы, обеспечить четкость и последовательность изложения материала, избежать пробелов и повторений, рационально организовать самостоятельный труд, сэкономить время.

Содержание работы помещают после справки о внедрении (если она есть). Слово «СОДЕРЖАНИЕ» записывают в виде заголовка симметрично тексту прописными буквами. В содержании работы указывается перечень всех глав и параграфов выпускной квалификационной работы, а также номера страниц, с которых начинается каждый из них (точно по тексту). Главы в выпускной квалификационной работе должны иметь в пределах всей работы порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами. Параграфы каждой главы должны иметь нумерацию в пределах каждой главы. Номер параграфа состоит из номера главы и непосредственно номера параграфа в данной главе, отделенного от номера главы точкой. Заголовки содержания должны точно повторять заголовки в тексте. Сокращать или давать их в другой формулировке, последовательности и соподчиненности по сравнению с заголовками в тексте нельзя.

При этом надо иметь в виду, что названия глав и параграфов не должны дублировать друг друга, а также наименование темы работы. Каждая глава должна раскрывать часть темы, каждый параграф главы – часть содержания главы.

Введение, заключение, список использованных источников включают в содержание, но не нумеруют.

Пример оформления содержания выпускной квалификационной работы приведен в приложении К.

Страницы содержания учитываются в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы, порядковый номер на странице не ставится.

Выполнение выпускной квалификационной работы рекомендуется начинать с написания «ВВЕДЕНИЯ». Естественно, в процессе исследования первичный текст введения будет меняться, иногда очень существенно. Но это не отрицает необходимости на начальном этапе поставить перед собой задачи исследования, отражаемые во введении.

«ВВЕДЕНИЕ» в общем случае имеет следующую структуру:

актуальность выбранной темы,

формулировка цели и определение конкретных задач исследования (они найдут отражение в содержании работы),

выбор объекта и предмета исследования,

информационная база исследования;

структура выпускной квалификационной работы.

Во введении следует коротко сформулировать актуальность темы исследования, т.е. причину возникновения проблемы и ее суть. Актуальность определяется как значимость, важность и приоритетность выбранной темы исследования среди других тем. Она должна подтверждаться положениями и доводами, свидетельствующими в пользу научной и практической значимости решения проблем и вопросов, исследуемых в работе. Необходимо объяснить, почему именно выбранная тема представляет интерес на современном этапе развития. Так, если, например, выбрана тема «Эксплуатационная разведка глубоких горизонтов на Северном фланге дайки Елизаветинская (Березовское золоторудное месторождение)», введение можно начать так: «Актуальность выбранной темы исследования обуславливается, во-первых, необходимостью пополнения сырь-

евой базы Березовского рудника за счет результатов эксплуатационной разведки по дайке елизаветинской, во-вторых, для выяснения перспектив золотоносности дайки на уровне глубоких горизонтов. Обоснование актуальности темы работы не должно быть многословным. Главное – показать, как автор оценивает своевременность и социальную значимость выбранной темы.

От доказательства актуальности следует перейти к формулировке цели исследования. Цель исследования – это образ желаемого результата, то, что намерен достичь автор работы.

Цель выпускной квалификационной работы должна соответствовать названию темы. Цель работы формулируется кратко и точно. Например, «Цель выпускной квалификационной работы – составление проекта на проведение эксплуатационной разведки в пределах северной части дайки Елизаветинская Березовского золоторудного месторождения». Конкретизация цели осуществляется в задачах исследования. «Исходя из поставленной цели, были поставлены следующие задачи выпускной квалификационной работы:

- обоснование методики эксплуатационной разведки;
- выбор технологии проходки горных выработок
- составление сметы на проведение проектируемых видов работ;
- расчет основных геолого-экономических показателей;
- оценка запасов по категории C_1 ».

Формулировки задач необходимо делать очень тщательно, так как описание их решения должно составить содержание последующих глав (параграфов) выпускной квалификационной работы.

Объект исследования – это процесс или явление, порождающее проблемную ситуацию и избранное для исследования. Выделение объекта происходит на основе анализа проблемы исследования.

Предмет исследования – это та часть объекта, которая и будет исследована. Предмет должен характеризовать тему выпускной квалификационной работы и включать в себя свойства и стороны объекта, которые следует рассмотреть в заявленной теме, установив пределы рассмотрения данного вопроса. Объект и предмет исследования соотносятся как общее и часть общего.

Объект и предмет исследования можно сформулировать так: «Объект исследования – Березовское золоторудное месторождение.

Предмет исследования – северная часть дайки Елизаветинская Березовского золоторудного месторождения».

Далее дается характеристика методов исследования. Методы исследования – основные приемы и способы, которые использовались при проведении исследования (диалектический метод, исторический метод, статистический и др.). В процессе обработки полученных данных практически всегда используются такие взаимосвязанные научные методы исследования, как анализ и синтез. Анализ – логический прием разделения целого на отдельные элементы и изучение каждого в отдельности и во взаимосвязи с целым. Синтез – объединение результатов для формирования (проектирования) целого.

После того, как сформулированы цель, задачи, объект и предмет, методы исследования, следует указать информационную базу и структуру выпускной работы:

«Информационная база выпускной квалификационной работы включает: материалы предшествующих работ – отчеты о геологоразведочных работах на месторождении, труды ведущих отечественных и зарубежных авторов, посвященных проблемам минерально-сырьевой базы страны, статьи, опубликованные в периодических изданиях, Интернет-ресурсы, а также собственные наблюдения дипломанта, полученные во время прохождения практики на предприятии.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех разделов основного текста, заключения, списка использованных источников, приложений. Содержание работы изложено на 122 страницах машинописного текста и включает 12 таблиц. Библиографический список состоит из 37 источников».

Введение не должно превышать 2-3 страницы компьютерного набора.

Страницы введения учитываются в общей нумерации страниц работы, номер страницы проставляется.

Основная часть выпускной квалификационной работы

Основная часть работы состоит из разделов:

- 1 Геологический раздел
- 2 Технический раздел
- 3 Специальный раздел

Текст работы излагается самостоятельно (не допускается дословное переписывание использованной литературы), последовательно, грамотно и аккуратно, при написании работы необходимо употреблять профессиональные термины, избегать сложных грамматических оборотов. Студент должен показать не только знание материала, но и умение разбираться в нем, творчески использовать основные положения источников. Материал, используемый из других источников, должен быть переработан, органически увязан с избранной студентом темой и изложен своими словами с приведением ссылок на источники информации.

Содержание выпускной квалификационной работы должно демонстрировать:

знакомство автора с учебной и научной литературой по теме выпускной квалификационной работы;

умение обобщать материал литературных источников, анализировать геологическую информацию, выявлять особенности геологических объектов, являющихся предметом исследования, выделить проблему и определить пути ее решения, последовательно изложить существо рассматриваемых вопросов, делать самостоятельные выводы;

владение понятийным и терминологическим аппаратом.

В тексте выпускной квалификационной работы следует избегать использования личных местоимений, заменяя их безличными формами (вместо «я считаю» - «автор считает», «мы полагаем»).

Все страницы основной части выпускной квалификационной работы участвуют в общей нумерации страниц, номера страниц проставляются.

«ЗАКЛЮЧЕНИЕ» выполняет роль концовки, обусловленной логикой проведенного исследования. Оно содержит изложение полученных итогов и их соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными и сформулированными во введении. Именно здесь содержится «выводное» знание, полученное в результате исследования. В заключении указывается вытекающая из конечных результатов теоретическая и практическая ценность, значимость. Заключительная часть предполагает обобщенную итоговую оценку проделанной работы.

В «ЗАКЛЮЧЕНИИ» находят отражение основные положения и выводы, содержащиеся во всех главах работы. В нем отражаются степень решения поставленных задач, полученные результаты, указывается также где, и каким образом применение рекомендаций может принести практическую пользу в деятельности организации.

Объем заключения – 2-3 страницы.

Нумерация страниц, на которых приводится текст заключения, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Список использованных источников является составной частью работы и отражает степень изученности рассматриваемой проблемы. При этом в список использованных источников включаются, как правило, те источники, на которые в работе имеются библиографические ссылки. Использованные источники должны содержать их полное описание по требованиям стандартов.

Порядок оформления списка использованных источников представлен в приложении Л.

Нумерация страниц, на которых приводится текст списка использованных источников, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

В *приложения* следует выносить вспомогательный материал, который при включении в основную часть работы загромождает текст.

К вспомогательному материалу относятся таблицы цифровых данных, инструкции, методики, иллюстрации вспомогательного характера, заполненные формы документов, выдержки из локальных нормативных актов и др.

Нумерация страниц, на которых даются приложения, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Объем выпускной квалификационной работы должен составлять – 60-100 страниц компьютерного набора (без приложений).

При выполнении выпускной квалификационной работы студент должен продемонстрировать навыки работы на персональном компьютере (например, статистическая обработка материалов, выполнение графических построений, проведения математических расчетов, использование программного обеспечения для решения конкретных задач, поставленных в работе).

1.1.6 Руководство выпускной квалификационной работой

Общее руководство и контроль за ходом выполнения ВКР осуществляет выпускающая кафедра в лице научного руководителя. Научный руководитель:

помогает студенту с выбором темы и разработкой плана работы;

оформляет задание на выполнение выпускной квалификационной работы;

оказывает студенту помощь в разработке календарного графика на весь период выполнения выпускной квалификационной работы;

рекомендует студенту необходимую литературу, нормативные документы по теме;

систематически контролирует ход работы и информирует кафедру о состоянии дел;

дает подробный отзыв на законченную работу.

Проверяя работу, научный руководитель не должен превращаться в корректора или редактора, хотя замечания в этой части он тоже высказывает. Научный руководитель выявляет полноту, глубину и всесторонность рассмотрения поставленных в плане вопросов, последовательность изложения материала, достаточность использования литературы, аргументированность выводов, степень их обоснованности и самостоятельности. В случае обнаружения плагиата, ошибочных решений и научных положений по тем или иным вопросам, неполноты или поверхностности исследования, противоречивости, излишнего отклонения от темы и других недостатков руководитель предлагает выпускнику устранить их, рекомендует пути и сроки их устранения.

Руководитель ВКР помогает выпускнику на всех этапах его работы, но эта помощь не должна выливаться в соавторство. Отношения руководителя со студентом строятся на основе научного сотрудничества молодого исследователя и опытного старшего коллеги, исполняющего наставнические функции.

1.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.2.1 Основные этапы и сроки выполнения выпускной квалификационной работы

На основании выданного обучающемуся задания составляется календарный план-график на весь период разработки темы с указанием сроков окончания и представления законченной работы. Соблюдение установленных сроков и последовательности выполнения выпускной квалификационной работы направлено на оптимизацию процесса достижения поставленных целей.

Рекомендуется следующая последовательность этапов выполнения выпускной квалификационной работы и сроки их выполнения:

выбор темы работы, её утверждение, составление программы исследования – *за месяц до начала государственной итоговой аттестации;*

подбор научной литературы, нормативной документации и ознакомление с ними, составление литературного обзора по проблеме исследования - *за две недели до начала преддипломной практики;*

сбор и обобщение аналитических материалов, анализ;

написание работы и представление её руководителю не позднее, чем *за 4 недели до дня защиты*, доработка по замечаниям руководителя;

написание введения и заключения, подготовка списка использованных источников, приложений, представление работы научному руководителю не позднее, чем *за две с половиной недели до дня защиты;*

прохождение нормоконтроля, исправление замечаний по оформлению работы;
проверка в системе Антиплагиат *за три дня до даты защиты*;
размещение работы на портфолио *за три дня до защиты*
подготовка к защите выпускной квалификационной работы: подготовка презентационных материалов, оформление документов на выпускную квалификационную работу.

1.2.2 Подготовка к защите выпускной квалификационной работы

Законченная ВКР, подписанная студентом, передается научному руководителю для проверки соответствия оформления работы предъявляемым требованиям и составления письменного отзыва руководителя. В отзыве руководителя указываются сведения об актуальности темы работы, достоинства и недостатки работы, практическая ценность работы, оценка подготовленности студента, инициативности и самостоятельности при решении задач выпускной квалификационной работы, умение студента работать с литературными источниками, и способность ясно и четко излагать материал, соблюдение правил и качества оформления работы. Особое внимание уделяется оценке выпускника по личностным характеристикам (ответственность, дисциплинированность, самостоятельность, активность, творчество, инициативность и т.д.), проявленным способностям к исследовательской деятельности, достигнутым результатам в формировании компетенций выпускника данной программы, мотивируется возможность или невозможность представления выпускной квалификационной работы на защиту в государственной экзаменационной комиссии.

Решение научного руководителя является основанием для допуска кафедрой ВКР к защите. Допуск работы к защите производится заведующим выпускающей кафедры.

Текст ВКР должен быть проверен на объем заимствований в системе «Антиплагиат», отчет печатается. ВКР размещается в портфолио. Размещение ВКР – не позднее, чем за 3 дня до защиты.

Перед защитой студентом представляются в ГЭК следующие документы:

- 1) ВКР, подписанная на титульном листе выпускником, научным руководителем, консультантами (если есть) (Приложение А);
- 2) задание на выполнение работы с отметками сроков окончательной подготовки работы, подписанное научным руководителем и заключением кафедры о допуске к защите;
- 3) отзыв научного руководителя;
- 4) отзыв рецензента;
- 5) отчет о проверке в системе «Антиплагиат».

Готовясь к защите работы, студент составляет тезисы выступления, содержащего наиболее важные и интересные результаты исследования. При этом следует помнить о том, что выпускнику для доклада отводится ограниченное время;

оформляет наглядные пособия, раздаточный материал к докладу, продумывает ответы на замечания рецензента.

Работу над тезисами доклада следует начинать сразу же после представления работы на кафедру и продолжить после ознакомления с отзывом руководителя. На вопросы и замечания отзыва целесообразно подготовить письменные ответы.

Доклад на защите выпускной квалификационной работы, как правило, не должен превышать 7-10 мин. Следует помнить, что студент не просто излагает, а защищает положения своей работы.

1.2.3 Защита выпускной квалификационной работы

Защита выпускной квалификационной работы проводится на открытом заседании ГЭК.

Порядок защиты:

-председатель ГЭК объявляет фамилию, имя и отчество выпускника, название работы с указанием места ее выполнения;

- доклад продолжительностью, как правило, не более 7-10 минут, в течении которых он должен кратко сформулировать актуальность, цель и задачи работы, изложить основные результаты, выводы и рекомендации, конкретные предложения, обосновать возможность их реализации, эффективность. При этом необходимо уточнить личный вклад в разработку проблемы.

Студент может пользоваться заранее подготовленным тезисами доклада, но должен излагать основное содержание своей выпускной квалификационной работы свободно, не читая письменного текста. При чтении утрачивается эмоциональность изложения, монотонное чтение текста не привлекает внимания и утомляет слушателей. Свободный рассказ по теме свидетельствует об уровне подготовки и глубине специальных знаний по проблеме выпускной квалификационной работы. Все это существенно влияет на итоговую оценку работы.

Все принципиальные положения выпускной квалификационной работы для большей наглядности могут быть представлены на демонстрационном материале. К демонстрационным материалам относится информация из выпускной квалификационной работы (таблицы, диаграммы, схемы, иллюстрации и пр.), оформленная в виде презентаций или ксерокопий для каждого члена ГЭК. Во время доклада необходимо ссылаться на эти материалы;

- после окончания доклада члены ГЭК и присутствующие на защите предлагают выпускнику вопросы, касающиеся устного выступления, имеющие непосредственное отношение к теме работы, или же просто в связи с обсуждаемой проблемой;

- зачитывается внешняя рецензия на выпускную квалификационную работу;

- выступление руководителя выпускной квалификационной работы, а в случае его отсутствия секретарь ГЭК зачитывает отзыв руководителя;

- председатель ГЭК предоставляет желающим слово для выступления, затем выпускнику, которое предполагает ответы на замечания рецензента и всех, выступивших при обсуждении работы, после чего объявляет об окончании защиты.

После окончания открытой защиты проводится закрытое заседание ГЭК (возможно с участием руководителей), на котором определяются итоговые оценки по четырехбалльной системе («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»). После закрытого обсуждения председатель объявляет решение ГЭК. Протокол заседания ГЭК ведется секретарем. В него вносятся все заданные вопросы, особые мнения, решение комиссии об оценке.

II КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Оценка выпускной квалификационной работы производится по четырем группам критериев:

Система оценивания по оценочным средствам государственной итоговой аттестации

Оценочное средство	Максимальная стоимость в баллах	Критерии начисления баллов
Выпускная квалификационная работа	0-70 балл	Качество выполненной работы, ее научно-теоретический уровень, степень самостоятельности и логичность изложения материала, правильность оформления и результат ее защиты
Отзыв руководителя ВКР	0-5 баллов	Ответственность, дисциплинированность, стремление к достижению высоких результатов самостоятельность, добросовестность в выполнении ВКР, контактность....
Отзыв рецензента ВКР	0-5 баллов	Качество выполненной работы, корректность расчетов, принятых обоснований и сделанных выводов
Ответы на вопросы (проверка компетенций)	0-20 баллов	Полнота и правильность ответа
Итого	100 баллов	

Оценка по итогам государственной итоговой аттестации определяется простым суммированием баллов:

<i>Критерии оценки</i>	<i>Количество баллов</i>
<i>Критерии содержания ВКР</i>	45
обоснованность выбора и актуальность темы исследования	0-5
обоснование практической и теоретической значимости исследования	0-5
уровень теоретической проработки проблемы, осмысления теоретических вопросов и обобщения собранного материала	0-5
умение представить литературный обзор проблемы исследования	0-5
наличие в ВКР результатов, которые в совокупности решают конкретную научную и (или) практическую задачу, или - результатов (теоретических и (или) экспериментальных), которые имеют существенное значение для развития конкретных направлений в определенной отрасли науки (деятельности), или – научно-обоснованных разработок, использование которых в полном объеме обеспечивает решение прикладных задач	0-5
умение логически верно, аргументированно и ясно излагать материалы исследования в ВКР	0-10
обоснованность и четкость сформулированных выводов	0-5
умение использовать компьютерные технологии в режиме пользователя для решения профессиональных задач	0-5
<i>Критерии оформления ВКР</i>	10
владение научным стилем изложения, орфографическая и пунктуационная грамотность	0-5
соответствие формы представления работы требованиям, предъявляемым к оформлению данных работ	0-5
<i>Критерии процедуры защиты</i>	15
качество устного доклада: соответствие доклада содержанию работы, логичность, точность формулировок, обоснованность выводов, культура речи	0-5
владение профессиональной терминологией и навыками профессиональной аргументации	0-5
презентационные навыки: структура и последовательность изложения материала, соблюдение временных требований, использование презентационного оборудования и/или раздаточного материала, грамотность оформления иллюстрационных материалов, выразительность изложения, контакт с аудиторией	0-5
<i>Отзыв рецензента ВКР</i>	5
теоретическая значимость исследования; анализ представленных методик исследования; практическая значимость исследования; степень полноты обзора состояния проблемы и корректность постановки задачи; уровень и корректность использования в работе методов исследования; степень комплексности работы, применение в ней знаний социально-гуманитарных дисциплин, естественно-математических, общепрофессиональных и специальных дисциплин; ясность, четкость, последовательность и обоснованность изложения.	0-5
<i>Отзыв руководителя ВКР</i>	5
ответственное отношение к работе, дисциплинированность, стремление к достижению высоких результатов, самостоятельность, добросовестность в выполнении работы, соблюдение сроков представления материалов, контактность	0-2
владеет навыками самостоятельного получения новых знаний, использования современных технологий	0-3
<i>Теоретические вопросы</i>	20
качество ответов на вопросы членов ГЭК: правильность и полнота ответов	0-20
<i>Итого баллов</i>	100

Правила оценивания результатов защиты ВКР

80-100 баллов (80-100%) – оценка «отлично»;

65-79 баллов (65-79%) – оценка «хорошо»;

50-64 баллов (50-64%) – оценка «удовлетворительно»;

0-49 баллов (0-49%) – оценка «неудовлетворительно».

III ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Оценочными средствами результатов обучения на этапе государственной итоговой аттестации являются выпускная квалификационная работа и ее защита по установленной процедуре (доклад, презентация, ответы на вопросы государственной экзаменационной комиссии), позволяющей сделать вывод о сформированности компетенций, теоретические вопросы.

3.1 Примерная тематика выпускных квалификационных работ

1. Буровые работы при оценке *Тамуньерского* золоторудного участка (*Ивдельский район*).
2. Технология и техника бурения гидрогеологической скважины на *Ефремовском* месторождении.
3. Сооружение эксплуатационных скважин на *Харампурском* месторождении нефти (ЯНАО), *куст 12*.
4. Разведочные работы на угольных месторождениях республики *САХА, Якутия (Эльгинский ГОК)*.
5. Поисково-оценочные работы на рудное золото участка *Гросс, Южно-Угуйской зоны*.
6. Бурение водозаборной скважины для водоснабжения при инженерно-геологических изысканиях на объекте *Ефремовское месторождение – причал на реке Б. Юган*.
7. Строительство эксплуатационных скважин на *Губкинском месторождении нефти, куст 35*.
8. Поисковые работы на золото на *Сурьинском участке Вагранской площади (Свердловская область)*.
9. Техничко-технологическое обеспечение буровых работ при сооружении эксплуатационной скважины на *Приобском месторождении нефти*.
10. Разработка специальных промывочных жидкостей на основе механоактивированных органопорошков для вскрытия низконапорных продуктивных горизонтов нефтяных пластов.

3.2 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность универсальных компетенций:

1. Каково значение коммуникативных навыков для успешной деятельности производственного коллектива?
2. В чем вы видите основные причины необходимости овладения навыками общения на иностранном языке для успешного решения профессиональных задач в современных условиях?
3. В чем проявляется толерантность в восприятии социальных, этнических, конфессиональных и культурных различий?
4. Чем обусловлена необходимость овладения правовой культурой для достижения высоких экономических результатов в современных условиях?
5. Какая формулировка образовательных потребностей специалиста в современных условиях является более актуальной: «образование для всей жизни» или «образование в течение всей жизни»?
6. Возможна ли успешная профессиональная самореализация работника без формирования потребности и способности к самоорганизации и самообразованию?
7. В чем вы видите значение здорового образа жизни, овладения методами и средствами физической культуры для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности?
8. Чем обусловлена в настоящее время необходимость овладения приемами первой помощи, методами защиты в условиях чрезвычайных ситуаций?
9. Каковы главные особенности научного знания в отличие от религиозных представлений о мире?

10. Что, по вашему мнению, является важнейшим фактором развития общества в современном мире?
11. В каких формах осуществляется влияние научного знания на развитие экономики, культуры, духовной жизни и общества в целом?
12. Каково значение коммуникативных навыков для успешной деятельности производственного коллектива?
13. В чем вы видите основные причины необходимости овладения навыками общения на иностранном языке для успешного решения профессиональных задач в современных условиях?
14. В чем проявляется толерантность в восприятии социальных, этнических, конфессиональных и культурных различий?
15. Чем обусловлена необходимость овладения правовой культурой для достижения высоких экономических результатов в современных условиях?
16. Какая формулировка образовательных потребностей специалиста в современных условиях является более актуальной: «образование для всей жизни» или «образование в течение всей жизни»?
17. В чем состоит профессиональная самореализация работника?
18. В чем вы видите значение здорового образа жизни, овладения методами и средствами физической культуры для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности?
19. Чем обусловлена в настоящее время необходимость овладения приемами первой помощи, методами защиты в условиях чрезвычайных ситуаций?
20. Каков порядок действий мастера смены при обнаружении пожара?
21. Каков порядок действий мастера смены в чрезвычайной ситуации (стихийное бедствие)?
22. Определение понятия «качество продукции горнодобывающего производства».
23. Какие меры может предпринять главный инженер предприятия для повышения экономической эффективности предприятия в целом?
24. Что представляют собой кондиции на полезное ископаемое и для чего они необходимы?
25. Объясните, как Вы понимаете термин «техногенное сырьё». Каковы перспективы развития обогащения этого вида сырья?
26. Как проявляется негативное влияние разубоживания на результаты деятельности горно-металлургической компании и на интересы государства?
27. Какова, на Ваш взгляд, роль высшего технического образования для подготовки кадров в области добычи полезных ископаемых?

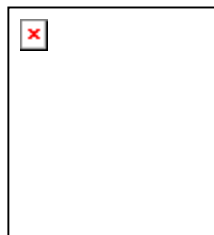
3.3 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общепрофессиональных компетенций:

- 1 Какова практическая значимость выполненной работы?
- 2 Какие технические средства выбраны для решения поставленных задач и как планируется осуществлять контроль за их применением?
- 3 Какие геологические работы выполнялись собственно автором?
- 4 Какие правила обеспечения безопасности технологических процессов, а также персонала при проведении работ в полевых условиях, на горных предприятиях предусмотрены проектом?
- 5 Какие мероприятия по защите окружающей среды запроектированы в работе?
- 6 Чем обусловлена актуальность представленной автором работы?
- 7 Какой фактический материал использован при выполнении выпускной работы?
- 8 Какие программные средства применялись для выполнения графических приложений?
- 9 Какая аналитическая база использована для выполнения выпускной работы?
- 10 Назовите основные результаты геолого-экономической оценки объекта?

3.4 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность профессиональных компетенций:

- 1 Назовите пространственные характеристики скважины?
- 2 Какие методы и приборы используются для контроля параметров наклонных скважин?
- 3 По каким признакам Вы узнаете о близости продуктивного пласта?
- 4 Как определяется осевая нагрузка на долото при бурении?
- 5 Как определяется конечный диаметр бурения скважины?
- 6 Диапазон изменения плотности бурового раствора при использовании добавок торфяной смеси?
- 7 Что такое терригенные породы?
- 8 Типы долот, используемых при бурении скважины?
- 9 Примеры ингибиторов глинистых растворов?
- 10 На каком основании выбираете конечный диаметр бурения?
- 11 От чего зависит количество бурового раствора на скважине?
- 12 Типы и конструкции используемых долот?
- 13 Как технически осуществляется искривление скважины?
- 14 Что понимается под вскрытием месторождения?
- 15 Что понимают под термином «горное давление»?
- 16 Подземное выщелачивание руд?
- 17 Опишите основные формы залегания месторождений полезных ископаемых?
- 18 Выщелачивание?

Пример оформления титульного листа выпускной квалификационной работы



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**



**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
Кафедра технологии и техники разведки
месторождений полезных ископаемых**

Специальность: **21.05.03** Технология геологической разведки

Специализация: **Технология и техника разведки МПИ**

Выпускная квалификационная работа специалиста

**Тема: Технико – технологическое обеспечение буровых работ при строитель-
стве эксплуатационных скважин
на Онбийском месторождении нефти**

Заведующий кафедрой ТТР _____

Фролов С.Г.

Руководитель проекта _____

Кралина Л.И.

Студент _____

Иманов В.А.

Учебная группа: _____

ТТР-63

Екатеринбург 2024г.

Пример оформления заявления на утверждение темы выпускной квалификационной работы

Зав. кафедрой ТТР МПИ
Фролову С.Г.
студента группы ТТР-24
Иманова В.А

**Заявление
на утверждение темы выпускной квалификационной работы**

Прошу утвердить мне тему выпускной квалификационной работы:

Технико – технологическое обеспечение буровых работ при строительстве эксплуатационных скважин на Онбийском месторождении нефти

Место прохождения преддипломной практики:

Руководитель ВКР: Кралина Л.И., ст. преподаватель
(Ф.И.О., ученая степень, ученое звание, должность)

Дата: _____

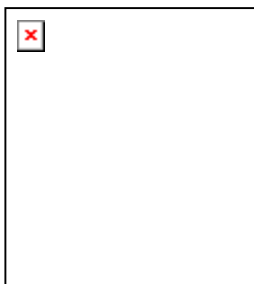
Подпись студента: _____

Подпись руководителя: _____

Решение зав. кафедрой
«Утверждаю»

«__» _____ 202__ г.

Пример оформления задания на выполнение выпускной квалификационной работы



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО

**УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Факультет геологии и геофизики

Кафедра Технологии и техники разведки МПИ

Специальность: **21.05.03 Технология геологической разведки**

Специализация Технология и техника разведки МПИ

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой

_____ С.Г. Фролов
« ____ » _____ 202_ г.

ЗАДАНИЕ ПО ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Студенту _____
(Фамилия, имя, отчество полностью)

1. Тема дипломного проекта (работы) _____

утверждена приказом по университету № ____ / ____ от « ____ » _____ 202_ г.

2. Срок сдачи студентом дипломного проекта (работы) « ____ » _____ 202_ г.

3. Исходные данные к дипломному проекту (работе) Материалы производственных и преддипломной практик, задание руководителя проекта.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки:

Обзор, анализ, оценка ранее проведенных работ.

4.1. Геологический раздел геологическая характеристика района. Методика, объемы и условия проведения проектируемых работ.

4.2. Технологический раздел Выбор способа бурения, выбор и обоснование конструкции скважины, выбор бурового и технологического оборудования, крепление скважины. Выбор промывочного агента.

4.3. Специальный раздел _____

5. Графический материал _____

Геологическая карта и разрез _____

ГТН _____

Графика спец.вопроса _____

6. Консультанты по разделам дипломного проекта (работы):

Раздел дипломного проекта (работы)	Фамилия, имя, отчество	Место работы, должность, степень, звание	Подпись
<i>Геологический</i>	<i>Малюгин А.А.</i>	<i>УГГУ, доц., к.г.-м.н., каф. ГПР</i>	
<i>Технологический</i>		<i>УГГУ,</i>	
<i>Спец. раздел</i>		<i>УГГУ,</i>	
Норм. контролер	Дерябин Н.Н.	УГГУ, доц., к.г.-м.н., каф. ТТР	

Ф.И.О. руководителя дипломного проекта (работы) _____

ученая степень _____ ученое звание _____

7. График выполнения дипломного проекта (работы):

Наименование раздела дипломного проекта (работы)	Срок выполнения
<i>Геологический</i>	<i>06.05.2024-27.05.2024</i>
<i>Технологический</i>	<i>27.05.2024-31.05.2024</i>
<i>Спец. раздел</i>	<i>01.06.2024-07.06.2024</i>

Дата выдачи задания « __ » _____ 202 _г.

Руководитель дипломного проекта (работы) _____ (подпись)

Задание по дипломному проектированию получил _____ (подпись)

Форма отзыва руководителя выпускной квалификационной работы

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Выпускная квалификационная работа выполнена

Студентом (кой)	Имановым В.А.
Специальность	21.05.03 Технология геологической разведки
Кафедра	Технологии и техники разведки месторождений полезных ископаем.
Группа	ТТР-24
Руководитель	Кралина Л.И

Общая характеристика работы студента в период выполнения ВКР:

Отмеченные достоинства _____

Отмеченные недостатки _____

Заключение: *Выпускная квалификационная работа студента Иманова В.А. может быть рекомендована к защите*

Научный руководитель: _____ «__» июня 2024 г.
подпись

Форма отзыва рецензента о выпускной квалификационной работе

**ОТЗЫВ
РЕЦЕНЗЕНТА О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

Ф. И.О. выпускника	Иманов В.А
Специальность	21.05.03 Технология геологической разведки
Специализация	Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых
Форма обучения	заочная
Тема рецензируемой работы	<u>Технико – технологическое обеспечение буровых работ при строительстве эксплуатационных скважин на Онбийском месторождении нефти</u>
Рецензент	Комраков В.В.
место работы, должность (при наличии)	ГП «ГТР»

Заключение о степени соответствия выпускной квалификационной работы заданию

Оценка теоретической части ВКР (теоретическая значимость исследования)

Оценка аналитической части ВКР (анализ представленных методик исследования)

Оценка проектной части ВКР (практическая значимость исследования)

Оценка самостоятельности работы студента при выполнении ВКР

Оценка сформированности компетенций, предусмотренных федеральным государственным образовательным стандартом:

ВКР демонстрирует (высокий, средний, низкий) уровень сформированности общекультурных компетенций и (высокий, средний, низкий) уровень сформированности профессиональных компетенций.

Замечания и рекомендации по ВКР _____

Общая оценка ВКР _____

Рецензент: _____ Фамилия И.О.

(подпись)

« _____ » _____ 2024г.

М.П

Пример оформления документа, подтверждающего использование результатов выпускной квалификационной работы

СПРАВКА

об использовании результатов выпускной квалификационной работы

на тему: «Технико – технологическое обеспечение буровых работ при строительстве эксплуатационных скважин на Онбийском месторождении нефти»

Выводы и предложения, представленные в исследовании Иманова В.А., нашли применение в практической деятельности _____.

Рекомендации автора по совершенствованию технологической деятельности организации взяты за основу при разработке перспективных направлений развития _____.

Директор _____ Фамилия И.О.
(подпись)

М.П.

Пример структуры и оформления содержания выпускной квалификационной работы

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.

1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ – 35 – 40 с.

1.1. Геологическое строение района.

Общие сведения о районе работ.

Геологическая, геохимическая, геофизическая изученность.

Стратиграфия, литология пород.

Магматизм.

Метаморфизм и метасоматические изменения пород.

Тектоника.

Геоморфология.

История геологического развития.

Гидрогеология и инженерная геология.

Полезные ископаемые.

1.2. Геологическое описание месторождения (участка).

2. ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ – 25 – 30 с.

2.1. Технология бурения скважин.

2.2.

2.3. Разработка мероприятий по охране недр и окружающей среды.

3. СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ – 15 - 20 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Список использованных источников

Приложения

Примеры библиографических описаний, применяемых при оформлении списка использованных источников

МОНОГРАФИИ

1. *Заварицкий А. Н.* Изверженные горные породы. М.: Наука, 1961. 479 с.
2. *Каждан А. Б.* Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых (Научные основы поисков и разведки). М.: Недра, 1984. 285 с.
3. *Методика изучения гидротермально-метасоматических образований* / Е. В. Плющев, О. П. Ушаков, В. В. Шатов, Г. М. Беляев. Л.: Недра, 1981. 252 с.
4. *Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Ч.1.* Обломочные и глинистые породы / под ред. А. В. Хабакова. М.-Л.: Госгеолыздат, 1962. 578 с.

ПЕРЕВОДНАЯ ЛИТЕРАТУРА

5. *Бейтс Р. Л.* Геология неметаллических полезных ископаемых: пер. с англ. М.: Мир, 1965. 548 с.

СТАТЬИ ИЗ СБОРНИКА

6. *Клочихин А. В.* Ордовик, силур и нижний девон восточного крыла Зилаирского синклинория на Южном Урале // Вопросы геологии Восточной окраины Русской платформы и Южного Урала. Вып. 7. Уфа, 1960. С. 120 – 125.

СТАТЬИ ИЗ ЖУРНАЛА

7. *Ферштатер Г. Б., Ф. Беа, Н. С. Бородина, М. П. Монтеро.* Анатексис базитов в зоне палеосубдукции и происхождение анортозит-плагиогранитной серии Платиноносного пояса Урала // Геохимия. М., 1998. № 8. С. 768 – 781.

СТАТЬИ ИЗ ЖУРНАЛА АКАДЕМИИ НАУК

8. *Соболев А. Е.* Вендские мафиты и минерагения Южного Верхоянья // Докл. РАН. М., 1992. Т. 237. № 4 – 6. С. 557 – 560.

СТАТЬИ ИЗ ТРУДОВ

9. *Розен О. М., Федоровский В. С.* Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры (примеры кайнозойских, палеозойских и протерозойских коллизионных систем). М.: Научный мир (Тр. ГИН РАН. Вып. 595), 2001. 188 с.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ, СОВЕЩАНИЙ

10. *Новые данные о рифейском тектогенезе на Северо-Востоке России* А. К. Худолей, Р. Рейнбирд, Р. Стерн [и др.]. // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма. Мат. совещ. М.: Геос, 1999. Т. II. С. 261 – 264.

ФОНДОВАЯ ЛИТЕРАТУРА

11. *Виниченко В. И.* (отв. исполн.). Отчёт о поисково-разведочных и ревизионных работах на рудное золото по Богомоловскому участку и месторождениям Смирновского рудного поля, проведённых Средне-Борзинской ГРП в 1969 г. / ЧГУ. Чита, 1970. 214 с.

СПРАВОЧНИКИ, ГОСТ, ИНСТРУКЦИИ

12. *Минеральное сырьё.* Золото: справочник / Ю. М. Щепотьев, В. И. Куторгин, В. И. На-тоцинский [и др.]. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. 85 с.
13. *Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твёрдые полезные ископаемые).* М.: ВИЭМС МПР, 1999. 28 с.
14. *Сборник руководящих материалов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых.* Т. 1, 2. М.: ГКЗ СССР, 1985, 1986. 576 с., 530 с.
15. ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.



СПРАВКА

о результатах проверки на наличие заимствований
 Уникальный код справки: **1-374123-30820**

Ф.И.О. автора проверяемой работы:

Тема работы: Разведка глубоких горизонтов Северо-Ольховского медно-колчеданного месторождения (Средний Урал)

Руководитель:

Информация о документе:

Имя исходного файла: ВКР_....._2023.docx

Тип документа: ВКР

Источники цитирования *

#	Доля в отчете	Источник (ссылка)	Где найдено (Модуль поиска)
1	7.14%	Работа «Технико – технологическое обеспечение при проведении оценочных работ в пределах XVI рудной зоны на Приморском золото-серебряном месторождении» студента «Ишков И.И.» организации «Уральский государственный горный университет» ()	Модуль поиска Интернет
2	1.47%	Проверочный расчет КБТ при бурении с частичной нагрузкой (http://www.ronl.ru/referaty/geologiya/76694/)	Модуль поиска Интернет
3	0.07%	Тема: Анализ разработки северо-западной части Пальяновской площади Красноленинского месторождения (http://bibliofond.ru/view.aspx?id=719590)	Модуль поиска Интернет
4	0.06%	Тема: Анализ эффективности теплового воздействия на пласт месторождения Кантагли (http://bibliofond.ru/view.aspx?id=793926)	Модуль поиска Интернет
5	0.05%	Проектирование буровых работ с целью предварительной разведки месторождения Родниковое (http://www.ronl.ru/referaty/geologiya/356858/)	Модуль поиска Интернет

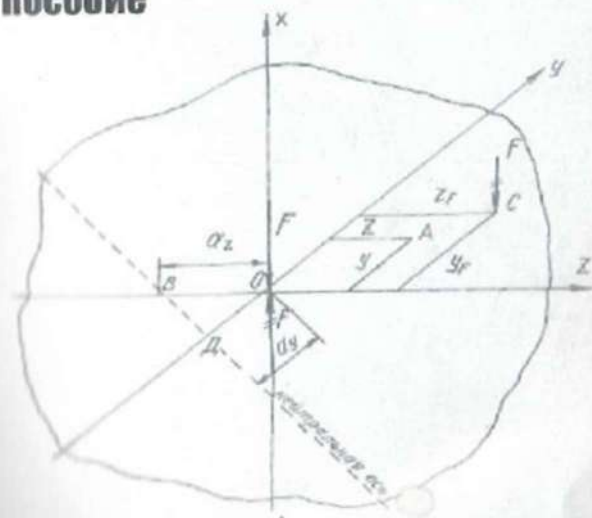
* Таблица формируется системой «ВКР-ВУЗ».

Уникальность текста: 91.01%

подпись студента	расшифровка подписи	подпись ответственного за проверку	расшифровка подписи
	дата		дата

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие



Издательство - 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Утверждено Редакционно-издательским советом
Уральского государственного горного университета
в качестве учебного пособия

Издание второе, исправленное и дополненное

Екатеринбург – 2012

УДК 620.10
М 74

Рецензенты: Таугер В. М., профессор кафедры мехатроника УрГУПС, канд. техн. наук, доцент; Раевская Л. Т., зав. кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики УГЛТУ, канд. техн. наук, доцент.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

М 74 **Сопротивление материалов в примерах и задачах: учебное пособие / 2-е изд., испр. и доп.** Екатеринбург Н. В. Мокрушин, С. А. Лящев, Л. Д. Чучманова, К. В. Серeda; Уральский гос. горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2012. – 184 с.
ISBN 978-5-8019-0185-5

Учебное пособие отражает опыт проведения практических занятий по дисциплине «Сопротивление материалов» в Уральском государственном горном университете. В пособии приведены примеры расчетов стержней, валов, балок, испытывающих простые и сложные виды деформаций. Для самостоятельной работы представлены задания по основным темам дисциплины.

Учебное пособие предназначено для студентов очного и заочного обучения.
Рис. 42. Табл. 22. Библи. 21 назв.

УДК 620.10

ISBN 978-5-8019-0185-5

© Уральский государственный
горный университет, 2008, 2012
© Мокрушин Н. В., Лящев С. А.,
Чучманова Л. Д., Серeda К. В., 2008, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Введение в учебную программу высших технических учебных заведений новых дисциплин, отражающих современное состояние науки и техники, при ограниченных сроках обучения привело к существенному сокращению количества лекционных часов по курсу сопротивления материалов.

Выполнение появившихся в результате этого пробелов в знании студентами вузов сопротивления материалов может быть достигнуто в известной мере за счет самостоятельного изучения ими необходимых разделов этого важного для будущего инженера курса. Данное учебное пособие составлено в соответствии с программой курса по сопротивлению материалов. По каждой теме предмета в пособии даны краткие теоретические сведения и основные формулы. Приведены примеры расчетов стержней на растяжение и сжатие (глава 1), примеры по определению главных моментов инерции поперечных сечений различного профиля (глава 2), рассмотрены примеры расчета вала на кручение (глава 3). В главе 4 рассмотрены примеры расчетов балок, испытывающих деформацию поперечного изгиба, на прочность и жесткость. С применением метода сил в главе 5 приведены примеры расчетов статически неопределимых неразрезных балок и плоских статически неопределимых рам. Виды сложного сопротивления (косой изгиб, внецентренное растяжение и сжатие, изгиб с кручением) рассмотрены в главе 6. Рассмотрение деформации продольного изгиба и расчеты на устойчивость гибких стержней приведены в главе 7.

Более подробное изложение теоретического материала приведено в работах [1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 18].

Для самостоятельного выполнения расчетно-графических работ по каждой теме составлены задания с необходимыми рисунками и таблицами. Для расчетов рекомендуется следующая литература [2, 8, 11, 14, 15, 16].

При выполнении практических расчетов используются следующие основные характеристики материалов [17]:

модули продольной упругости: стали $E_c = 2 \cdot 10^{11}$ Па; дюралю (и алюминия) $E_a = 0,7 \cdot 10^{11}$ Па; меди $E_m = 1 \cdot 10^{11}$ Па; чугуна $E_{ч} = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па; дерева $E_d = 1 \cdot 10^{10}$ Па;

модуль сдвига стали: $G = 0,8 \cdot 10^{11}$ Па;

коэффициенты теплового линейного расширения: стали $\alpha_c = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/град; дюралю $\alpha_a = 2,25 \cdot 10^{-5}$ 1/град; меди $\alpha_m = 1,65 \cdot 10^{-5}$ 1/град;

коэффициент Пуассона для стали: $\nu = 0,30$.

Глава 1

ПРОДОЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ СТЕРЖНЕЙ

Растяжением называют такой вид деформации, при котором в каждом его поперечном сечении возникают только продольные внутренние усилия.

Продольное усилие F в любом поперечном сечении численно равно алгебраической сумме проекций на ось стержня внешних сил, приложенных к части стержня, расположенной по одну сторону от сечения. Усилие считается положительным, если вызывает растяжение рассматриваемого участка.

При растяжении (сжатии) в сечении возникают только нормальные напряжения, которые определяются по формуле (1.1):

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (1.1)$$

где F – продольное усилие, кН; A – площадь поперечного сечения, м².

Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{adm}}, \quad (1.2)$$

где σ_{adm} – допускаемое нормальное напряжение материала стержня, МПа.

Абсолютная деформация Δl однородного участка (постоянное сечение и материал) определяется **по закону Гука**:

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}, \quad (1.3)$$

где l – длина участка, м; E – модуль продольной упругости материала (модуль Юнга), Па.

Для наглядного представления строятся эпюры. Эпюрами продольных сил и нормальных напряжений называют графики, показывающие законы изменения сил и напряжений в поперечных сечениях по длине стержня. Эпюры продольных сил, нормальных напряжений и перемещений поперечных сечений строятся в выбранном масштабе с учетом знаков.

Пример 1.1.

К узлу C кронштейна ABC (рис. 1.1, a) приложена сила $F = 100$ кН. Стержень AC – стальной, круглого сечения диаметром $d = 30$ мм; стержень BC – дюралюминиевый, квадратного сечения со стороной $a = 40$ мм. Определить напряжения в стержнях, а также горизонтальное, вертикальное и полное перемещение узла C .

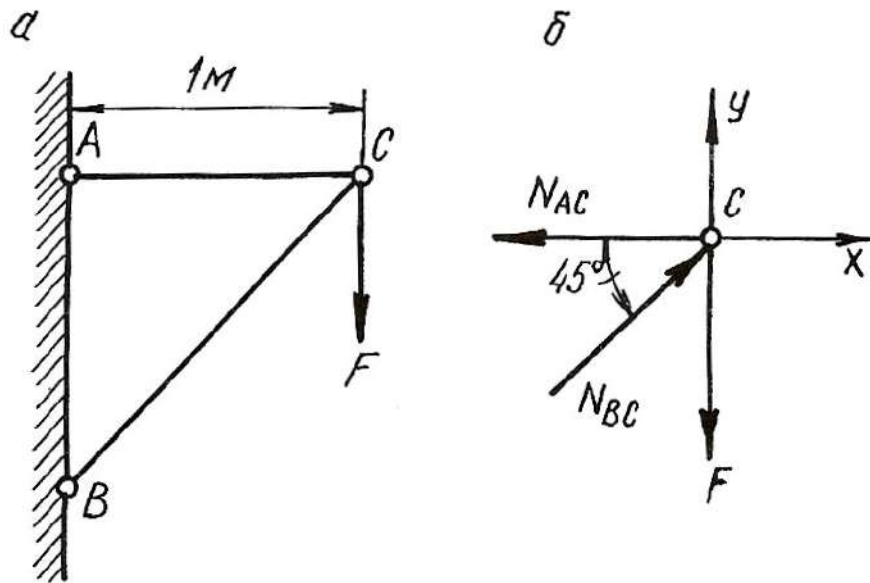


Рис. 1.1.

Решение.

Для определения продольных сил в стержнях AC и BC условно вырезаем узел C , заменяем действие стержней на узел усилиями и составляем уравнение равновесия для узла C (рис. 1.1, б)

$$\sum X = 0; \quad -N_{AC} + N_{BC} \cdot \cos 45^\circ = 0;$$

$$\sum Y = 0; \quad N_{BC} \cdot \sin 45^\circ - F = 0.$$

Откуда

$$N_{BC} = \frac{F}{\sin 45^\circ} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,707} = 141 \cdot 10^3 \text{ Н} = 141 \text{ кН},$$

$$N_{AC} = N_{BC} \cdot \cos 45^\circ = 141 \cdot 10^3 \cdot 0,707 = 100 \cdot 10^3 \text{ Н} = 100 \text{ кН}.$$

Стержень AC растянут, а стержень BC сжат. Определяем площади поперечных сечений стержней

$$A_{AC} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (30 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 706 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$A_{BC} = a^2 = (40 \cdot 10^{-3})^2 = 1600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Напряжения в поперечных сечениях стержней AC и BC

$$\sigma_{AC} = \frac{N_{AC}}{A_{AC}} = \frac{100 \cdot 10^3}{706 \cdot 10^{-6}} = 141 \cdot 10^6 \text{ Па} = 141 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{BC} = -\frac{N_{BC}}{A_{BC}} = -\frac{141 \cdot 10^3}{1600 \cdot 10^{-6}} = -88 \cdot 10^6 \text{ Па} = -88 \text{ МПа}.$$

Знак минус указывает на то, что в стержне BC возникает деформация сжатия.

Находим удлинения стержней:

$$\Delta l_{AC} = \frac{N_{AC} \cdot l_{AC}}{E_{ст} \cdot A_{AC}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 706 \cdot 10^{-6}} = 0,71 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,71 \text{ мм};$$

$$\Delta l_{BC} = -\frac{N_{BC} \cdot l_{BC}}{E_{дюр} \cdot A_{BC}} = -\frac{141 \cdot 10^3 \cdot 1,41}{7 \cdot 10^{10} \cdot 1600 \cdot 10^{-6}} = -1,77 \cdot 10^{-3} \text{ м} = -1,77 \text{ мм},$$

где $l_{BC} = \frac{l_{AC}}{\cos 45^\circ} = \frac{1}{0,707} = 1,41 \text{ м}$; $E_{ст}$, $E_{дюр}$ – модули продольной упругости стального и дюралюминиевого стержней, Па.

Для определения перемещения точки C мысленно разведем стержни в этом шарнире и отметим их новые длины AC_1 и BC_2 (рис. 1.2, а). Для того, чтобы найти новое положение точки C , необходимо деформированные стержни свести вместе путем их вращения вокруг шарниров A и B . Точки C_1 и C_2 будут перемещаться по дугам, которые вследствие их малости могут быть приняты за прямые C_1C_3 и C_2C_3 , перпендикулярные к стержням AC и BC . Точка пересечения этих перпендикуляров (точка C_3) и даст положение узла C после деформации. На рис. 1.2, б изображена диаграмма перемещений в большом масштабе.

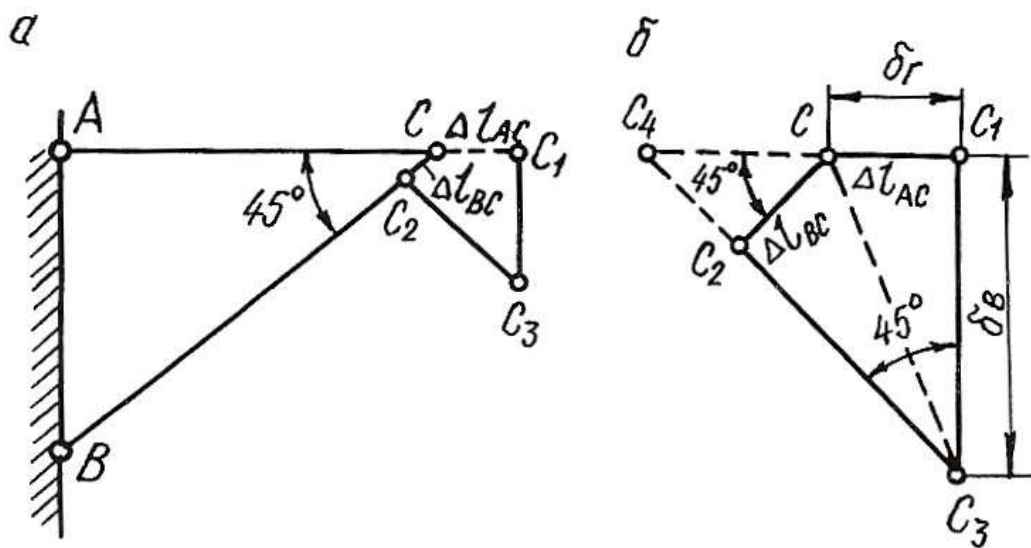


Рис. 1.2.

Горизонтальное перемещение узла C равно $\delta_r = \Delta l_{AC} = 0,71 \text{ мм}$.

Для удобства определения вертикального перемещения произведем дополнительное построение. Продолжим линии C_1C и C_3C_2 до их пересечения в точке C_4 .

Вертикальное перемещение узла C

$$\delta_B = C_1 C_3 = \frac{C_1 C_4}{\operatorname{tg} 45^\circ} = C_1 C_4 = C_1 C + C C_4 = \Delta l_{AC} + \frac{\Delta l_{BC}}{\cos 45^\circ};$$

$$\delta_B = 0,71 + \frac{1,77}{0,707} = 3,21 \text{ мм.}$$

Полное перемещение узла C

$$\delta = C C_3 = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_B^2} = \sqrt{0,71^2 + 3,21^2} = 3,29 \text{ мм.}$$

1.1. Влияние собственного веса на напряжения и перемещения

Если ось в стержне вертикальна, то его собственный вес вызывает центральное растяжение или сжатие. Если вертикальный брус закреплен верхним концом, то от собственного веса он растягивается, а при закреплении нижнего конца – сжимается. Собственный вес вертикального бруса можно рассматривать как продольную (осевую) внешнюю нагрузку, распределенную вдоль оси бруса.

Рассмотрим брус постоянного сечения, закрепленный верхним концом. Продольная сила от собственного веса в поперечном сечении бруса на расстоянии x от его нижнего конца равна весу нижележащей части бруса

$$N_x = \rho g A x, \quad (1.4)$$

где N_x – продольная сила от собственного веса, Н; ρ – плотность материала, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; A – площадь поперечного сечения бруса, м²; x – расстояние от нижнего конца стержня, м.

Напряжение от собственного веса определяется по формуле:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} = \rho g x. \quad (1.5)$$

По формулам (1.4) и (1.5) строятся эпюры N и σ с учетом знаков. Если на стержень действует дополнительная сила F , то продольная сила и нормальное напряжение определяются по формулам:

$$N_x = F + \rho g A x; \quad (1.6)$$

$$\sigma_x = \frac{F}{A} + \rho g x. \quad (1.7)$$

Полное удлинение (укорочение) стержня постоянного сечения от собственного веса определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{\rho g l^2}{2E}, \quad (1.8)$$

где l – длина стержня, м; E – модуль продольной упругости материала, Па.

При действии внешней силы F и собственного веса удлинение стержня определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA} + \frac{\rho gl^2}{2E}. \quad (1.9)$$

В формулах (1.7) и (1.9) физический смысл первого слагаемого – напряжение и удлинение от внешней силы, второго – напряжение и удлинение от собственного веса.

Перемещение любого поперечного сечения бруса, закрепленного верхним концом, равно удлинению части бруса, лежащей над сечением, и равно сумме удлинений под действием собственного веса верхней части, нижней части бруса и внешней силы.

Рассмотрим подробнее решение типовой задачи.

Пример 1.2.

Для стального бруса переменного сечения (рис. 1.3, а) с учетом собственного веса и при продольной нагрузке F требуется:

1. Построить эпюры продольных сил и нормальных напряжений по длине бруса.
2. Найти полное удлинение (укорочение) бруса.
3. Определить перемещение сечения I-I.

Исходные данные: $A = 20 \text{ см}^2$; $a = 1,0 \text{ м}$; $b = 1,5 \text{ м}$; $c = 1,0 \text{ м}$; $F = 40 \text{ кН}$.

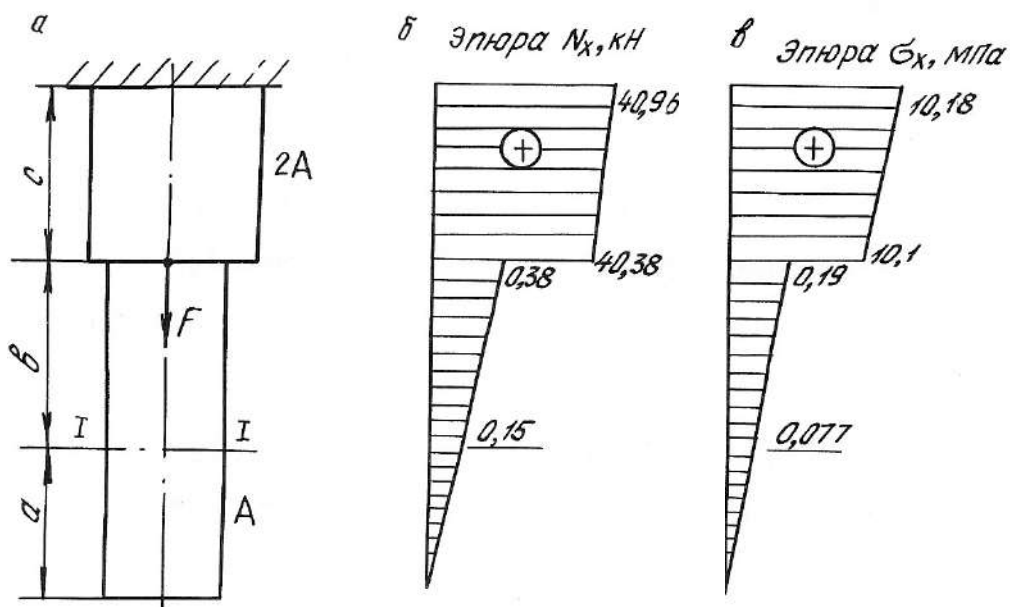


Рис. 1.3.

Решение.

Определим продольную силу и нормальное напряжение в поперечном сечении по формулам (1.6) и (1.7):

а) на участке длиной a (нижний участок): $0 \leq x \leq 1,0$ м;

$$N_x = \rho g A x;$$

$$\sigma_x = \rho g x.$$

При $x = 0$ $N_x = 0,$
 $\sigma_x = 0.$

При $x = 1$ м $N_x = 7850 \cdot 9,81 \cdot 20 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 150 \text{ Н} = 0,15 \text{ кН};$
 $\sigma_x = 7850 \cdot 9,81 \cdot 1 = 80000 \text{ Па} = 0,08 \text{ МПа}.$

б) на участке длиной b (средний участок): $1,0 \leq x \leq 2,5$ м;

$$N_x = Q_a + \rho g A (x - a);$$

$$\sigma_x = \frac{Q_a}{A} + \rho g (x - a);$$

где $Q_a = \rho g A a = 0,15$ кН – вес нижнего участка бруса; для среднего участка он играет роль внешней силы.

При $x = 1,0$ м; $N_x = Q_a = 0,15$ кН;
 $\sigma_x = 0,08$ МПа.

При $x = 2,5$ м; $N_x = 0,15 + 7850 \cdot 9,81 \cdot 20 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,38$ кН;
 $\sigma_x = 0,08 + 7850 \cdot 9,81 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} = 0,19$ МПа.

в) на участке длиной c (верхний участок): $2,5 \leq x \leq 3,5$ м;

$$N_x = Q_a + Q_b + F + \rho g 2A (x - a - b);$$

$$\sigma_x = \frac{Q_a + Q_b + F}{2A} + \rho g (x - a - b),$$

где $Q_b = \rho g A b = 0,23$ кН – вес среднего участка бруса.

При $x = 2,5$ м; $N_x = 0,15 + 0,23 + 40 + 7850 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 40,38$ кН;
 $\sigma_x = 10,1$ МПа.

При $x = 3,5$ м; $N_x = 0,15 + 0,23 + 40 + 7850 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} = 40,96$ кН;
 $\sigma_x = 10,18$ МПа.

Строим эпюры N_x (рис. 1.3, б) и σ_x (рис. 1.3, в).

Определим полное удлинение стержня по формуле (1.9). Полное удлинение складывается из удлинений каждого участка бруса под действием внешних сил и собственного веса.

$$\Delta l = \Delta a + \Delta b + \Delta c ;$$

где $\Delta a = \frac{\rho g a^2}{2E} = \frac{7850 \cdot 9,81 \cdot 1^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}} = 0,19 \cdot 10^{-6} \text{ м};$

$$\Delta b = \frac{Q_a \cdot b}{EA} + \frac{\rho g b^2}{2E} = \frac{0,15 \cdot 10^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 10^{11} \cdot 20 \cdot 10^{-4}} + \frac{7850 \cdot 9,81 \cdot 1,5^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}} =$$

$$= 0,56 \cdot 10^{-6} + 0,43 \cdot 10^{-6} = 0,99 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\Delta c = \frac{(Q_a + Q_b + F)c}{E \cdot 2A} + \frac{\rho g c^2}{2E} = \frac{(0,15 + 0,23 + 40) \cdot 10^3 \cdot 1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 20 \cdot 10^{-4}} + \frac{7850 \cdot 9,81 \cdot 1^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}} =$$

$$= 50,48 \cdot 10^{-6} + 0,19 \cdot 10^{-6} = 50,67 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\Delta l = 0,19 \cdot 10^{-6} + 0,99 \cdot 10^{-6} + 50,67 \cdot 10^{-6} = 51,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Перемещение сечения I-I равно удлинению лежащей над сечением части бруса, т. е.

$$\delta_{I-I} = \Delta c + \Delta b = 0,99 \cdot 10^{-6} + 50,67 \cdot 10^{-6} = 51,66 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

1.2. Напряженное состояние материала в точке

Напряженным состоянием называют совокупность напряжений, действующих по всевозможным площадкам, проведенным через данную точку. В различных точках тела напряженное состояние неоднородно и определить все значения возникающих напряжений затруднительно. В связи с этим в сопротивлении материалов точку рассматривают в виде элементарного параллелепипеда с гранями $dx \cdot dy \cdot dz$. При этом считается, что возникающие напряжения на гранях и в наклонных сечениях распределяются равномерно. Нормальные напряжения на гранях обозначаются: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, а касательные: $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{zy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{zx}$. Двойной индекс при касательных напряжениях указывает на направление и плоскость, где они действуют. Например, индексы при напряжении τ_{xy} означают, что x – направление действия этого напряжения по оси x ; y – это напряжение возникает в плоскости, нормаль к которой параллельна оси y .

Во взаимно перпендикулярных сечениях касательные напряжения равны по величине и противоположны по знаку. Это свойство касательных напряжений называется **законом парности касательных напряжений**

$$-\tau_{xy} = \tau_{yx}.$$

Рассматриваемый параллелепипед в теле стержня можно сориентировать таким образом, что по его граням будут действовать только нормальные напряжения, а касательные будут равны нулю. В этом случае грани будут называться главными площадками, а действующие на них нормальные напряжения – главными напряжениями. По количеству главных напряжений, возникающих одновременно на главных площадках, различают три вида напряженного состояния точки упругого тела: линейное, плоское и объемное. Главные напряжения обозначаются: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Принято считать, что $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Наиболее часто встречается плоское напряженное состояние материала.

Для правильной оценки опасности, угрожающей прочности стержня, необходимо знать полностью его напряженное состояние. Это требует умение вычислять напряжения не только по сечениям, перпендикулярным оси стержня, но и по наклонным сечениям.

Напряжения в наклонных сечениях, нормаль к которым с осью x составляет угол α , определяются по следующим формулам:

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha - \tau_{yx} \sin 2\alpha; \quad (1.10)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{yx} \cos 2\alpha, \quad (1.11)$$

Для сечений, проходящих под углом $\beta = \alpha + 90^\circ$, возникающие напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_\beta = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha; \quad (1.12)$$

$$\tau_\beta = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{yx} \cos 2\alpha, \quad (1.13)$$

Угол α положительный, если он отсчитан в направлении от оси x к оси y по кратчайшему угловому пути, против хода часовой стрелки.

Нормальное напряжение σ_α считается положительным, если его направление совпадает с направлением внешней нормали к наклонной площадке. Положительное направление τ_α образовано поворотом внешней нормали к наклонной площадке на угол 90° по ходу часовой стрелки.

Противоположные направления σ_α и τ_α следует считать отрицательными.

Площадки, где действуют экстремальные нормальные напряжения и нет касательных напряжений, называются главными площадками, а напряжения, действующие на главных площадках – главными напряжениями. Они обозначаются: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ и определяются по следующим формулам:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2} \right]; \quad (1.14)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_2 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2} \right]. \quad (1.15)$$

Положение главных площадок определяется углом наклона α_0

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{-2\tau_{yx}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (1.16)$$

Наибольшие касательные напряжения действуют на площадках под углом 45°

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2}. \quad (1.17)$$

Пример 1.3.

Стальной кубик находится под действием сил, создающих плоское напряженное состояние: $\sigma_x = 80$ МПа; $\alpha = 30^\circ$; $\tau_{xy} = 10$ МПа (рис. 1.4). Требуется найти:

1. Главные напряжения и положение главных площадок.

2. Максимальные касательные напряжения.

3. Определить аналитически величины нормальных σ_α и касательных τ_α напряжений, действующих на площадках, нормаль, к которой составляет угол α с горизонтальной осью x . Показать на чертеже заданный элемент и направления соответствующих напряжений.

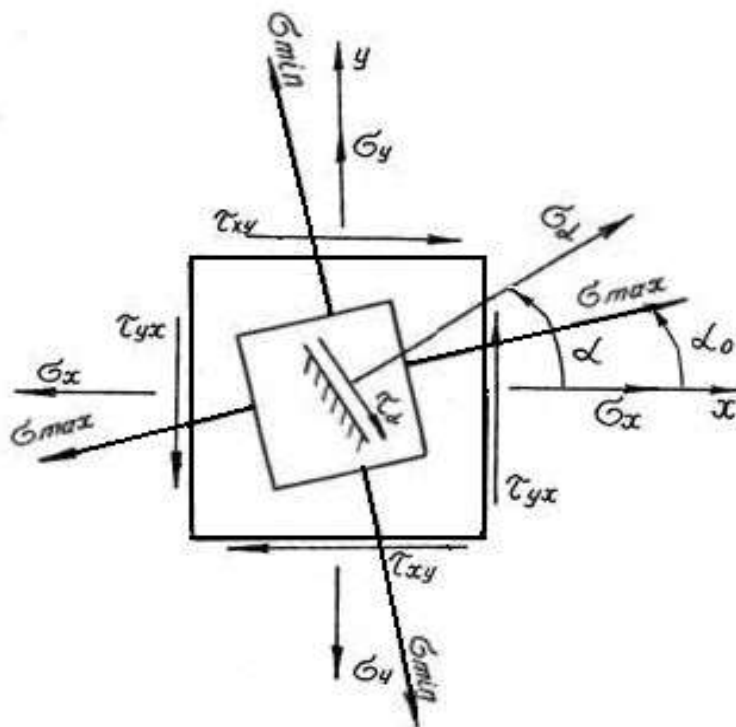


Рис. 1.4.

Решение.

Определим главные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2} \right] = \frac{1}{2} \left[(80 + 20) + \sqrt{(80 - 20)^2 + 4 \cdot 10^2} \right] = \\ = \frac{1}{2} [100 + 63,6] = 81,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2} \right] = \frac{1}{2} \left[(80 + 20) - \sqrt{(80 - 20)^2 + 4 \cdot 10^2} \right] = \\ = \frac{1}{2} [100 - 63,6] = 18,2 \text{ МПа}.$$

Найдем положение главных площадок

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{yx}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{-2 \cdot (-10)}{80 - 20} = 0,333; \quad 2\alpha_0 = 18^\circ 24'; \quad \alpha_0 = 9^\circ 12'.$$

Определим аналитически величины σ_α и τ_α , действующие на площадке, нормаль к которой составляет угол 30° с горизонтальной осью (см. рис. 1.4.)

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha - \tau_{yx} \sin 2\alpha = 80 \cdot 0,866^2 + 20 \cdot 0,5^2 - (-10) \cdot 0,866 = \\ = 73,65 \text{ МПа};$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{yx} \cos 2\alpha = \frac{80 - 20}{2} 0,866 + (-10) \cdot 0,5 = 20,98 \text{ МПа}.$$

Вектор максимальных главных напряжений σ_{\max} всегда проходит через те четверти осей координат, в которых стрелки касательных напряжений сходятся.

1.3. Статически неопределимые стержневые системы

Статически неопределимыми системами называют такие системы, у которых реакции или все внутренние суммарные силовые факторы, возникающие в сечениях их элементов при действии произвольной нагрузки, не могут быть определены из уравнений равновесия статики.

Равновесие плоской стержневой системы обеспечивается тремя опорными направлениями. Всякое закрепление сверх трех опорных направлений является «лишним» с точки зрения равновесия системы, что делает ее *статически неопределимой*. Термин «лишние» является условным. Постановка дополнительных опорных закреплений производится с целью уменьшения деформации, веса конструкции или с целью увеличения ее грузоподъемности.

Расчет статически неопределимой системы начинается с определения степени статической неопределимости системы, которая равна числу «лишних» связей (число неизвестных сил минус три – число уравнений статики для плоской системы).

Определение усилий в статически неопределимой системе связано с необходимостью составления дополнительных уравнений – уравнений совместности деформаций. Число этих уравнений должно быть равно степени статической неопределимости стержневой системы.

Уравнения совместности деформаций устанавливают геометрические зависимости между упругими перемещениями отдельных элементов при соблюдении равновесия всей системы в целом.

Геометрическая схема деформаций должна рассматриваться не с точки зрения обычной геометрии, а на основе кинематики малых перемещений, с учетом того, что траектории отдельных точек элементов являются прямыми линиями.

Решение статически неопределимых систем необходимо производить в следующей последовательности:

1. Заданную систему освободить от наложенных на нее связей, действие которых заменяется реакциями, и составить уравнения статики;
2. Определить степень статической неопределимости системы;
3. По числу «лишних» неизвестных составить дополнительные уравнения из условия совместности деформаций. В уравнениях упругие деформации выразить через усилия по закону Гука в развернутом виде по формуле (1.3);
4. Решить совместно уравнения равновесия статики и дополнительные уравнения, определяя усилия в элементах конструкций;
5. Исходя из условия задачи и на основании условия прочности, определить поперечные размеры стержней.

Рассмотрим подробнее пример расчета статически неопределимой системы.

Пример 1.4.

Для статически неопределимой системы (рис. 1.5), состоящей из жесткой невесомой балки AB и стальных стержней 1 и 2, соединенных с ней шарнирно, требуется:

1. Определить усилия, возникающие в стержне от действия силы F .
2. Подобрать сечение стержней из двух равнобоких уголков, каждое при $A_2 : A_1 = 2$; $F = 180$ кН; $a = 2,0$ м; $b = 1,0$ м; $h = 2,0$ м.

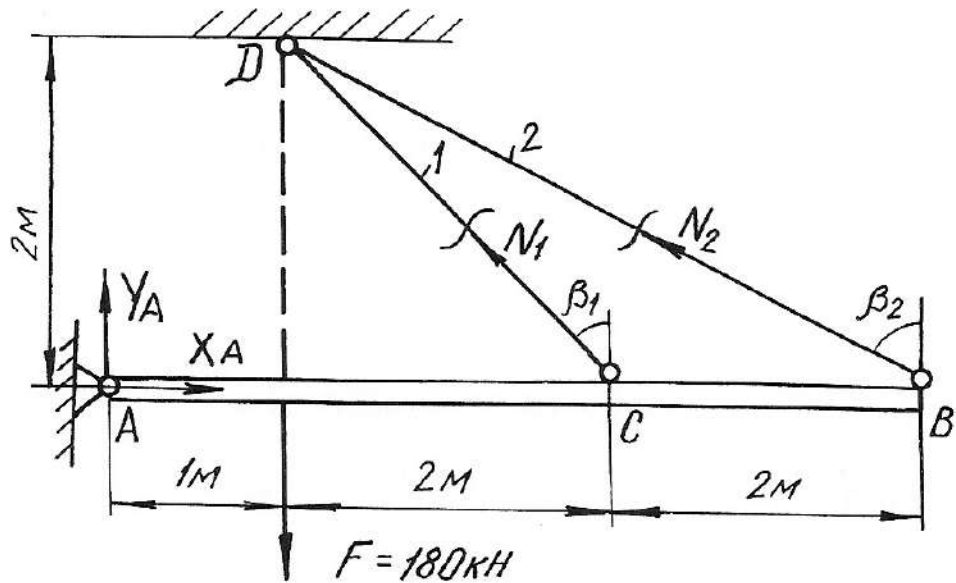


Рис. 1.5.

Решение.

Перед началом решения по приведенному плану определяем геометрические параметры системы

$$l_1 = DC = \sqrt{4 + 4} = 2,83 \text{ м}; \quad \beta_1 = 45^\circ;$$

$$l_2 = DB = \sqrt{4 + 16} = 4,47 \text{ м}; \quad \sin\beta_2 = \frac{4}{4,47} = 0,89;$$

Далее освобождаем брус AB от наложенных связей, заменяя их действие реакциями X_A, Y_A, N_1, N_2 . Так как на балку AB действуют четыре неизвестные силы, то одна связь «лишняя», т. е. задача является однажды статически неопределимой.

Из трех уравнений равновесия достаточно записать только одно уравнение, не содержащее X_A, Y_A , определение которых не ставится в задаче,

$$\sum M_A = 0; \quad -F \cdot 1 + N_1 \cdot \cos\beta_1 \cdot 3 + N_2 \cdot \cos\beta_2 \cdot 5 = 0;$$

$$-180 + N_1 \cdot 0,707 \cdot 3 + N_2 \cdot 0,45 \cdot 5 = 0 \quad (1.18)$$

В уравнении статики два неизвестных, поэтому нужно записать еще одно дополнительное уравнение из условия совместности деформаций стержней DB и DC . Рассматривая геометрическую схему деформаций этих стержней, считаем перемещение точек B и C балки вертикальными (рис. 1.6). Из подобия треугольников ACC_1 и ABB_1 имеем:

$$\frac{AC}{AB} = \frac{CC_1}{BB_1} = \frac{3}{5}.$$

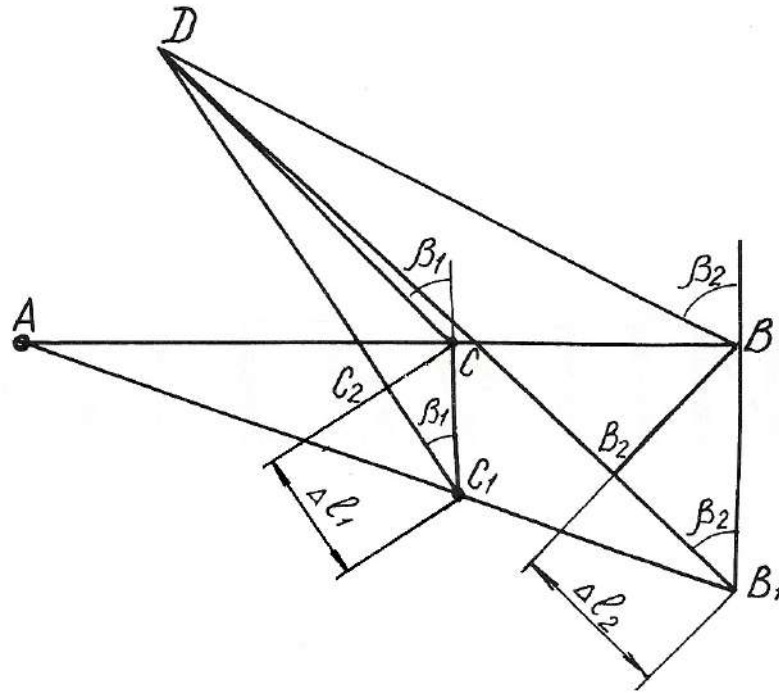


Рис. 1.6.

Учитывая, что

$$\begin{cases} CC_1 = \frac{CC_1}{\cos\beta_1} = \frac{\Delta l_1}{\cos\beta_1}; \\ BB_1 = \frac{B_1B_2}{\cos\beta_2} = \frac{\Delta l_2}{\cos\beta_2}, \end{cases}$$

получим $\frac{\Delta l_1}{\cos\beta_1} = \frac{3}{5} \cdot \frac{\Delta l_2}{\cos\beta_2}$; откуда

$$\Delta l_1 = 0,94 \cdot \Delta l_2. \quad (1.19)$$

Равенство (1.19) и есть условие совместности деформации стержней 1 и 2. Выразим деформации через усилия по закону Гука

$$\Delta l_1 = \frac{N_1 l_1}{EA_1} = \frac{N_1 \cdot 2,83}{EA_1}; \quad \Delta l_2 = \frac{N_2 l_2}{EA_2} = \frac{N_2 \cdot 4,74}{E \cdot 2A_1}.$$

Подставим полученные выражения в формулу (1.19)

$$\frac{N_1 \cdot 2,83}{EA_1} = 0,94 \frac{N_2 \cdot 4,74}{E \cdot 2A_1}.$$

Отсюда получим

$$2,83 \cdot N_1 - 2,10 \cdot N_2 = 0. \quad (1.20)$$

Теперь можно определить усилия N_1 и N_2 , решая совместно систему уравнений (1.18) и (1.20),

$$\begin{cases} 2,12 \cdot N_1 + 2,25 \cdot N_2 - 180 = 0; \\ 2,83 \cdot N_1 - 2,10 \cdot N_2 = 0. \end{cases}$$

Получаем $N_1 = 34,94$ кН; $N_2 = 47,08$ кН.

Подбираем сечение стержней из условий прочности:

$$A_1 \geq \frac{N_1}{\sigma_{adm}} = \frac{34,94 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 2,18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 2,18 \text{ см}^2;$$

$$A_2 \geq \frac{N_2}{\sigma_{adm}} = \frac{47,08 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 2,94 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 2,94 \text{ см}^2.$$

Для площадей задано условие $A_2:A_1 = 2$. Если принять $A_1 = 2,18 \text{ см}^2$, тогда $A_2 = 4,36 \text{ см}^2$. Условие $A_2 \geq 2,94 \text{ см}^2$ выполняется.

Сечение подбираем из двух равнобоких уголков по ГОСТ 8509-93 (табл. П. 3).

Для первого стержня подбираем два уголка №2 (20x20x3 мм) с площадью сечения $1,13 \text{ см}^2$. Для второго стержня принимаем два уголка №4 (40x40x3 мм) с площадью сечения $2,35 \text{ см}^2$.

Полные площади сечений будут равны $A_1 = 2,26 \text{ см}^2$; $A_2 = 4,70 \text{ см}^2$.

Проверим отношение площадей:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{4,70}{2,26} = 2,08.$$

Отклонение $\delta = \frac{2,08 - 2}{2} 100 \% = 3,98 \%$.

Погрешность допустимая.

Пример 1.5. Монтажная задача

Для статически неопределимой системы (рис. 1.7), состоящей из жесткой невесомой балки AB и стальных стержней 1 и 2, соединенных с ней шарнирно, требуется определить дополнительные усилия в стержнях конструкции, если стержень 2 изготовлен короче проектного размера на $\Delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м при $A_2 : A_1 = 2$; $a = 2,0$ м; $b = 1,0$ м; $h = 2,0$ м.

При сборке стержни деформируются: стержень 2 – растянется, стержень 1 – сожмется. В соответствии с этим покажем направления дополнительных усилий N_1' и N_2' (см. рис. 1.7), возникающих после сборки конструкции.

Для определения усилий воспользуемся уравнением статики

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0; \quad & -N_1' \cdot \cos\beta_1 \cdot 3 + N_2' \cdot \cos\beta_2 \cdot 5 = 0; \\ & -2,12N_1' + 2,25N_2' = 0. \end{aligned} \quad (1.21)$$

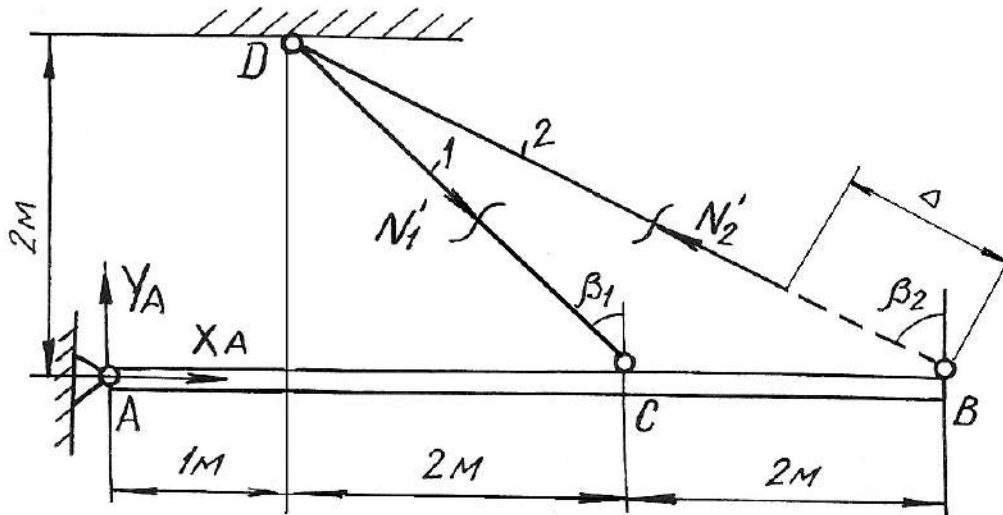


Рис. 1.7.

Уравнение одно, неизвестных два, следовательно, система один раз статически неопределима. Запишем дополнительно условие совместности деформаций. Рассмотрим картину деформаций стержней (см. рис. 1.8). Из подобия треугольников AC_1C и AB_1B получим $\frac{AC}{AB} = \frac{C_1C}{B_1B} = \frac{3}{5}$.

Учитывая соотношение $C_1C = \frac{CC_2}{\cos\beta_1} = \frac{\Delta l_1}{\cos\beta_1}$; $B_1B = \frac{B_2B}{\cos\beta_2} = \frac{\Delta - \Delta l_2}{\cos\beta_2}$,

получаем $\frac{\Delta l_1}{0,707} = \frac{3}{5} \cdot \frac{\Delta - \Delta l_2}{0,45}$; $\Delta l_1 = 0,94(\Delta - \Delta l_2)$. (1.22)

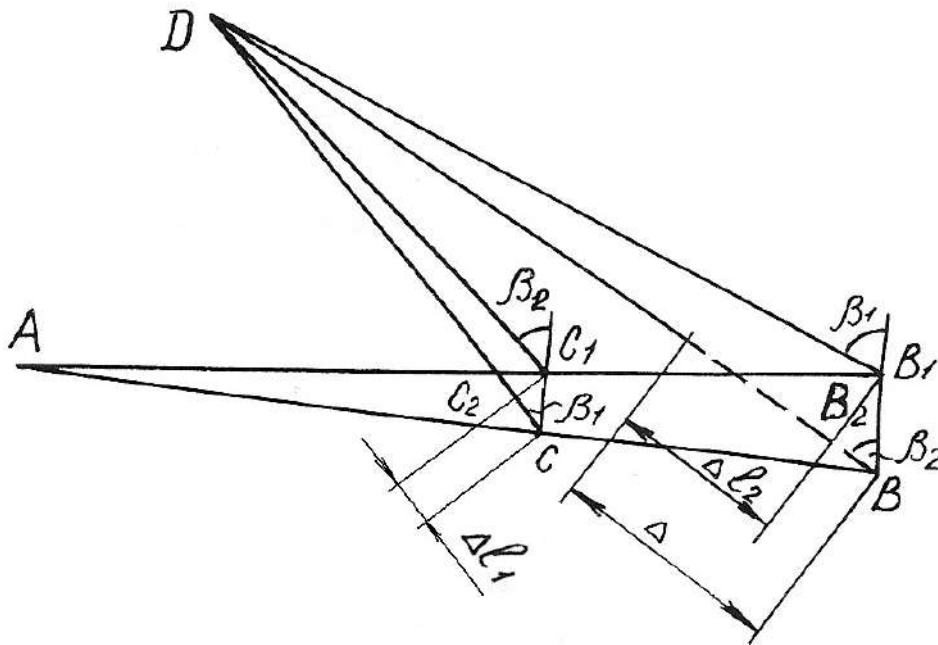


Рис. 1.8.

Выражение (1.22) – условие совместности деформаций стержней 1 и 2. Выражая деформацию через усилия по закону Гука, получим

$$\frac{N_1' l_1}{EA_1} + \frac{0,94 \cdot N_2' l_2}{EA_2} = 0,94 \cdot \Delta$$

или

$$1,25 \cdot N_1' + 0,894 \cdot N_2' = 94 \quad (1.23)$$

Решая совместно систему уравнений (1.21) и (1.23), определяем усилия N_1' и N_2'

$$N_1' = 42,75 \text{ кН}; N_2' = 45,36 \text{ кН}.$$

Пример 1.6.

Стержень длиной $l = 800$ мм, заделанный обоими концами, подвергается действию двух сосредоточенных сил $F_1 = 100$ кН и $F_2 = 150$ кН (рис. 1.9, а). Определить напряжения, возникающие в различных сечениях стержня, и проверить его прочность, если допускаемое напряжение $\sigma_{adm} = 140$ МПа. Площадь поперечного сечения $A = 10 \text{ см}^2$, $l_1 = 200$ мм и $l_2 = 600$ мм.

Решение.

Обозначим реакции в заделках стержня через R_A и R_B . На стержень действует система сил, направленных вдоль одной прямой. Для такой системы статика дает одно уравнение равновесия

$$\sum Y = 0; R_A - F_1 - F_2 + R_B = 0,$$

откуда $R_A + R_B = F_1 + F_2$. (1.24)

Для составления уравнения совместности деформаций мысленно отбросим нижнюю заделку и заменим ее действие на стержень реакцией R_B , т. е. приложим к сечению B (к нижнему торцовому сечению) такую силу, которая оказывает на стержень воздействие, полностью аналогичное воздействию заделки. Таким образом, изображенная система эквивалентна заданной системе и, поскольку в заданной системе перемещение сечения B равно нулю, то и для второй системы (рис. 1.9, б) должно соблюдаться то же условие

$$\delta_B = 0. \quad (1.25)$$

Для определения вида левой части записанного равенства используем принцип независимости действия сил, т. е. вычислим перемещение сечения B как сумму перемещений, вызванных каждой силой F_1 , F_2 и R_B в отдельности

$$\delta_B = \delta_{F_1} + \delta_{F_2} + \delta_{R_B}.$$

Под действием одной лишь силы F_1 деформируется только верхняя часть стержня, нижняя и средняя части перемещаются как твердое тело. Таким образом, перемещение сечения B , вызванное силой F_1 , равно удлинению верхней части стержня

$$\delta_{F_1} = \frac{F_1 l_1}{EA}.$$

Аналогично установим, что перемещение сечения B от действия силы F_2 , равно удлинению верхней и средней частей

$$\delta_{F_2} = \frac{F_2 l_2}{EA}.$$

Наконец, перемещение сечения B от действия силы R_B равно укорочению всего стержня

$$\delta_{R_B} = \frac{R_B l}{EA}.$$

Суммируя полученные величины и приравнявая сумму нулю согласно равенству (1.25), получим уравнение совместности деформаций,

$$\frac{F_1 l_1}{EA} + \frac{F_2 l_2}{EA} - \frac{R_B l}{EA} = 0,$$

откуда
$$R_B = \frac{F_1 l_1 + F_2 l_2}{l} = \frac{100 \cdot 0,2 + 150 \cdot 0,6}{0,8} = 137,5 \text{ кН.}$$

Подставив значение реакции R_B в уравнение равновесия (1.24), определим значение реакции в точке A :

$$\begin{aligned} R_A = F_1 + F_2 - R_B &= F_1 + F_2 - \frac{F_1 l_1 + F_2 l_2}{l} = \frac{(F_1 + F_2)l - (F_1 l_1 + F_2 l_2)}{l} = \\ &= \frac{(100 + 150) \cdot 0,8 - (100 \cdot 0,2 + 150 \cdot 0,6)}{0,8} = 112,5 \text{ кН.} \end{aligned}$$

На рис. 1.9, в приведена эпюра продольных сил, в соответствии с которой определяем напряжения на различных участках стержня.

В поперечных сечениях верхней части стержня

$$\sigma^{(1)} = \frac{N_1}{A} = \frac{112,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = 112,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 112,5 \text{ МПа};$$

в поперечных сечениях средней части

$$\sigma^{(2)} = \frac{N_2}{A} = \frac{12,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = 12,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 12,5 \text{ МПа},$$

а в нижней части

$$\sigma^{(3)} = \frac{N_3}{A} = -\frac{137,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = -137,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = -137,5 \text{ МПа.}$$

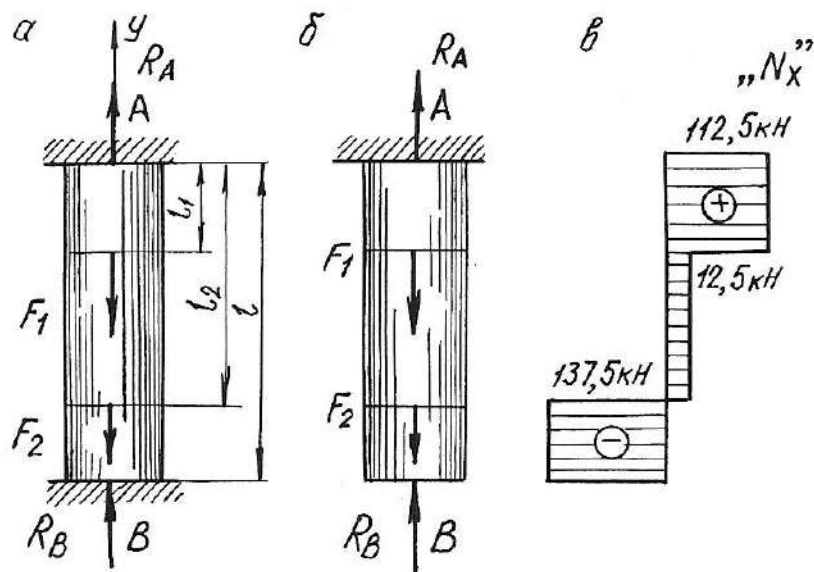


Рис. 1.9.

Наиболее напряженными, как видно из расчетов, являются поперечные сечения нижней части стержня. Это напряжение используем для проверки стержня на прочность:

$$|\sigma^{(3)}| = 137,5 \text{ МПа} < \sigma_{\text{adm}} = 140 \text{ МПа},$$

т. е. условие прочности выполняется.

Пример 1.7. Температурная задача

Определить допускаемое повышение температуры составного стержня (рис. 1.10.) из условия, чтобы напряжения сжатия не превышали в стальной части $\sigma_c = 120$ МПа, в медной $\sigma_M = 60$ МПа и в алюминиевой $\sigma_a = 70$ МПа. (линейные размеры на рисунке приведены в мм).

Решение.

Площади поперечных сечений ступеней стержня

$$A_M = \frac{\pi(50 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1963 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$A_a = \frac{\pi(40 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1257 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$A_c = \frac{\pi(30 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 707 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

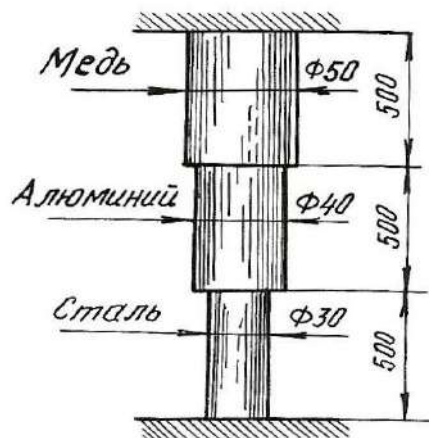


Рис. 1.10.

Продольные силы, при которых напряжения в ступенях будут равны заданным величинам, должны быть следующими:

$$N_M = A_M \cdot \sigma_M = 1963 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 10^6 = 118000 \text{ Н} = 118 \text{ кН};$$

$$N_a = A_a \cdot \sigma_a = 1257 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot 10^6 = 88000 \text{ Н} = 88 \text{ кН};$$

$$N_c = A_c \cdot \sigma_c = 707 \cdot 10^{-6} \cdot 120 \cdot 10^6 = 84800 \text{ Н} = 84,8 \text{ кН}.$$

Величина продольной силы не одинакова для всего стержня, следовательно, в качестве допускаемой продольной силы должно быть принято меньшее из трех полученных значений, а именно $N = N_c = 84,8 \text{ кН}$.

Длина стержня в результате заземления обоих концов остается при изменении температуры неизменной. Следовательно, удлинение стержня в результате повышения температуры должно равняться полученному упругому укорочению

$$\Delta l_t = \Delta l = l_M \alpha_M \Delta t + l_a \alpha_a \Delta t + l_c \alpha_c \Delta t = l(\alpha_M + \alpha_a + \alpha_c) \Delta t,$$

где $\alpha_M, \alpha_a, \alpha_c$ – соответствующие коэффициенты теплового линейного расширения.

$$\Delta l = \Delta l_M = \Delta l_a = \Delta l_c = \frac{N l_M}{E_M A_M} + \frac{N l_a}{E_a A_a} + \frac{N l_c}{E_c A_c} = N l \left(\frac{1}{E_M A_M} + \frac{1}{E_a A_a} + \frac{1}{E_c A_c} \right);$$

$$l(\alpha_M + \alpha_a + \alpha_c) \Delta t = N l \left(\frac{1}{E_M A_M} + \frac{1}{E_a A_a} + \frac{1}{E_c A_c} \right),$$

$$\text{откуда } \Delta t = \frac{N \left(\frac{1}{E_M A_M} + \frac{1}{E_a A_a} + \frac{1}{E_c A_c} \right)}{\alpha_M + \alpha_a + \alpha_c}.$$

Подставим численные значения величин и произведем вычисления

$$\Delta t = \frac{84800 \left[\frac{1}{1 \cdot 10^{11} \cdot 1963 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{0,7 \cdot 10^{11} \cdot 1257 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 707 \cdot 10^{-6}} \right]}{16,5 \cdot 10^{-6} + 25 \cdot 10^{-6} + 12,5 \cdot 10^{-6}} = 36^\circ.$$

Далее определим напряжения в поперечных сечениях стержня при повышении температуры на 36°

$$\sigma_M = -\frac{N}{A_M} = -\frac{84800}{1963 \cdot 10^{-6}} = -43 \cdot 10^6 \text{ Па} = -43 \text{ МПа},$$

$$\sigma_a = -\frac{N}{A_a} = -\frac{84800}{1257 \cdot 10^{-6}} = -67,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = -67,5 \text{ МПа},$$

$$\sigma_c = -120 \text{ МПа}.$$

1.4. Задания для расчетов стержней с учетом собственного веса

Для стального бруса с учетом собственного веса и при продольной нагрузке F (табл. 1.1.) требуется по указанной схеме (табл. 1.2.):

1. Построить эпюры продольных сил и нормальных напряжений по длине бруса.

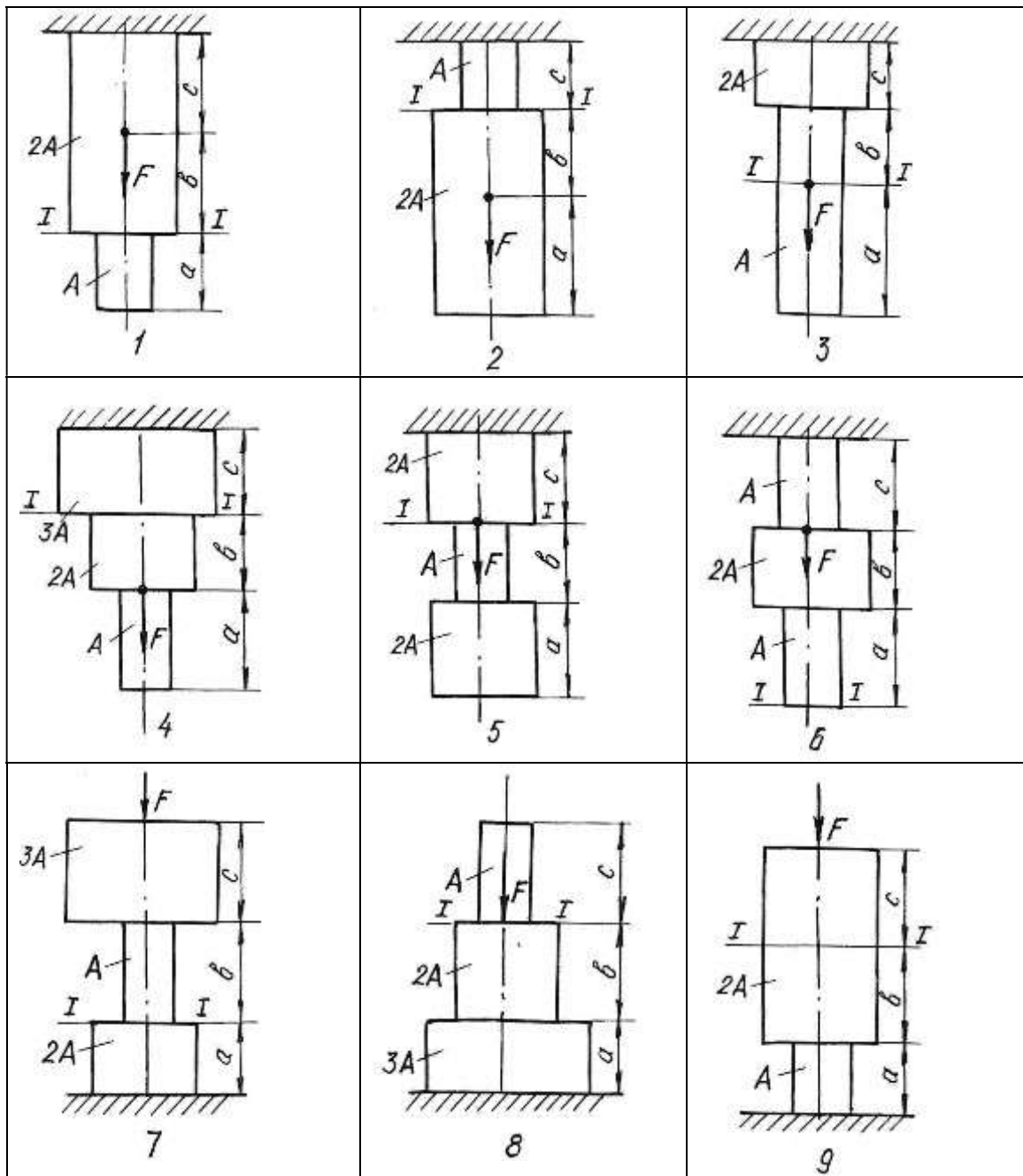
2. Найти полное удлинение (укорочение) бруса для геометрических размеров, приведенных в табл. 1.1. Плотность стали $\rho=7850 \text{ кг/см}^3$; ускорение силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

3. Определить перемещение сечений I-I.

Таблица 1.1

Номер варианта	a , м	b , м	c , м	F , кН	A , см ²
1	1,5	1,0	2,0	30	20
2	1,0	1,5	2,0	40	30
3	2,0	1,0	2,0	50	40
4	2,0	1,0	1,5	60	18
5	2,0	1,5	1,5	20	24
6	1,5	1,0	2,0	40	28
7	1,5	1,0	1,0	50	30
8	1,0	1,5	2,0	50	32
9	1,5	1,0	1,5	60	12
10	2,0	1,0	1,5	70	14
11	1,0	2,0	1,0	20	15
12	2,0	2,0	1,0	40	18
13	1,0	1,5	1,0	30	20
14	1,4	1,0	1,0	40	24
15	1,0	3,0	1,0	50	28
16	1,0	2,0	1,0	40	30
17	1,2	1,0	2,4	70	32
18	2,0	1,5	2,0	60	20
19	2,6	1,0	1,7	60	18
20	2,0	1,0	1,5	50	22
21	1,5	1,8	1,4	40	15
22	2,0	1,0	1,4	30	16
23	1,2	1,2	1,2	20	20
24	1,5	1,0	2,0	10	16
25	1,4	2,0	1,0	40	18

Расчетные схемы бруса



1.5. Задания для определения напряжений при плоском напряженном состоянии

Стальной кубик находится под действием сил, создающих плоское напряженное состояние (рис. 1.11.). Показать на рисунке элемент и направления напряжений в соответствии с вариантом задания.

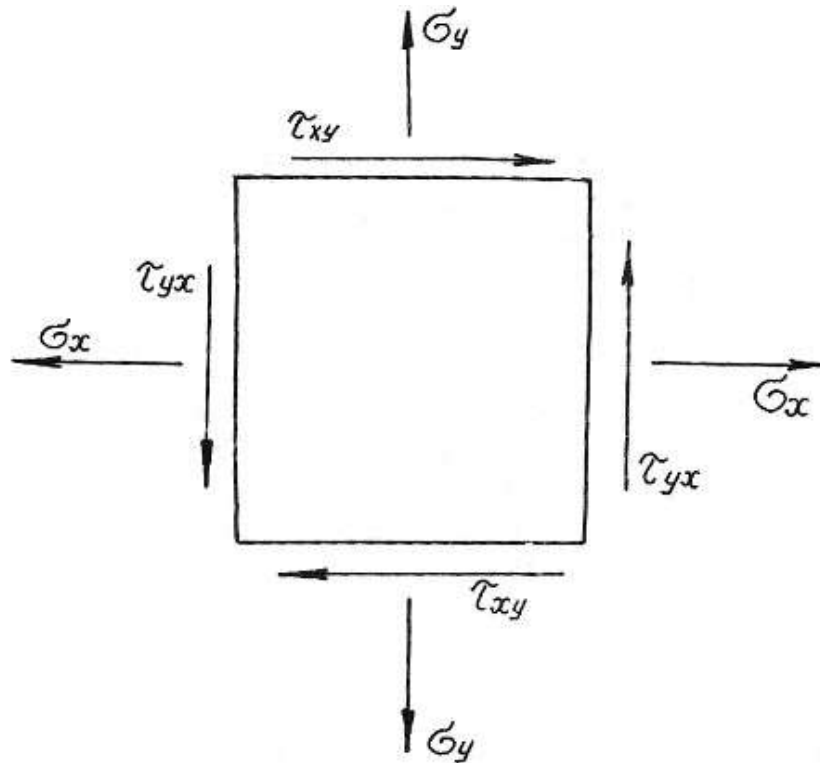


Рис. 1.11.

Требуется найти:

1. Главные напряжения и положение главных площадок.
2. Максимальные касательные напряжения.
3. Определить аналитически величины нормальных σ_α и касательных напряжений τ_α , действующих на площадках, нормаль к которым составляет угол α с горизонтальной осью x .

Данные приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Номер варианта	σ_x , МПа	σ_y , МПа	τ_{xy} , МПа	α , град
1	40,0	-20,0	-10,0	30
2	12,0	10,0	-80,0	-45
3	-10,0	-14,0	-12,0	15
4	15,0	12,0	90,0	30
5	20,0	-40,0	80,0	15
6	-12,0	10,0	-80,0	45
7	20,0	-2,0	10,0	-30
8	80,0	10,0	-60,0	45
9	12,0	14,0	10,0	30
10	-14,0	-10,0	50,0	15
11	20,0	10,0	-80,0	-45
12	30,0	-50,0	-10,0	60
13	-25,0	10,0	50,0	15
14	16,0	80,0	10,0	30
15	18,0	-10,0	10,0	-30
16	22,0	12,0	-90,0	45
17	-16,0	-12,0	10,0	20
18	10,0	80,0	-60,0	-20
19	25,0	-25,0	10,0	30
20	-10,0	10,0	60,0	60
21	12,0	10,0	-60,0	20
22	18,0	-10,0	-12,0	45
23	-40,0	30,0	20,0	30
24	50,0	-60,0	10,0	-30
25	45,0	35,0	15,0	-45

1.6. Задания для расчета статически неопределимых стержневых систем

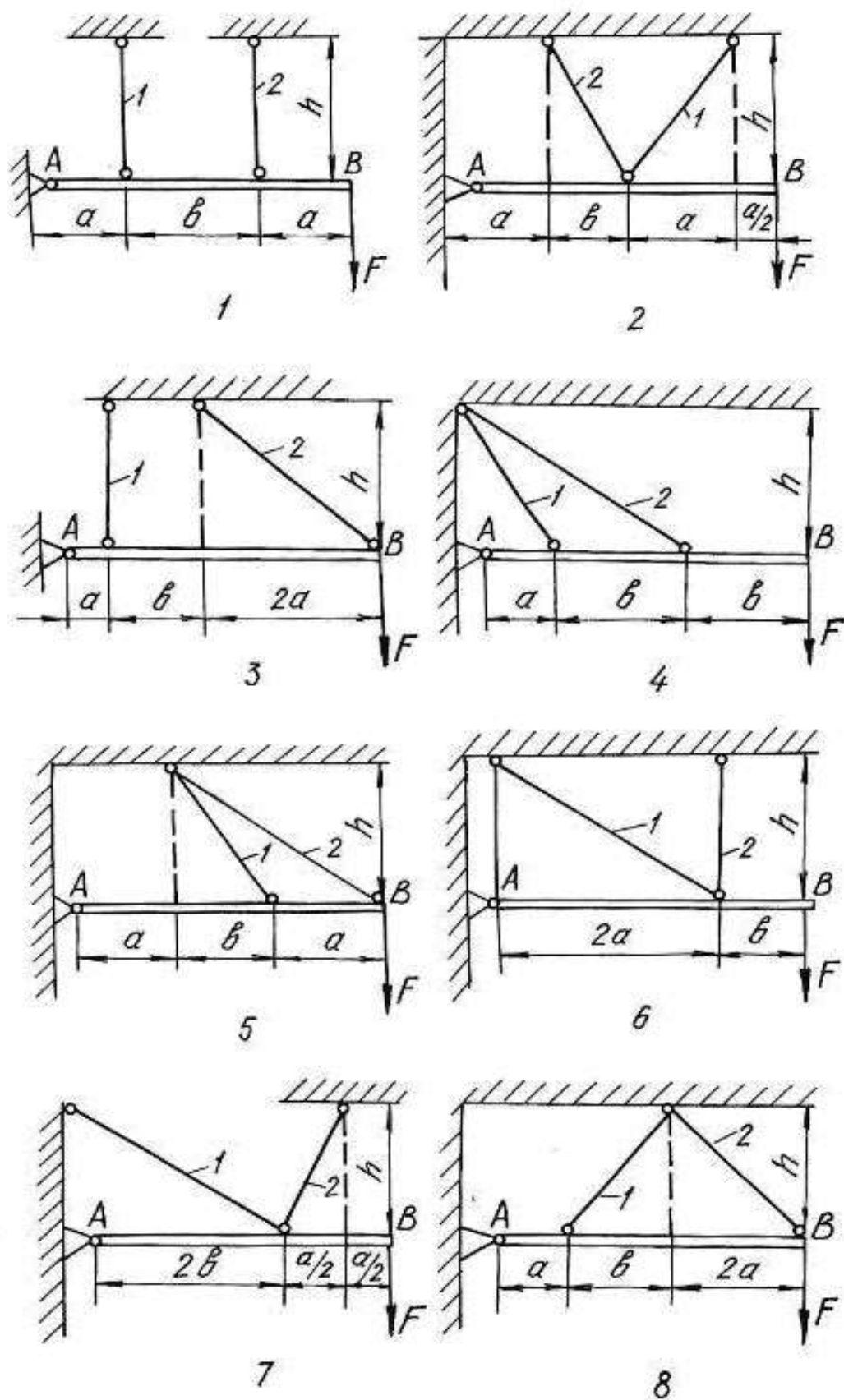
Для статически неопределимой системы, состоящей из жесткой невесомой балки и стальных стержней 1 и 2, соединенных с ней шарнирно (табл.1.4), требуется:

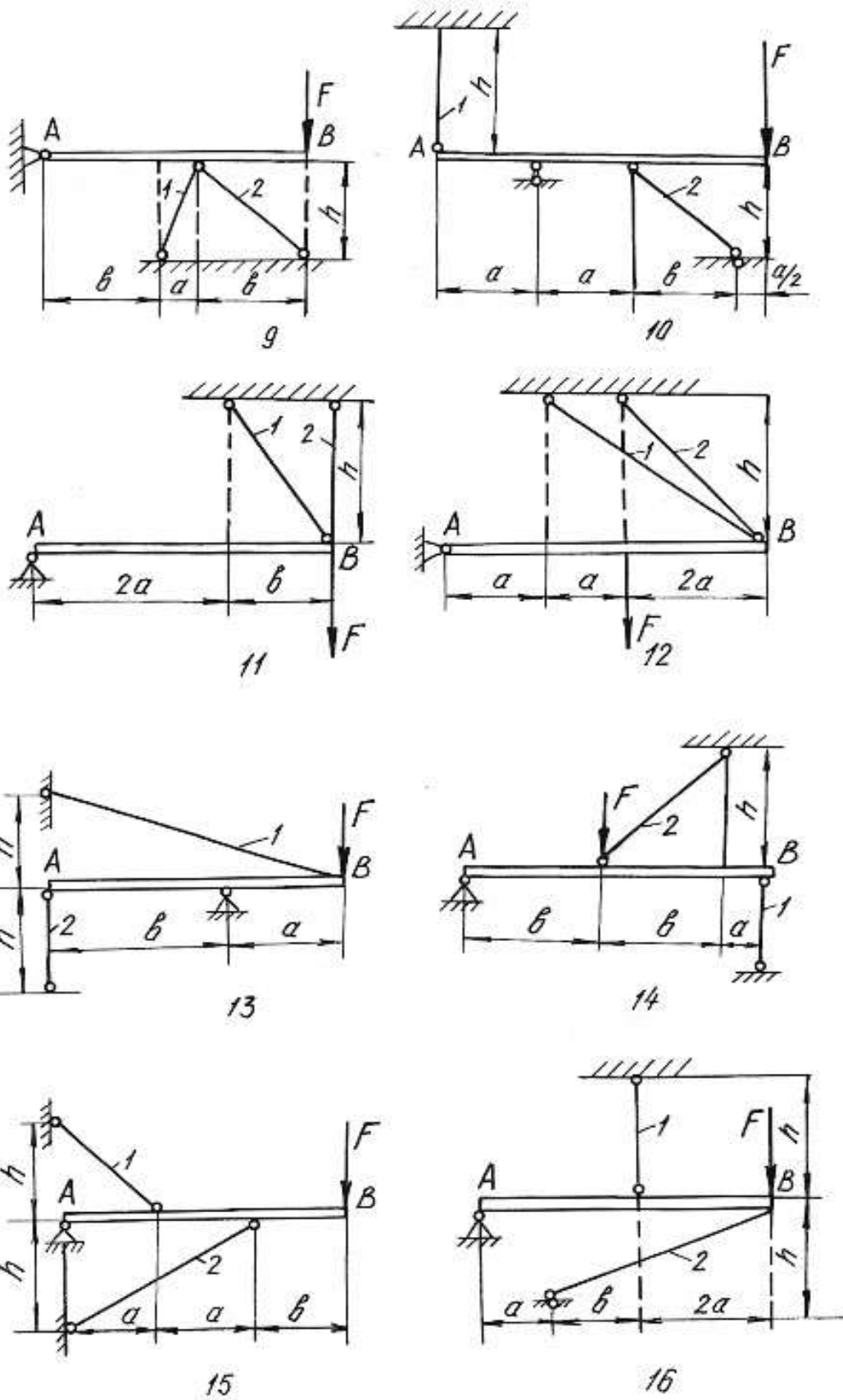
1. Определить усилия, возникающие в стержнях от действия нагрузки F ;
2. Подобрать сечение стержней из двух равнобоких уголков каждое по ГОСТ 8509-93 (см. табл. П. 3).
3. Определить дополнительные усилия в стержнях конструкции, если стержень 2 изготовлен короче проектного размера на $\Delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

При расчетах принять $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_{adm} = 160$ МПа, остальные данные приведены в табл. 1.4. Расчетные схемы приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.4

Номер варианта	a , м	b , м	h , м	$A_2 : A_1$	F , кН
1	2,0	1,4	1,8	2,0	80
2	2,2	1,6	2,0	1,5	120
3	2,6	1,8	2,2	1,2	150
4	2,5	1,1	1,5	1,0	180
5	1,8	1,0	1,2	1,5	100
6	2,0	1,0	1,5	2,0	240
7	2,4	1,4	1,6	1,8	140
8	2,8	1,6	2,	2,0	120
9	1,6	1,2	1,5	1,5	100
10	2,4	1,4	1,6	1,8	180
11	3,0	2,0	2,0	1,5	260
12	2,4	1,8	2,2	2,0	320
13	1,8	1,4	1,2	1,5	400
14	2,0	1,5	1,3	1,2	360
15	1,5	1,5	2,0	1,5	400
16	1,0	0,9	1,5	1,1	340
17	1,1	1,3	1,8	1,8	250
18	1,5	1,2	2,0	2,0	120
19	0,9	0,6	3,0	1,4	170
20	0,8	0,7	2,3	1,6	210
21	1,2	1,7	1,3	1,3	200
22	1,3	1,4	0,8	1,7	90
23	2,0	2,0	2,0	0,9	110
24	2,0	1,1	1,0	0,8	130
25	1,5	1,6	0,8	0,7	280





Глава 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

Моментами инерции являются геометрические характеристики, отражающие заполнение веществом плоского поперечного сечения балки. Значения моментов инерции для стандартных поперечных сечений можно найти в любой литературе, список которой приведен в конце настоящего пособия. Моменты инерции относительно собственных осей простых фигур определяются по известным формулам.

Для прямоугольника

$$J_x = \frac{bh^3}{12}; \quad J_y = \frac{hb^3}{12}; \quad J_{xy} = 0, \quad (2.1)$$

где x, y – горизонтальная и вертикальная оси, проходящие через центр тяжести прямоугольника; b – ширина; h – высота прямоугольника.

Для круга

$$J_x = J_y = \frac{\pi d^4}{64}; \quad J_{xy} = 0. \quad (2.2)$$

Для треугольника

$$J_x = \frac{bh^3}{36}; \quad J_y = \frac{hb^3}{36}; \quad J_{xy} = \pm \frac{b^2h^2}{72}. \quad (2.3)$$

При этом знак центробежного момента определяется следующим образом. Треугольник вычерчивается в масштабе, через его центр проводятся оси, которые делят треугольник на четыре четверти. В первой и третьей четвертях площадь положительна, в остальных – отрицательна. Если суммарная положительная площадь будет по размеру больше отрицательной, то знак центробежного момента будет тоже положительный и наоборот.

Осевые моменты инерции прокатных профилей выписываются из таблицы (сортамента проката) в соответствии с номером профиля. Для равнополочных уголков центробежный момент относительно горизонтальной и вертикальной осей определяется по формуле:

$$J_{xy} = \left(J_{x_0} - J_{y_0} \right) \frac{\sin 2\alpha}{2} + J_{x_0 y_0} \cos 2\alpha, \quad (2.4)$$

где x_0, y_0 – оси, проходящие через центр тяжести уголка под углом 45° к горизонтальной и вертикальной осям уголка.

При этом нужно помнить, что угол поворота осей xu относительно осей x_0y_0 будет отрицательным. Если уголок неравнополочный, то его условно разбивают на два прямоугольника, находят их центры тяжести, и центробежный

момент относительно собственных осей всего уголка определяют по формуле центробежных моментов инерции относительно параллельных осей.

Для составного сечения необходимо определять положение центра тяжести, разбив его на простейшие части (прямоугольник, круг, треугольник, двутавр, швеллер, уголок). Формулы для определения центра тяжести имеют вид:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum S_{x_{вр}}}{\sum A} = \frac{(A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n)}{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}; \\ y_c &= \frac{\sum S_{y_{вр}}}{\sum A} = \frac{(A_1y_1 + A_2y_2 + \dots + A_ny_n)}{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $S_{y_{вр}}$, $S_{x_{вр}}$ – статические моменты площадей простых фигур относительно временных осей; A_1, A_2, \dots, A_n – площади простых фигур; x_n, y_n – координаты центров тяжести простых фигур во временных осях.

Главными моментами инерции плоской фигуры (сечения) называют моменты инерции, определяемые относительно главных центральных осей сечения. Такие оси должны отвечать следующим требованиям:

- 1) они проходят через центр тяжести сечения;
- 2) относительно этих осей наблюдаются экстремальные значения моментов инерции (главные моменты инерции);
- 3) центробежный момент инерции относительно главных осей равен нулю.

В формулы напряжений, содержащие моменты инерции, необходимо всегда подставлять значения главных моментов инерции. Определение главных моментов инерции проводится в следующем порядке.

1. Заданное поперечное сечение сложной конфигурации вычерчивается в выбранном масштабе с указанием всех размеров.

2. Сечение условно разбивается на простейшие фигуры (прямоугольник, круг, треугольник, двутавр, швеллер, уголок).

3. Определяется положение центра тяжести площадки каждой простой фигуры и из этих центров проводятся собственные оси координат.

4. Для всей фигуры сечения проводятся временные (вспомогательные) оси координат ($x_{вр}, y_{вр}$) параллельно собственным осям отдельных фигур (желательно, чтобы временные оси проходили через центры тяжести простых фигур, что ведет к уменьшению объема вычислений).

5. Определяются координаты центра тяжести площади всего сечения по формулам (2.5).

6. Центр тяжести сечения наносится на чертеж, и из него проводятся опорные оси координат (x_c, y_c) параллельно временным осям.

7. Определяются осевые и центробежные моменты инерции сечения относительно опорных осей. При этом используют формулы для определения моментов инерции относительно параллельных осей:

$$\begin{aligned} J_{x_c} &= \left(J_{x_1} + A_1 a_1^2 \right)^I + \left(J_{x_2} + A_2 a_2^2 \right)^{II} + \dots + \left(J_{x_n} + A_n a_n^2 \right)^n; \\ J_{y_c} &= \left(J_{y_1} + A_1 b_1^2 \right)^I + \left(J_{y_2} + A_2 b_2^2 \right)^{II} + \dots + \left(J_{y_n} + A_n b_n^2 \right)^n; \\ J_{x_c y_c} &= \left(J_{x_1 y_1} + A_1 a_1 b_1 \right)^I + \left(J_{x_2 y_2} + A_2 a_2 b_2 \right)^{II} + \dots + \left(J_{x_n y_n} + A_n a_n b_n \right)^n, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $J_{x_1}, J_{x_2}, \dots, J_{x_n}$ и $J_{y_1}, J_{y_2}, \dots, J_{y_n}$ – моменты инерции простых фигур относительно собственных осей; $J_{x_1 y_1}, J_{x_2 y_2}, \dots, J_{x_n y_n}$ – центробежные моменты инерции простых фигур относительно собственных осей; a_1, a_2, \dots, a_n – расстояния между собственными осями x_1, x_2, \dots, x_n простых фигур и центральной осью x_c ; b_1, b_2, \dots, b_n – расстояния между собственными осями y_1, y_2, \dots, y_n простых фигур и центральной осью y_c (с учетом знаков).

8. Определяется положение главных осей инерции по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot J_{x_c y_c}}{J_{y_c} - J_{x_c}}. \quad (2.7)$$

Положительным считается угол α_0 , откладываемый против хода часовой стрелки.

9. Проводятся главные оси на чертеже под углом α_0 по отношению к центральным осям.

10. Определяются главные моменты инерции по формулам:

$$\begin{aligned} J_{x_0} &= J_{x_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{y_c} \sin^2 \alpha_0 - J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0; \\ J_{y_0} &= J_{x_c} \sin^2 \alpha_0 + J_{y_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

или

$$J_{\max/\min} = \frac{J_{x_c} + J_{y_c}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(J_{x_c} - J_{y_c} \right)^2 + 4 \cdot J_{x_c y_c}^2}. \quad (2.9)$$

11. Проводится проверка правильности решения задачи в двух вариантах:

а) суммы главных моментов инерции и моментов инерции относительно центральных осей должны быть равны

$$J_{x_0} + J_{y_0} = \left(J_{x_c} + J_{y_c} \right) \pm 5\%; \quad (2.10)$$

б) центробежный момент инерции относительно главных осей должен быть равен нулю

$$J_{x_0y_0} = \frac{J_{x_c} - J_{y_c}}{2} \sin 2\alpha_0 + J_{x_c y_c} \cos 2\alpha_0 = 0. \quad (2.11)$$

Пример 2.1.

Для заданного поперечного сечения, состоящего из швеллера и равнополочного уголка (рис. 2.1), требуется:

- 1) определить положение центра тяжести;
- 2) найти осевые и центробежный моменты инерции относительно осей, проходящих через центр тяжести;
- 3) определить направления главных центральных осей x_0 и y_0 ;
- 4) найти моменты инерции относительно главных центральных осей;
- 5) вычертить сечение в масштабе 1:2 и указать на нем все размеры в числах и все оси.

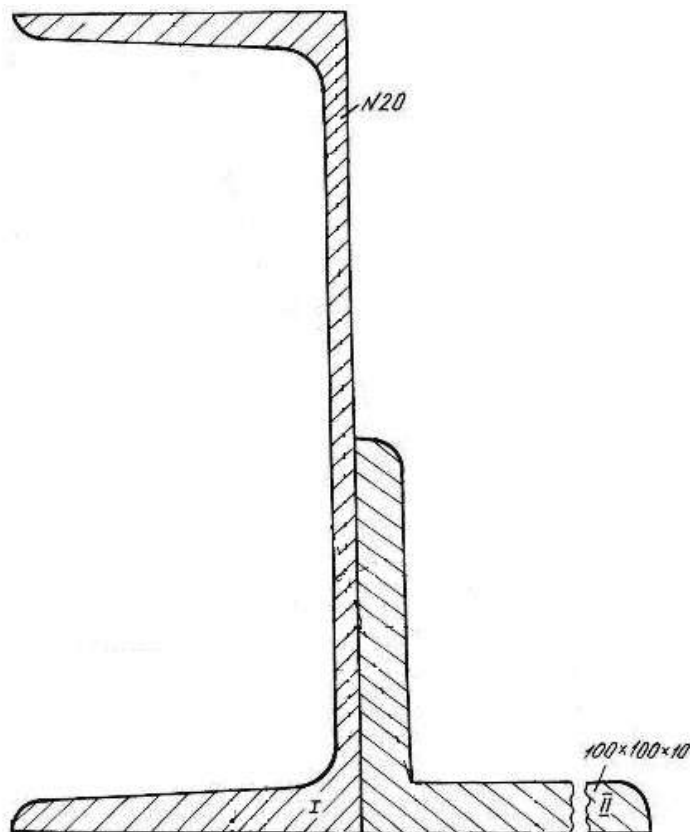


Рис. 2.1.

Решение.

1. Проводим временные оси $x_{вр}$ и $y_{вр}$ через левый нижний угол сечения (рис. 2.2) и разбиваем сечение на две фигуры: швеллер I и уголок II.

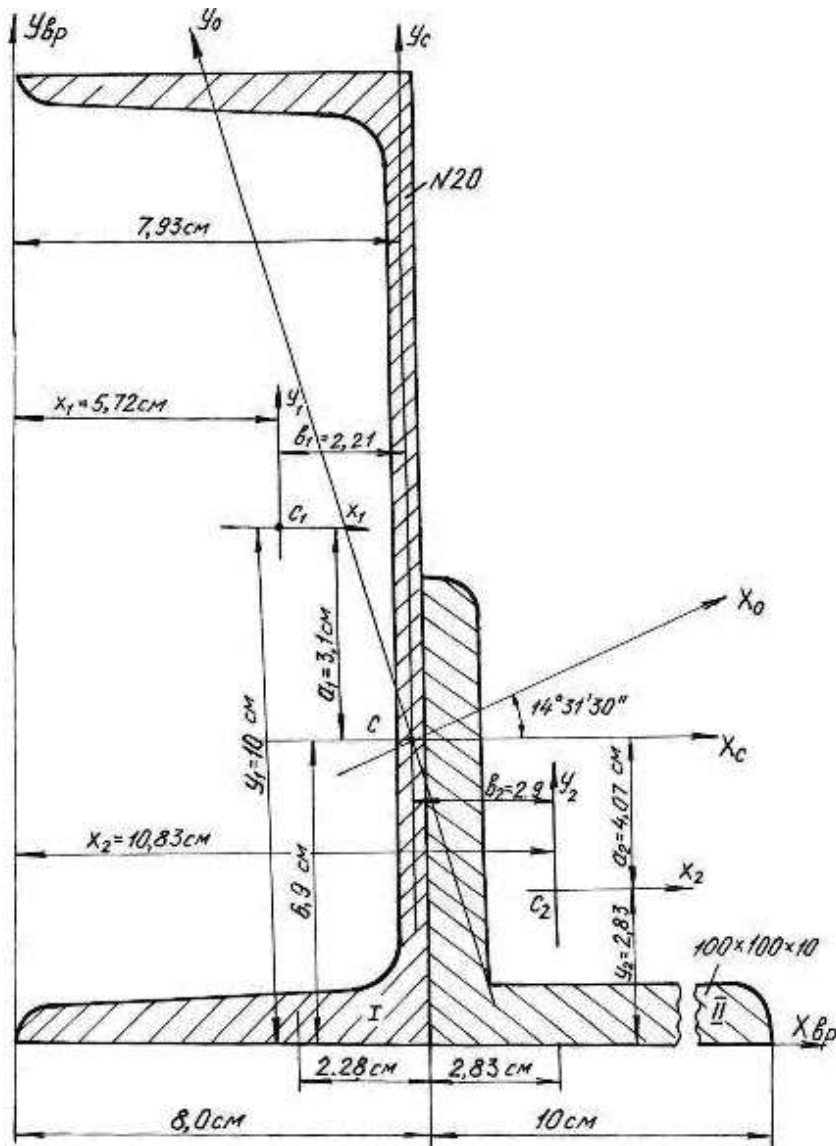


Рис. 2.2.

Основные данные фигур выписываем из таблиц сортамента проката.

Швеллер № 20а: $A_1 = 25,2 \text{ см}^2$, $Z_0 = 2,28 \text{ см}$, $J_{x_1} = 1670 \text{ см}^4$, $J_{y_1} = 139 \text{ см}^4$.

Уголок 100×100×10 мм: $A_2 = 19,2 \text{ см}^2$, $Z_0 = 2,83 \text{ см}$, $J_{x_0} = 284 \text{ см}^4$,

$J_{y_0} = 74,1 \text{ см}^4$, $J_{x_2} = J_{y_2} = 179 \text{ см}^4$ (рис. 2.3).

Координаты центра тяжести сечения

$$x_c = \frac{(A_1 x_1 + A_2 x_2)}{(A_1 + A_2)} = \frac{25,2 \cdot 5,72 + 19,2 \cdot 10,83}{25,2 + 19,2} = 7,93 \text{ см};$$

$$y_c = \frac{(A_1 y_1 + A_2 y_2)}{(A_1 + A_2)} = \frac{25,2 \cdot 10 + 19,2 \cdot 2,83}{25,2 + 19,2} = 6,9 \text{ см};$$

где A_1, A_2 – площади поперечного сечения первой и второй фигур; x_1, x_2, y_1, y_2 – координаты центров тяжести фигур относительно временных осей.

По значениям координат центра тяжести фигуры наносим точку C (см. рис. 2.2.) и проводим центральные оси x_c и y_c параллельно временным осям.

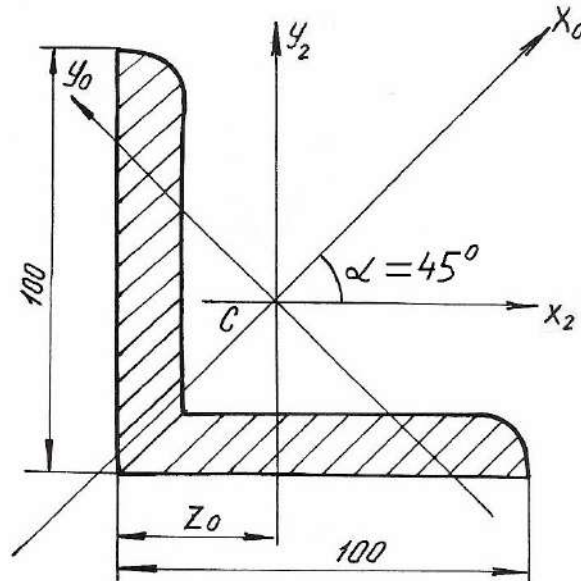


Рис. 2.3.

2. Вычисляем осевые моменты инерции относительно центральных опорных осей

$$J_{x_c} = (J_{x_c})^I + (J_{x_c})^{II} = (J_{x_1} + A_1 a_1^2) + (J_{x_2} + A_2 a_2^2) = \\ = [1670 + 25,2(3,1)^2] + [179 + 19,2(-4,07)^2] = 2409 \text{ см}^4;$$

$$J_{y_c} = (J_{y_c})^I + (J_{y_c})^{II} = (J_{y_1} + A_1 b_1^2) + (J_{y_2} + A_2 b_2^2) = \\ = [139 + 25,2(-2,21)^2] + [179 + 19,2(2,9)^2] = 603 \text{ см}^4.$$

3. Вычисляем центробежный момент инерции сечения относительно осей x_c и y_c . Центробежный момент швеллера относительно собственных осей равен 0, так как его оси проходят через центр тяжести и одна из них является осью симметрии.

Для уголка собственные центральные оси, т. е. оси x_2 и y_2 не являются главными, поэтому центробежный момент уголка в этой системе координат не равен 0. Вычислим его.

Из таблиц сортамента

$$J_{x_0} = 284 \text{ см}^4; \quad J_{y_0} = 74,1 \text{ см}^4;$$

$$J_{x_2y_2} = \frac{(J_{x_0} - J_{y_0})}{2} \sin 2\alpha + J_{x_0y_0} \cos 2\alpha = \frac{284 - 74,1}{2} (-1) + 0 = -104,95 \text{ см}^4.$$

Угол α отрицателен, так как поворот осей x_0 , y_0 направлен по ходу часовой стрелки.

$$\begin{aligned} J_{x_c y_c} &= (J_{x_c y_c})^I + (J_{x_c y_c})^{II} = (J_{x_1 y_1} + A_1 a_1 b_1) + (J_{x_2 y_2} + A_2 a_2 b_2) = \\ &= [0 + 25,2(3,1)(-2,21)] + [-104,95 + 19,2(-4,07)(2,90)] = \\ &= -172,0 - 104,95 - 225 = -501,95 \text{ см}^4. \end{aligned}$$

Угол поворота главных осей инерции

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2J_{x_c y_c}}{(J_{y_c} - J_{x_c})} = \frac{2(-501,95)}{(603 - 2409)} = 0,555, \quad 2\alpha_0 = 29^\circ 03', \quad \alpha_0 = 14^\circ 31' 30''.$$

4. Откладываем полученный угол против хода часовой стрелки от центральных осей x_c , y_c и проводим главные оси инерции x_0 , y_0 (см. рис. 2.2).

5. Определяем главные моменты инерции

$$J_{x_0} = J_{x_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{y_c} \sin^2 \alpha_0 - J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0 = 2536 \text{ см}^4;$$

$$J_{y_0} = J_{x_c} \sin^2 \alpha_0 + J_{y_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0 = 476 \text{ см}^4.$$

Так как $J_{x_c} > J_{y_c}$, то J_{\max} будет относительно оси x_0 , а J_{\min} будет относительно оси y_0 .

Проверка.

а) Согласно формуле (2.10)

$$J_{x_c} + J_{y_c} = (J_{x_0} + J_{y_0}) \pm 5 \%;$$

$$(2409 + 603) \cdot 10^{-8} = (2536 + 476) \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$3012 \cdot 10^{-8} \text{ см}^4 = 3012 \cdot 10^{-8} \text{ см}^4.$$

б) Согласно формуле (2.11)

$$J_{x_0 y_0} = \frac{(J_{x_c} - J_{y_c})}{2} \sin 2\alpha_0 + J_{x_c y_c} \cos 2\alpha_0 = 0;$$

$$J_{x_0 y_0} = \frac{(2409 - 603)}{2} \sin 2(14^\circ 31' 30'') - 501,95 \cdot \cos 2(14^\circ 31' 30'') = 0;$$

$$J_{x_0 y_0} = 438 - 438 = 0.$$

Проверка показывает, что главные моменты инерции определены правильно.

6. Вычерчиваем поперечное сечение в масштабе 1:2 с указанием всех осей и размеров.

Пример 2.2.

Для заданного поперечного сечения (рис. 2.4) определить положение центра тяжести, найти положение главных осей инерции и значения главных моментов инерции.

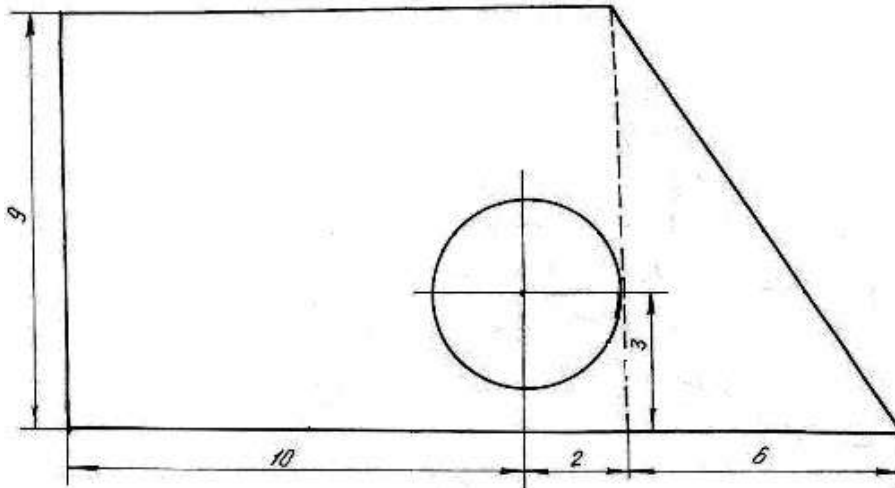


Рис. 2.4.

Решение.

1. Чертим поперечное сечение в масштабе 1:1;
2. Разбиваем сечение на простейшие фигуры: I – прямоугольник, II – прямоугольный треугольник, III – круг;
3. Проводим временные оси $x_{вр}$ и $y_{вр}$ через левый нижний угол заданного сечения (рис. 2.5).
4. Обозначив на рисунке центры тяжести простейших фигур, находим их координаты относительно временных осей и определяем площади фигур

$$C_1 \begin{cases} x_1 = 6 \text{ см;} \\ y_1 = 4,5 \text{ см;} \end{cases} \quad C_2 \begin{cases} x_2 = 14 \text{ см;} \\ y_2 = 3 \text{ см;} \end{cases} \quad C_3 \begin{cases} x_3 = 10 \text{ см;} \\ y_3 = 3 \text{ см.} \end{cases}$$

$$A_1 = 108 \text{ см}^2, \quad A_2 = 27 \text{ см}^2, \quad A_3 = 12,56 \text{ см}^2.$$

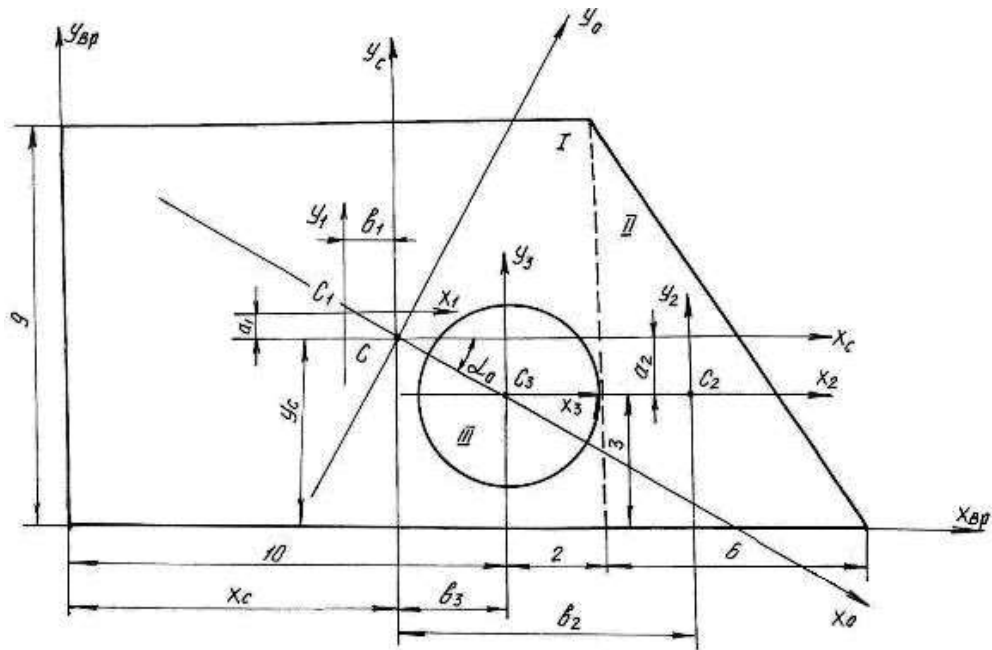


Рис. 2.5.

5. Определим координаты центра тяжести сечения

$$x_c = \frac{S_y}{A} = \frac{x_1 A_1 + x_2 A_2 - x_3 A_3}{A_1 + A_2 - A_3} = \frac{6 \cdot 108 + 14 \cdot 27 - 10 \cdot 12,56}{108 + 27 - 12,56} = 7,35 \text{ см};$$

$$y_c = \frac{S_x}{A} = \frac{y_1 A_1 + y_2 A_2 - y_3 A_3}{A_1 + A_2 - A_3} = \frac{4,5 \cdot 108 + 3 \cdot 27 - 3 \cdot 12,56}{108 + 27 - 12,56} = 4,32 \text{ см}.$$

Обозначим на рис. 2.5 положение центра тяжести C ($x_c = 7,35$ см; $y_c = 4,32$ см) и проведем центральные оси x_c и y_c параллельно временным осям.

6. Определим координаты центров тяжести простейших фигур (C_1, C_2, C_3) относительно центральных осей x_c и y_c

$$C_1 \begin{cases} b_1 = x_1 - x_c = 1,35 \text{ см} \\ a_1 = y_1 - y_c = 0,18 \text{ см} \end{cases} \quad C_2 \begin{cases} b_2 = x_2 - x_c = 6,65 \text{ см} \\ a_2 = y_2 - y_c = -1,32 \text{ см} \end{cases}$$

$$C_3 \begin{cases} b_3 = x_3 - x_c = 2,65 \text{ см} \\ a_3 = y_3 - y_c = -1,32 \text{ см} \end{cases}$$

7. Определим моменты инерции простейших фигур относительно их центральных осей

Для прямоугольника:

$$J_{x_1} = \frac{bh^3}{12} = \frac{12 \cdot 9^3}{12} = 729 \text{ см}^4; \quad J_{y_1} = \frac{b^3 h}{12} = \frac{12^3 \cdot 9}{12} = 1296 \text{ см}^4; \quad J_{x_1 y_1} = 0.$$

Для треугольника:

$$J_{x_2} = \frac{bh^3}{36} = \frac{6 \cdot 9^3}{36} = 121,5 \text{ см}^4; \quad J_{y_2} = \frac{b^3h}{36} = \frac{6^3 \cdot 9}{36} = 54 \text{ см}^4;$$

$$J_{x_2y_2} = -\frac{b^2h^2}{72} = -\frac{6^2 \cdot 9^2}{72} = -40,5 \text{ см}^4,$$

знак минус указывает на преобладание суммарной отрицательной части площади поперечного сечения.

Для круга:

$$J_{x_3} = J_{y_3} = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 4^4}{64} = 12,56 \text{ см}^4; \quad J_{x_3y_3} = 0.$$

8. Определим моменты инерции всего сечения относительно центральных осей x_c и y_c , используя формулы моментов инерции относительно параллельных осей

$$J_{x_c} = \left(J_{x_c} \right)^I + \left(J_{x_c} \right)^II - \left(J_{x_c} \right)^III = \left(J_{x_1} + A_1 a_1^2 \right) + \left(J_{x_2} + A_2 a_2^2 \right) - \left(J_{x_3} + A_3 a_3^2 \right) = \\ = \left(729 + 0,18^2 \cdot 108 \right) + \left(121,5 + (-1,32)^2 \cdot 27 \right) - \left(12,56 + (-1,32)^2 \cdot 12,56 \right) = 866,6 \text{ см}^4;$$

$$J_{y_c} = \left(J_{y_c} \right)^I + \left(J_{y_c} \right)^II - \left(J_{y_c} \right)^III = \left(J_{y_1} + A_1 b_1^2 \right) + \left(J_{y_2} + A_2 b_2^2 \right) - \left(J_{y_3} + A_3 b_3^2 \right) = \\ = \left(1296 + (-1,35)^2 \cdot 108 \right) + \left(54 + 6,65^2 \cdot 27 \right) - \left(12,56 + 2,65^2 \cdot 12,56 \right) = 1093,32 \text{ см}^4;$$

$$J_{x_c y_c} = \left(J_{x_c y_c} \right)^I + \left(J_{x_c y_c} \right)^II - \left(J_{x_c y_c} \right)^III = \\ = \left(J_{x_1 y_1} + a_1 b_1 A_1 \right) + \left(J_{x_2 y_2} + a_2 b_2 A_2 \right) - \left(J_{x_3 y_3} + a_3 b_3 A_3 \right) = \\ = \left(0 + 0,18 \cdot (-1,35) \cdot 108 \right) + \left(-40,5 + (-1,32) \cdot 6,65 \cdot 27 \right) - \left(0 + (-1,32) \cdot 2,65 \cdot 12,56 \right) = \\ = -259,82 \text{ см}^4.$$

Получили, что центробежный момент сечения $J_{x_c y_c} \neq 0$, следовательно, оси x_c и y_c не являются главными осями инерции.

9. Найдём положение главных осей инерции по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{-2 \cdot J_{x_c y_c}}{J_{x_c} - J_{y_c}} = -2,29; \text{ откуда } 2 \cdot \alpha_0 = -66^\circ 20'; \quad \alpha_0 = -33^\circ 10'.$$

10. Проводим главные оси инерции x_0 , y_0 под углом α_0 относительно центральных осей и определяем значение главных моментов инерции

$$J_{x_0} = J_{x_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{y_c} \sin^2 \alpha_0 - J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0 = 696,48 \text{ см}^4;$$

$$J_{y_0} = J_{x_c} \sin^2 \alpha_0 + J_{y_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0 = 1263,42 \text{ см}^4.$$

$$J_{\min} = J_{x_0} = 696,48 \text{ см}^4; \quad J_{\max} = J_{y_0} = 1263,42 \text{ см}^4.$$

Проверка.

а) Согласно формуле (2.10)

$$J_{x_c} + J_{y_c} = (J_{x_0} + J_{y_0}) \pm 5\%;$$

$$(866,6 + 1093,32) \cdot 10^{-8} = (696,48 + 1263,42) \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$1959,9 \cdot 10^{-8} \text{ см}^4 = 1959,9 \cdot 10^{-8} \text{ см}^4.$$

б) Согласно формуле (2.11)

$$J_{x_0 y_0} = \frac{(J_{x_c} - J_{y_c})}{2} \sin 2\alpha_0 + J_{x_c y_c} \cos 2\alpha_0 = 0;$$

$$J_{x_0 y_0} = \frac{(866,6 - 1093,32)}{2} \sin 2(-33^\circ 10') + (-259,82) \cos 2(-33^\circ 10') = 0;$$

$$J_{x_0 y_0} = 104 - 104 = 0.$$

Проверка показывает, что главные моменты инерции определены правильно.

2.1. Задания для определения главных моментов инерции

а) Для заданного поперечного сечения (табл. 2.1), состоящего из швеллера и равнополочного уголка или из швеллера и двутавра (табл. 2.2), требуется:

1. Определить положение центра тяжести;
2. Найти осевые и центробежный моменты инерции относительно осей x_c и y_c , проходящих через центр тяжести сечения;
3. Определить положение главных осей инерции x_0 и y_0 ;
4. Найти главные моменты инерции относительно главных осей x_0 и y_0 ;

5. Вычертить сечение в выбранном масштабе и указать на нем все размеры в числах и все оси;

6. Сделать проверочные расчеты.

б) Для заданного поперечного сечения (табл. 2.3) требуется:

1. Определить положение центра тяжести;
2. Найти осевые и центробежный моменты инерции относительно осей x_c и y_c , проходящих через центр тяжести сечения;
3. Определить положение главных осей инерции x_0 и y_0 ;

4. Найти главные моменты инерции относительно главных осей x_0 и y_0 ;
 5. Сделать проверочные расчеты.

Таблица 2.1

Номер варианта	Тип сечения	Швеллер №	Равнобокий уголок, мм	Двутавр №
1	I	14	80×80×8	12
2	II	16	80×80×6	14
3	III	18	90×90×8	16
4	IV	20	90×90×7	18
5	V	22	90×90×6	20а
6	VI	24	100×100×8	20
7	VII	27	100×100×10	22а
8	VIII	30	100×100×12	22
9	IX	33	125×125×10	24а
10	X	36	125×125×12	24

Таблица 2.2

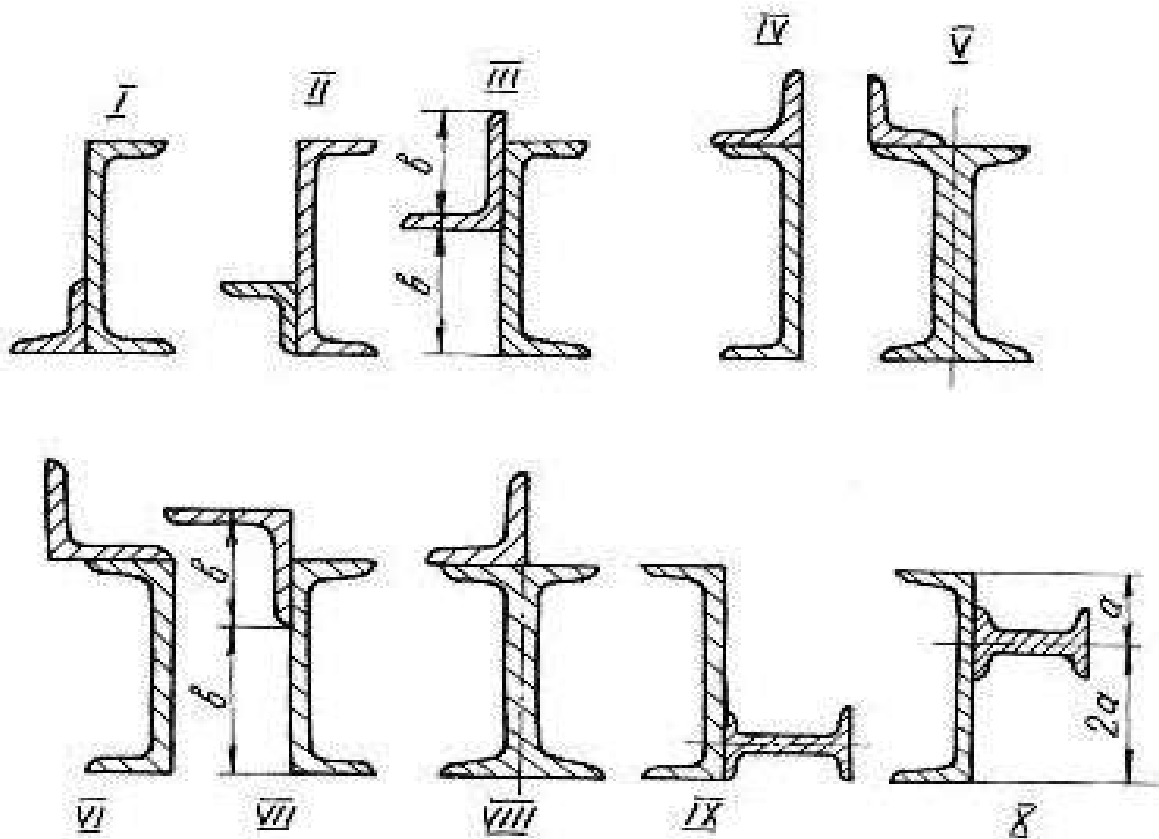
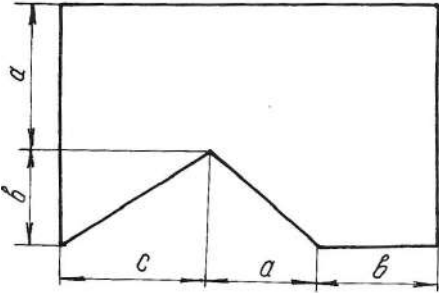
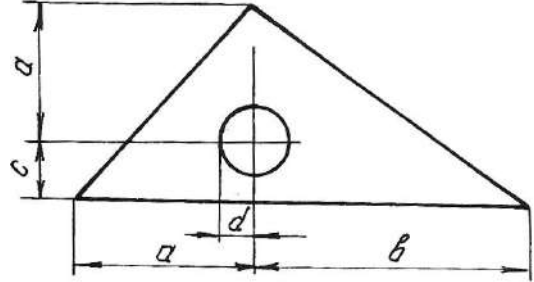
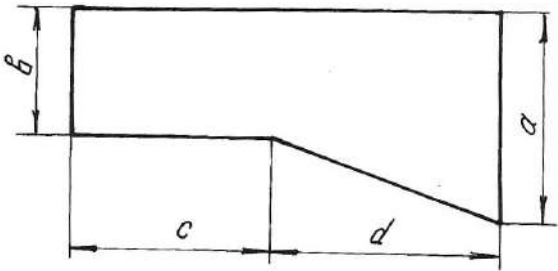
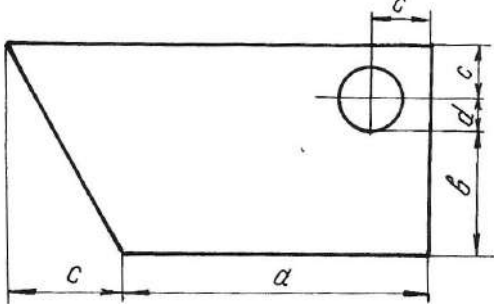


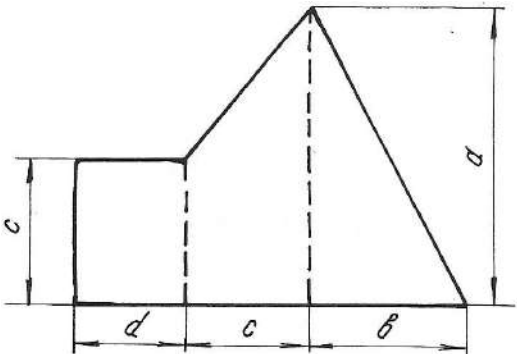
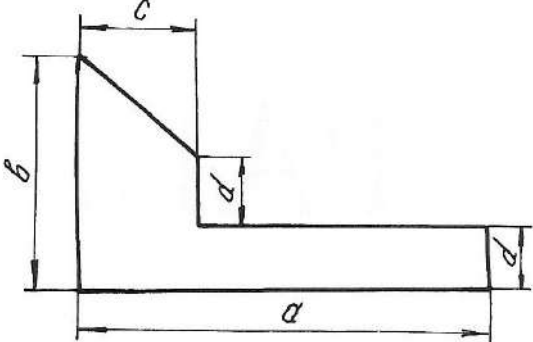
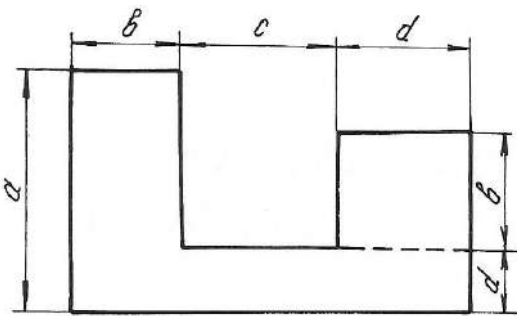
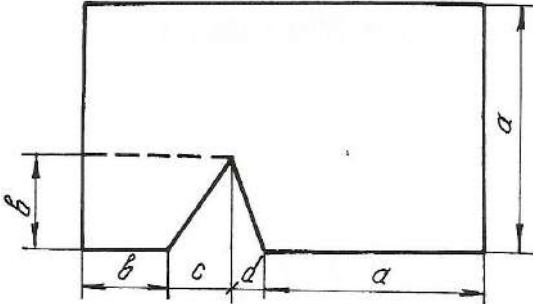
Таблица 2.3

Вид поперечного сечения	Номер варианта	a , см	b , см	c , см	d , см
	1	12	6	4	2
	2	16	10	2	6
	3	9	6	1	3
	4	6	9	3	5
	5	7	8	6	9
	6	8	6	4	6
	7	9	5	2	3
	8	6	4	3	4
	9	5	2	4	4
	10	4	3	2	5
	11	7	5	3	2
	12	9	4	4	6
	13	7	5	3	3
	14	6	3	6	4
	15	4	2	5	6

Продолжение табл. 2.3

Вид поперечного сечения	Номер варианта	a , см	b , см	c , см	d , см
	16	12	9	4	6
	17	18	12	5	8
	18	14	6	6	7
	19	15	19	3	4
	20	12	10	6	6
	21	16	8	9	4
	22	20	9	8	12
	23	14	14	12	6
	24	24	20	10	4
	25	10	8	4	3
	26	11	9	6	6
	27	13	12	5	9
	28	15	10	5	6
	29	8	4	8	12
	30	8	5	2	2
	31	9	4	1	2
	32	6	9	3	3
	33	10	6	4	1
	34	12	8	5	1

Вид поперечного сечения	Номер варианта	a , см	b , см	c , см	d , см
	35	6	6	3	4
	36	9	4	6	5
	37	10	6	12	9
	38	12	9	10	6
	39	12	10	3	1
	40	10	12	3	2
	41	9	12	3	1
	42	8	10	3	2
	43	20	12	4	4
	44	18	10	3	5
	45	12	9	5	6
	46	15	12	6	4
	47	10	4	3	1
	48	12	6	4	2
	49	14	5	5	3
	50	16	6	4	1

Вид поперечного сечения	Номер варианта	a , см	b , см	c , см	d , см
	51	12	10	6	3
	52	18	12	4	9
	53	20	14	8	6
	54	22	16	10	4
	55	30	12	12	4
	56	24	14	10	6
	57	18	16	9	5
	58	12	10	8	3
	59	9	6	2	4
	60	6	5	4	2
	61	10	8	3	8
	62	12	9	4	1
	63	20	10	6	3
	64	12	6	4	3
	65	15	9	3	6
	66	18	10	9	6

Глава 3

ДЕФОРМАЦИЯ КРУЧЕНИЯ ВАЛА

Деформация кручения возникает при действии на вал пар сил, действующих в плоскостях, перпендикулярных к его продольной оси. При расчетах вала на кручение выполняются следующие условия прочности и жесткости:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{adm}}, \quad \varphi_{\max} \leq \varphi_{\text{adm}},$$

где τ_{\max} – максимальное касательное напряжение, φ_{\max} – максимальный угол закручивания вала.

Для определения максимального касательного напряжения и максимального угла закручивания необходимо иметь представление о том, как изменяется величина крутящего момента по длине вала. Текущие значения крутящих моментов определяются графиками их изменения, называемыми эпюрами. Вал по длине делится на участки вертикальными линиями, проведенными через те сечения, где приложены моменты пар сил. На каждом участке крутящий момент имеет постоянное значение и равен алгебраической сумме моментов относительно продольной оси, приложенных слева от сечения, проведенного условно на данном участке, или же приложенных справа от этого сечения.

Правило знаков: момент в сечении считается положительным, если, смотря на торцевое крайнее правое сечение вала, момент направлен по ходу часовой стрелки. Параллельно продольной оси вала проводится нулевая линия, от которой положительные моменты откладываются вверх, отрицательные – вниз в выбранном масштабе. Эпюра штрихуется вертикальными линиями. Диаметр сечения вала определяется из условия прочности

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_p} \leq \tau_{\text{adm}}, \quad (3.1)$$

где T_{\max} – максимальный крутящий момент из эпюры T ;

$W_p = \frac{J_p}{d/2} = \frac{(\pi d^4/32)}{(d/2)} = \frac{\pi d^3}{16}$ – полярный момент сопротивления кручению поперечного сечения.

Исходя из условия прочности $\frac{\pi d^3}{16} \geq \frac{T_{\max}}{\tau_{\text{adm}}}$, можно определить диаметр

вала

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16T_{\max}}{\pi\tau_{\text{adm}}}}. \quad (3.2)$$

Углы закручивания вала на отдельных участках определяются по формуле:

$$\varphi = \frac{Tl}{GJ_p}, \quad (3.3)$$

где T – крутящий момент на рассматриваемом участке вала, взятый из эпюры моментов; l – длина участка вала; GJ_p – жесткость вала при кручении; G – модуль сдвига; $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$ – полярный момент инерции поперечного сечения вала.

При построении эпюры углов закручивания вала необходимо помнить, что полный угол закручивания равен алгебраической сумме углов закручивания вала на отдельных участках. Значения углов закручивания в промежуточных сечениях определяются по формуле:

$$\alpha_{\text{прав}} = \alpha_{\text{лев}} + \varphi, \quad (3.4)$$

где $\alpha_{\text{лев}}$ – суммарный угол закручивания всех участков, которые находятся слева от рассматриваемого участка; φ – угол закручивания на данном участке.

Для определения максимального относительного угла закручивания определяют углы для каждого участка по формуле:

$$\theta = \frac{\varphi}{l}, \quad (3.5)$$

где l – длина рассматриваемого участка.

Пример 3.1.

К стальному валу приложены три известных момента: $T_1=1100$ Н·м, $T_2=1400$ Н·м, $T_3=1800$ Н·м, $a=1,1$ м, $b=1,4$ м, $c=1,8$ м (рис. 3.1).

Требуется:

1. Установить, при каком значении момента X угол закручивания правого концевого сечения вала равен нулю.
2. Построить эпюру крутящих моментов.
3. При заданном значении τ_{adm} определить диаметр вала из расчета на прочность и округлить его величину до ближайшего большего, соответственно равного 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 мм.
4. Построить эпюру углов закручивания.
5. Найти наибольший относительный угол закручивания и проверить вал на жесткость при $\theta_{\text{adm}} = 1,5$ град/м.

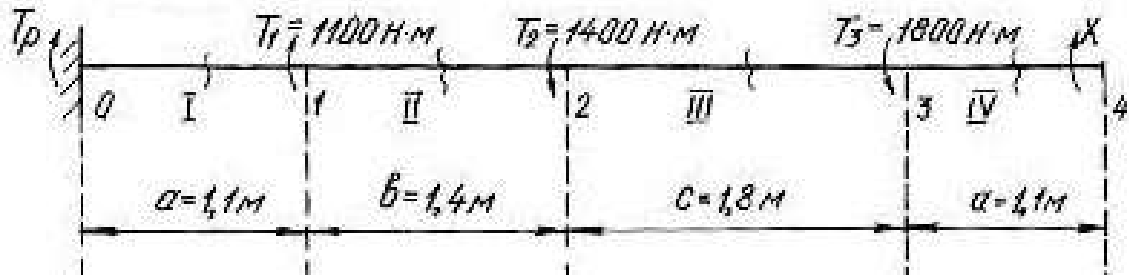


Рис. 3.1.

Решение.

1. Задача является статически неопределимой, так как невозможно определить из одного уравнения равновесия два неизвестных момента T_p и X . Для решения составим одно уравнение статики и одно уравнение совместности деформации. Уравнение статики представляем в виде уравнения моментов относительно продольной оси вала

$$\sum T = T_p + T_1 - T_2 - T_3 + X = 0.$$

Угол закручивания правого концевого сечения может быть выражен как алгебраическая сумма взаимных углов закручивания сечений отдельных участков под действием каждого из моментов в отдельности

$$\sum \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0,$$

где φ_1 – угол закручивания вала на участке 0-1 под действием момента T_1 ; φ_2 – угол закручивания вала на участке под действием момента T_2 ; φ_3 – угол закручивания вала на участке под действием момента T_3 ; φ_4 – угол закручивания вала на участке 3-4 под действием неизвестного момента X .

При этом

$$\varphi_1 = \frac{T_1 a}{GJ_p}; \quad \varphi_2 = -\frac{T_2 (a+b)}{GJ_p}; \quad \varphi_3 = -\frac{T_3 (a+b+c)}{GJ_p}; \quad \varphi_4 = \frac{X (2a+b+c)}{GJ_p}.$$

$$\begin{aligned} \sum \varphi &= \frac{T_1 a}{GJ_p} - \frac{T_2 (a+b)}{GJ_p} - \frac{T_3 (a+b+c)}{GJ_p} + \frac{X (2a+b+c)}{GJ_p} = \\ &= T_1 a - T_2 (a+b) - T_3 (a+b+c) + X (2a+b+c) = 0. \end{aligned}$$

Подставив данные, получим

$$1100 \cdot 1,1 - 1400 \cdot 2,5 - 1800 \cdot 4,3 + X \cdot 5,4 = 0;$$

откуда $X = \frac{-1210 + 3500 + 7740}{5,4} = 1857 \text{ Н·м}.$

Реактивный момент находим из уравнения статики:

$$T_p = -T_1 + T_2 + T_3 - X;$$

$$T_p = -1100 + 1400 + 1800 - 1857 = 243 \text{ Н·м}.$$

2. Для построения эпюры моментов (рис. 3.2) определяем значения мо-

ментов методом сечений.

В сечении IV-IV $T_{IV} = 1857 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В сечении III-III $T_{III} = 1857 - 1800 = 57 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В сечении II-II $T_{II} = 1857 - 1800 - 1400 = -1343 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В сечении I-I $T_I = 1857 - 1800 - 1400 + 1100 = -243 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

3. Найдем полярный момент инерции сечения

$$W_p \geq \frac{|T_{\max}|}{\tau_{\text{adm}}} \geq \frac{1857}{60 \cdot 10^6} \geq 30,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

где $\tau_{\text{adm}} = 60 \text{ МПа}$; $T_{\max} = 1857 \text{ Нм}$.

Из соотношения $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$ найдем диаметр вала:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot W_p}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 30,95 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 55 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр вала равным 60 мм.

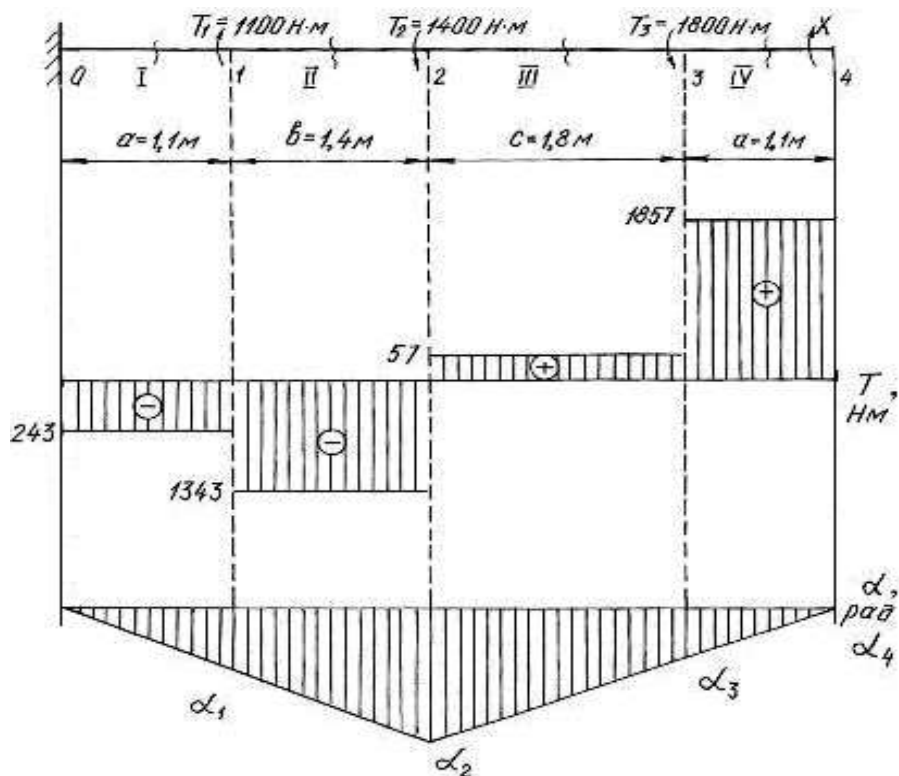


Рис. 3.2.

4. Углы закручивания вала на участках находим по формуле (3.3). Для этого сначала найдем J_p

$$J_p = \frac{3,14 \cdot 6^4}{32} = 127,2 \text{ см}^4 = 127,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

$$\varphi_I = \frac{T_I a}{G J_p} = -\frac{243 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1}{8 \cdot 10^4 \cdot 127,2 \cdot 10^{-8}} = -0,0026 \text{ рад};$$

$$\varphi_{II} = \frac{T_{II} b}{G J_p} = -\frac{-1343 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4}{8 \cdot 10^4 \cdot 127,2 \cdot 10^{-8}} = -0,0185 \text{ рад};$$

$$\varphi_{III} = \frac{T_{III} c}{G J_p} = \frac{57 \cdot 10^{-6} \cdot 1,8}{8 \cdot 10^4 \cdot 127,2 \cdot 10^{-8}} = 0,0010 \text{ рад};$$

$$\varphi_{IV} = \frac{T_{IV} a}{G J_p} = \frac{1857 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1}{8 \cdot 10^4 \cdot 127,2 \cdot 10^{-8}} = 0,0200 \text{ рад}.$$

В месте жёсткой заделки в сечении 0 вал неподвижен. По формуле (3.4), находим угол закручивания вала в сечениях 1, 2, 3, 4:

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \varphi_I = 0 - 0,0026 \text{ рад};$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \varphi_{II} = -0,0026 - 0,0185 = -0,0211 \text{ рад};$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + \varphi_{III} = -0,0211 + 0,001 = -0,0201 \text{ рад};$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 + \varphi_{IV} = -0,0201 + 0,02 = -0,0001 \approx 0 \text{ рад}.$$

Строим эпюру углов закручивания (см. рис.3.2). Относительный угол закручивания на каждом участке можно определить по формуле (3.5):

$$\theta_I = \frac{\varphi_I}{1,1} = -\frac{0,0026}{1,1} = -0,0023 \text{ рад/м};$$

$$\theta_{II} = \frac{\varphi_{II}}{1,4} = -\frac{0,0185}{1,4} = -0,0132 \text{ рад/м};$$

$$\theta_{III} = \frac{\varphi_{III}}{1,8} = \frac{0,0010}{1,8} = 0,0006 \text{ рад/м};$$

$$\theta_{IV} = \frac{\varphi_{IV}}{1,1} = \frac{0,0200}{1,1} = 0,0182 \text{ рад/м}.$$

5. Наибольшим является относительный угол закручивания на участке 3-4

$$\theta_{\max} = 0,0182 \text{ рад/м} = 0,0182 \frac{180^\circ}{\pi} = 1,04 \text{ град/м}.$$

Таким образом, $\theta_{\max} = 1,04 \text{ град/м} < \theta_{\text{adm}} = 1,5 \text{ град/м}$, т. е. условие жесткости выполняется.

Пример 3.2.

Шкив двухколочного тормоза крана, имеющий диаметр $D = 300$ мм, жестко крепится на стальном валу диаметром $d = 30$ мм (рис. 3.3). Определить наибольшие напряжения кручения в сечении вала, если сила нажатия на колодки тормозного шкива $Q = 820$ Н, коэффициент трения скольжения между колодками и шкивом $f = 0,4$. Определить угол закручивания вала, если $l = 400$ мм.

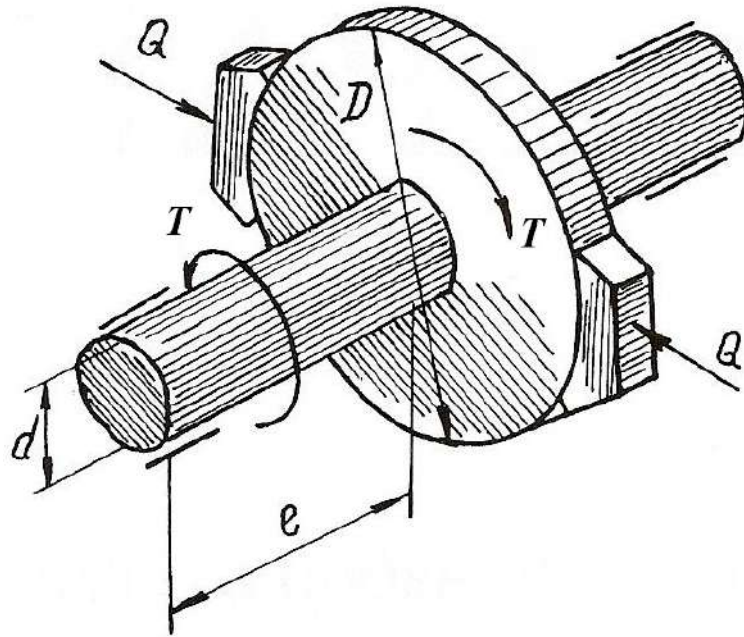


Рис. 3.3.

Решение.

Окружное усилие на тормозном шкиве равно силе трения, возникающей между колодками и шкивом

$$F = Qf = 820 \cdot 0,4 = 328 \text{ Н.}$$

Крутящий момент на тормозном шкиве

$$T = FD = 328 \cdot 30 \cdot 10^{-2} = 98,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Полярный момент сопротивления и полярный момент инерции сечения вала равны

$$W_p = \frac{\pi}{16} d^3 = \frac{\pi}{16} (3 \cdot 10^{-2})^3 = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$J_p = \frac{\pi}{32} d^4 = \frac{\pi}{32} (3 \cdot 10^{-2})^4 = 7,96 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Наибольшее касательное напряжение в сечении определяем по формуле (3.1)

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_P} = \frac{98,4}{5,3 \cdot 10^{-6}} = 18,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 18,5 \text{ МПа.}$$

Угол закручивания вала тормозного шкива

$$\varphi = \frac{Tl}{GJ_p} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{98,4 \cdot 0,4}{8 \cdot 10^{-10} \cdot 7,96 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 0,36^\circ,$$

следовательно $\varphi = 22'$.

Пример 3.3.

К стальному валу, оба конца которого защемлены (рис. 3.4, а), приложен крутящий момент $T = 440 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Определить реактивные моменты в опорах A и B и построить эпюру крутящих моментов при $l_1 = 0,2 \text{ м}$, $l = 0,8 \text{ м}$.

Решение.

Обозначим реактивные моменты в защемлении через T_A и T_B . Из статики знаем уравнение равновесия

$$-T_A + T - T_B = 0 \text{ или } T_A + T_B = T$$

Далее составим уравнение совместности деформаций. Для этого отбросим (мысленно) защемление правого конца вала и заменим его действием на вал неизвестным реактивным моментом T_B (рис. 3.4, б).

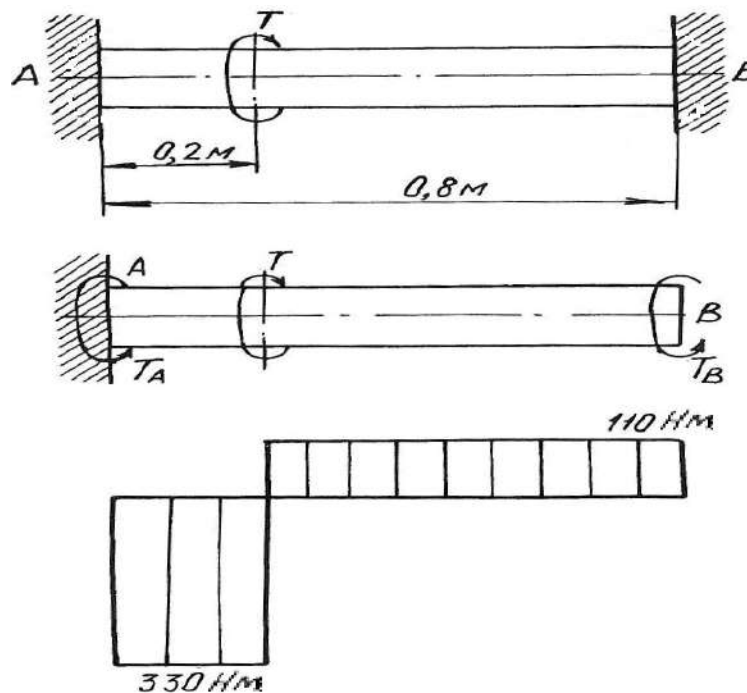


Рис. 3.4.

Величину момента T_B определим из условия, что угол закручивания правого крайнего сечения от действия моментов T и T_A равен нулю, так как это сечение вследствие защемления неподвижно. Угол закручивания правого освобожденного сечения вала на основе принципа независимости действия сил можно определить как сумму двух слагаемых

$$\varphi = \varphi' + \varphi'',$$

где φ' и φ'' – углы закручивания правого освобожденного сечения вала, найденные отдельно от моментов T и T_B , при этом $\varphi' = \frac{Tl_1}{GJ_p}$; $\varphi'' = -\frac{T_B l}{GJ_p}$.

Знак минус в выражении φ'' взят потому, что моменты T и T_B противоположны по направлению.

Полный угол закручивания правого сечения равен нулю, поэтому

$$\varphi = \varphi' + \varphi'' = \frac{Tl_1}{GJ_p} - \frac{T_B l}{GJ_p} = 0,$$

откуда $T_B = \frac{Tl_1}{l} = \frac{440 \cdot 0,2}{0,8} = 110 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

Из уравнения статики определим момент T_A

$$T_A = T - T_B = 440 - 110 = 330 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Эпюра крутящих моментов приведена на рис. 3.4, в.

3.1. Задания для расчета валов на кручение

К стальному валу приложены три известных момента T_1 , T_2 , T_3 .

Требуется:

1. Установить, при каком значении момента X угол закручивания правого концевого сечения вала равен нулю.
2. Построить эпюру крутящих моментов.
3. При заданном значении τ_{adm} определить диаметр вала из расчета на прочность и округлить его значение до ближайшего равного: 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 мм.
4. Построить эпюру углов закручивания, найти наибольший относительный угол закручивания и проверить вал на жесткость при $\theta_{adm} = 1,5$ град/м.

Данные для расчета приведены на рис. 3.5 и в табл. 3.1.

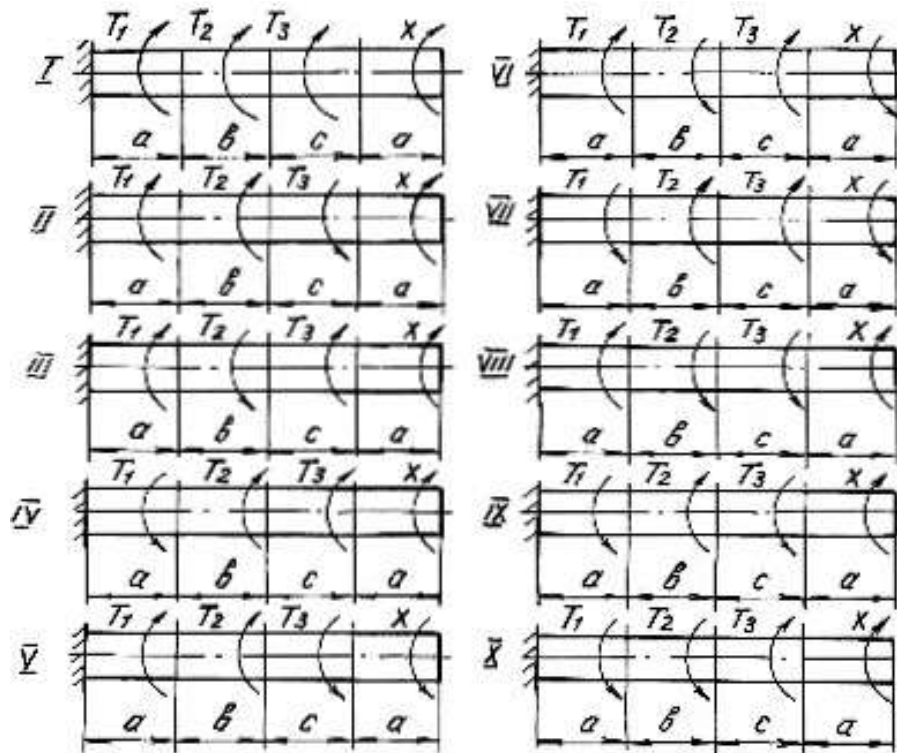


Рис. 3.5.

Таблица 3.1

Номер варианта	Номер схемы	Расстояние, м			Момент, Н·м			τ_{adm} , МПа
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	T_1	T_2	T_3	
1	I	1,1	1,2	1,1	1100	1000	1200	35
2	II	1,2	1,3	1,2	1200	1100	1000	40
3	III	1,3	1,4	1,3	1300	1200	1100	45
4	IV	1,4	1,5	1,4	1400	1300	1200	50
5	V	1,5	1,6	1,5	1500	1400	1300	55
6	VI	1,6	1,7	1,6	1600	600	1500	60
7	VII	1,7	1,8	1,7	1700	700	1600	65
8	VIII	1,8	1,9	1,8	1800	800	1700	70
9	IX	1,9	2,0	1,9	1900	900	1800	75
10	X	2,0	2,1	2,0	2000	1000	2100	80

Глава 4

ДЕФОРМАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА БАЛОК

Деформация поперечного изгиба может возникнуть от любых нагрузок, если линии действия этих нагрузок находятся в плоскости, проходящей через продольную ось балки. Если в такой плоскости располагается одна из главных осей инерции поперечного сечения, то возникает деформация плоского изгиба. От действия внешних нагрузок в поперечных сечениях балок возникают внутренние силовые факторы – поперечные силы и изгибающие моменты. Для их нахождения пользуемся методом сечений и, изучая равновесие сил, приводим внешние нагрузки к центру тяжести поперечного сечения.

Поперечная сила Q_x в любом сечении равна алгебраической сумме проекций всех внешних сил, приложенных с одной стороны от рассматриваемого сечения, на ось, перпендикулярную к продольной оси балки.

Изгибающий момент M_x в любом сечении равен алгебраической сумме моментов всех сил, действующих с одной стороны от рассматриваемого сечения балки, относительно центра тяжести сечения.

Правило знаков для Q_x и M_x :

1) поперечная сила считается положительной, если она сдвигает левую часть балки от сечения вверх, а правую часть балки вниз;

2) изгибающий момент в сечении считается положительным, если он изгибает балку выпуклостью вниз; при изгибе балки выпуклостью вверх изгибающий момент считается отрицательным.

Уравновесить момент внешних сил может только момент внутренних сил упругости, который образован силами, направленными нормально к сечению балки. Поперечная сила может быть уравновешена силой, которая является равнодействующей внутренних сил упругости, расположенных в плоскости сечения балки.

Таким образом, нормальные напряжения, возникающие в поперечных сечениях балок, зависят от величины изгибающих моментов в этих сечениях, а касательные напряжения – от величины поперечных сил в этих сечениях. Эту зависимость в общем виде можно записать

$$\sigma = f_1(M_x); \quad \tau = f_2(Q_x)$$

Таким образом, для того, чтобы определить напряжения в поперечных сечениях, необходимо знать законы изменения Q_x и M_x по длине балок. Для этого строят два графика, называемых эпюрами поперечных сил и изгибающих моментов.

Порядок построения эпюр сводится к следующему:

1. Заданная балка вычерчивается в выбранном масштабе с указанием размеров и нагрузок;

2. С помощью уравнений равновесия статики определяются реакции опор с обязательной последующей проверкой;

3. Балка разбивается на отдельные участки. Каждый участок имеет свой закон изменения нагрузки;

4. Для каждого участка записываются уравнения для определения Q_x и M_x ;

5. Вычисляют ординаты Q_x и M_x по составленным для отдельных участков уравнениям;

6. Строят в принятом масштабе эпюры Q_x и M_x .

Положительные значения найденных величин откладываются выше нулевой линии эпюры, а отрицательные – ниже ее.

Построение эпюр поперечных сил и изгибающих моментов можно выполнить, применяя следующие контрольные правила для построения эпюр:

1. На концевых шарнирных опорах Q_x равны реакциям, а M_x равны нулю, если на опорах не приложены пары с моментами M .

2. На участках балки, где отсутствует распределенная нагрузка, поперечная сила постоянна, а изгибающий момент изменяется по линейному закону.

3. На участках, где приложена равномерно распределенная нагрузка, эпюра Q_x изменяется по закону прямой наклонной линии, а эпюра M_x – по закону квадратичной параболы. В том сечении, где эпюра Q_x пересекается с нулевой линией, на эпюре M_x наблюдается экстремальное значение момента (вершина параболы).

4. На участках, где приложена нагрузка, изменяющаяся по закону треугольника, эпюра Q_x изменяется по закону квадратичной параболы, а эпюра M_x – по закону кубической параболы.

5. В тех сечениях, где приложены сосредоточенные силы (включая и реакции), на эпюре Q_x наблюдаются скачки (перепады) на величину этих сил, а на эпюре M_x – переломы смежных линий.

6. В тех сечениях, где приложены пары с моментами M , на эпюре M_x наблюдаются скачки на величину этих моментов.

7. На свободном конце консольной балки поперечная сила Q_x равна нулю, если в этом месте не приложена сосредоточенная сила; и изгибающий момент M_x равен нулю, если в этом месте не приложена пара с моментом M .

8. В жесткой заделке консольной балки Q_x равна реакции, а изгибающий момент M_x равен моменту заделки.

Нормальные напряжения при изгибе определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M_x}{J_{\text{н.о.}}} y, \quad (4.1)$$

где M_x – изгибающий момент в сечении; $J_{\text{н.о.}}$ – момент инерции сечения относительно нейтральной оси поперечного сечения (нейтральная ось – это ось, в любой точке которой нормальные напряжения всегда равны нулю); y – расстояние до рассматриваемого волокна от нейтральной оси.

Касательные напряжения при изгибе могут быть определены по формуле Д. И. Журавского:

$$\tau = \frac{Q_x S_{\text{н.о.}}}{J_{\text{н.о.}} b}, \quad (4.2)$$

где Q_x – поперечная сила в сечении; $S_{\text{н.о.}}$ – статический момент площади отсеченной части поперечного сечения выше уровня, на котором определяются касательные напряжения относительно нейтральной оси; b – ширина сечения на уровне, для которого определяются напряжения.

Подбор поперечного сечения балки производится на основании следующего условия прочности:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_{\text{н.о.}}} \leq \sigma_{\text{adm}}, \quad (4.3)$$

откуда

$$W_{\text{н.о.}} \geq \frac{M_{\text{max}}}{\sigma_{\text{adm}}}, \quad (4.4)$$

где M_{max} – максимальный изгибающий момент, взятый из эпюры M_x ; $W_{\text{н.о.}}$ – момент сопротивления поперечного сечения балки изгибу относительно нейтральной оси; σ_{adm} – допускаемое нормальное напряжение для материала балки.

После подбора поперечного сечения производится полная проверка балки на прочность по следующим напряжениям:

а) по рабочим нормальным напряжениям

$$\sigma_{\text{раб.}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_{\text{н.о.}}} \leq \sigma_{\text{adm}},$$

где $W_{\text{н.о.}}$ – момент сопротивления выбранного поперечного сечения.

б) по максимальным касательным напряжениям

$$\tau_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}} S_{\text{н.о.}}}{J_{\text{н.о.}} b} \leq \tau_{\text{adm}},$$

где Q_{max} – наибольшая поперечная сила, взятая из эпюры Q_x ; $S_{\text{н.о.}}$ – статический момент части площади выбранного поперечного сечения, находящейся выше или ниже нейтральной оси, относительно этой оси; b – ширина сечения на уровне нейтральной оси; $J_{\text{н.о.}}$ – момент инерции выбранного сечения относительно нейтральной оси.

в) по главным напряжениям:

проверка проводится для балок, ширина сечений которых не постоянна. При этой проверке на основании эпюр выбирается опасное сечение балки, в котором одновременно значения Q_x и M_x большие. По формулам (4.1) и (4.2) для этого сечения строят эпюры нормальных и касательных напряжений, а затем определяют главные напряжения для характерных волокон сечения по его высоте, пользуясь формулой:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}). \quad (4.5)$$

Для стальных балок определяют расчётное (эквивалентное) напряжение для верхних (нижних), средних, переходных волокон (где резко изменяется ширина сечения) по III или IV теориям прочности.

Проверка прочности сводится к рассмотрению выполнения следующих условий прочности:

$$\sigma_p^{III} = \sigma_1 - \sigma_2 \leq \sigma_{adm}, \quad (4.6)$$

$$\sigma_p^{IV} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq \sigma_{adm}. \quad (4.7)$$

4.1. Расчет балки на прочность

Пример 4.1.

Для расчетной схемы с указанными размерами и нагрузками (рис. 4.1.) построить по длине балки эпюры изгибающих моментов и поперечных сил.

Подобрать поперечное сечение балки в двух вариантах:

а) прямоугольного профиля, полагая, что балка деревянная при $\sigma_{adm} = 10$ МПа; соотношение между размерами сечения принять равным $b:h = 1:2$;

б) двутаврового профиля (см. табл. П.1), материал сталь при $\sigma_{adm} = 160$ МПа, $\tau_{adm} = 96$ МПа.

в) провести полную проверку стальной балки на прочность.

Решение.

Определение опорных реакций.

Расчёт балки следует начинать с расстановки и определения величины опорных реакций. Величина и направление опорных реакций и реактивных моментов могут быть определены из решения уравнений равновесия. Для плоской

системы параллельных сил (поперечный плоский изгиб) условия равновесия описываются двумя уравнениями статики: $\sum M_A = 0$; $\sum M_B = 0$.

Рассматриваемая балка (см. рис. 4.1) имеет две шарнирные опоры. В опоре A (шарнирно-подвижной) возникает одна реакция R_A , в опоре B (шарнирно-неподвижной) направление реакции в общем случае неизвестно, поэтому разложим её на две составляющие: H_B – горизонтальную и R_B – вертикальную. Все нагрузки действуют перпендикулярно продольной оси балки, поэтому из уравнения проекций на горизонтальную ось x получается, что составляющая $H_B = 0$. Запишем уравнения моментов сил относительно опоры B

$$\sum M_B = 0, \quad M_1 - R_A \cdot 5 + F \cdot 3 - M_2 + q \cdot 3 \cdot 0,5 = 0.$$

Решаем уравнение относительно R_A

$$R_A = \frac{M_1 + F \cdot 3 - M_2 + q \cdot 3 \cdot 0,5}{5} = \frac{30 + 60 \cdot 3 - 50 + 20 \cdot 1,5}{5} = 38 \text{ кН}.$$

Запишем уравнения моментов сил относительно опоры A

$$\sum M_A = 0, \quad R_B \cdot 5 - q \cdot 3 \cdot 4,5 - M_2 - F \cdot 2 + M_1 = 0.$$

Решаем уравнение относительно R_B

$$R_B = \frac{q \cdot 3 \cdot 4,5 + M_2 + F \cdot 2 - M_1}{5} = \frac{20 \cdot 3 \cdot 4,5 + 50 + 60 \cdot 2 - 30}{5} = \frac{410}{5} = 82 \text{ кН}.$$

Для проверки правильности вычисления опорных реакций составим уравнение проекций всех сил на вертикальную ось y :

$$\sum y = 0, \quad R_A - F - q \cdot 3 + R_B = 0; \quad 38 - 60 - 60 + 82 = 0, \quad 120 - 120 = 0.$$

Последнее уравнение обращается в тождество, следовательно, величина реакций и их направление определены правильно.

Если в результате решения уравнения реакция имеет отрицательное значение, то следует изменить направление реакции на противоположное и в дальнейших расчётах считать её положительной.

После определения опорных реакций можно перейти к построению эпюр изгибающих моментов и поперечных сил, предварительно разбив балку по длине на участки, в пределах которых закон изменения внешних нагрузок остаётся постоянным.

Границы участков располагаются в местах приложения моментов пар сил, сосредоточенных сил, начала или конца распределенной нагрузки.

Участки нумеруются слева или справа от концевых сечений балки. Рассчитываемая балка имеет пять участков I - V.

При составлении аналитических выражений для Q_x и M_x в пределах I-го участка проведём сечение с абсциссой x_1 и рассмотрим равновесие левой части консоли. На эту часть балки действует пара сил с моментом $M_1 = 30 \text{ кН} \cdot \text{м}$, поэтому поперечная сила $Q_I = 0$, а изгибающий момент в любом сечении будет постоянным $M_I = -M_1 = -30 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

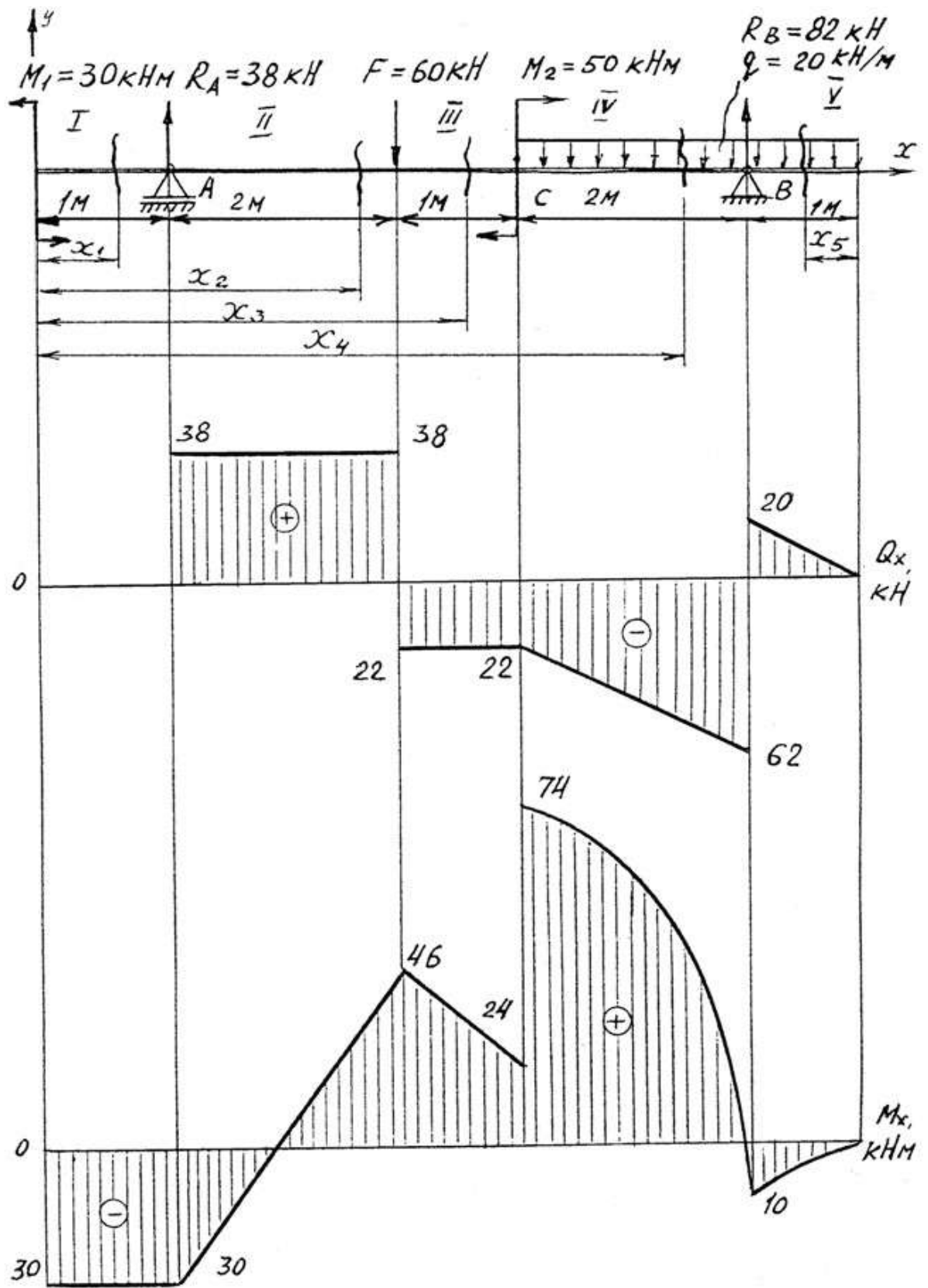


Рис. 4.1.

Для составления аналитических выражений Q_x и M_x в пределах II-го участка проводим сечение с абсциссой x_2 и рассматриваем равновесие левой части балки.

$Q_{II} = R_A = 38$ кН – поперечная сила в пределах II-го участка постоянна.

$$M_{II} = -M + R_A(x_2 - 1).$$

Это уравнение прямой линии, для её построения достаточно определить ординаты изгибающего момента в двух точках (на концах участка):

при $x_2 = 1$ м $M_{II} = -M_1 = -30$ кН·м;

при $x_2 = 3$ м $M_{II} = -M_1 + R_A \cdot 2 = -30 + 76 = 46$ кН·м.

Для III-го участка (сечение с абсциссой x_3)

$$Q_{III} = R_A - F = 38 - 60 = -22$$
 кН.

На этом участке поперечная сила не зависит от x_3 и поэтому на протяжении всего участка она не меняет своего значения.

$$M_{III} = -M_1 + R_A(x_3 - 1) - F(x_3 - 3).$$

Это уравнение прямой линии.

Вычислим моменты при следующих значениях x_3 :

при $x_3 = 3$ м $M_{III} = -30 + 38 \cdot 2 = 46$ кН·м;

при $x_3 = 4$ м $M_{III} = -30 + 38 \cdot 3 - 60 = 24$ кН·м.

Для IV-го участка (сечение с абсциссой x_4) поперечная сила равна:

$$Q_{IV} = R_A - F - q(x_4 - 4).$$

Это уравнение прямой линии.

Вычислим ординаты в начале и в конце участка:

при $x_4 = 4$ м $Q_{IV} = 38 - 60 = -22$ кН;

при $x_4 = 6$ м $Q_{IV} = 38 - 60 - 40 = -62$ кН.

Уравнение изгибающих моментов для IV-го участка имеет вид

$$M_{IV} = -M_1 + R_A(x_4 - 1) - F(x_4 - 3) + M_2 - q \frac{(x_4 - 4)^2}{2}.$$

Это уравнение параболы.

Для её построения определяем моменты:

при $x_4 = 4$ м $M_{IV} = -30 + 114 - 60 + 50 - 20 \cdot 0 = 74$ кН;

при $x_4 = 6$ м $M_{IV} = -30 + 38 \cdot 5 - 60 \cdot 3 + 50 - 20 \cdot (4/2) = -10$ кН.

Прежде, чем составлять выражение поперечной силы и изгибающего момента для V-го участка, заметим, что их можно найти как из равновесия левой части, так и из равновесия отсеченной правой части. Каждый раз к выбору решения нужно подходить с точки зрения возможной простоты и наименьшего количества вычислений.

Для V-го участка (сечение с абсциссой x_5) поперечная сила равна

$$Q_V = qx_5.$$

Вычислим значения ординат:

$$\text{при } x_5 = 0 \quad Q_V = 0;$$

$$\text{при } x_5 = 1 \text{ м} \quad Q_V = 20 \text{ кН.}$$

Составим уравнение изгибающего момента для V-го участка:

$$M_V = -qx_5 \frac{x_5}{2} = -\frac{qx_5^2}{2}.$$

Получили уравнение параболы. Для её построения вычислим ординаты:

$$\text{при } x_5 = 0, \quad M_V = 0;$$

$$\text{при } x_5 = 1, \quad M_V = -10 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

При построении эпюр Q_x и M_x выбираем масштаб и откладываем положительные значения ординат эпюр от нулевой линии вверх, а отрицательные вниз (см. рис. 4.1). После построения эпюр устанавливаем наибольшие значения поперечной силы $Q_{\max} = 62 \text{ кН}$ и изгибающего момента $M_{\max} = 74 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Сечение C является опасным, в нем $Q_x = 22 \text{ кН}$, $M_x = 74 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Подбор поперечного сечения балки проводим в соответствии с условием задания в двух вариантах:

а) подбор сечения прямоугольного профиля деревянной балки

$$W_{\text{н.о.}} \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{74 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 7400 \text{ см}^3.$$

$$\text{Для прямоугольного сечения } W_{\text{н.о.}} = \frac{J_{\text{н.о.}}}{y_{\max}} = \frac{(bh)^3 / 12}{h/2} = \frac{bh^2}{6}.$$

$$\text{При } h = 2b, \quad W_{\text{н.о.}} = (2/3)b^3 \geq 7400 \text{ см}^3, \quad \text{отсюда} \quad b \geq \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 7400}{2}} = 22,3 \text{ см};$$

$$h = 2 \cdot 22,3 = 44,6 \text{ см.}$$

После округления размеров в большую сторону принимаем: $h = 46 \text{ см}$, $b = 23 \text{ см}$.

б) подбор сечения двутаврового профиля

$$W_{\text{н.о.}} \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{74 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 4,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 462 \text{ см}^3.$$

Из таблицы сортамента проката этому значению соответствует двутавр № 30, для которого $W_{\text{н.о.}} = W_x^{\text{табл.}} = 472 \text{ см}^3$.

Основные размеры и геометрические характеристики профиля:

высота $h = 0,3 \text{ м}$; ширина полки $b = 0,135 \text{ м}$; толщина полки $t = 0,01 \text{ м}$; толщина стенки $d = 0,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; площадь сечения $A = 46,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; момент инерции сечения относительно нейтральной оси $J_{\text{н.о.}} = J_x^{\text{табл.}} = 0,708 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4$; статический момент половины площади сечения относительно нейтральной оси $S_{\text{н.о.}}^{\max.} = S_x^{\text{табл.}} = 2,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Полная проверка стальной балки на прочность:

а) проверка по рабочим нормальным напряжениям

$$\sigma_{\text{раб.}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_x^{\text{табл.}}} = \frac{74 \cdot 10^3}{4,72 \cdot 10^{-4}} = 157 \cdot 10^6 \text{ Па} = 157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{раб.}} = 157 \text{ МПа} < \sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа},$$

т. е. условие прочности выполняется.

б) проверка по максимальным касательным напряжениям

$$\tau_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}} S_x^{\text{табл.}}}{J_x^{\text{табл.}} d} = \frac{62 \cdot 2,68 \cdot 10^{-4}}{0,708 \cdot 10^{-4} \cdot 0,65 \cdot 10^{-2}} = 36,2 \cdot 10^6 \text{ Па} = 36,2 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\text{max}} = 36,2 \text{ МПа} < \tau_{\text{adm}} = 96 \text{ МПа}.$$

Таким образом, условие прочности выполняется.

в) проверка по главным напряжениям в опасном сечении С, в котором $Q_x = 22 \text{ кН}$, $M_x = 74 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Строим эпюру нормальных напряжений для этого сечения по уровням (рис. 4.2):

$$\sigma_{1-1} = -\frac{M_x}{J_x^{\text{табл.}}} y_{1-1} = -\frac{74 \cdot 10^3}{0,708 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,15 = -157 \cdot 10^6 \text{ Па} = -157 \text{ МПа}.$$

Знак «минус» при напряжении для верхних волокон указывает на то, что при положительной эпюре M_x в этом сечении верхняя часть волокон испытывает деформацию осевого сжатия.

$$\sigma_{7-7} = \sigma_{1-1} = 157 \text{ МПа};$$

$$\begin{aligned} \sigma_{2-2} = \sigma_{3-3} &= -\frac{M_x}{J_x^{\text{табл.}}} y_{2-2} = -\frac{M_x}{J_x^{\text{табл.}}} \left(\frac{h}{2} - t\right) = -\frac{74 \cdot 10^3}{0,708 \cdot 10^{-4}} (0,15 - 0,01) = \\ &= -147 \cdot 10^6 \text{ Па} = -147 \text{ МПа}; \quad \sigma_{4-4} = 0, \text{ так как } y_{4-4} = 0. \end{aligned}$$

Эпюра касательных напряжений также строится по значениям, определяемым для различных уровней (волокон) сечения

$$\tau_{1-1} = \tau_{7-7} = 0,$$

так как $S_{\text{н.о.}}^{1-1} = 0$, т. е. статический момент площади сечения, находящейся выше или ниже уровня 1-1 относительно нейтральной оси, равен нулю.

Напряжения в волокнах уровня 2-2 и 6-6 можно не определять, так как они обычно очень малы.

В переходных волокнах 3-3 и 5-5 напряжения будут равны

$$\tau_{3-3} = \tau_{5-5} = \frac{Q_x S_{\text{н.о.}}^{3-3}}{J_x^{\text{табл.}} b_{3-3}} = \frac{Q_x b t (h/2 - t/2)}{J_x^{\text{табл.}} d} =$$

$$= \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 0,135 \cdot 0,01 \cdot (0,15 - 0,005)}{0,708 \cdot 10^{-4} \cdot 0,65 \cdot 10^{-2}} = 9,7 \cdot 10^6 \text{ Па} = 9,7 \text{ МПа}.$$

Для волокон нейтрального слоя

$$\tau_{4-4} = \frac{Q_x S_{\text{н.о.}}^{4-4}}{J_x^{\text{табл.}} b_{4-4}} = \frac{Q_x S_x^{\text{табл.}}}{J_x^{\text{табл.}} d} = \frac{22 \cdot 2,68 \cdot 10^{-4}}{0,708 \cdot 10^{-4} \cdot 0,65 \cdot 10^{-2}} = 12,8 \cdot 10^6 \text{ Па} = 12,8 \text{ МПа}.$$

Эпюры σ и τ строятся в масштабе (см. рис. 4.2).

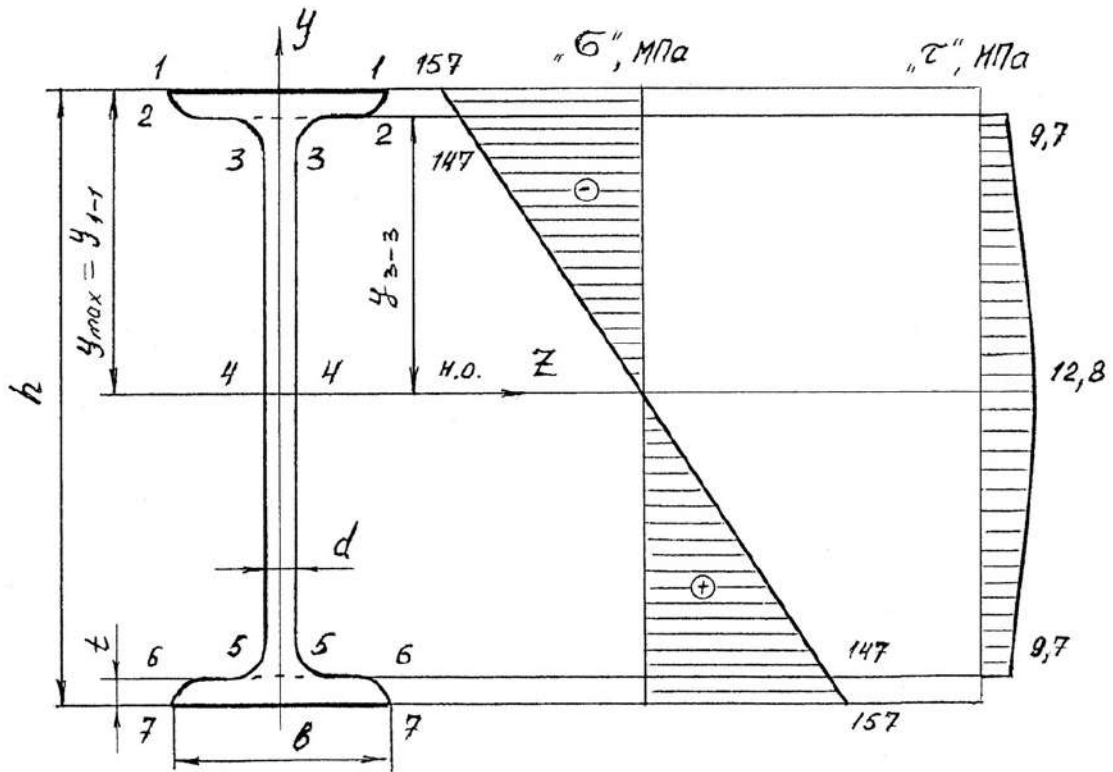


Рис. 4.2.

На основании эпюр напряжений определяют главные напряжения для верхних, переходных и средних волокон

$$\sigma_1^{1-1} = 1/2(\sigma_{1-1} + \sqrt{\sigma_{1-1}^2 + 4\tau_{1-1}^2}) = 1/2(-157 + \sqrt{157^2 + 4 \cdot 0^2}) = 0;$$

$$\sigma_2^{1-1} = 1/2(-157 - \sqrt{157^2 + 4 \cdot 0^2}) = -157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_1^{3-3} = 1/2(-147 + \sqrt{147^2 + 4 \cdot 9,7^2}) = 0,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2^{3-3} = 1/2(-147 - \sqrt{147^2 + 4 \cdot 9,7^2}) = -147,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_1^{4-4} = 1/2(0 + \sqrt{0^2 + 4 \cdot 12,8^2}) = 12,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2^{4-4} = -12,8 \text{ МПа}.$$

Определим величины расчётных напряжений по третьей теории прочности:

$$\sigma_p^{1-1} = \sigma_1^{1-1} - \sigma_2^{1-1} = 0 - (-157) = 157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_p^{3-3} = \sigma_1^{3-3} - \sigma_2^{3-3} = 0,5 - (-147,5) = 148 \text{ МПа};$$

$$\sigma_p^{4-4} = \sigma_1^{4-4} - \sigma_2^{4-4} = 12,8 - (-12,8) = 25,6 \text{ МПа},$$

таким образом условие прочности $\sigma_p^{\text{III}} < \sigma_{\text{adm}}$ выполняется.

По четвертой теории прочности

$$\sigma_p^{1-1} = \sqrt{(\sigma_1^{1-1})^2 + (\sigma_2^{1-1})^2 - \sigma_1^{1-1}\sigma_2^{1-1}} = \sqrt{0^2 + 157^2 - 0^2} = 157 \text{ МПа}.$$

$$\text{Аналогично: } \sigma_p^{3-3} = 148 \text{ МПа}; \sigma_p^{4-4} = 22,1 \text{ МПа}.$$

Таким образом, результаты по всем вариантам полной проверки прочности балки показывают, что все условия прочности выполняются, следовательно, к практическому применению принимается двутавр № 30.

Пример 4.2. Консольная балка, сложное сечение.

Для заданной схемы балки (рис. 4.3) построить эпюры поперечных сил Q_x и изгибающих моментов M_x , определить размеры сечения заданной формы из условия прочности, принимая $\sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа}$.

Решение.

Определим реакции опоры A из уравнений равновесия

$$1) \sum M_A = 0; \quad -M_A + M - q \cdot 1 \cdot 2,5 + F \cdot 3 = 0;$$

$$M_A = M - q \cdot 1 \cdot 2,5 + F \cdot 3 = 6 - 10 + 24 = 20 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$2) \sum Y = 0; \quad R_A - q \cdot 1 + F = 0 \text{ (предварительное направление реакции } R_A \text{ вверх);}$$

$$R_A = q \cdot 1 - F = 4 - 8 = -4 \text{ кН (меняем направление реакции на противоположное)}.$$

Проверка

$$\sum M_C = 0; \quad -M_A + R_A \cdot 3 + M + q \cdot 1 \cdot 0,5 = -20 + 12 + 6 + 2 = 0.$$

Определим размеры поперечного сечения (см. рис. 4.3), для чего условно разбиваем это сечение на фигуры 1, 2, 3 и 4, площади которых равны: $A_1 = 5b \cdot 6b$; $A_2 = 2b \cdot 3b$; $A_3 = A_4 = b \cdot b$.

Для определения положения центра тяжести сечения проводим вспомогательную ось $x_{\text{вп}}$ и найдем координату y_c по известной формуле

$$y_c = \frac{S_{x_{\text{вп}}}}{A} = \frac{A_1 y_1 - A_2 y_2 + A_3 y_3 + A_4 y_4}{A_1 - A_2 + A_3 + A_4} =$$

$$= \frac{6b \cdot 5b \cdot 2,5b - 2b \cdot 3b \cdot 1,5b + 2b \cdot b \cdot 0,5b}{6b \cdot 5b - 2b \cdot 3b + 2b \cdot b} = 2,58b,$$

где y_1, y_2, y_3, y_4 — расстояния от центров тяжести фигур 1, 2, 3, 4 до оси $x_{вр}$.

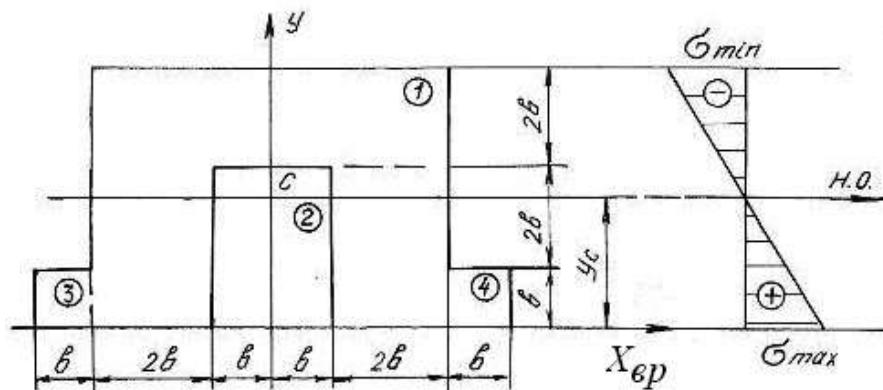
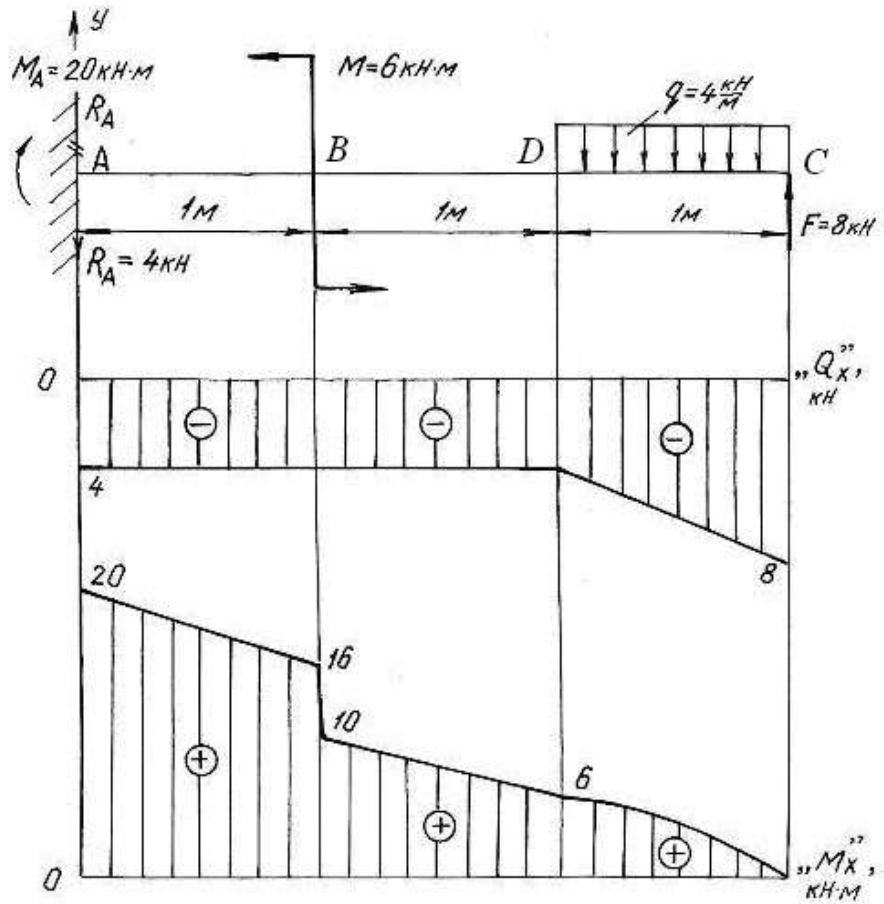


Рис. 4.3.

Так как сечение симметричное, то его центр тяжести лежит на оси симметрии y .

Проводим нейтральную ось через центр тяжести параллельно вспомогательной оси $x_{вр}$. Находим момент инерции относительно нейтральной оси

$$J_{н.о.} = (J_{н.о.})^1 - (J_{н.о.})^2 + 2(J_{н.о.})^3 = \left[\frac{6b \cdot (5b)^3}{12} + 6b \cdot 5b \cdot (y_1 - y_c)^2 \right] - \left[\frac{2b \cdot (3b)^3}{12} + 2b \cdot 3b \cdot (y_2 - y_c)^2 \right] + 2 \cdot \left[\frac{b \cdot b^3}{12} + b \cdot b \cdot (y_3 - y_c)^2 \right] = 60 \cdot b^4,$$

где $(y_n - y_c)$ – расстояние между собственной осью простой фигуры и нейтральной осью.

Строим эпюры поперечных сил Q_x и изгибающих моментов M_x , пользуясь контрольными правилами и начиная построения со свободного конца балки.

$$Q_C = -F = -8 \text{ кН}; \quad Q_D = -F + q \cdot 1 = -8 + 4 = -4 \text{ кН} = Q_B = Q_A;$$

$$M_C = 0; \quad M_D = F \cdot 1 - q \cdot 1 \cdot 0,5 = 8 - 2 = 6 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_B = F \cdot 2 - q \cdot 1 \cdot 1,5 = 16 - 6 = 10 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

В сечении B изгибающий момент возрастает на момент $M = 6 \text{ кН} \cdot \text{м}$, что на эпюре M_x отражается в виде скачка. Изгибающий момент в жесткой заделке равен моменту заделки M_A .

Максимальный изгибающий момент $M_{\max} = M_A = 20 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Максимальные напряжения, возникающие в нижних волокнах этого сечения

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y_{\max}^H}{J_{н.о.}} = \frac{20 \cdot 2,58 \cdot b}{60 \cdot b^4} = \frac{0,83 \text{ кН} \cdot \text{м}}{b^3}.$$

Максимальные напряжения, возникающие в верхних волокнах этого сечения

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\max} y_{\max}^B}{J_{н.о.}} = \frac{20 \cdot 2,42 \cdot b}{60 \cdot b^4} = \frac{0,81 \text{ кН} \cdot \text{м}}{b^3}.$$

Приравнивая наибольшее напряжение к допускаемому напряжению σ_{adm} , получим размер сечения b

$$\sigma_{\max} = \frac{0,83 \text{ кН} \cdot \text{м}}{b^3} \leq \sigma_{adm} = 160 \text{ МПа}; \quad b^3 \geq \frac{0,83 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6},$$

$$b \geq \sqrt[3]{5,2 \cdot 10^{-6}} = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad b = 18 \text{ мм}.$$

4.2. Задания для расчета балок на прочность

Для расчетной схемы балки необходимо:

1. Построить по длине балки эпюры изгибающих моментов и поперечных сил.

2. Подобрать поперечное сечение балки в двух вариантах:

а) прямоугольного профиля, полагая, что балка деревянная при $\sigma_{adm} = 10$ МПа ;
соотношение между размерами сечения принять равными $b:h = 1:2$;

б) двутаврового профиля (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа, $\tau_{adm} = 96$ МПа .

3. Провести полную проверку стальной двутавровой балки на прочность.

Данные для расчета приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

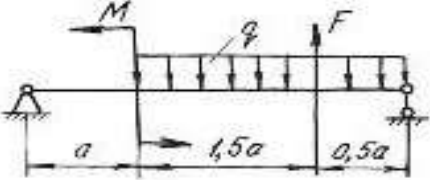
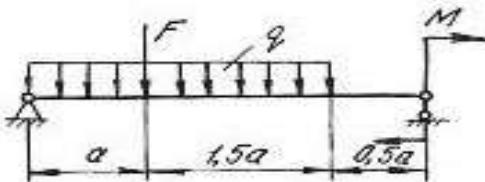
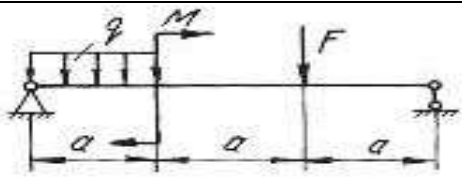

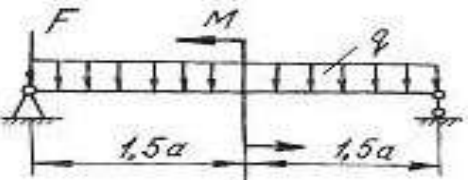
Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	1	2,0	19	20	20
	2	1,0	16	35	40
	3	1,2	10	30	40
	4	2,0	10	25	50
	5	2,2	30	50	40
	6	2,4	10	10	20
	7	1,0	10	65	20
	8	1,2	10	55	40
	9	2,0	20	45	15
	10	1,0	18	32	60
	11	2,2	10	35	50
	12	1,8	30	42	30
	13	2,0	12	26	20
	14	1,0	14	14	20
	15	2,0	15	25	30

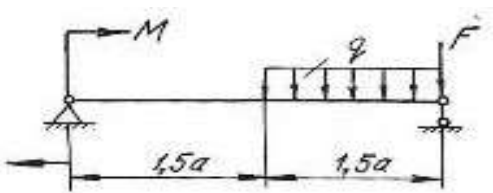
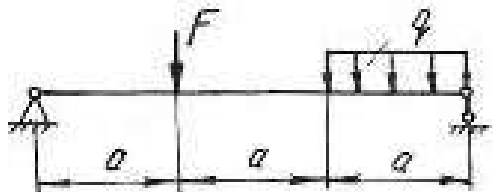
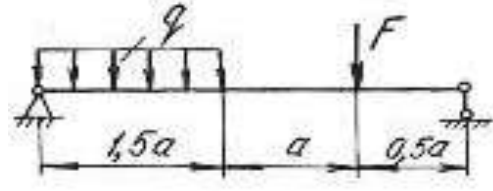
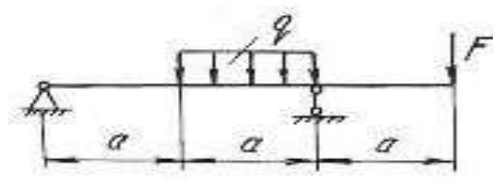
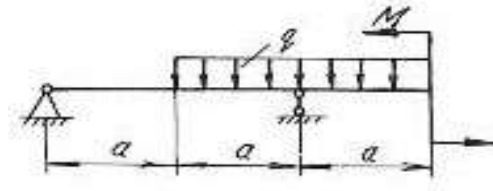
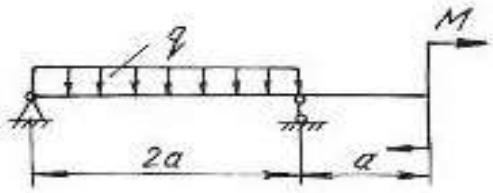
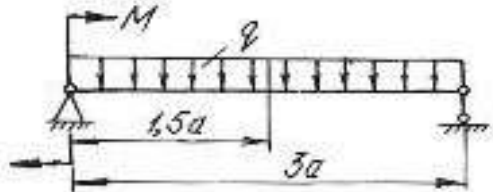
Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	16	1,0	10	32	40
	17	2,0	25	42	20
	18	1,6	30	50	30
	19	1,0	10	—	10
	20	2,0	11	—	30
	21	1,0	12	—	30
	22	1,2	13	—	60
	23	2,2	14	—	70
	24	3,0	15	—	40
	25	3,0	16	—	20
	26	1,2	17	—	70
	27	2,0	18	—	70
	28	3,0	20	10	—
	29	2,0	21	60	—
	30	2,0	22	10	—
	31	2,1	23	30	—
	32	2,0	24	30	—
	33	2,2	25	30	—
	34	2,0	26	40	—
	35	2,0	27	40	—
	36	2,0	28	40	—

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	37	1,2	10	30	15
	38	1,3	12	40	10
	39	1,4	15	45	12
	40	1,0	14	50	10
	41	2,0	13	60	20
	42	2,0	12	55	12
	43	1,1	16	—	20
	44	1,4	17	—	16
	45	1,5	20	—	15
	46	1,6	18	30	—
	47	1,2	11	20	—
	48	1,3	14	10	—
	49	0,8	15	40	—
	50	0,7	13	13	—
	51	1,1	17	22	—
	52	0,5	24	—	20
	53	0,6	28	—	30
	54	0,9	30	—	40
	55	1,1	10	30	—
	56	1,2	20	31	—
	57	1,3	30	32	—

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	58	1,4	40	—	40
	59	1,2	35	—	50
	60	2,0	28	—	80
	61	1,5	12	20	—
	62	1,7	14	30	—
	63	1,9	16	40	—
	64	2,1	18	20	20
	65	2,3	19	30	30
	66	2,5	20	25	40
	67	2,0	12	30	25
	68	2,4	10	35	30
	69	2,7	10	30	35
	70	1,0	12	10	40
	71	2,0	14	20	30
	72	2,0	16	30	40
	73	1,0	—	—	20
	74	2,0	—	—	30
	75	2,5	—	—	40

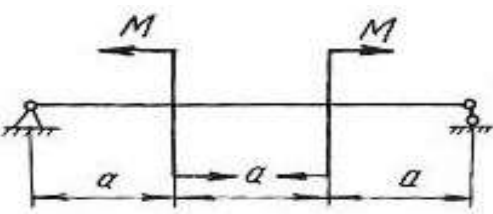
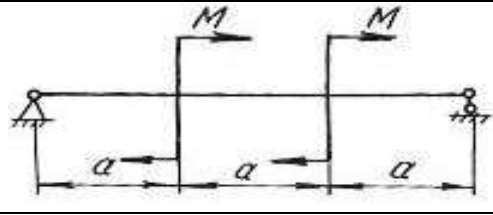
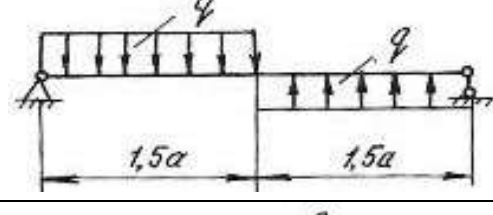
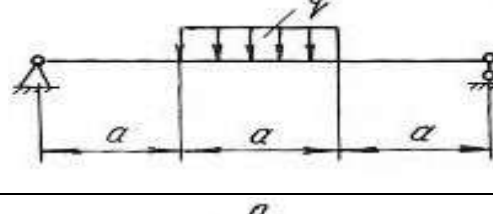
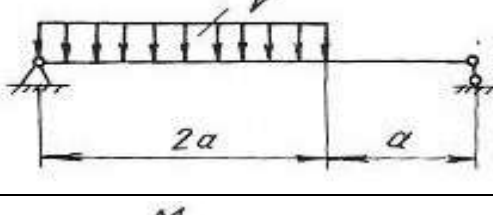
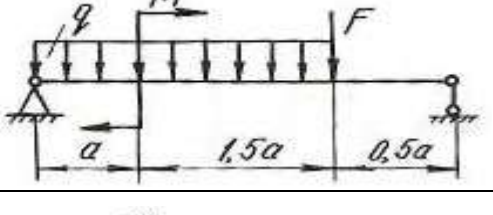

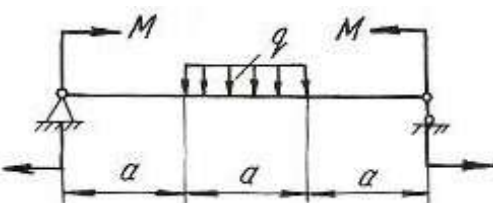
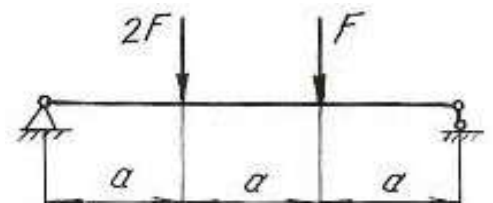
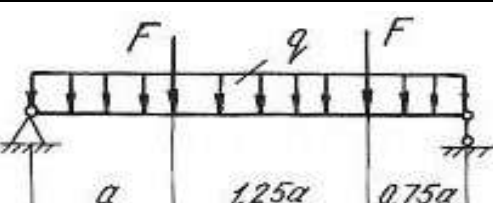
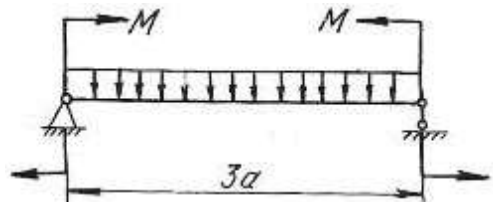
Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	76	1,5	—	30	—
	77	2,5	—	40	—
	78	1,2	—	50	—
	79	1,3	—	40	—
	80	1,4	—	25	—
	81	1,6	—	30	—
	82	1,7	10	—	—
	83	1,8	10	—	—
	84	1,9	10	—	—
	85	2,1	30	—	—
	86	2,2	20	—	—
	87	2,3	10	—	—
	88	2,0	25	—	—
	89	1,0	15	—	—
	90	2,3	10	—	—
	91	1,0	15	30	80
	92	2,0	20	40	90
	93	2,0	25	50	100
	94	1,2	10	45	25
	95	1,4	12	50	30
	96	1,6	15	60	35

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	97	1,8	15	30	40
	98	1,0	18	20	45
	99	1,4	21	55	50
	100	1,0	10	30	55
	101	2,0	20	35	80
	102	1,0	30	60	40
	103	1,9	15	25	60
	104	1,7	13	50	40
	105	1,3	17	75	20
	106	1,0	18	20	35
	107	2,2	16	60	45
	108	2,3	14	40	55
	109	1,0	—	30	50
	110	0,6	—	40	50
	111	0,8	—	30	60
	112	1,0	2	—	70
	113	0,6	30	—	60
	114	1,2	40	—	50

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	115	1,2	20	40	—
	116	1,3	10	20	—
	117	1,4	20	30	—
	118	1,5	—	—	40
	119	1,0	—	—	30
	120	1,3	—	—	20
	121	1,0	10	—	20
	122	1,0	20	—	40
	123	1,0	30	—	10
	124	1,2	10	20	—
	125	1,3	11	40	—
	126	1,5	12	50	—

4.3. Расчет балки на жесткость

После проверки балок на прочность они обычно проверяются на жесткость.

Проверка состоит в определении максимальных перемещений балки при изгибе и сравнении их с допускаемыми значениями для данного материала и типа балки. При этом должны выполняться следующие условия:

$$y_{\max} \leq y_{\text{adm}}; \quad y_{\text{adm}} = \left(\frac{1}{20} \div \frac{1}{250}\right)l; \quad \theta_{\max} \leq \theta_{\text{adm}},$$

где y_{adm} – допускаемый прогиб; θ_{adm} – допускаемый угол поворота; l – пролёт балки.

Для определения прогибов и углов поворота в статически определимых балках обычно применяют метод начальных параметров, который записывается в виде следующих универсальных уравнений:

$$EJ_z\theta = EJ_z\theta_0 + \sum_{i=1}^n \frac{M_i(x-a_i)^1}{1!} + \sum_{i=1}^n \frac{F_i(x-b_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^n \frac{q_i(x-c_i)^3}{3!}, \quad (4.8)$$

где n – количество нагрузок на рассматриваемых участках.

$$EJ_z y = EJ_z y_0 + EJ_z \theta_0 x + \sum_{i=1}^n \frac{M_i(x-a_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^n \frac{F_i(x-b_i)^3}{3!} + \sum_{i=1}^n \frac{q_i(x-c_i)^4}{4!}, \quad (4.9)$$

где θ – угол поворота в исследуемом сечении; y – прогиб в исследуемом сечении; y_0 – прогиб в начале координат; θ_0 – угол поворота в начале координат; x – расстояние от начала координат до сечения, в котором определяются перемещения; M, F, q – внешние нагрузки, включая и реакции; a – расстояния от начала координат до сечений, где приложены моменты; b – расстояния от начала координат до сечений, где приложены сосредоточенные силы; c – расстояния от начала координат до начала каждого участка, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой; EJ_z – жесткость балки при поперечном изгибе.

Метод начальных параметров применяется при условии, что жесткость EJ_z постоянна по всей длине балки.

Слагаемые, которые включают M, F, q , по знаку определяются в соответствии с правилами знаков, принятыми для определения M_x при расчете слева. При использовании метода начальных параметров необходимо выполнить следующие требования:

1. Начало координат принимается единым для всей балки (обычно в левом крайнем сечении балки);
2. Если равномерно распределенная нагрузка не доходит до рассматриваемого сечения, то ее необходимо продлить до этого сечения, а для сохранения равновесия приложить такую же по величине, но противоположного направления нагрузку. Эту контрнагрузку необходимо включить в уравнения.

Начальные параметры y_0 и θ_0 определяются следующим образом. Если начало координат находится не на опоре (рис. 4.4, б), то составляем два дополнительных уравнения прогибов для двух опор, где заранее известно, что прогибы на опорах равны нулю. Если начало координат находится на концевой шарнирной опоре (рис. 4.4, в), то составляем одно дополнительное уравнение прогибов для другой опоры. Если начало координат находится в жесткой заделке (рис. 4.4, г), то дополнительные уравнения составлять не нужно.

При решении задач необходимо иметь в виду, что положительное направление оси y принято вверх. При этом условии положительное значение угла поворота соответствует вращению сечения против хода часовой стрелки, положительный прогиб направлен вверх.

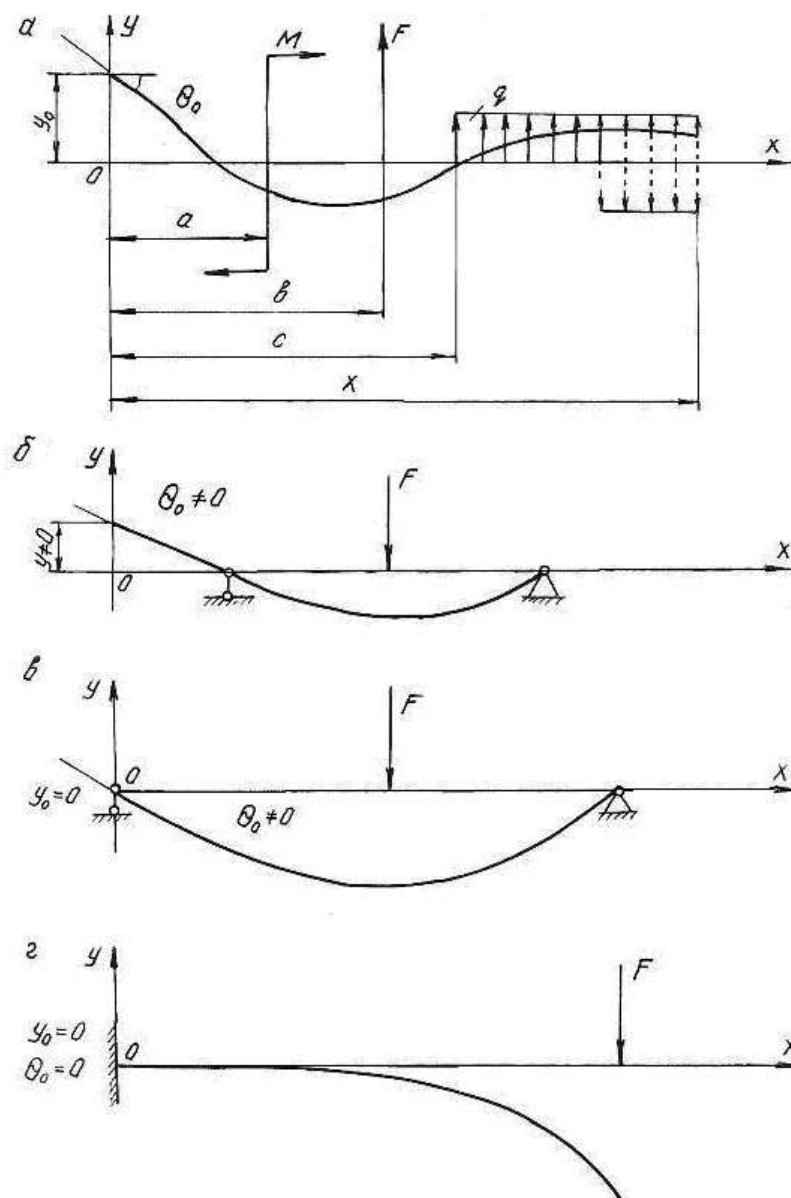


Рис. 4.4.

Пример 4.3.

Для балки, изображенной на рис. 4.5, построить эпюры Q_x и M_x , подобрать поперечное двутавровое сечение (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. По методу начальных параметров определить прогибы в сечениях C и D и угол поворота сечения B . Построить эпюру прогибов и провести проверку на жесткость при $y_{adm} = (1/200)l = (1/200)4 = 0,02$ м = 2 см, где l – пролет балки.

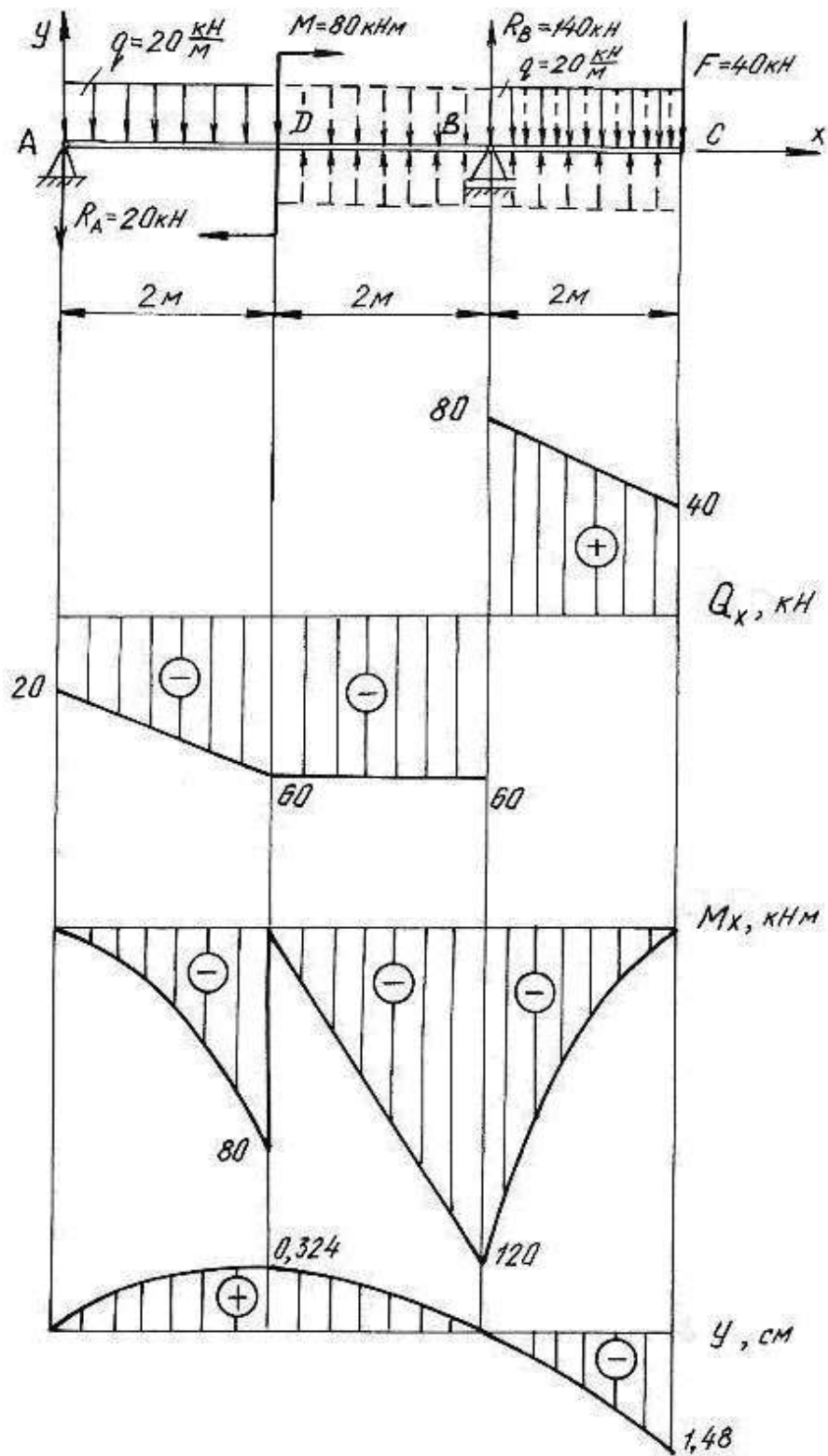


Рис. 4.5.

Решение.

Определим опорные реакции:

$$\sum M_B = 0, \quad R_A \cdot 4 + q \cdot 2 \cdot 3 - M - q \cdot 2 \cdot 1 - F \cdot 2 = 0;$$

$$R_A \cdot 4 + 20 \cdot 2 \cdot 3 - 80 - 20 \cdot 2 \cdot 1 - 40 \cdot 2 = 0; \quad R_A = 20 \text{ кН.}$$

$$\sum M_A = 0, \quad R_B \cdot 4 - q \cdot 2 \cdot 1 - M - q \cdot 2 \cdot 5 - F \cdot 6 = 0;$$

$$R_B \cdot 4 - 20 \cdot 2 \cdot 1 - 80 - 20 \cdot 2 \cdot 5 - 40 \cdot 6 = 0; \quad R_B = 140 \text{ кН.}$$

Проводим проверку

$$\sum Y = 0; \quad -R_A + R_B - q \cdot 2 - F - q \cdot 2 = 0;$$

$$-20 + 140 - 20 \cdot 2 - 40 - 20 \cdot 2 = 0; \quad 0 = 0$$

По контрольным правилам строим эпюры Q_x и M_x , и подбираем поперечное сечение при $M_{\max} = 120 \text{ кН}$.

$$W_z = \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{120 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 750 \text{ см}^3.$$

По таблице сортамента (см. табл. П.1) принимаем двутавр № 36:

$$J_z = J_x^{\text{табл.}} = 13380 \text{ см}^4 = 13380 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Для определения перемещений помещаем начало координат на левой опоре (прогиб $y_0 = 0$, угол поворота $\theta_0 \neq 0$). Составляем дополнительное уравнение прогибов для сечения B (при $x_B = 4 \text{ м}$), где заранее известно, что прогиб на опоре y_B равен нулю.

Распределенная нагрузка обрывается в сечении D . Продолжим её до сечения B , в котором определяем перемещение, но, чтобы не нарушить прежнее равновесие, вводим уравновешивающую нагрузку обратного направления на участке BD .

$$EJ_z y_B = EJ_z \theta_0 x_B + \frac{M(x-2)^2}{2} - \frac{R_A(x_B-0)^3}{6} - \frac{q(x_B-0)^4}{24} + \frac{q(x_B-2)^4}{24};$$

$$0 = EJ_z \theta_0 \cdot 4 + \frac{80(4-2)^2}{2} - \frac{20(4-0)^3}{6} - \frac{20(4-0)^4}{24} + \frac{20(4-2)^4}{24}.$$

Последний член уравнения учитывает компенсирующую нагрузку. Подставляя числовые значения, получим $EJ_z \theta_0 = EJ_z \theta_A = 63,3 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$.

Определим прогибы на границах заданных участков. При определении прогиба в сечении C равномерно распределенную нагрузку необходимо продлить до этого сечения и уравновесить её.

В сечении C ($x_C = 6 \text{ м}$):

$$EJ_Z y_C = EJ_Z \theta_0 x_C + \frac{M(x_C - 2)^2}{2} - \frac{R_A(x_C - 0)^3}{6} + \frac{R_B(x_C - 4)^3}{6} - \frac{q(x_C - 0)^4}{24} + \frac{q(x_C - 2)^4}{24} - \frac{q(x_C - 4)^4}{24};$$

$$EJ_Z y_C = 63,3 \cdot 6 + \frac{80 \cdot (6 - 2)^2}{2} - \frac{20 \cdot (6 - 0)^3}{6} + \frac{140 \cdot (6 - 4)^3}{6} - \frac{20 \cdot (6 - 0)^4}{24} + \frac{20(6 - 2)^4}{24} - \frac{20(6 - 4)^4}{24} = -393 \text{ кНм}^3;$$

$$y_C = \frac{-393 \cdot 10^3}{EJ_Z} = \frac{-393 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 13380 \cdot 10^{-8}} = -0,0148 \text{ м}; \quad y_C = -1,480 \text{ см};$$

в сечении D ($x_D = 2$ м):

$$EJ_Z y_D = EJ_Z \theta_0 \cdot x_D - \frac{R_A(x_D - 0)^3}{6} - \frac{q(x_D - 0)^4}{24} = 63,3 \cdot 2 - \frac{20(2 - 0)^3}{6} - \frac{20(2 - 0)^4}{24} = 86,7 \text{ кНм}^3; \quad y_D = \frac{86,7 \cdot 10^3}{EJ_Z} = \frac{86,7 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 13380 \cdot 10^{-8}} = 0,00324 \text{ м} = 0,324 \text{ см}.$$

По полученным значениям прогибов строим изогнутую ось балки (см. рис. 4.5).

Определим угол поворота сечения B ($x_B = 4$ м), продлив и уравновесив распределенную нагрузку

$$EJ_Z \theta_B = EJ_Z \theta_0 + \frac{M(x - 2)^1}{1} - \frac{R_A(x - 0)^2}{2} - \frac{q(x - 0)^3}{6} + \frac{q(x - 2)^3}{6} = 63,3 + \frac{80(4 - 2)^1}{1} - \frac{20(4 - 0)^2}{2} - \frac{20(4 - 0)^3}{6} + \frac{20(4 - 2)^3}{6} = -123 \text{ кНм}^2;$$

$$\theta_B = -\frac{123 \cdot 10^3}{EJ_Z} = -\frac{123 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 13380 \cdot 10^{-8}} = -46 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = -46 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{180}{\pi} = -0,26^\circ = -0^\circ 15' 36''.$$

Максимальный прогиб балки $y_{\max} = y_C = 1,480$ см.

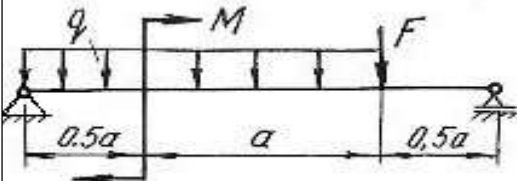
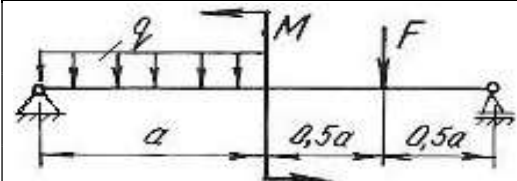
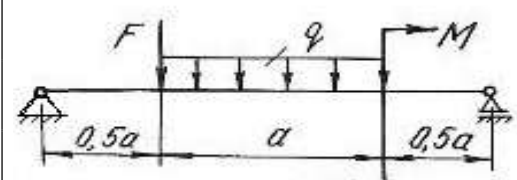
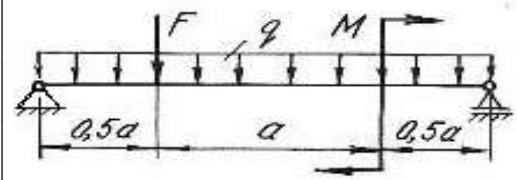
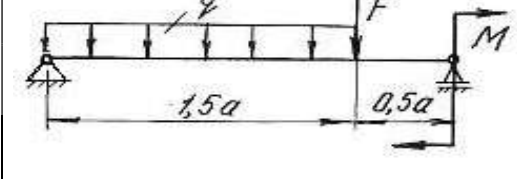
Таким образом, $y_{\max} = 1,480$ см $<$ $y_{\text{adm}} = 2$ см, следовательно, условие жесткости выполняется.

4.4. Задания для расчета балок на жесткость

Для расчетной схемы (табл. 4.2) необходимо:

1. Построить по длине балки эпюры изгибающих моментов и поперечных сил.
2. Подобрать поперечное сечение балки двутаврового профиля (см. табл. П. 1), материал – сталь при $\sigma_{adm} = 160$ МПа.
3. Определить по методу начальных параметров величину прогибов балки в характерных сечениях и провести проверку балки на жесткость, приняв $y_{adm} = (1/100)l$.

Таблица 4.2

Схема балки и нагрузки	Вариант	a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	1	1	10	30	20
	2	0,5	20	25	30
	3	1	10	10	16
	4	2	20	30	10
	5	0,5	30	15	12
	6	1	12	36	24
	7	2	6	12	10
	8	1	4	12	8
	9	0,5	10	20	16
	10	2	4	12	10
	11	1	20	24	12
	12	1	12	12	10
	13	2	10	4	10
	14	1	8	20	30

Продолжение табл. 4.2

Схема балки и нагрузки	Вариант	a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	15	1	8	12	16
	16	1	12	14	10
	17	2	4	16	6
	18	1	10	18	24
	19	2	4	16	16
	20	0,5	20	32	24
	21	1	20	15	8
	22	2	8	14	4
	23	0,5	10	28	12
	24	1	24	10	10
	25	2	12	16	12
	26	0,5	4	18	24
	27	1	20	10	6
	28	2	10	8	16
	29	0,5	4	15	8
	30	1	2	6	4
	31	2	4	12	10
	32	0,5	8	12	18
	33	1	10	12	4
	34	2	12	18	12
	35	0,5	20	30	10

Продолжение табл. 4.2

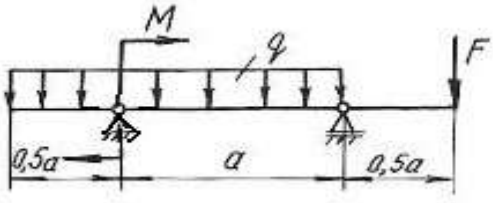
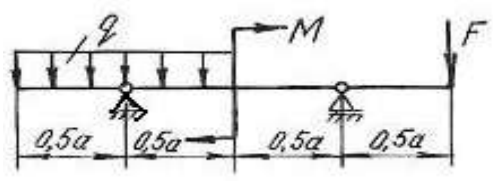
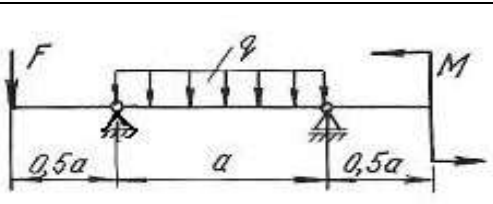
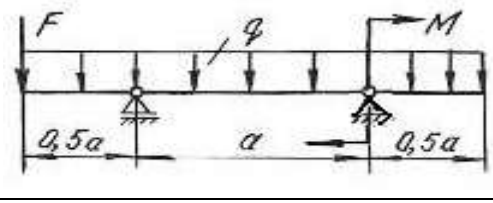
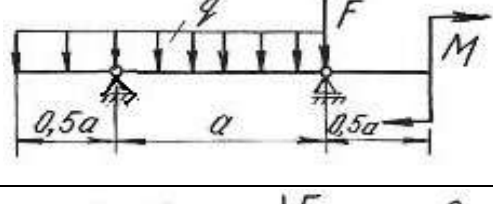
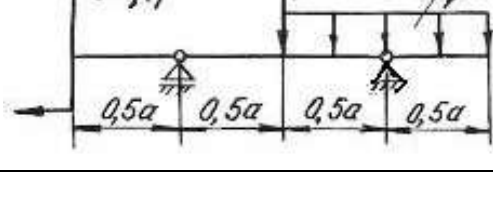
Схема балки и нагрузки	Вариант	a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	36	1	20	12	8
	37	2	12	16	16
	38	1	40	24	20
	39	1	10	20	12
	40	2	4	12	8
	41	1	8	4	12
	42	1	24	12	8
	43	2	8	10	4
	44	1	12	24	20
	45	1	36	12	24
	46	2	32	16	20
	47	1	16	8	8
	48	1	16	18	10
	49	2	12	20	12
	50	1	32	10	6
	51	1	24	20	4
	52	2	4	24	16
	53	1	8	30	10

Схема балки и нагрузки	Вариант	a , м	q , кН/м	M , кН·м	F , кН
	54	1	10	12	6
	55	2	4	10	8
	56	0,5	8	8	4
	57	1	20	12	6
	58	2	12	36	8
	59	1	24	16	12
	60	1	10	40	16
	61	0,5	12	18	10
	62	2	4	36	12
	63	1	10	20	10
	64	1	12	16	8
	65	2	4	16	12
	66	1	12	10	20
	67	2	8	32	16
	68	0,5	24	12	12
	69	1	10	18	12
	70	2	8	36	16
	71	0,5	20	42	8

Глава 5

СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ НЕРАЗРЕЗНЫЕ МНОГОПРОЛЕТНЫЕ БАЛКИ И ПЛОСКИЕ РАМЫ

5.1. Статически неопределимые балки

Цельная балка, лежащая на нескольких опорах, называется неразрезной. С промежуточными опорами такая балка обычно соединена шарнирно. Концевые опоры могут быть или шарнирными или защемленными.

Неразрезные балки представляют собой статически неопределимые системы, так как для их расчета уравнений статики недостаточно. Эти балки могут быть рассчитаны с помощью теоремы о трех моментах или методом сил.

В данном разделе рассматривается решение неразрезной балки по методу сил.

Способ расчета статически неопределимых систем, при котором за «лишние» неизвестные принимаются силы или моменты, называется **методом сил**. Для расчета статически неопределимой балки необходимо раскрыть ее статическую неопределимость, для чего эту балку освобождают сначала от «лишних» связей, превращая ее тем самым в статически определимую (геометрически неизменяемую) систему, называемую основной системой. Она может быть получена путем введения необходимого количества шарниров, балочных опор, путем разреза контура (чаще для рам) и др.

Дополнительные уравнения для нахождения «лишних» неизвестных составляются из условий, что взаимные перемещения основной системы в местах приложения «лишних» неизвестных равны нулю (условия совместности деформаций – условия неразрезности).

Степень статической неопределимости балки соответствует количеству «лишних» неизвестных. В качестве «лишних» неизвестных можно принимать реакции на опорах балки или опорные моменты. Для многопролетных неразрезных балок за «лишние» неизвестные удобнее принять опорные моменты. Опорными моментами называют суммарные моменты внутренних сил упругости, возникающих в поперечных сечениях над опорами.

На рис. 5.1, *а* показана дважды статически неопределимая балка. За «лишние» неизвестные приняты опорные моменты на первой и второй опорах. Моменты на нулевой и третьей опорах равны нулю (рис. 5.1, *б*).

Для определения «лишних» неизвестных воспользуемся условием:

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= 0, \\ \Delta_2 &= 0,\end{aligned}\tag{5.1}$$

где Δ_1 – суммарное возможное перемещение центра тяжести поперечного сечения от всех внешних нагрузок и от всех «лишних» неизвестных по направле-

нию действия первой «лишней» неизвестной X_1 ; Δ_2 – суммарное возможное перемещение центра тяжести поперечного сечения от всех внешних нагрузок и от всех «лишних» неизвестных по направлению действия второй «лишней» неизвестной X_2 .

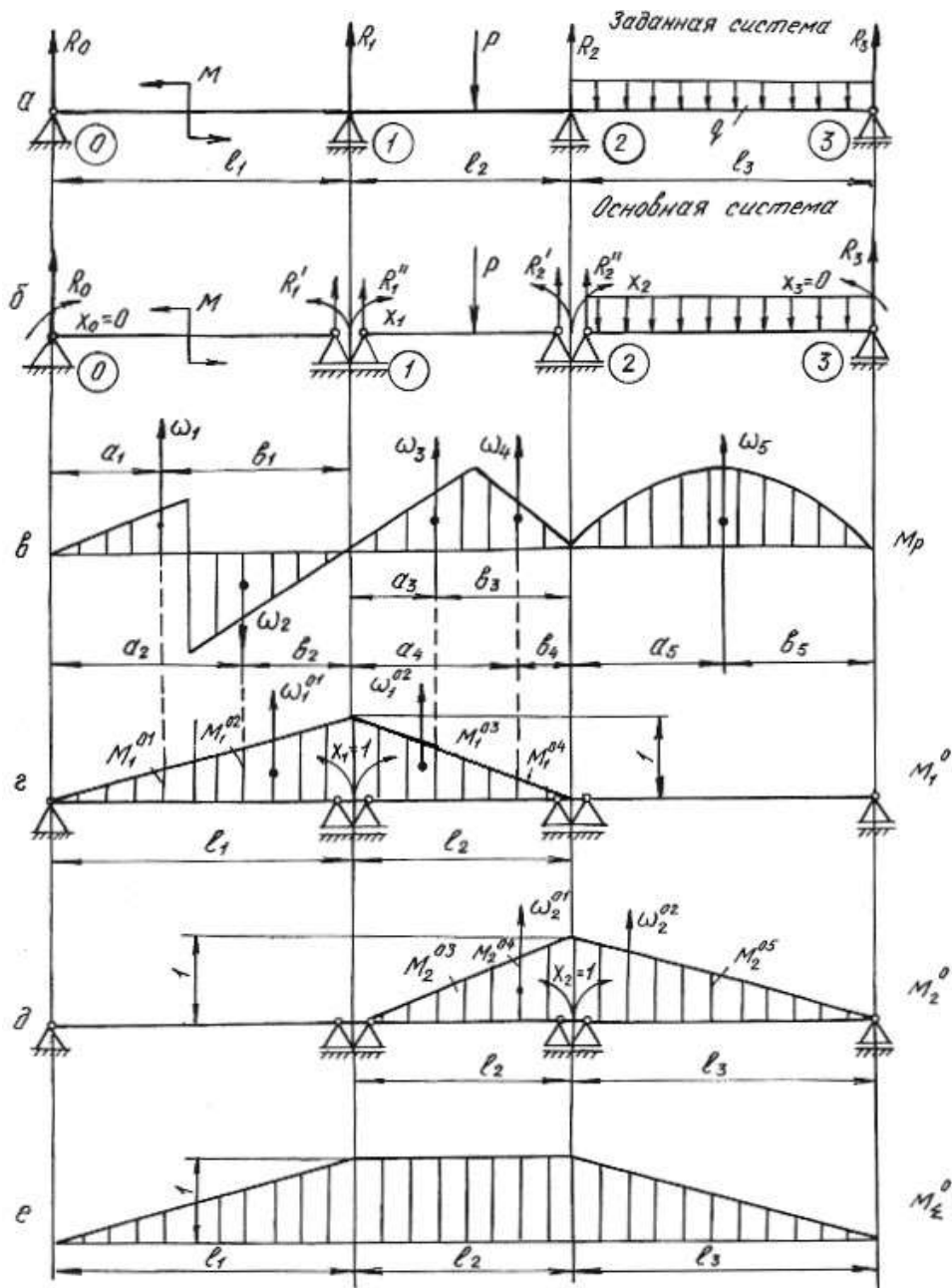


Рис. 5.1.

Эти перемещения в силу принципа независимости действия сил можно представить как сумму перемещений от каждой отдельной силы, приложенной к системе, т. е. от внешней нагрузки, обобщенно обозначаемой буквой P , и от неизвестных X_1 , X_2 , приложенных на опорах основной системы. Указанные пе-

ремещения выражаются через неизвестные X_1, X_2 , нагрузку P и перемещения от единичных сил $X_1=1, X_2=1$.

$$\begin{aligned}\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} &= 0, \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} &= 0.\end{aligned}\tag{5.2}$$

Эти уравнения носят название канонических уравнений метода сил. Число их равно степени статической неопределимости системы. На примере первого уравнения рассмотрим обозначения:

δ_{11} – возможное перемещение центра тяжести поперечного сечения от действия единичной силы $X_1 = 1$ по направлению действия первой «лишней» неизвестной X_1 ;

$\delta_{11}X_1$ – возможное перемещение, вызванное действием X_1 по ее направлению;

δ_{12} – возможное перемещение от единичной нагрузки $X_2 = 1$ по направлению X_1 ;

$\delta_{12}X_2$ – возможное перемещение от второй «лишней» неизвестной X_2 по направлению X_1 ;

Δ_{1p} – возможное перемещение от всех внешних нагрузок по направлению «лишней» неизвестной X_1 .

Коэффициенты канонических уравнений с одинаковыми числовыми индексами δ_{11}, δ_{22} называются *главными коэффициентами*. Они всегда положительны. Коэффициенты с разными числовыми индексами δ_{21}, δ_{12} называются *побочными*. Они могут быть положительными или отрицательными. На основании теоремы о взаимности перемещений побочные коэффициенты $\delta_{21} = \delta_{12}$.

Свободные члены канонических уравнений Δ_{1p} , и Δ_{2p} еще называют *грузовыми членами*, так как они представляют собой перемещения от внешних нагрузок.

Для вычисления коэффициентов и грузовых членов канонических уравнений строим эпюры изгибающих моментов от единичных нагрузок (единичные эпюры) – рис. 5.1, *г, д* и эпюры изгибающих моментов от внешних нагрузок (грузовые эпюры) – рис. 5.1, *в*.

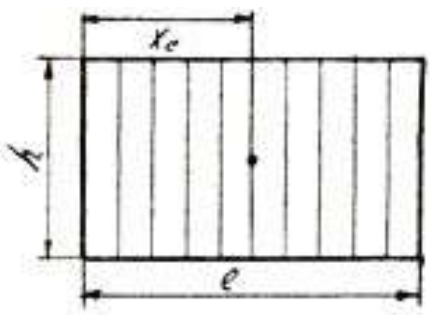
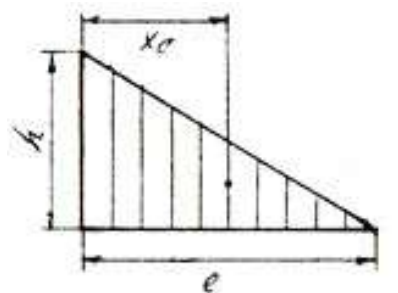
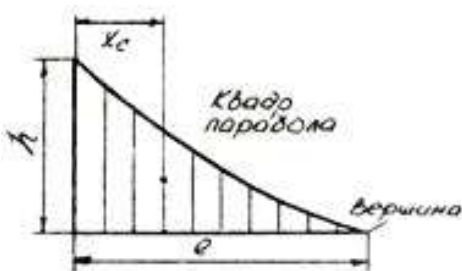

Коэффициенты уравнений и свободные члены находим путем перемножения эпюр по формуле Верещагина (или по формуле Симпсона)

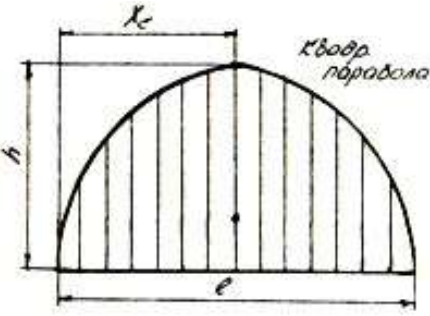
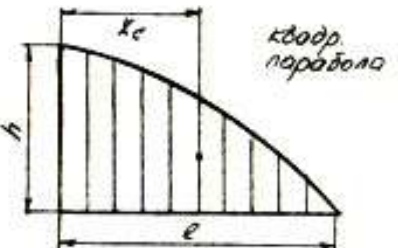
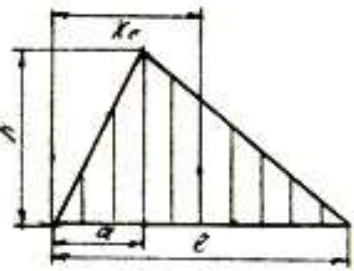
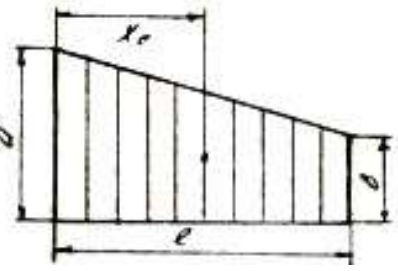
$$\delta = \frac{1}{EJ} \sum \omega M_c^0,\tag{5.3}$$

где ω – площадь эпюры изгибающих моментов; M_c^0 – ордината из единичной эпюры напротив центра тяжести грузовой эпюры; EJ – жесткость балки при изгибе.

Формулы для определения площадей и координат их центров тяжести приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Фигура	ω	x_c
	lh	$\frac{1}{2}l$
	$\frac{1}{2}lh$	$\frac{1}{3}l$
	$\frac{1}{3}lh$	$\frac{1}{4}l$
	$\frac{1}{4}lh$	$\frac{1}{5}l$

Фигура	ω	x_c
	$\frac{2}{3}lh$	$\frac{1}{2}l$
	$\frac{2}{3}lh$	$\frac{3}{8}l$
	$\frac{1}{2}lh$	$\frac{a+l}{3}$
	$l \frac{a+b}{2}$	$\frac{(a+2b)l}{3(a+b)}$

Главные коэффициенты δ_{11} и δ_{22} находим в результате перемножения единичных эпюр M_1^0 , M_2^0 самих на себя

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \sum \omega_1^0 M_{c1}^0 = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_1 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) + \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_2 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(\frac{l_1}{3} + \frac{l_2}{3} \right);$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EJ} \sum \omega_2^0 M_{c2}^0 = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_2 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) + \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_3 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(\frac{l_2}{3} + \frac{l_3}{3} \right);$$

Побочные коэффициенты находим путем взаимного перемножения указанных единичных эпюр.

Для определения коэффициента δ_{12} берется площадь эпюры M_2^0 на участке длиной l_2 , которая умножается на ординату с эпюры M_1^0

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{EJ} \sum \omega_2^0 M_{c1}^0 = \frac{1}{EJ} \sum \omega_1^0 M_{c2}^0 = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_2 \cdot 1 \right) \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 = \frac{l_2}{6 \cdot EJ}.$$

Свободные члены уравнений находим путем умножения грузовых эпюр M_p на единичные M_1^0 и M_2^0

$$\begin{aligned} \Delta_{1p} &= \frac{1}{EJ} \sum \omega_p M_{c1}^0 = \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 M_1^{01} - \omega_2 M_1^{02} + \omega_3 M_1^{03} + \omega_4 M_1^{04} \right) = \\ &= \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 \frac{a_1}{l_1} - \omega_2 \frac{a_2}{l_1} + \omega_3 \frac{b_3}{l_2} + \omega_4 \frac{b_4}{l_2} \right), \end{aligned}$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – площади грузовых эпюр; $M_1^{01}, M_1^{02}, M_1^{03}, M_1^{04}$ – ординаты, взятые из единичной эпюры M_1^0 напротив центров тяжести указанных площадей.

$$\begin{aligned} \Delta_{2p} &= \frac{1}{EJ} \sum \omega_p M_{c2}^0 = \frac{1}{EJ} \left(\omega_3 M_2^{03} + \omega_4 M_2^{04} + \omega_5 M_2^{05} \right) = \\ &= \frac{1}{EJ} \left(\omega_3 \frac{a_3}{l_2} + \omega_4 \frac{a_4}{l_2} + \omega_5 \frac{b_5}{l_3} \right). \end{aligned}$$

После подстановки найденных перемещений в канонические уравнения получим

$$\frac{1}{EJ} \left(\frac{l_1}{3} + \frac{l_2}{3} \right) X_1 + \frac{l_2}{6EJ} X_2 + \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 \frac{a_1}{l_1} - \omega_2 \frac{a_2}{l_1} + \omega_3 \frac{b_3}{l_2} + \omega_4 \frac{b_4}{l_2} \right) = 0;$$

$$\frac{l_2}{6EJ} X_1 + \frac{1}{EJ} \left(\frac{l_2}{3} + \frac{l_3}{3} \right) X_2 + \frac{1}{EJ} \left(\omega_3 \frac{a_3}{l_2} + \omega_4 \frac{a_4}{l_2} + \omega_5 \frac{b_5}{l_3} \right) = 0.$$

Во избежание ошибок при определении «лишних» неизвестных необходимо проверить правильность определения коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Для этого необходимо построить суммарную эпюру единичных моментов M_Σ^0 .

При умножении по правилу Верещагина суммарной единичной эпюры M_{Σ}^0 на единичную эпюру M_1^0 должна получиться сумма коэффициентов первого канонического уравнения

$$\delta_{11} + \delta_{12} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_1 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) + \frac{1}{EJ} \left(l_2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(\frac{l_1}{3} + \frac{l_2}{2} \right).$$

При умножении суммарной эпюры M_{Σ}^0 на эпюру M_2^0 должна получиться сумма коэффициентов второго канонического уравнения

$$\delta_{21} + \delta_{22} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_3 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) + \frac{1}{EJ} \left(l_2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(\frac{l_3}{3} + \frac{l_2}{2} \right).$$

Эта проверка называется построчной.

Произведение суммарной единичной эпюры самой на себя должно быть равным сумме всех коэффициентов канонических уравнений

$$\begin{aligned} \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{21} + \delta_{22} &= \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_1 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) + \frac{1}{EJ} (l_2 \cdot 1 \cdot 1) + \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_3 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \\ &= \frac{1}{EJ} \left(\frac{l_1}{3} + l_2 + \frac{l_3}{3} \right). \end{aligned}$$

Эта проверка называется универсальной.

Правильность определения грузовых членов уравнений состоит в следующем: их сумма должна равняться произведению грузовой эпюры M_p на суммарную единичную эпюру M_{Σ}^0

$$\Delta_{1p} + \Delta_{2p} = \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 \frac{a_1}{l_1} - \omega_2 \frac{a_2}{l_1} + \omega_3 \cdot 1 + \omega_4 \cdot 1 + \omega_5 \frac{b_5}{l_3} \right).$$

Убедившись в правильности определения коэффициентов и свободных членов уравнений методом последовательного исключения, находим «лишние» неизвестные X_1 и X_2 из канонических уравнений. При правильном определении «лишних» неизвестных после их подстановки в канонические уравнения, последние должны обращаться в тождества.

Учитывая опорные моменты и внешние нагрузки, определяют по уравнениям статики опорные реакции, строят эпюру поперечных сил Q_x и эпюру изгибающих моментов M_x .

Порядок решения неразрезной балки методом сил сводится к следующему:

1. Определяют степень статической неопределимости балки;
2. Выбирают основную систему (тем самым выбирают «лишние» неизвестные);
3. По числу «лишних» неизвестных составляются канонические уравнения;

4. Строят эпюры изгибающих моментов от действующих на основную систему внешних нагрузок – грузовые эпюры;
5. В местах действия «лишних» неизвестных и по направлению их действия прикладывают единичные моменты и строят эпюры изгибающих моментов от этих единичных моментов – единичные эпюры;
6. Вычисляют главные, побочные коэффициенты и свободные члены канонических уравнений и проверяют правильность их вычисления;
7. Методом последовательного исключения неизвестных решают канонические уравнения и определяют «лишние» неизвестные с последующей проверкой;
8. С помощью уравнений равновесия определяют опорные реакции заданной балки с последующей проверкой;
9. Строят эпюры поперечных сил Q_x и изгибающих моментов M_x ;
10. Подбирают поперечное сечение балки заданного профиля;
11. Производят проверку на прочность и жесткость балки, если это требуется по условию задачи.

Пример 5.1.

Для заданной схемы стальной неразрезной балки (рис. 5.2, а) требуется:

1. Построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов;
2. Подобрать поперечное сечение двутаврового профиля (см. табл. П. 1), если $\sigma_{adm} = 160 \text{ МПа}$, $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

Решение.

Определяем степень статической неопределимости балки. Она равна двум (числу опор без двух плюс единица из-за наличия жесткой заделки) и выбираем основную систему.

В качестве «лишних» неизвестных принимаются опорные моменты. Основная система показана на рис. 5.2, б.

Составляем канонические уравнения:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0,$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0.$$

Для определения главных, побочных коэффициентов и свободных членов уравнений строим единичные эпюры M_1^0 (рис. 5.2, г), M_2^0 (рис. 5.2, д) и суммарную единичную эпюру M_Σ^0 (рис. 5.2, е). Грузовые эпюры M_p представлены на рис. 5.2, в.

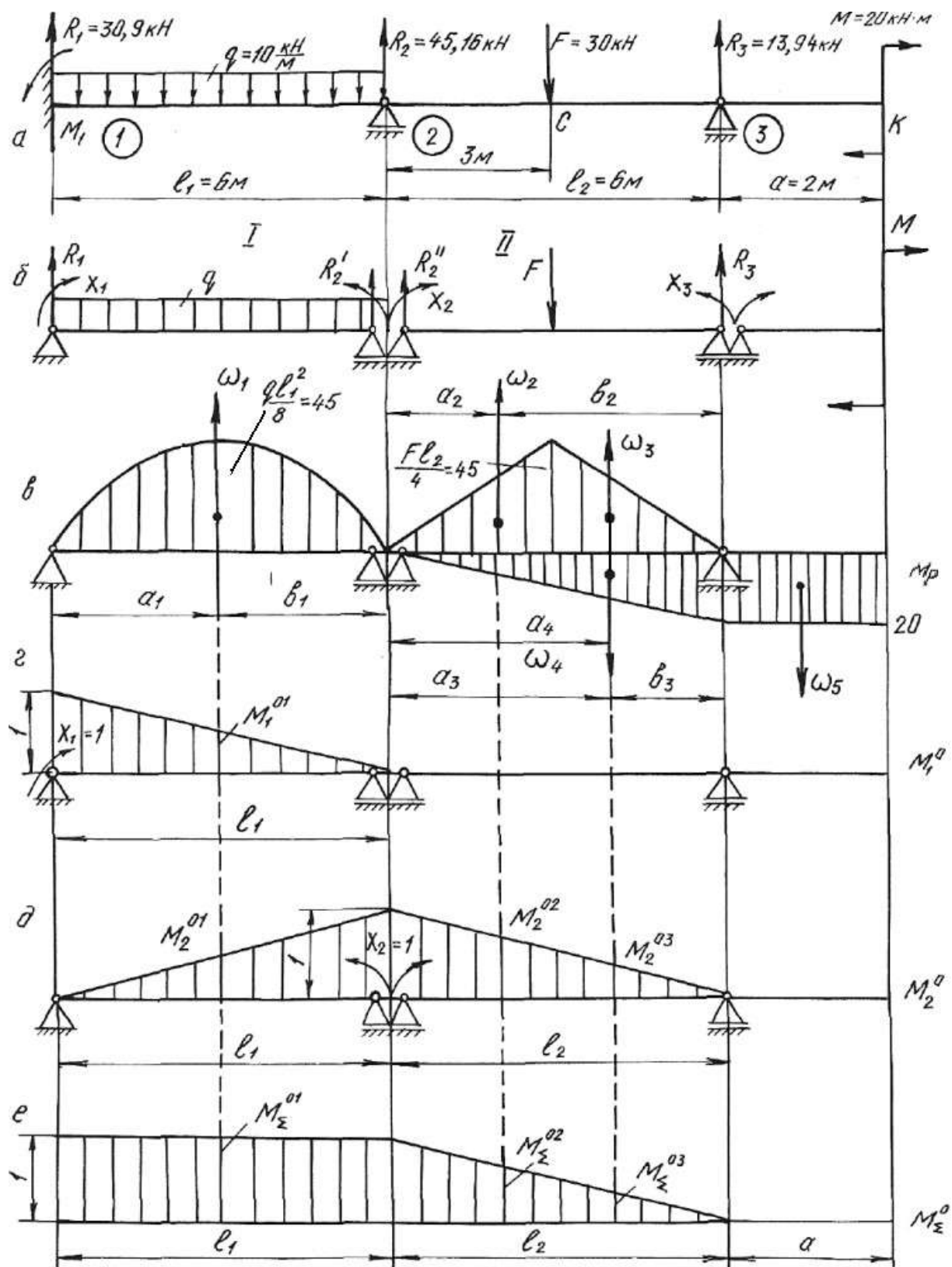


Рис. 5.2.

Путем умножения эюр M_1^0 и M_2^0 самих на себя, находим значения главных коэффициентов:

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot l_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{2,0}{EJ};$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot l_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot l_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} (2,0 + 2,0) = \frac{4,0}{EJ}.$$

Побочные коэффициенты определяем путем взаимного перемножения единичных эюр M_1^0 и M_2^0

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot l_1 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ}.$$

Находим свободные (грузовые) члены уравнений, перемножая эюры изгибающих моментов от внешних нагрузок на единичные эюры.

Площади грузовых эюр:

$$\omega_1 = \frac{2}{3} h_1 l_1 = \frac{2}{3} \cdot 4,5 \cdot 10^4 \cdot 6 = 18 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$\omega_2 = \omega_3 = \frac{1}{2} h_2 \frac{l_2}{2} = \frac{1}{2} \cdot 4,5 \cdot 10^4 \cdot 3 = 6,75 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$\omega_4 = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 6 = 6 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

Расстояния $a_1 = b_1 = 3$ м; $a_2 = b_3 = 2$ м; $b_2 = a_3 = 4$ м; $a_4 = 4$ м.

$$\Delta_{1p} = \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 M_1^{01} \right) = \frac{1}{EJ} \left(18 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 \right) = \frac{9 \cdot 10^4}{EJ},$$

где M_1^{01} – ордината единичной эюры M_1^0 напротив центра тяжести площади грузовой эюры ω :

$$\Delta_{2p} = \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 M_2^{01} + \omega_2 M_2^{02} + \omega_3 M_2^{03} - \omega_4 M_2^{04} \right) =$$

$$= \frac{1}{EJ} \left(18 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 - 6 \cdot 10^4 \cdot \frac{2}{6} + 6,75 \cdot 10^4 \cdot \frac{4}{6} + 6,75 \cdot 10^4 \cdot \frac{2}{6} \right) =$$

$$= \frac{15,75 \cdot 10^4}{EJ} - \frac{2 \cdot 10^4}{EJ} = \frac{13,75 \cdot 10^4}{EJ},$$

где M_2^{01} , M_2^{02} , M_2^{03} , M_2^{04} – ординаты единичной эюры M_2^0 напротив центров тяжести площадей грузовых эюр ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 .

Производим проверку правильности определения коэффициентов и свободных членов уравнений, для чего строим суммарную единичную эюру M_{Σ}^0 .

Построчная проверка. Перемножая суммарную единичную эпюру M_{Σ}^0 на единичную эпюру M_1^0 , должны получить сумму коэффициентов первого канонического уравнения

$$\delta_{11} + \delta_{12} = \frac{1}{EJ} \left(1 \cdot l_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 + 0 \right) = \frac{3}{EJ}.$$

При перемножении эпюры M_{Σ}^0 на единичную эпюру M_2^0 должны получить сумму коэффициентов второго канонического уравнения:

$$\delta_{21} + \delta_{22} = \frac{1}{EJ} \left(1 \cdot l_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot l_2 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(1 \cdot 6 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{5,00}{EJ}.$$

Универсальная проверка. Умножаем суммарную единичную эпюру M_{Σ}^0 саму на себя. Должны получить сумму всех коэффициентов канонических уравнений:

$$\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{21} + \delta_{22} = \frac{1}{EJ} \left(1 \cdot l_1 \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot l_2 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \right) = \frac{1}{EJ} \left(1 \cdot 6 \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \right) = \frac{8,00}{EJ}.$$

Проводим проверку правильности определения грузовых членов уравнений.

Перемножением грузовой эпюры M_p на суммарную единичную эпюру M_{Σ}^0 должны получить сумму свободных членов уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta_{1p} + \Delta_{2p} &= \frac{1}{EJ} \left(\omega_1 M_{\Sigma}^{01} + \omega_2 M_{\Sigma}^{02} + \omega_3 M_{\Sigma}^{03} - \omega_4 M_{\Sigma}^{04} \right) = \\ &= \frac{1}{EJ} \left(18 \cdot 10^4 \cdot 1 + 6,75 \cdot 10^4 \cdot \frac{4}{6} + 6,75 \cdot 10^4 \cdot \frac{2}{6} - 6 \cdot 10^4 \cdot \frac{2}{6} \right) = \frac{22,75 \cdot 10^4}{EJ}. \end{aligned}$$

Подставляем коэффициенты и свободные члены в канонические уравнения:

$$\frac{2,00}{EJ} X_1 + \frac{1,00}{EJ} X_2 + \frac{9 \cdot 10^4}{EJ} = 0.$$

$$\frac{1,00}{EJ} X_1 + \frac{4,0}{EJ} X_2 + \frac{13,75 \cdot 10^4}{EJ} = 0.$$

После сокращения на жесткость получаем:

$$2,00 X_1 + 1,00 X_2 + 9 \cdot 10^4 = 0.$$

$$1,00 X_1 + 4,00 X_2 + 13,75 \cdot 10^4 = 0.$$

Решая совместно эти уравнения, находим:

$$X_1 = M_1 = -3,18 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м} = -31,8 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$X_2 = M_2 = -2,64 \cdot 10^4 \text{ Нм} = -26,4 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

На опоре № 3 (см. рис. 5.2, а) опорный момент будет равен моменту M со знаком минус:

$$X_3 = M_3 = -20 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Подставив найденные значения «лишних» неизвестных в канонические уравнения, убеждаемся в том, что эти уравнения превращаются в тождества.

Определяем опорные реакции заданной балки из уравнений статики:

$$\sum M_1^I = 0; \quad R_2 l_1 + M_2 - \frac{q l_1^2}{2} - M_1 = 0;$$

$$R_2' = -\frac{M_2}{l_1} + \frac{q l_1}{2} + \frac{M_1}{l_1} = \frac{26,4}{6} + \frac{10 \cdot 6}{2} - \frac{31,8}{6} = 29,1 \text{ кН}.$$

$$\sum M_2^I = 0; \quad -R_1 l_1 - M_1 + \frac{q l_1^2}{2} + M_2 = 0;$$

$$R_1 = -\frac{M_1}{l_1} + \frac{q l_1}{2} + \frac{M_2}{l_1} = \frac{31,8}{6} + \frac{10 \cdot 6}{2} - \frac{26,4}{6} = 30,9 \text{ кН}.$$

$$\sum M_2^{II} = 0; \quad M_3 + R_3 l_3 - F \frac{l_2}{2} - M_2 = 0;$$

$$R_3 = -\frac{M_3}{l_2} + \frac{F}{2} + \frac{M_2}{l_2} = \frac{20}{6} + \frac{30}{2} - \frac{26,4}{6} = 13,94 \text{ кН}.$$

$$\sum M_3^{II} = 0; \quad -M_2 - R_2' l_2 + P \frac{l_2}{2} + M_3 = 0;$$

$$R_2'' = -\frac{M_2}{l_2} + \frac{F}{2} + \frac{M_3}{l_2} = \frac{26,4}{6} + \frac{30}{2} - \frac{20}{6} = 16,06 \text{ кН}.$$

Окончательно:

$$R_1 = 30,9 \text{ кН}; \quad R_2 = R_2' + R_2'' = 29,1 + 16,06 = 45,16 \text{ кН}; \quad R_3 = 13,94 \text{ кН}.$$

Проверка:

$$\sum Y = 0; \quad R_1 + R_2 + R_3 - F - q \cdot l_1 = 0; \quad 30,9 + 45,16 + 13,94 - 30 - 10 \cdot 6 = 0.$$

Строим эпюру поперечных сил Q_x и эпюру изгибающих моментов M_x по правилам, принятым при построении эпюр для статически определимых балок (рис. 5.3).

$$Q_1 = R_1 = 30,9 \text{ кН};$$

$$Q_2 = R_1 - q \cdot l_1 = 30,9 - 10 \cdot 6 = -29,1 \text{ кН};$$

Затем скачок вверх на $R_2 = 45,16 \text{ кН}$.

На участке от опоры 2 до сечения C : $Q_x = 16,06 \text{ кН}$.

Затем скачок вниз в сечении C на силу F , $Q_C = 16,06 - 30 = -13,94 \text{ кН}$.

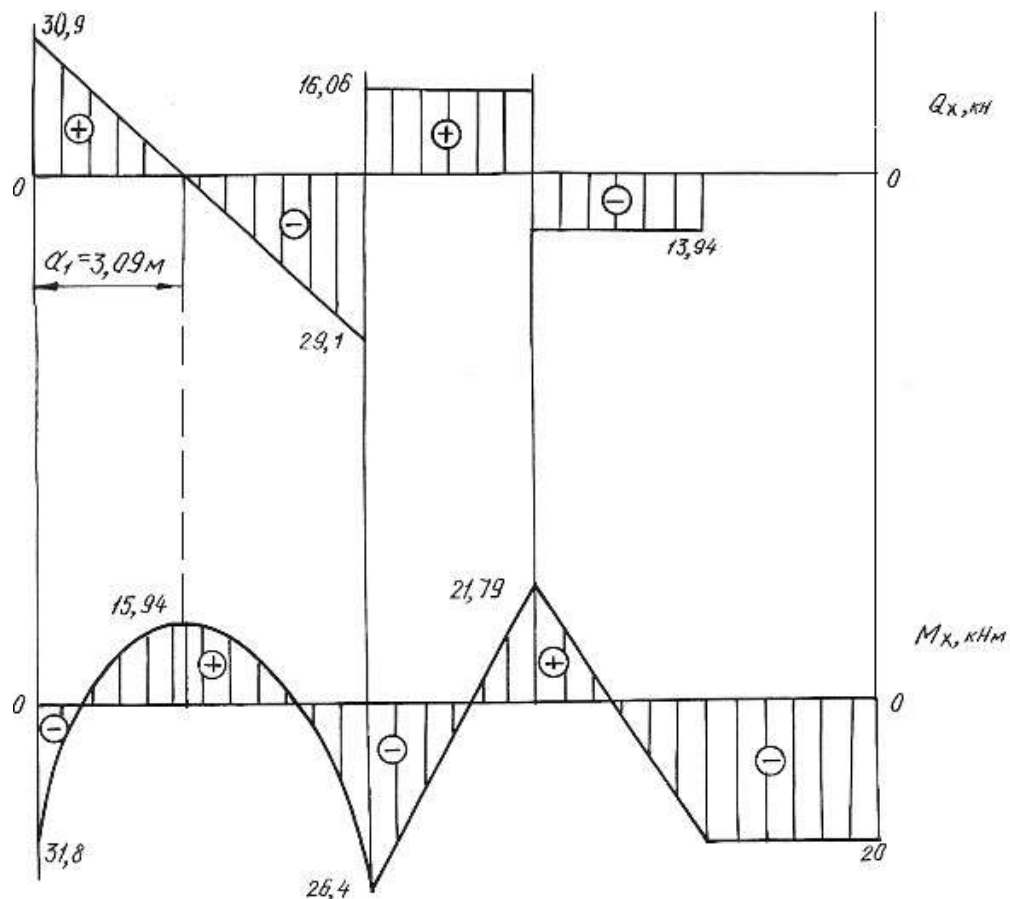


Рис. 5.3.

Находим расстояние a

$$\frac{30,9}{a_1} = \frac{29,1}{6 - a_1}, \quad a_1 = 3,09 \text{ м.}$$

На участке от сечения C до опоры 3

$$Q_{C-3} = -13,94 \text{ кН.}$$

В левом крайнем сечении $M_x = -M_1 = -31,8 \text{ кН} \cdot \text{м.}$

При $x = a_1 = 3,09 \text{ м}$

$$M_x = R_1 a_1 - \frac{q a_1^2}{2} - M_1 = 30,9 \cdot 3,09 - \frac{10 \cdot 3,09^2}{2} - 31,8 = 15,94 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

В сечении над опорой 2

$$M_x = -M_1 + R_1 l_1 - \frac{q l_1^2}{2} = -31,8 + 30,9 \cdot 6 - \frac{10 \cdot 6^2}{2} = -26,4 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

До сечения C расчет производим справа:

$$M_k = -M = -20 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$M_C = -M + R_3 \cdot 3 = -20 + 13,93 \cdot 3 = 21,79 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

На участке балки от сечения K до опоры 3: $M_x = -20 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

По сортаменту проката в соответствии с ГОСТ 8239-89 подбираем поперечное сечение двутаврового профиля, используя условие прочности

$$M_{\max} \leq \sigma_{\text{adm}} \cdot W_{\text{н.о.}}$$

откуда $W_{\text{н.о.}} \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{31,8 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 1,98 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 198 \text{ см}^3$.

Принимаем двутавр № 20а, для которого $W_{\text{н.о.}} = W_x^{\text{табл.}} = 203 \text{ см}^3$,
 $J_{\text{н.о.}} = J_x^{\text{табл.}} = 2030 \text{ см}^4$, $A = 28,9 \text{ см}^2$.

5.2. Задания для расчета статически неопределимых балок

Для заданной схемы неразрезной балки при заданных значениях длин и нагрузок в соответствии с указанным номером варианта требуется:

1. Определить степень статической неопределимости балки, выбрать основную систему.
2. Составить канонические уравнения по методу сил.
3. Вычислить коэффициенты при неизвестных и свободные члены канонических уравнений. Проверить правильность их определения.
4. После определения неизвестных построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов.
5. Подобрать поперечное сечение балки двутаврового профиля (см. табл. П. 1) при $\sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа}$. Данные для расчета взять из табл. 5.2.

Таблица 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	M , кН·м	F , кН	q , кН/м	l_1 , м	l_2 , м	a , м
	1	10	10	15	3,5	5,0	0,5
	2	20	11	15	2,5	4,0	0,5
	3	30	12	15	4,0	4,0	0,5
	4	15	13	10	3,0	5,5	0,5
	5	20	14	10	3,5	5,0	0,5
	6	25	15	10	2,5	5,0	0,4

Продолжение табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	M , кН·м	F , кН	q , кН/м	l_1 , м	l_2 , м	a , м
	7	10	10	10	5,0	5,0	0,4
	8	15	11	15	3,5	6,0	0,6
	9	20	12	20	3,5	5,0	0,4
	10	10	15	20	4,0	5,0	0,4
	11	20	20	10	2,0	5,0	0,5
	12	30	25	10	3,0	4,0	0,6
	13	30	11	15	2,0	5,0	0,4
	14	40	10	15	4,5	5,0	0,5
	15	20	12	15	3,5	5,5	0,6
	16	15	12	10	3,5	4,5	0,5
	17	20	10	10	2,6	5,2	0,4
	18	25	11	10	2,0	5,0	0,8
	19	25	20	20	3,5	6,0	0,5
	20	20	25	15	3,0	5,5	0,8
	21	15	10	10	3,5	3,5	0,8
	22	20	10	10	3	5	0,5
	23	30	11	10	4	6	0,4
	24	25	12	10	5	6	0,6
	25	20	15	10	2	3	0,4
	26	30	16	10	3	4	0,5
	27	40	20	10	4	5	0,6

Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	M , кН·м	F , кН	q , кН/м	l_1 , м	l_2 , м	a , м
	28	15	10	15	3	5	0
	29	20	15	15	4	6	0,5
	30	25	20	15	5	6	0,4
	31	30	12	20	2	3	0,4
	32	35	14	15	3	4	0,5
	33	40	16	20	2,5	5	0,6
	34	10	20	10	3	5,5	0,4
	35	15	15	15	2,5	4	0,5
	36	20	10	20	5	6	0,6
	37	20	12	15	4	6	0,4
	38	15	14	20	3,5	4	0,6
	39	10	16	25	4	5	0,5
	40	10	10	30	2,5	4	0,4
	41	15	20	20	3	5	0,5
	42	20	30	10	4	6	0,6
	43	10	15	10	3	5	0,4
	44	20	25	12	4	5	0,5
	45	30	35	14	5	6	0,6
	46	40	10	10	2	5	0,5
	47	20	25	16	3	4	0,6
	48	10	30	10	4	6	0,4

Продолжение табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	M , кН·м	F , кН	q , кН/м	l_1 , м	l_2 , м	a , м
	49	30	25	12	5	6	0,5
	50	15	15	15	6	5	0,4
	51	10	20	20	2	4	0,6
	52	10	20	10	4	5	0,5
	53	20	15	12	5	6	0,5
	54	30	40	14	4	6	0,5
	55	25	20	16	3	4	0,4
	56	35	30	10	5	6	0,5
	57	40	15	12	4	5	0,6
	58	10	20	14	5	6	0,6
	59	15	30	16	2	4	0,5
	60	20	40	10	4	5	0,4
	61	25	10	12	3	5	0,3
	62	35	15	14	5	6	0,6
	63	40	20	16	6	4	0,5
	64	10	–	10	3	4	0,5
	65	20	–	15	4	5	0,6
	66	30	–	12	5	6	0,4
	67	–	12	40	2	3	0,6
	68	–	14	30	3	4	0,5
	69	–	16	25	4	5	0,4

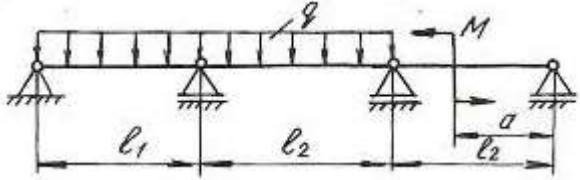
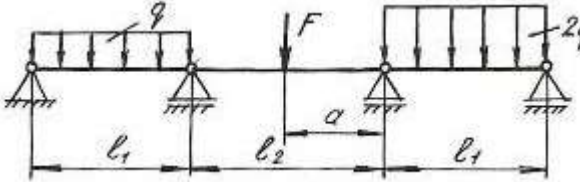
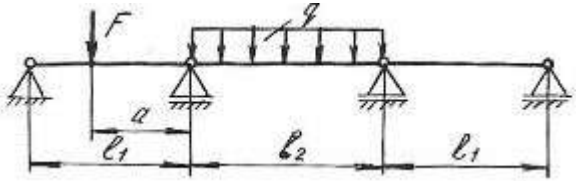
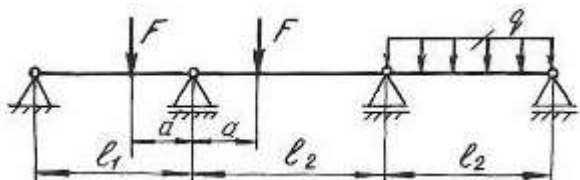
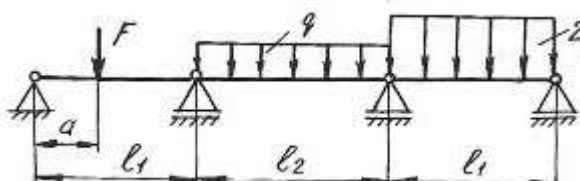
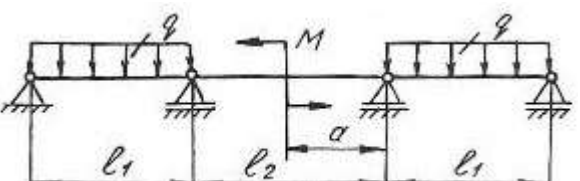
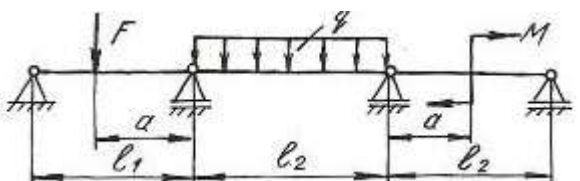
Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	M , кН·м	F , кН	q , кН/м	l_1 , м	l_2 , м	a , м
	70	30	–	20	4	5	0,4
	71	20	–	15	3	4	0,6
	72	40	–	30	2	3	0,8
	73	–	20	20	3	3	0,5
	74	–	15	15	4	5	0,5
	75	–	16	30	5	6	0,5
	76	–	40	20	4	5	0,4
	77	–	30	10	3	5	0,5
	78	–	20	12	2	3	0,6
	79	–	10	20	2	3	0,6
	80	–	12	15	4	5	0,8
	81	–	15	10	6	6	0,5
	82	–	20	12	3	4	0,5
	83	–	10	15	4	5	0,6
	84	–	15	20	5	6	0,8
	85	20	–	12	3	5	0,5
	86	30	–	15	4	6	0,6
	87	40	–	20	5	6	0,8
	88	10	20	12	3	4	0,4
	89	15	30	14	4	6	0,6
	90	20	40	16	5	5	0,5

Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	M , кН·м	F , кН	q , кН/м	l_1 , м	l_2 , м	a , м
	91	12	–	20	5	6	0,5
	92	15	–	30	4	5	0,5
	93	20	–	40	6	4	0,4
	94	–	20	12	5	6	0,5
	95	–	30	15	4	5	0,6
	96	–	40	16	6	4	0,4
	97	20	–	20	3	4	0,5
	98	30	–	30	4	5	0,5
	99	40	–	40	5	6	0,6
	100	–	12	10	6	4	0,4
	101	–	15	15	3	3	0,5
	102	–	20	20	4	5	0,6
	103	–	–	20	5	5	0,8
	104	–	–	30	6	6	0,6
	105	–	–	40	4	8	0,5

5.3. Статически неопределимые рамы

Плоской рамой называется геометрически неизменяемая система, состоящая из стержней, лежащих в одной плоскости и жестко соединенных между собой. Горизонтальные стержни рам называются *ригелями*, вертикальные – *стойками*.

Статически неопределимой рамой называется такая геометрически неизменяемая система, у которой реакции или все внутренние суммарные силовые факторы, возникающие в сечениях ее элементов при действии произвольной нагрузки, не могут быть определены из уравнений статики.

Расчет статически неопределимой рамы сводится к построению эпюр изгибающих моментов M_x , поперечных сил Q_x и нормальных сил N_x , на основании которых подбираются сечения, или проверяются напряжения в опасных сечениях различных элементов, или определяется несущая способность системы.

В пособии рассмотрено только построение эпюр M_x , Q_x , N_x , а также подбор поперечного сечения, так как это наиболее трудоемкая часть расчета.

Степень статической неопределимости плоской рамы определяется следующим образом:

1. Замкнутый контур (рама, оба конца которой жестко зацементированы) имеет степень статической неопределимости, равную трем.
2. Наличие шарнира в раме понижает степень статической неопределимости на единицу.
3. Наличие подвижной опоры также понижает степень статической неопределимости на единицу.

Определение усилий в статически неопределимой раме связано с необходимостью составления дополнительных уравнений – уравнений совместности деформаций. Число этих уравнений должно быть равно степени статической неопределимости рамы.

Прежде, чем составлять уравнение деформаций, следует превратить заданную статически неопределимую раму в статически определимую, геометрически неизменяемую, устранив из нее «лишние» связи. Такая система называется *основной системой*.

Если к основной системе, кроме заданной нагрузки, приложить реакции устраненных связей, то деформации этой системы и возникающие в ней внутренние усилия, будут такими же, как и в заданной системе. То есть, обе системы будут эквивалентными.

В заданной системе в направлениях имеющихся связей перемещений быть не может. Поэтому, в основной системе перемещения в направлении отброшенных связей должны быть равны нулю.

Способ расчета статически неопределимых систем, при котором за «лишние» неизвестные принимаются силы и моменты, называется *методом сил*.

Данный метод рассмотрен при расчете статически неопределимых неразрезных балок в начале этой главы. Определение коэффициентов уравнений и грузовых членов и их проверки рассмотрены также при расчете балок.

Построение эпюр изгибающих моментов, поперечных и продольных сил.

При расчете рам на прочность в каждом поперечном сечении необходимо определять три силовых фактора: продольную силу N_x , поперечную силу Q_x , изгибающий момент M_x .

Продольная сила N_x равна алгебраической сумме проекций всех сил, действующих по одну сторону от сечения на продольную ось бруса. Если сила вызывает растяжение, она положительна, сжатие – отрицательна.

При построении эпюр продольных сил их значения откладываются симметрично от оси бруса в обе стороны с указанием знака.

Поперечная сила Q_x равна алгебраической сумме проекций на нормаль к оси бруса всех сил, действующих по одну сторону от сечения.

Если поперечная сила относительно сечения вращает часть бруса по часовой стрелке, то она положительна. Противоположное направление следует считать отрицательным. Условимся положительные ординаты откладывать снаружи контура, отрицательные – внутри.

При построении эпюр поперечных сил их значения откладываются по одну сторону от оси бруса с указанием знака.

Изгибающий момент M_x равен сумме моментов всех сил, взятых по одну сторону от сечения, относительно оси, проходящей через центр сечения перпендикулярно плоскости рамы. Условно принято построение эпюр изгибающих моментов со стороны растянутых волокон.

Общий порядок расчета статически неопределимых рам по методу сил сводится к следующему.

1. Определяют степень статической неопределимости рамы.
2. Удаляют «лишние» связи. Полученную таким образом основную систему загружают заданными силами и реакциями отброшенных связей.
3. В местах действия «лишних» неизвестных и по направлению их действия прикладывают единичные силы и строят эпюры изгибающих моментов от единичных сил, а также суммарную единичную эпюру.
4. Строят эпюры изгибающих моментов от действующих на основную систему внешних нагрузок.
5. Вычисляют главные, побочные коэффициенты и свободные члены канонических уравнений и проверяют правильность их определения.
6. Составляют и решают канонические уравнения, определяя «лишние» неизвестные.
7. Определяют остальные реакции с помощью уравнений статики.

8. Вычисляют значения изгибающих моментов, поперечных и нормальных сил и строят эпюры.

9. Подбирают поперечное сечение заданного профиля.

Пример 5.2.

Для заданной схемы статически неопределимой рамы (рис. 5.4, а), при заданных значениях длин и нагрузок, построить эпюры изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил. Жесткости стоек и ригеля одинаковы.

Решение.

Заданная система освобождается от наложенных на нее связей. Действия связей заменяются реакциями. Установим степень статической неопределимости рамы: $3(\text{замкнутый контур}) - 2(\text{наличие двух шарниров}) = 1$, т. е. рама однажды статически неопределима.

За «лишнюю» неизвестную X_1 принимаем реакцию H_b . Нагружаем основную систему (рис. 5.4, б) заданными внешними силами и реакцией отброшенной связи. Выбирая основную систему, необходимо помнить, что она должна быть статически определимой и геометрически неизменяемой.

В месте действия «лишней» неизвестной и по направлению ее действия прикладываем единичную силу $X_1 = 1$ и строим единичную эпюру.

Рассмотрим подробно построение этой эпюры. Покажем реакции опор (рис. 5.5), их три. Определим эти реакции по уравнениям статики:

$$\begin{aligned}\sum X &= 0; & H'_a - X_1 &= 0; & H'_a &= 1; \\ \sum M_A &= 0; & -X_1 \cdot 3 + R'_b \cdot 4 &= 0; & R'_b &= \frac{3}{4} = 0,75; \\ \sum M_B &= 0; & -H'_a \cdot 3 + R'_a \cdot 4 &= 0; & R'_a &= \frac{3}{4} = 0,75.\end{aligned}$$

Проверка правильности вычисления реакций:

$$\sum Y = 0; \quad -R'_a + R'_b = 0; \quad 0 = 0.$$

Получили тождество, следовательно, реакции определены правильно.

Разбиваем раму на участки, граница участка там, где приложены сосредоточенные силы и для рамы граница участка, где жестко соединяется стойка с ригелем. Участков три, находим значения изгибающих моментов на границах участков. На всех участках эпюра изгибающих моментов очерчена наклонной прямой, эпюра изгибающих моментов показана на рис. 5.4, в.

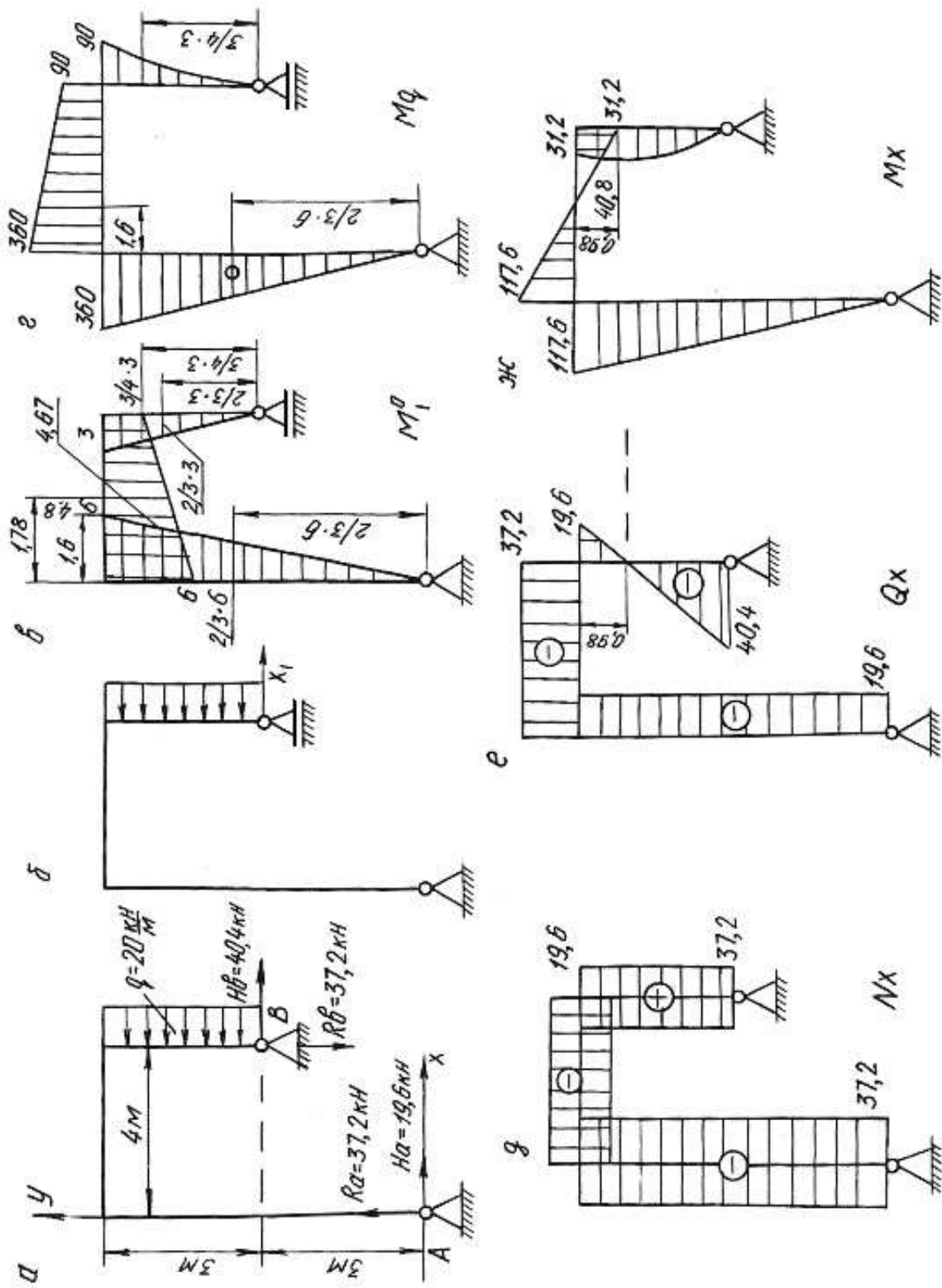


Рис. 5.4.

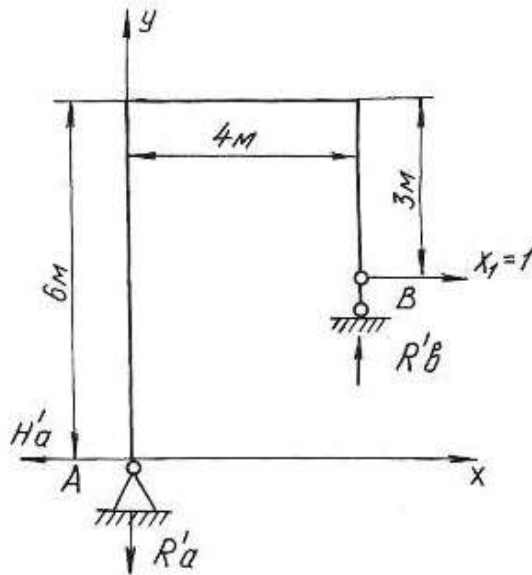


Рис. 5.5.

Строим эпюру изгибающих моментов от действия на основную систему внешней равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q (рис. 5.4, з). По приведенной выше методике определяем реакции опор, разбиваем раму на участки, определяем значения изгибающих моментов на границах участков и по контрольным правилам строим эпюру изгибающих моментов.

По числу «лишних» неизвестных записываем канонические уравнения метода сил

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0.$$

Перемещение δ_{11} определяется перемножением единичной эпюры самой на себя

$$\delta_{11} = \sum \frac{\omega_1^0 M_{c1}^0}{EJ},$$

где ω_1^0 – площадь единичной эпюры; M_{c1}^0 – ордината единичной эпюры под ее центром тяжести.

$$\delta_{11} = \sum \frac{\omega_1^0 M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ \left(\frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 6 \right) \left[\frac{2}{3} \cdot 6 \right] + \left(\frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 3 \right) \left[\frac{2}{3} \cdot 3 \right] + \left(\frac{(3+6)}{2} \cdot 4 \right) [4,67] \right\} = \frac{165,06}{EJ}.$$

На участке по ригелю площадь эпюры изгибающих моментов представлена трапецией. Посмотрим подробнее как определить центр тяжести площади, площадь и ординату под ее центром тяжести (рис. 5.6).

$$C = \frac{4(2 \cdot 3 + 6)}{3(3 + 6)} = 1,78 \text{ м}; \quad \omega_0 = \frac{1}{2}(3 + 6) \cdot 4 = 18 \text{ кН} \cdot \text{м}^2,$$

где ω_0 – площадь трапеции.

$$M_c^0 = (3 + 1,67) = 4,67 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где M_c^0 – ордината под центром тяжести трапеции.

Отрезок 1,67 определяем из подобия треугольников $3 : 4 = x : 2,22$.

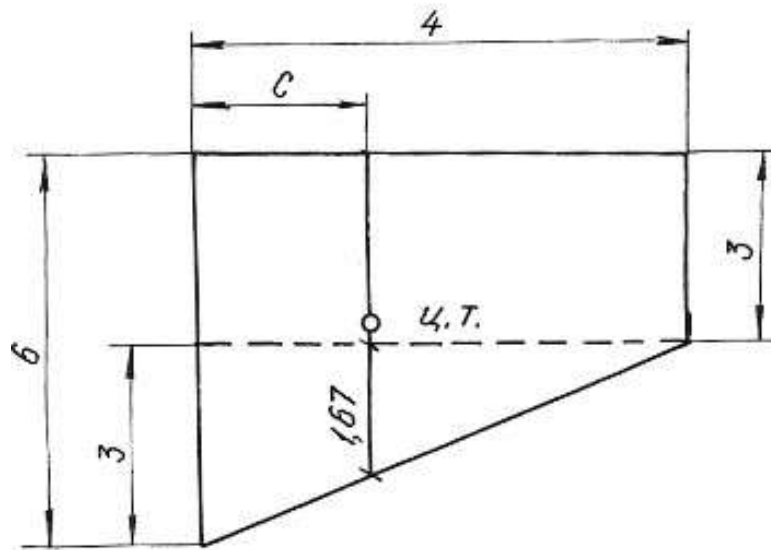


Рис. 5.6.

Перемещение Δ_{1p} получаем перемножением грузовой эпюры M_q на единичную M_1^0

$$\Delta_{1p} = \sum \frac{\omega_p M_{c1}^0}{EJ},$$

где ω_p – площадь грузовой эпюры; M_{c1}^0 – ордината с первой единичной эпюры под центром тяжести грузовой.

$$\Delta_{1p} = \frac{1}{EJ} \left\{ - \left(\frac{1}{2} 360 \cdot 6 \right) \left[\frac{2}{3} 6 \right] - \left(\left(\frac{90 + 360}{2} \right) \cdot 4 \right) [4,8] - \left(\frac{1}{3} 90 \cdot 3 \right) \left[\frac{3}{4} 3 \right] \right\} = - \frac{6682,5}{EJ}.$$

Полученные значения δ_{11} и Δ_{1p} подставляем в уравнения, определяем X_1 :

$$\frac{165,06 \cdot X_1}{EJ} - \frac{6682,5}{EJ} = 0, \quad X_1 = 40,4 \text{ кН.}$$

Зная реакцию $H_b = X_1$, по уравнениям статики определяем R_a , H_a , R_b :

$$\sum X = 0, \quad H_b + H_a - q \cdot 3 = 0, \quad H_a = 19,6 \text{ кН;}$$

$$\sum M_a = 0, \quad H_b \cdot 3 + R_b \cdot 4 - q \cdot 3 \cdot 4,5 = 0, \quad R_b = 37,2 \text{ кН;}$$

$$\sum M_b = 0, \quad H_a \cdot 6 - R_a \cdot 4 + q \cdot 3 \cdot 1,5 = 0, \quad R_a = 37,2 \text{ кН.}$$

Проверка правильности вычисления реакций:

$$\sum Y = 0, \quad R_a + R_b = 0.$$

Строим эпюры M_x , Q_x , N_x известным способом. Эпюры приведены на рисунке 5.4, д, е, ж.

Пример 5.3.

Для заданной схемы статически неопределимой рамы (рис. 5.7, а), при заданных значениях длин и нагрузок, построить эпюры изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил. Подобрать поперечное сечение двутаврового профиля (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа. Жесткости стойки и ригеля одинаковы.

Решение.

Заданная система освобождается от наложенных на нее связей. Действия связей заменяются реакциями. Установим степень статической неопределимости рамы: 3(замкнутый контур) – 1(наличие одного шарнира) = 2, т. е. рама дважды статически неопределима.

За «лишние» неизвестные принимаем $H_b = X_1$, $R_b = X_2$, тем самым выбираем основную систему. Нагружаем основную систему внешними силами (q , M) и реакциями отброшенных связей (X_1 , X_2). Отбрасывая «лишние» связи, следует помнить, что основная система должна быть статически определимой и геометрически неизменяемой.

В местах действия «лишних» неизвестных и по направлению их действия прикладываем единичные силы $X_1 = 1$ и $X_2 = 1$ и строим эпюры изгибающих моментов от этих сил.

Строим эпюры изгибающих моментов от действия на основную систему внешних сил q и M .

Методика построения эпюр изгибающих моментов от единичных сил и внешних нагрузок, приложенных к основной системе, подробно рассмотрена при решении примера 5.1 и здесь не приводится.

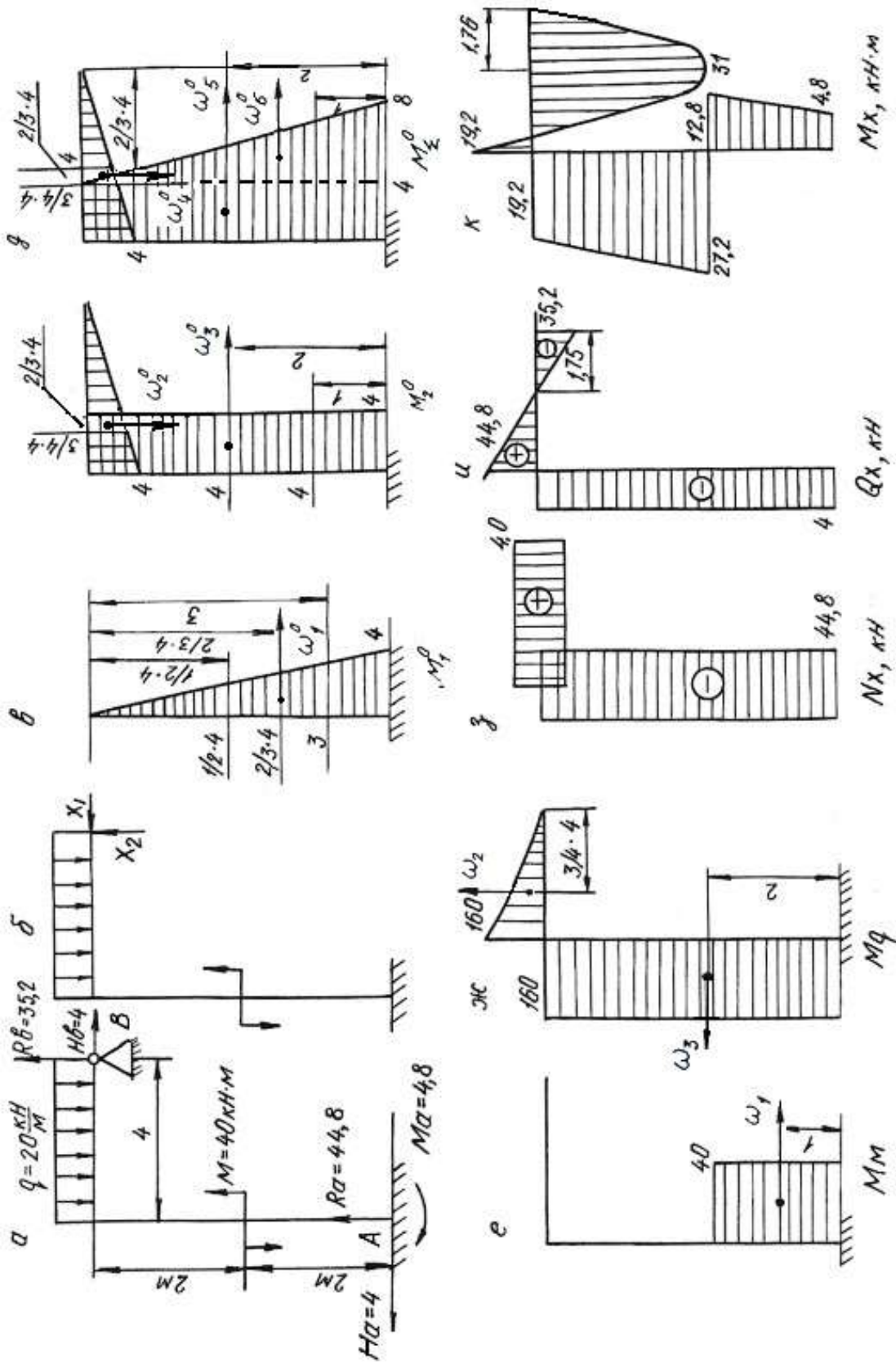


Рис. 5.7.

Составляем канонические уравнения метода сил:

$$\begin{aligned}\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} &= 0; \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} &= 0.\end{aligned}$$

Вычисляем коэффициенты и свободные члены канонических уравнений:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \sum \frac{\omega_1^0 M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ \left(\frac{1}{2} 4 \cdot 4 \right) \left[\frac{2}{3} 4 \right] \right\} = \frac{21,3}{EJ}, \\ \delta_{22} &= \sum \frac{\omega_2^0 M_{c2}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ \left(\frac{1}{2} 4 \cdot 4 \right) \cdot \left[\frac{2}{3} 4 \right] + (4 \cdot 4) [4] \right\} = \frac{85,3}{EJ}, \\ \delta_{21} = \delta_{12} &= \sum \frac{\omega_2^0 M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ (4 \cdot 4) [2] \right\} = \frac{32}{EJ}, \\ \Delta_{1p} &= \sum \frac{\omega_p M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ (40 \cdot 2) [3] - (160 \cdot 4) [2] \right\} = -\frac{1040}{EJ}, \\ \Delta_{2p} &= \sum \frac{\omega_p \cdot M_{c2}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ (40 \cdot 2) [4] - (160 \cdot 4) [4] - \left(\frac{1}{3} 160 \cdot 4 \right) \left[\frac{3}{4} 4 \right] \right\} = -\frac{2880}{EJ}.\end{aligned}$$

Проверяем правильность вычисления коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Для этого строим суммарную единичную эпюру M_{Σ}^0 .

Для проверки правильности вычисления коэффициентов канонических уравнений применяем универсальную проверку:

$$\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{22} + \delta_{21} = \sum \frac{\omega_{\Sigma}^0 M_{c\Sigma}^0}{EJ};$$

$$\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{22} + \delta_{21} = \frac{1}{EJ} \left\{ \left(\frac{1}{2} (4+8) \cdot 4 \right) [6,22] + \left(\frac{1}{2} 4 \cdot 4 \right) \left[\frac{2}{3} 4 \right] \right\} = \frac{170,6}{EJ}.$$

Проверяем правильность вычисления грузовых членов

$$\begin{aligned}\Delta_{1p} + \Delta_{2p} &= \sum \frac{\omega_p M_{c\Sigma}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ} \left\{ (40 \cdot 2) [7] - (160 \cdot 4) [6] - \left(\frac{1}{3} 160 \cdot 4 \right) \left[\frac{3}{4} 4 \right] \right\} = \\ &= -\frac{3920}{EJ}.\end{aligned}$$

В обоих случаях получили тождества, значит коэффициенты и свободные члены канонических уравнений определены правильно.

Подставляем вычисленные значения коэффициентов в канонические уравнения, определяем неизвестные X_1 и X_2 :

$$\left. \begin{aligned} 21,3 \cdot X_1 + 32 \cdot X_2 - 1040 &= 0 \\ 32 \cdot X_1 + 85,3 \cdot X_2 - 2880 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$X_1 = -4 \text{ кН}; \quad X_2 = 35,2 \text{ кН}.$$

Сила X_1 получилась со знаком «минус», это говорит о том, что направление реакции будет противоположно единичной силе.

Зная реакции H_b и R_b , по уравнениям статики определяем остальные реакции

$$\begin{aligned} \sum X &= 0, \quad H_b - H_a = 0, & H_a &= 4 \text{ кН}; \\ \sum M_a &= 0, \quad M - M_a - q \cdot 4 \cdot 2 + R_b \cdot 4 - H_b \cdot 4 = 0, & M_a &= 4,8 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ \sum M_b &= 0, \quad M - M_a - H_a \cdot 4 - R_a \cdot 4 + q \cdot 4 \cdot 2 = 0, & R_a &= 44,8 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Проверка:

$$\sum Y = 0, \quad R_a + R_b - q \cdot 4 = 0, \quad 35,2 + 44,8 - 80 = 0.$$

Строим эпюры изгибающих моментов, поперечных и нормальных сил по контрольным правилам. Эпюры приведены на рис. 5.7.

Выявляем опасное сечение рамы, где одновременно M_x и N_x имеют большие значения. Это сечение левой стойки, где $N_x = -44,8 \text{ кН}$, $M_x = 27,2 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Условие прочности

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{N_x}{A} \pm \frac{M_x}{W_z} \leq \sigma_{\text{adm}}.$$

Выбираем сечение по моменту M_x

$$\frac{M_x}{W_z} \leq \sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа}. \quad W_z \geq \frac{27,2 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 170 \text{ см}^3.$$

По сортаменту проката выбираем двутавр № 20, $W_z = W_x^{\text{табл.}} = 184 \text{ см}^3$,
 $A_{\text{табл.}} = 26,8 \text{ см}^2$.

Производим проверку с учетом силы N_x :

$$\sigma_{\max} = -\frac{44,8 \cdot 10^3}{26,8 \cdot 10^{-4}} - \frac{27,2 \cdot 10^3}{184 \cdot 10^{-6}} = -1,67 \cdot 10^7 - 0,148 \cdot 10^9 \text{ Па} = 164,7 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\max} = 164,7 \text{ МПа} > \sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа}.$$

Отклонение (перегруз) $\delta = \frac{164,7 - 160}{160} \cdot 100 = 2,93 \% < 5 \%$, что допустимо.

5.4. Задания для расчета плоских рам

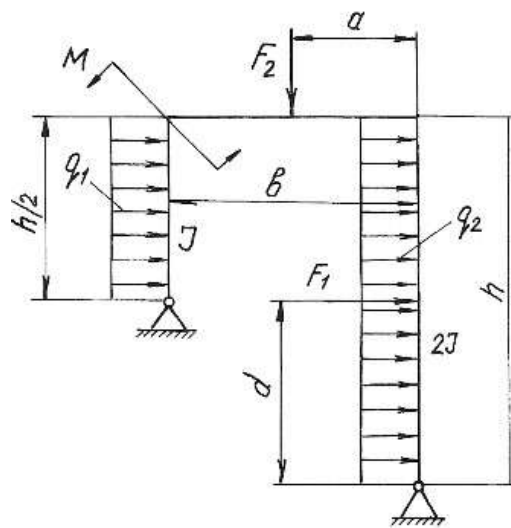
Для расчетной схемы статически неопределимой рамы при заданных значениях длин и нагрузок, определяемых в соответствии с указанным номером варианта, требуется:

1. Определить степень статической неопределимости рамы. Выбрать основную систему.
2. Составить канонические уравнения метода сил.
3. Вычислить коэффициенты при неизвестных и свободные члены канонических уравнений. Проверить правильность их вычисления.
4. Построить эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил.
5. Подобрать поперечное сечение элементов рамы в виде двутавра (см. табл. П. 1) при $\sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа}$.

Данные для расчета взять из табл. 5.3.

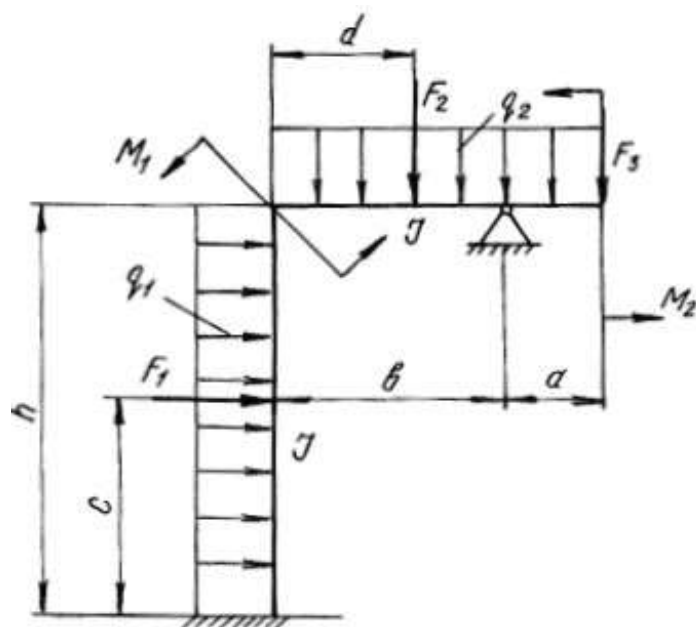
Таблица 5.3

Номер варианта	h , м	b , м	a , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	M , кН·м
1	10	5	—	—	20	—	—	—	80
2	9	5	—	—	—	15	—	—	10
3	9	6	—	—	—	—	—	—	60
4	9	4	—	5	15	—	40	—	—
5	10	4	2	—	—	20	—	30	—
6	8	5	3	—	—	—	—	60	—
7	8	6	—	—	—	—	—	—	10
8	8	5	—	5	—	—	40	—	—
9	9	6	3	—	—	—	—	50	80
10	9	6	5	—	—	—	40	—	—



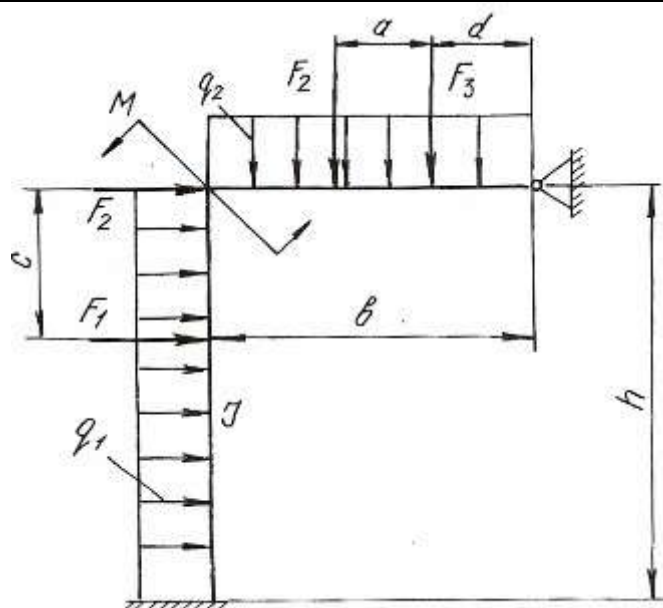
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M_1 , кН·м	M_2 , кН·м
11	10	5	0,5	6	—	20	—	40	—	—	—	—
12	11	6	0,4	6	—	—	20	40	—	—	—	—
13	11	5	0,3	4	—	—	—	30	—	—	—	10
14	9	4	0,6	—	—	—	25	—	—	—	—	12
15	9	5	0,4	—	4	30	—	—	60	—	—	—
16	8	4	0,3	—	3	—	—	—	30	20	—	—
17	8	4	0,3	—	—	—	—	—	—	30	10	—
18	6	3	0,2	—	—	25	—	—	—	—	15	80
19	7	4	0,6	—	3	—	—	—	30	20	12	—
20	10	6	0,6	—	—	—	30	—	—	—	10	—



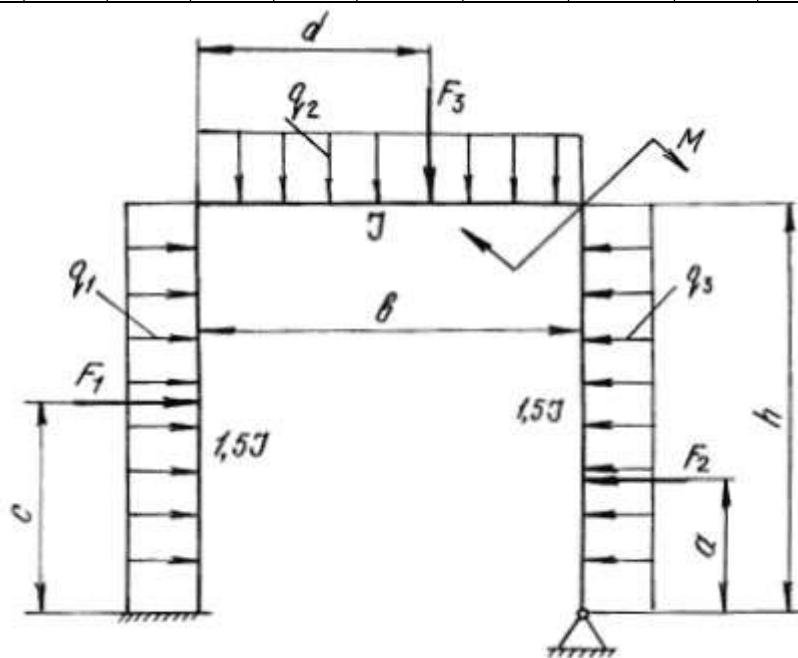
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M_1 , кНм	M_2 , кН·м
21	10	8	—	—	—	20	—	—	—	—	—	20
22	10	7	2	—	2	30	—	—	—	—	20	—
23	10	6	—	2	—	—	—	—	30	20	—	—
24	8	6	—	—	—	20	30	—	—	—	—	—
25	8	6	—	3	—	—	20	—	20	—	—	—
26	9	5	—	—	—	—	20	—	—	—	—	15
27	9	6	2	—	1	—	—	—	—	40	20	—
28	7	5	2	—	1	—	—	—	—	—	30	—
29	8	4	2	—	1	—	—	—	—	—	20	20
30	8	6	—	—	—	—	—	—	50	20	—	10



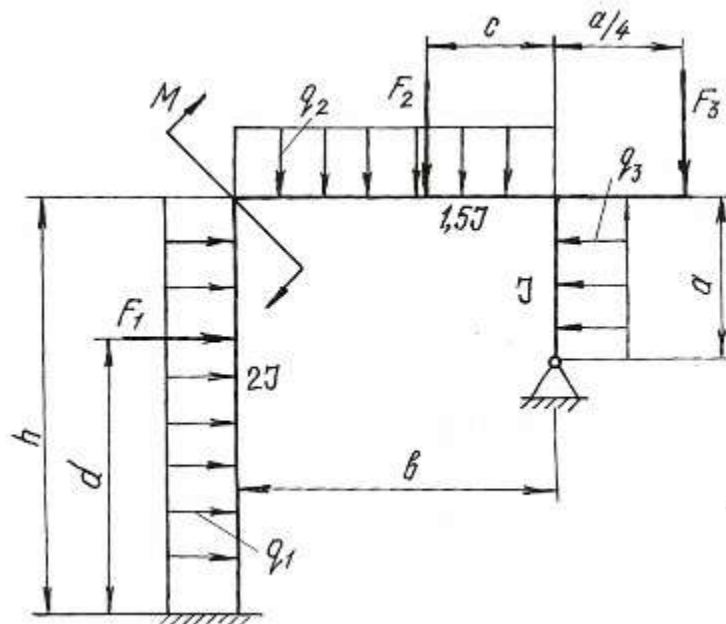
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	q_3 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M , кН·м
31	10	4	0,5	—	—	12	—	—	—	—	—	10
32	9	5	0,4	—	—	—	20	—	—	—	—	15
33	8	4	0,3	—	—	—	—	20	—	30	—	—
34	8	6	0,3	—	4	20	—	—	—	—	40	—
35	8	4	0,4	—	—	—	20	—	—	30	—	—
36	6	5	0,3	5	—	—	—	20	60	—	—	—
37	10	5	0,4	—	4	—	—	—	—	40	50	—
38	8	4	0,3	—	—	—	—	—	—	30	—	12
39	12	6	0,5	—	4	—	—	—	—	—	40	15
40	12	6	0,6	3	—	—	—	25	10	—	—	—



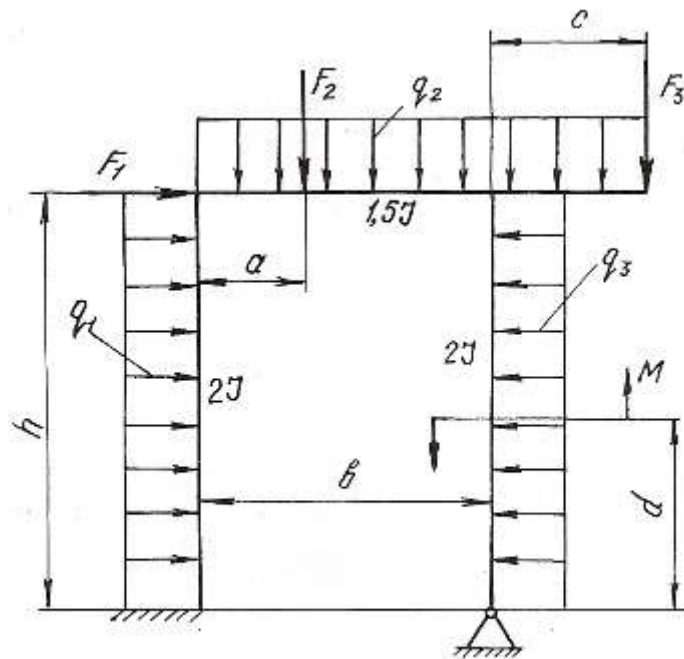
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	q_3 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M , кН·м
41	10	5	4	—	—	20	—	—	—	—	—	50
42	9	6	4	—	—	—	15	—	—	—	—	10
43	8	6	5	—	—	—	—	20	—	—	30	—
44	8	5	6	—	2	15	—	—	30	—	—	—
45	8	4	5	2	—	—	20	—	—	40	—	—
46	9	6	3	—	5	—	—	15	40	—	—	—
47	9	8	4	2	—	—	—	—	—	10	—	60
48	9	6	6	—	—	—	—	—	—	—	40	10
49	10	8	5	3	—	—	—	—	—	20	40	—
50	10	6	4	1	4	—	—	—	10	25	—	—

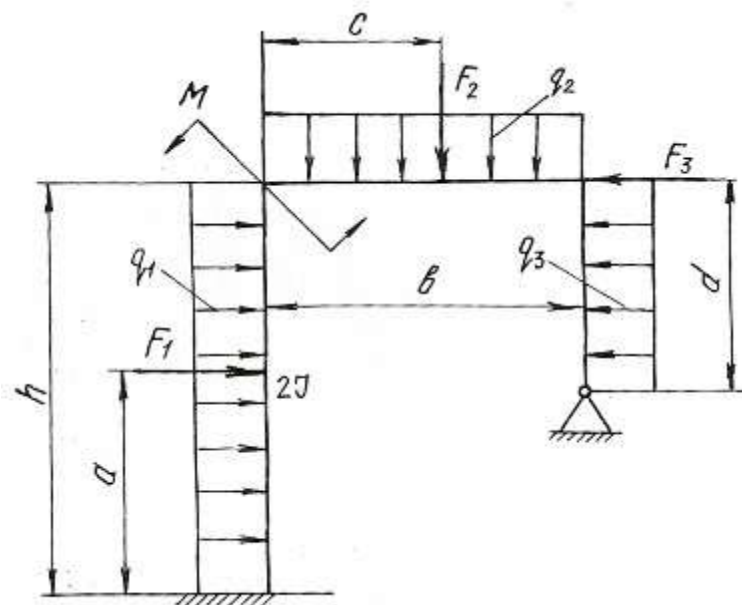


Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	q_3 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M , кН·м
51	8	4	0,6	0,5	5	20	—	—	—	—	—	50
52	10	5	0,5	0,6	—	—	20	—	20	30	—	—
53	8	4	0,4	0,4	—	—	—	25	—	20	—	—
54	6	4	0,3	0,4	4	—	—	—	—	—	30	14
55	12	6	0,6	0,5	—	—	—	—	40	20	—	—
56	10	4	0,4	0,3	2	15	—	—	—	—	—	10
57	8	5	0,3	0,3	2	—	15	—	—	—	—	12
58	8	5	0,4	0,4	—	—	—	20	30	—	—	—
59	9	5	0,5	0,6	—	—	—	—	—	30	40	—
60	9	4	0,6	0,5	—	—	30	—	—	20	—	—

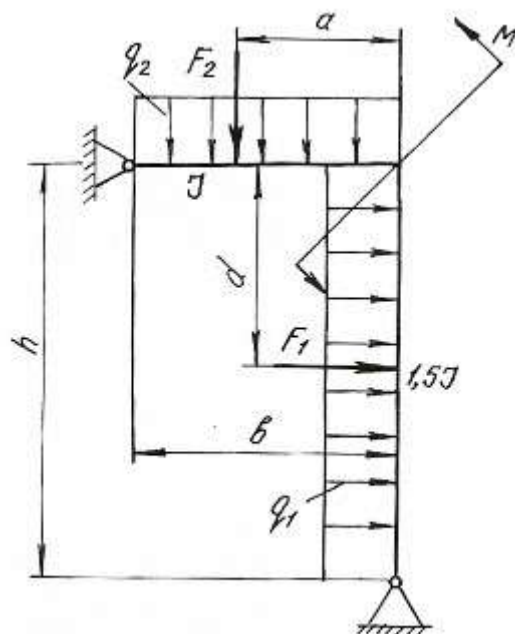


Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	q_3 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M , кН·м
61	8	4	4	—	4	20	—	—	50	—	—	—
62	10	5	—	2,5	5	—	20	—	—	30	—	—
63	6	3	—	—	3	—	—	20	—	—	30	—
64	12	6	5	—	6	—	—	20	50	—	—	—
65	10	4	—	—	5	—	20	—	—	—	—	80
66	8	4	—	—	5	15	—	—	—	—	20	—
67	8	5	—	2	5	20	—	—	—	40	—	—
68	8	4	—	—	4	—	—	—	—	—	80	40
69	9	4	—	3	5	—	—	—	—	60	—	40
70	10	5	8	—	5	—	15	—	60	—	—	—

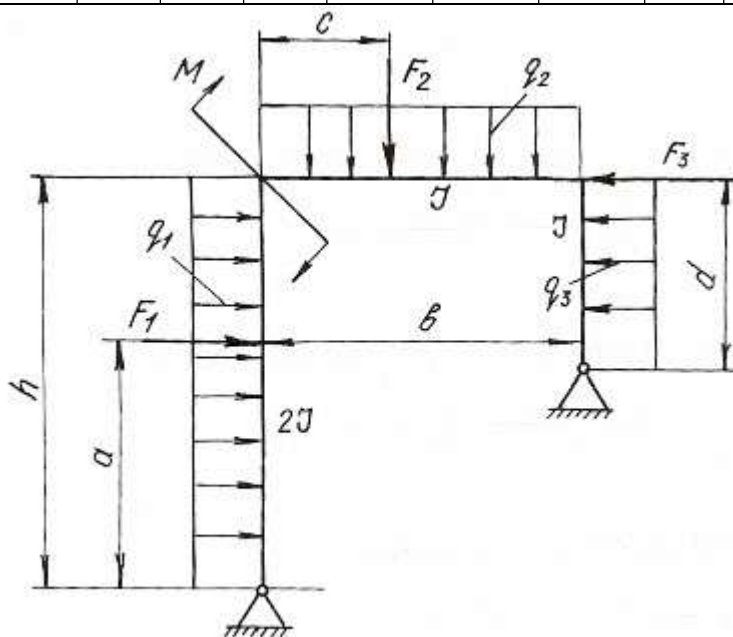


Продолжение табл. 5.3

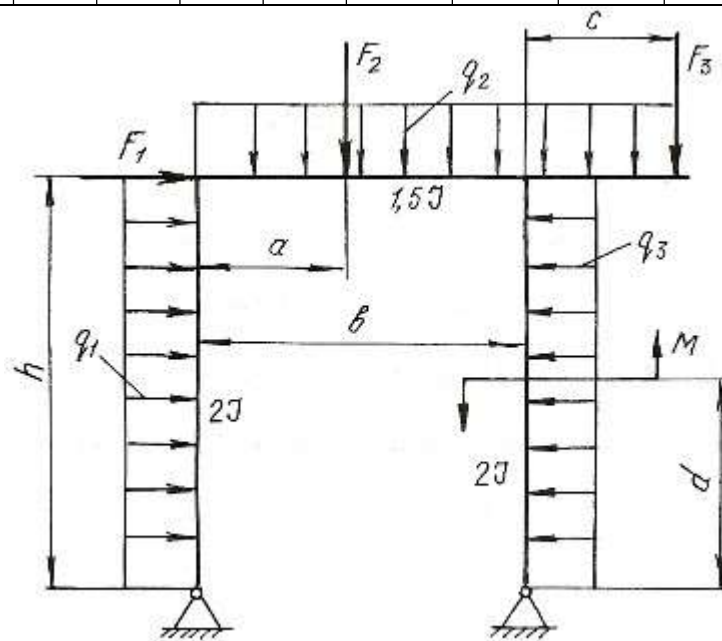
Номер варианта	h , м	b , м	a , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	M , кН·м
71	10	5	2,5	—	20	—	—	80	—
72	10	6	—	—	—	15	—	—	—
73	10	4	2	—	—	—	—	—	—
74	10	5	—	—	15	—	—	80	—
75	9	5	—	—	—	20	—	—	—
76	9	6	—	—	—	—	—	—	60
77	9	4	2	—	—	—	—	10	—
78	8	6	3	—	—	—	—	80	10
79	8	6	3	4	—	—	40	60	—
80	8	5	—	4	—	—	30	—	—



Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	q_3 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M , кН·м
81	8	4	4	—	4	20	—	—	50	—	—	—
82	10	5	—	2,5	5	—	20	—	—	30	—	—
83	8	4	—	—	3	—	—	20	—	—	30	—
84	6	4	5	—	6	—	—	20	50	—	—	—
85	12	6	—	—	5	—	20	—	—	—	—	80
86	10	4	—	—	5	15	—	—	—	—	20	—
87	8	5	—	2	5	20	—	—	—	40	—	—
88	8	5	—	—	4	—	—	—	—	—	80	40
89	9	5	—	3	5	—	—	—	—	60	—	40
90	9	4	8	—	5	—	15	—	60	—	—	—



Номер варианта	h , м	b , м	a , м	c , м	d , м	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	q_3 , кН/м	F_1 , кН	F_2 , кН	F_3 , кН	M , кН·м
91	8	4	0,6	0,5	5	20	—	—	—	—	—	50
92	10	5	0,5	0,6	—	—	20	—	20	30	—	—
93	8	4	0,4	0,4	—	—	—	25	—	20	—	—
94	6	4	0,3	0,4	4	—	—	—	—	—	30	14
95	12	6	0,6	0,5	—	—	—	—	40	20	—	—
96	10	4	0,4	0,3	2	15	—	—	—	—	—	10
97	8	5	0,3	0,3	2	—	15	—	—	—	—	12
98	8	5	0,4	0,4	—	—	—	20	30	—	—	—
99	9	5	0,5	0,6	—	—	—	—	—	30	40	—
100	9	4	0,6	0,5	—	—	30	—	—	20	—	—



Глава 6

ВИДЫ СЛОЖНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сочетание простейших видов деформаций называется сложным сопротивлением. При расчете элементов конструкций, испытывающих сложные сопротивления, используют принцип независимости действия сил, т. е. определяют деформации и напряжения для каждого простейшего вида сопротивления, а затем результаты суммируют алгебраически, геометрически или согласно одной из теорий прочности. При этом задача сводится к определению опасного сечения по длине бруса и опасной точки в этом сечении.

В данной главе приведены методики решения задач на косоу изгиб, внецентренное растяжение или сжатие, совместное действие изгиба с кручением.

6.1. Косой изгиб

Косой изгиб – вид сложного сопротивления, который возникает при действии внешних нагрузок, перпендикулярных продольной оси бруса, но расположенных вне главных плоскостей инерции. Поэтому косой изгиб можно рассматривать как сочетание двух плоских изгибов во взаимно перпендикулярных плоскостях, разложив все силы по направлению главных центральных осей инерции поперечных сечений.

При косом изгибе балки нормальные напряжения в произвольной точке поперечного сечения с координатами y и z определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M^B}{J_z} y + \frac{M^\Gamma}{J_y} z, \quad (6.1)$$

где J_z и J_y – главные центральные моменты инерции поперечного сечения балки относительно осей z и y ; M^B и M^Γ – изгибающие моменты в поперечном сечении в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Положение нейтральной оси поперечного сечения определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{M^\Gamma}{M^B} \cdot \frac{J_z}{J_y}, \quad (6.2)$$

где α – угол наклона нейтральной оси к горизонтальной главной центральной оси инерции.

Максимальные и минимальные нормальные напряжения возникают в точках, наиболее удаленных от обеих главных центральных осей инерции и для симметричных сечений определяются по формуле:

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{M^{\Gamma}}{W_y} \pm \frac{M^{\text{B}}}{W_z}, \quad (6.3)$$

где W_z и W_y – моменты сопротивления поперечного сечения изгибу относительно осей z и y .

Если внешние нагрузки лежат в одной плоскости, то положение нейтральной оси определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{J_z}{J_y}, \quad (6.4)$$

где φ – угол между силовой плоскостью, в которой действуют внешние нагрузки, и главной вертикальной осью инерции поперечного сечения балки.

Напряжения в этом случае определяются по формуле:

$$\sigma_{\max/\min} = \pm M \left(\frac{\cos \varphi}{W_z} \pm \frac{\sin \varphi}{W_y} \right), \quad (6.5)$$

где M – результирующий момент, действующий в силовой плоскости.

Прогиб f и угол поворота θ сечения балки при косом изгибе определяются как геометрические суммы прогибов и углов поворота от составляющих изгибающего момента, действующих в главных плоскостях инерции балки

$$f = \sqrt{f_z^2 + f_y^2} \quad \text{и} \quad \theta = \sqrt{\theta_z^2 + \theta_y^2}, \quad (6.6)$$

где f_z и f_y – прогибы в направлении осей z и y ; θ_z и θ_y – углы поворота сечения вокруг осей z и y .

Пример 6.1.

Для балки (рис. 6.1) построить эпюры нормальных напряжений по сторонам поперечного сечения (см. табл. П. 1) в защемлении, определить наибольшее нормальное напряжение и полный прогиб свободного конца балки при $F = 2$ кН, $\varphi = 15^\circ$.

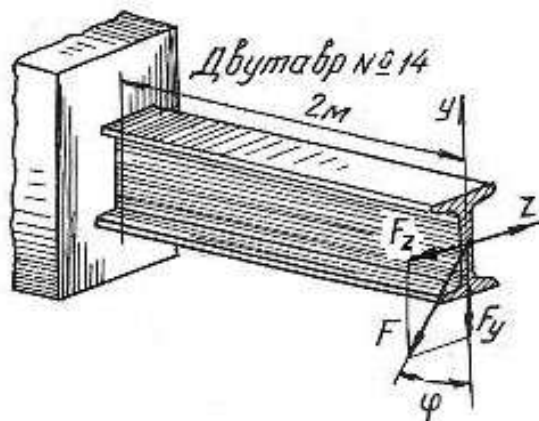


Рис. 6.1.

Решение.

Раскладываем силу F на ее составляющие, действующие в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$F_y = F \cdot \cos 15^\circ = 2000 \cdot 0,96 = 1920 \text{ Н};$$

$$F_z = F \cdot \sin 15^\circ = 2000 \cdot 0,26 = 520 \text{ Н}.$$

Максимальные изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях будут в защемленном сечении балки:

$$M_{\max}^B = F_y l = 1920 \cdot 2 = 3840 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max}^\Gamma = F_z l = 520 \cdot 2 = 1040 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По ГОСТ 8239-89 (см. табл. П. 1) для заданного профиля находим моменты инерции и моменты сопротивления сечения:

$$J_z = 572 \text{ см}^4; \quad J_y = 41,9 \text{ см}^4; \quad W_z = 81,7 \text{ см}^3; \quad W_y = 11,5 \text{ см}^3,$$

что при переводе в единицы СИ соответствует:

$$J_z = 572 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4; \quad J_y = 41,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4; \quad W_z = 81,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3; \quad W_y = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Наибольшие нормальные напряжения от изгиба в вертикальной плоскости:

$$\sigma_{\max}^B = \frac{M_{\max}^B}{W_z} = \frac{3840}{81,7 \cdot 10^{-6}} = 47 \cdot 10^6 \text{ Па} = 47 \text{ МПа},$$

а наибольшие нормальные напряжения от изгиба в горизонтальной плоскости:

$$\sigma_{\max}^\Gamma = \frac{M_{\max}^\Gamma}{W_y} = \frac{1040}{11,5 \cdot 10^{-6}} = 90,4 \cdot 10^6 \text{ Па} = 90,4 \text{ МПа}.$$

Эпюры нормальных напряжений даны на рис. 6.2. Таким образом, наибольшие нормальные напряжения будут в крайних угловых точка поперечного сечения. Как видно по эпюрам нормальных напряжений

$$\sigma_{\max} = 47 + 90,4 = 137,4 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\min} = -47 - 90,4 = -137,4 \text{ МПа}.$$

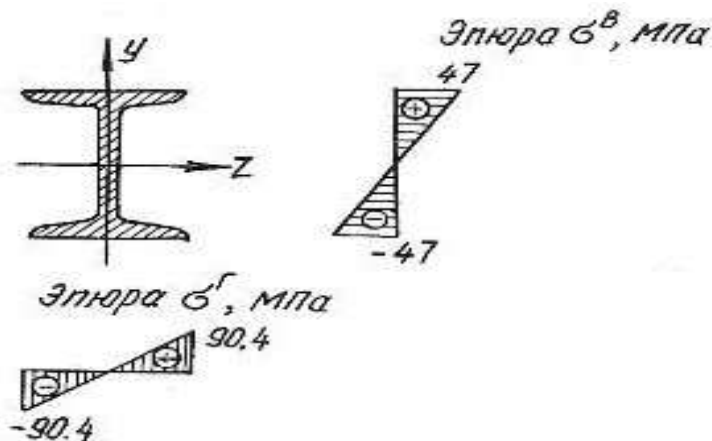


Рис. 6.2.

Прогиб свободного конца балки в вертикальной плоскости [10]

$$f_y = \frac{F_y l^3}{3EJ_z} = \frac{1920 \cdot 2^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 572 \cdot 10^{-8}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м или } f_y = 4,5 \text{ мм},$$

а величина прогиба в горизонтальной плоскости

$$f_z = \frac{F_z l^3}{3EJ_y} = \frac{520 \cdot 2^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 41,9 \cdot 10^{-8}} = 16,5 \cdot 10^{-3} \text{ м или } f_z = 16,5 \text{ мм}.$$

Полный прогиб свободного конца балки

$$f = \sqrt{f_y^2 + f_z^2} = \sqrt{4,5^2 + 16,5^2} = 17,1 \text{ мм}.$$

Пример 6.2.

Для бруса прямоугольного поперечного сечения (рис. 6.3) требуется:

1. Построить эпюры изгибающих моментов в главных плоскостях; определить из расчета на прочность размеры поперечного сечения, принимая $\sigma_{adm} = 160 \text{ МПа}$ и отношение сторон $\frac{h}{b} = 2$;

2. Для опасного поперечного сечения построить эпюры нормальных напряжений от каждого из изгибающих моментов и суммарную эпюру нормальных напряжений.

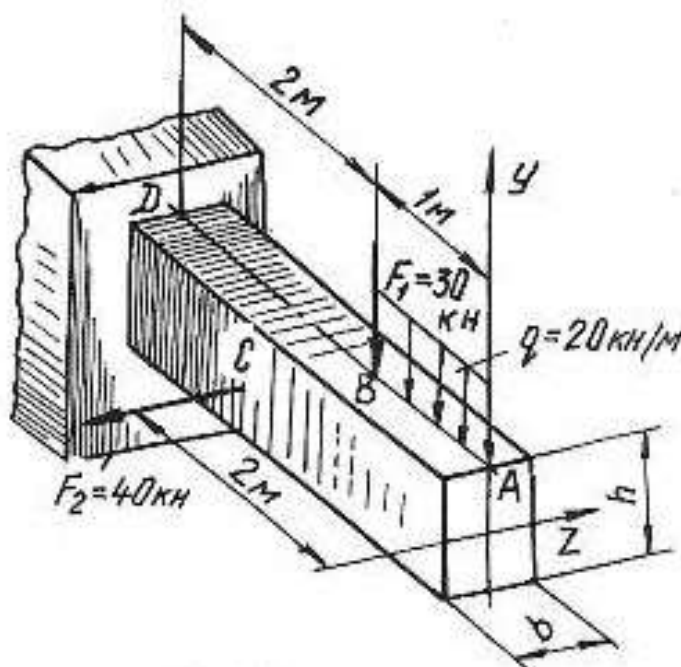


Рис. 6.3.

Решение.

Согласно принципу независимости действия сил рассмотрим отдельно действие сил, вызывающих изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Изгиб в вертикальной плоскости вызывается действием силы F_1 и равномерно распределенной нагрузкой. Определим величину изгибающих моментов в характерных точках:

$$M_A^B = 0;$$

$$M_B^B = -q \cdot 1 \cdot 0,5 = -20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,5 = -10 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} = -10 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_D^B = -q \cdot 1 \cdot 2,5 - F_1 \cdot 2 = -20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 2,5 - 30 \cdot 10^3 \cdot 2 = -110 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} = -110 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Изгиб в горизонтальной плоскости вызывается силой F_2 . Определим величину изгибающих моментов в характерных точках:

$$M_A^F = 0; \quad M_B^F = 0; \quad M_C^F = 0;$$

$$M_D^F = F_2 \cdot 1 = 40 \cdot 10^3 \cdot 1 = 40 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} = 40 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Эпюры изгибающих моментов показаны на рис. 6.4, а. Максимальные изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях будут в сечении D:

$$M_{\max}^B = M_D^B = 110 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad M_{\max}^F = M_D^F = 40 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

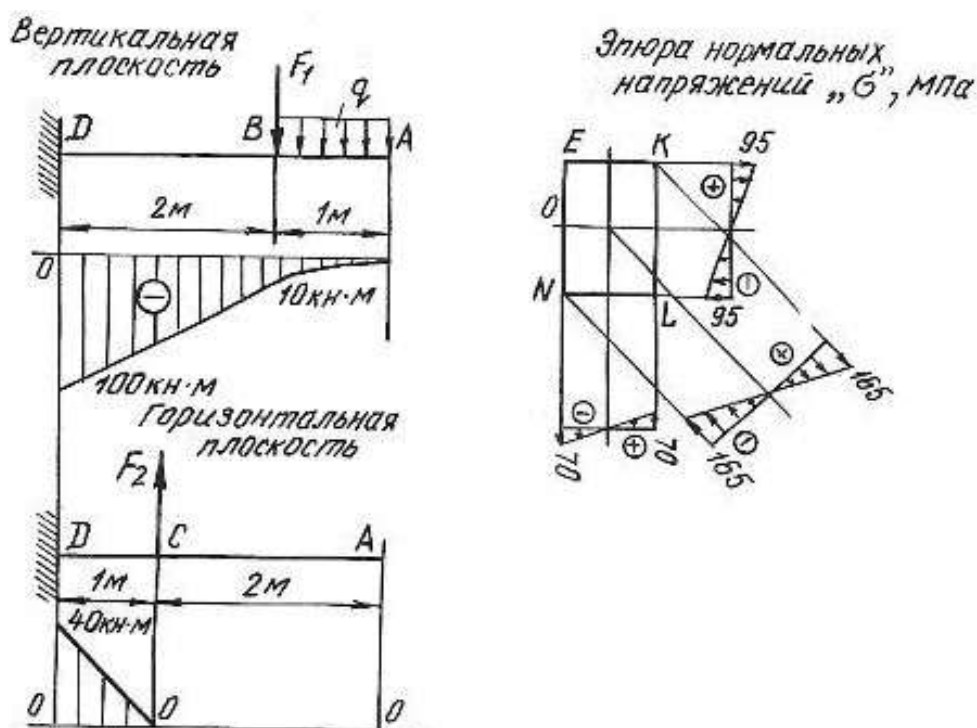


Рис. 6.4.

Опасное сечение балки будет в защемлении. Запишем условие прочности для опасного сечения

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}^B}{W_z} + \frac{M_{\max}^Г}{W_y} \leq \sigma_{\text{adm}}.$$

Для бруса прямоугольного сечения моменты сопротивления равны:

$$W_z = \frac{bh^2}{6} \quad \text{и} \quad W_y = \frac{b^2h}{6};$$

при $h = 2 \cdot b$ получим

$$W_z = \frac{b(2 \cdot b)^2}{6} = \frac{2b^3}{3} \quad \text{и} \quad W_y = \frac{b^2 \cdot 2 \cdot b}{6} = \frac{b^3}{3}.$$

Подставляя значение величин в условие прочности, получим

$$\sigma_{\max} = \frac{110 \cdot 10^3}{\frac{2}{3} \cdot b^3} + \frac{40 \cdot 10^3}{\frac{1}{3} \cdot b^3} \leq 160 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Решая уравнение относительно b , получим $b = 0,12 \text{ м} = 120 \text{ мм}$ и $h = 2b = 240 \text{ мм}$. Для построения эпюр нормальных напряжений определяем наибольшие напряжения, для чего вычислим моменты сопротивления сечения:

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \frac{12 \cdot 10^{-2} \cdot (24 \cdot 10^{-2})^2}{6} = 1152 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$W_y = \frac{b^2h}{6} = \frac{(12 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 24 \cdot 10^{-2}}{6} = 576 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Наибольшие нормальные напряжения от изгиба в вертикальной плоскости:

$$\sigma_{\max}^B = \frac{M_{\max}^B}{W_z} = \frac{110 \cdot 10^3}{1152 \cdot 10^{-6}} = 95 \cdot 10^6 \text{ Па} = 95 \text{ МПа.}$$

Наибольшие нормальные напряжения от изгиба в горизонтальной плоскости:

$$\sigma_{\max}^Г = \frac{M_{\max}^Г}{W_y} = \frac{40 \cdot 10^3}{576 \cdot 10^{-6}} = 70 \cdot 10^6 \text{ Па} = 70 \text{ МПа.}$$

Наибольшие нормальные напряжения будут в точках K и N :

$$\sigma_K = 95 + 70 = 165 \text{ МПа};$$

$$\sigma_N = -95 - 70 = -165 \text{ МПа.}$$

Эпюры нормальных напряжений показаны на рис. 6.4, б

6.2. Задания для расчета на косой изгиб

Для расчетной схемы балки при заданных значениях геометрических размеров и нагрузок необходимо:

- 1) определить положение нейтральной оси;
- 2) вычислить наибольшие и наименьшие напряжения в опасном сечении балки;
- 3) построить эпюры напряжений;
- 4) найти прогиб балки в середине пролета или на свободном конце консольной балки.

Данные для расчета взять из таблиц 6.1, 6.2, 6.3 и табл. П. 1.

Таблица 6.1

Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет l , м	Размеры сечения, см	Угол φ , град	Нагрузка		
						F , кН	M , кН·м	q , кН/м
1	А	дерево	1,5	$b \times h = 12 \times 20$	60	—	4	—
	Б	Ст 3	1,4	двутавр № 24	30	—	3	—
	В	Ст 3	1,3	швеллер № 24	45	—	5	—
	Г	Ст 3	1,6	2 швеллера № 8	60	—	6	—
	Д	Ст 3	1,7	2 швеллера № 10	30	—	7	—
	Е	Ст 3	1,8	2 двутавра № 10	60	—	8	—
2	А	дерево	1,2	$b \times h = 15 \times 25$	45	3	—	—
	Б	Ст 3	1,4	двутавр № 22	30	2	—	—
	В	Ст 3	1,5	швеллер № 27	60	4	—	—
	Г	Ст 3	1,6	2 швеллера № 18	30	8	—	—
	Д	Ст 3	1,8	2 швеллера № 20	60	10	—	—
	Е	Ст 3	1,7	2 двутавра № 12	45	9	—	—
3	А	дерево	1,2	$b \times h = 14 \times 28$	30	—	—	4
	Б	Ст 3	1,3	двутавр № 24	60	—	—	3
	В	Ст 3	1,5	швеллер № 27	45	—	—	2
	Г	Ст 3	1,4	2 швеллера № 16	20	—	—	6
	Д	Ст 3	1,7	2 швеллера № 14	30	—	—	5
	Е	Ст 3	1,6	2 двутавра № 14	40	—	—	7

Продолжение табл. 6.1

Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет $l, м$	Размеры сечения, $см$	Угол φ , град	Нагрузка		
						F , кН	M , кН·м	q , кН/м
4	А	дерево	2,5	$b \times h = 12 \times 30$	30	—	6	—
	Б	Ст 3	4	двутавр № 55	40	—	5	—
	В	Ст 3	5	швеллер № 30	50	—	7	—
	Г	Ст 3	6	2 швеллера № 10	60	—	8	—
	Д	Ст 3	4	2 швеллера № 12	30	—	9	—
	Е	Ст 3	6	2 двутавра № 14	40	—	10	—
5	А	дерево	3	$b \times h = 18 \times 30$	40	6	—	—
	Б	Ст 3	4	двутавр № 36	60	2,5	—	—
	В	Ст 3	5	швеллер № 24	30	3	—	—
	Г	Ст 3	6	2 швеллера № 10	20	4	—	—
	Д	Ст 3	5,5	2 швеллера № 12	40	3	—	—
	Е	Ст 3	4,5	2 двутавра № 14	50	5	—	—
6	А	дерево	4	$b \times h = 16 \times 28$	60	—	—	2
	Б	Ст 3	6	двутавр № 20	50	—	—	4
	В	Ст 3	3	швеллер № 16	30	—	—	3
	Г	Ст 3	4	2 швеллера № 14	40	—	—	5
	Д	Ст 3	5	2 швеллера № 16	45	—	—	6
	Е	Ст 3	5,5	2 двутавра № 18	20	—	—	7
7	А	дерево	2	$b \times h = 16 \times 24$	—	1	—	—
	Б	Ст 3	2,5	двутавр № 28	—	3	—	—
	В	Ст 3	2,4	швеллер № 16	—	4	—	—
	Г	Ст 3	2,6	2 швеллера № 14	—	6	—	—
	Д	Ст 3	2,3	2 швеллера № 16	—	8	—	—
	Е	Ст 3	2,7	2 двутавра № 20	—	10	—	—
8	А	дерево	1,5	$b \times h = 15 \times 25$	—	2	3	—
	Б	Ст 3	1,8	двутавр № 18	—	3	4	—
	В	Ст 3	1,6	швеллер № 24	—	5	3	—
	Г	Ст 3	1,7	2 швеллера № 12	—	6	6	—
	Д	Ст 3	1,9	2 швеллера № 14	—	7	7	—
	Е	Ст 3	2	2 двутавра № 16	—	8	5	—

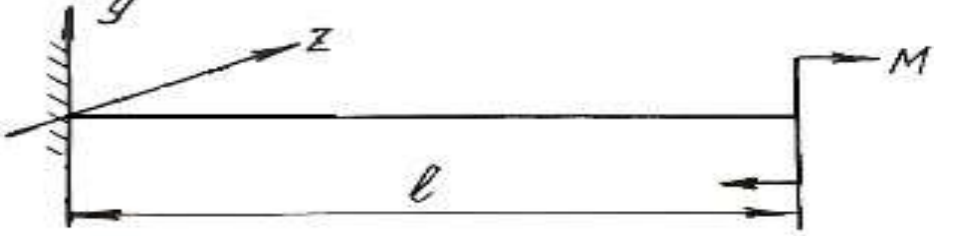
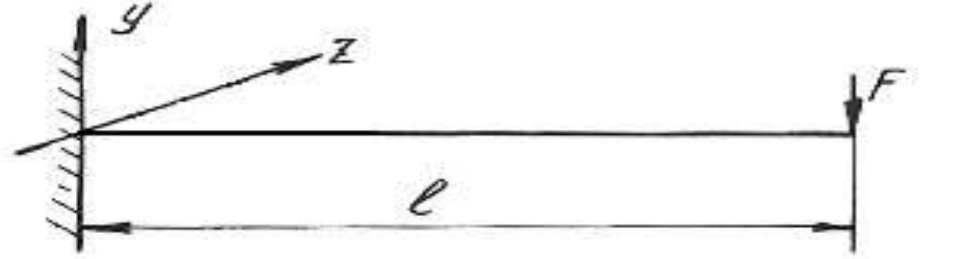
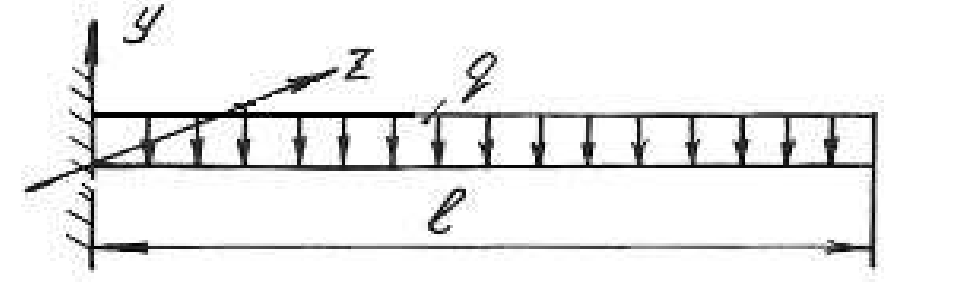
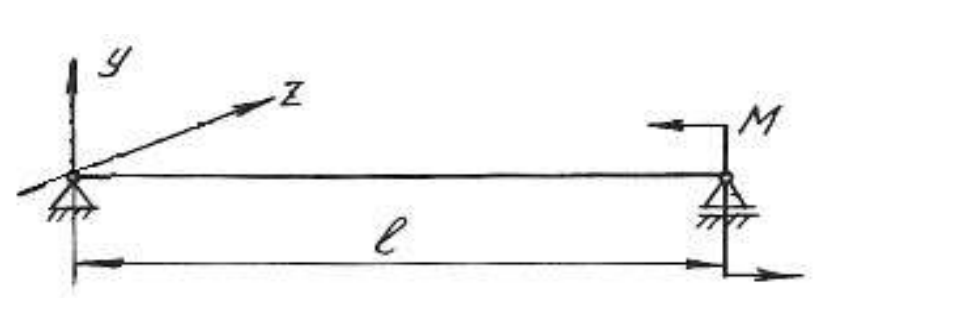
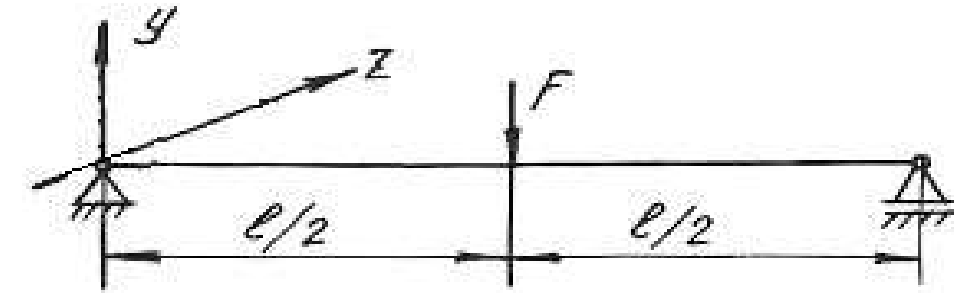
Продолжение табл. 6.1

Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет l , м	Размеры сечения, см	Угол φ , град	Нагрузка		
						F , кН	M , кН·м	q , кН/м
9	А	дерево	2,5	$b \times h = 17 \times 27$	—	4	—	30
	Б	Ст 3	4	двутавр № 30	—	6	—	20
	В	Ст 3	3	швеллер № 27	—	5	—	40
	Г	Ст 3	5	2 швеллера № 14	—	7	—	50
	Д	Ст 3	6	2 швеллера № 16	—	8	—	60
	Е	Ст 3	4,6	2 двутавра № 18	—	9	—	70
10	А	дерево	1,6	$b \times h = 18 \times 24$	—	—	5	10
	Б	Ст 3	1,8	двутавр № 27	—	—	4	20
	В	Ст 3	1,9	швеллер № 20	—	—	3	30
	Г	Ст 3	2	2 швеллера № 14	—	—	6	40
	Д	Ст 3	2,1	2 швеллера № 16	—	—	7	50
	Е	Ст 3	2,2	2 двутавра № 20	—	—	8	60
11	А	дерево	1,5	$b \times h = 19 \times 30$	—	2	30	—
	Б	Ст 3	1,7	двутавр № 24	—	3	40	—
	В	Ст 3	1,9	швеллер № 24	—	5	60	—
	Г	Ст 3	1,8	2 швеллера № 18	—	7	80	—
	Д	Ст 3	2,3	2 швеллера № 20	—	6	70	—
	Е	Ст 3	2,4	2 двутавра № 14	—	4	50	—
12	А	дерево	1,2	$b \times h = 20 \times 29$	—	2	—	20
	Б	Ст 3	1,3	двутавр № 22	—	4	—	30
	В	Ст 3	1,4	швеллер № 24	—	5	—	40
	Г	Ст 3	1,5	2 швеллера № 22	—	7	—	50
	Д	Ст 3	1,6	2 швеллера № 20	—	6	—	60
	Е	Ст 3	1,7	2 двутавра № 20	—	7	—	70

Окончание табл. 6.1

Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет $l, м$	Размеры сечения, см	Угол φ , град	Нагрузка		
						F , кН	M , кН·м	q , кН/м
13	А	дерево	1,5	$b \times h = 18 \times 32$	—	3	—	10
	Б	Ст 3	1,6	двутавр № 36	—	4	—	20
	В	Ст 3	1,7	швеллер № 36	—	5	—	30
	Г	Ст 3	1,8	2 швеллера № 18	—	6	—	40
	Д	Ст 3	1,9	2 швеллера № 20	—	7	—	50
	Е	Ст 3	2	2 двутавра № 24	—	8	—	60
14	А	дерево	1,3	$b \times h = 19 \times 30$	—	20	3	—
	Б	Ст 3	1,4	двутавр № 40	—	40	4	—
	В	Ст 3	1,5	швеллер № 30	—	60	5	—
	Г	Ст 3	1,6	2 швеллера № 16	—	50	6	—
	Д	Ст 3	1,7	2 швеллера № 20	—	60	7	—
	Е	Ст 3	1,8	2 двутавра № 18	—	70	8	—
15	А	дерево	1,4	$b \times h = 17 \times 32$	—	1	40	—
	Б	Ст 3	1,6	двутавр № 24	—	2	50	—
	В	Ст 3	1,8	швеллер № 20	—	3	60	—
	Г	Ст 3	1,9	2 швеллера № 22	—	4	70	—
	Д	Ст 3	2,1	2 швеллера № 18	—	5	80	—
	Е	Ст 3	2,2	2 двутавра № 20	—	6	60	—
16	А	дерево	1,6	$b \times h = 19 \times 32$	—	—	2	20
	Б	Ст 3	1,7	двутавр № 22	—	—	3	30
	В	Ст 3	1,9	швеллер № 27	—	—	4	40
	Г	Ст 3	1,8	2 швеллера № 16	—	—	5	50
	Д	Ст 3	2,3	2 швеллера № 20	—	—	6	40
	Е	Ст 3	2,4	2 двутавра № 22	—	—	7	50

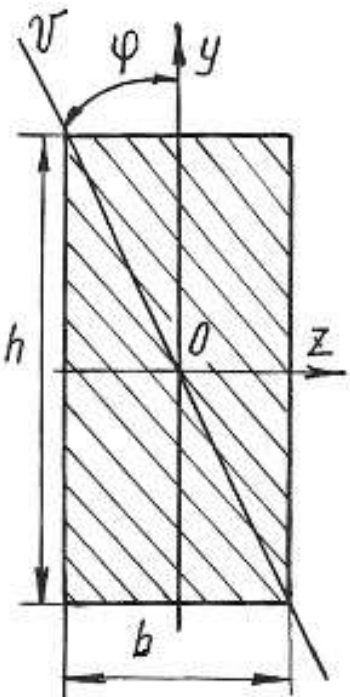
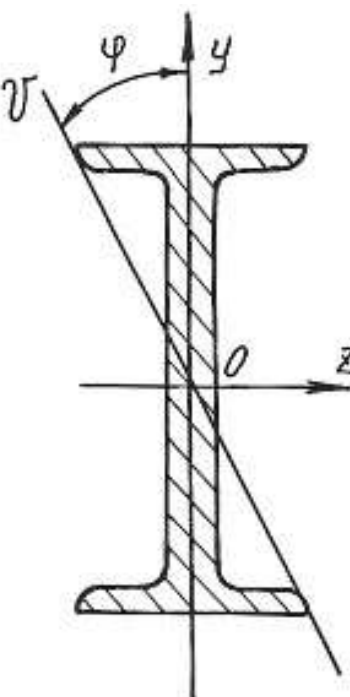
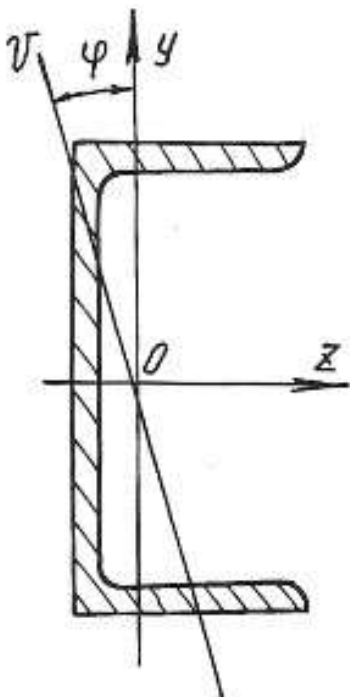
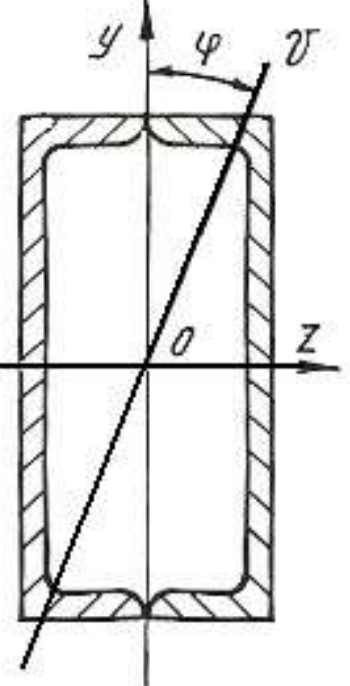
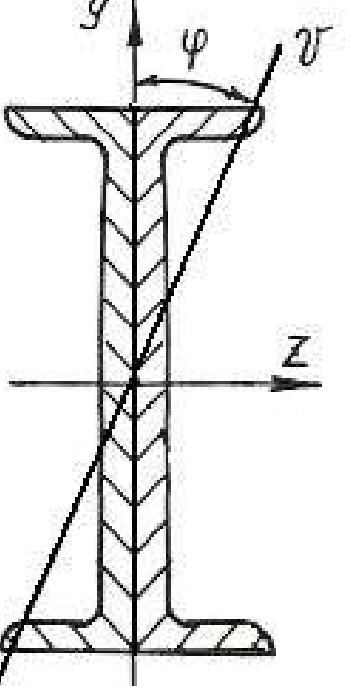
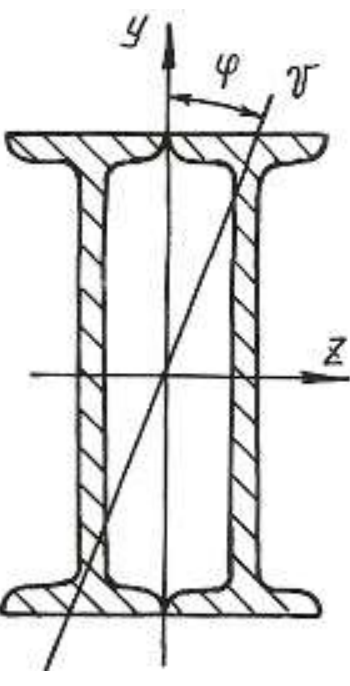
Схемы закрепления и нагружения балок

Номер схемы	Схема балки
1	
2	
3	
4	
5	

Номер схемы	Схема балки
6	
7	
8	
9	
10	
11	

Номер схемы	Схема балки
12	
13	
14	
15	
16	

Схемы поперечных сечений балок

А	Б	В
		
Г	Д	Е
		

6.3. Внецентренное растяжение или сжатие

Если действующая на брус продольная растягивающая или сжимающая сила приложена на некотором расстоянии от центра тяжести сечения, то возникает внецентренное растяжение или сжатие. Расстояние между точкой приложения силы и центром тяжести сечения бруса называется эксцентриситетом. Для практики весьма важны случаи внецентренного сжатия, например, для каменных и кирпичных столбов, бетонных колонн и др.

Внецентренное приложение сжимающей силы можно привести к случаю сжатия центральной силой F и чистому изгибу моментом $M = Fe$, если перенести силу F в центр тяжести поперечного сечения и уравновесить ее (рис. 6.5).

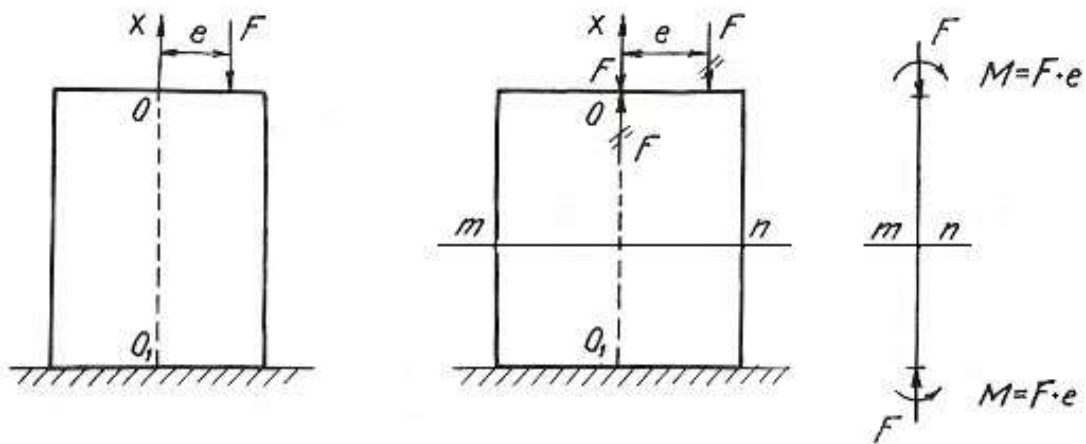


Рис. 6.5.

Так как изгибающий момент во всех сечениях постоянен, то проверку прочности можно производить по любому сечению бруса. Если отбросить верхнюю часть бруса по сечению $m-n$ и рассмотреть нижнюю (рис. 6.6), то для любой точки A поперечного сечения с координатами y, z нормальное напряжение будет равно алгебраической сумме напряжений

$$\sigma_A = \sigma_F + \sigma_{M_y} + \sigma_{M_z}, \quad (6.7)$$

где $\sigma_F = -\frac{F}{A}$ – напряжение от сжимающей центрально приложенной силы F ;

$\sigma_{M_y} = -M_y \frac{z}{J_y}$ – напряжение от изгибающего момента относительно главной

оси сечения y ; $\sigma_{M_z} = -M_z \frac{y}{J_z}$ – напряжение от изгибающего момента относительно главной оси сечения z .

Знак минус указывает на то, что данные нагрузки вызывают в точке A деформацию сжатия.

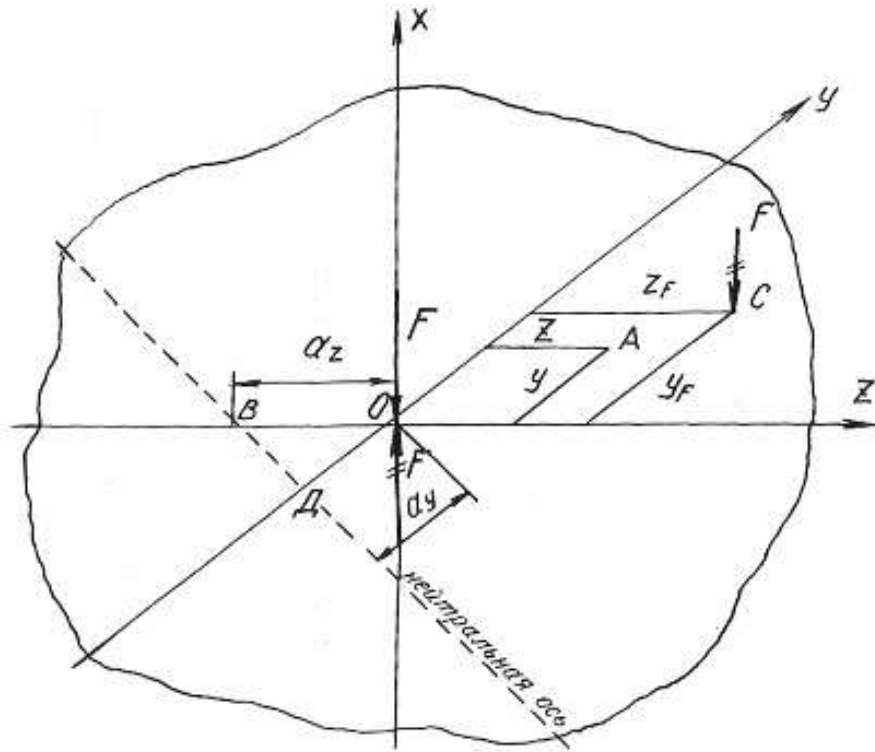


Рис. 6.6.

Изгибающие моменты определяются

$$M_y = Fz_F; \quad M_z = Fy_F;$$

где z_F и y_F - координаты точки C приложения силы F .

После подстановки имеем:

$$\sigma_A = -\frac{F}{A} - Fz_F \frac{z}{J_y} - Fy_F \frac{y}{J_z}.$$

Окончательный вид формулы для определения напряжений в любой точке поперечного сечения получаем после простых преобразований

$$\sigma = F \left(\pm \frac{1}{A} \pm z_F \frac{z}{J_y} \pm y_F \frac{y}{J_z} \right), \quad (6.8)$$

где J_y, J_z - моменты инерции поперечного сечения; y_F, z_F - координаты точки приложения силы F .

У каждого из слагаемых данного уравнения знак плюс берется для растягивающего, а знак минус - для сжимающего напряжения.

Условие прочности при внецентренном растяжении или сжатии имеет вид:

$$\sigma_{\max} = F \left(\pm \frac{1}{A} \pm z_F \frac{z_{\max}}{J_y} \pm y_F \frac{y_{\max}}{J_z} \right) \leq \sigma_{\text{adm}}, \quad (6.9)$$

где z_{\max}, y_{\max} – координаты наиболее удаленных точек сечения от его центра тяжести.

Уравнение нейтральной оси при внецентренном растяжении или сжатии имеет вид:

$$\pm \frac{1}{A} \pm z_F \frac{z_0}{J_y} \pm y_F \frac{y_0}{J_z} = 0, \quad (6.10)$$

где z_0, y_0 – координаты точек, лежащих на нейтральной оси.

Это уравнение является уравнением прямой, не проходящей через центр тяжести сечения. Величины отрезков, отсекаемых на координатных осях y и z нейтральной осью, определяются из уравнения:

$$\pm 1 \pm z_F \frac{a_z}{i_y^2} \pm y_F \frac{a_y}{i_z^2} = 0, \quad (6.11)$$

где $a_z = z_0, a_y = y_0$ – отрезки, определяющие положение нейтральной оси.

Величины отрезков определяются по формулам:

$$a_z = -\frac{i_y^2}{z_F}; \quad a_y = -\frac{i_z^2}{y_F}, \quad (6.12)$$

где i_z, i_y – радиусы инерции поперечного сечения относительно осей y и z .

Знак минус в этих формулах указывает на то, что нейтральная ось располагается по другую сторону центра тяжести сечения, по сравнению с точкой приложения силы F , действующей на брус.

Если поперечное сечение имеет сложную форму, то необходимо найти центр тяжести сечения, положение главных центральных осей и главные моменты инерции, пользуясь формулами и указаниями, приведенными в главе 2. В формулы, содержащие моменты инерции, необходимо подставлять значения главных моментов инерции сечения.

Пример 6.3.

Короткий чугунный стержень, поперечное сечение которого показано на рис. 6.7, сжимается продольной силой F , приложенной в точке A .

Требуется:

1. Вычислить наибольшее растягивающее и наибольшее сжимающее напряжения в поперечном сечении, выразив величины этих напряжений через F и размеры сечений.

2. Найти допускаемую нагрузку F при заданных размерах сечения и допускаемых напряжениях для чугуна на сжатие σ_{adm}^c и на растяжение σ_{adm}^p :
 $\sigma_{adm}^c = 110$ МПа, $\sigma_{adm}^p = 24$ МПа.

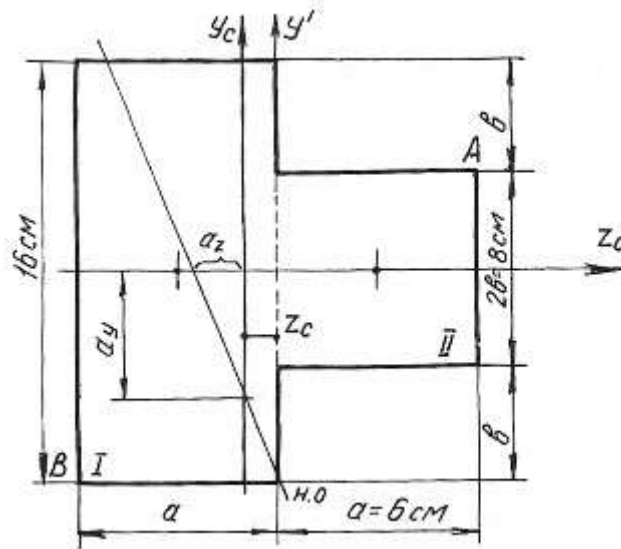


Рис. 6.7.

Определяем координату центра тяжести сечения. Проведем вспомогательную ось y' :

$$z_c = \frac{\sum S y'}{\sum A} = \frac{(A_1 z_1 + A_2 z_2)}{A_1 + A_2} = \frac{[16 \cdot 6 \cdot (-3) + 6 \cdot 8 \cdot 3]}{16 \cdot 6 + 6 \cdot 8} = \frac{-144}{144} = -1 \text{ см.}$$

Для определения положения нейтральной оси находим геометрические характеристики сечения.

Моменты инерции:

$$J_{y_c} = 16 \frac{6^3}{12} + 6 \cdot 16 \cdot 2^2 + 8 \cdot \frac{6^3}{12} + 6 \cdot 8 \cdot 4^2 = 1584 \text{ см}^4;$$

$$J_{z_c} = 16^3 \frac{6}{12} + 6 \frac{8^3}{12} = 2304 \text{ см}^4.$$

Радиусы инерции:

$$i_y = \sqrt{\frac{J_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{1584}{144}} = \sqrt{11} = 3,31 \text{ см};$$

$$i_z = \sqrt{\frac{J_{z_c}}{A}} = \sqrt{\frac{2304}{144}} = \sqrt{16} = 4 \text{ см.}$$

Нейтральная ось пересекает оси z_c и y_c в точках:

$$a_y = -\frac{i_z^2}{y_F}; \quad a_z = -\frac{i_y^2}{z_F}; \quad z_F = 7 \text{ см}; \quad y_F = 4 \text{ см}.$$

$$a_y = \frac{-4^2}{4} = -4 \text{ см}; \quad a_z = \frac{-3,31^2}{7} = -1,57 \text{ см}.$$

Максимальное напряжение возникает в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси, т. е. в точках A и B . Определяются они по формуле:

$$\sigma = -\frac{F}{A} \pm \frac{Fz_F z_{\max}}{J_{y_c}} \pm \frac{Fy_F y_{\max}}{J_{z_c}},$$

где z_{\max} , y_{\max} – координаты точек A и B .

Наибольшее сжимающее напряжение:

$$\sigma_A = -F \left[\frac{1}{144} + 7 \frac{7}{1584} + 4 \frac{4}{2304} \right] = -0,044 \cdot F.$$

Наибольшее растягивающее напряжение:

$$\sigma_B = -F \left[\frac{1}{144} + 7 \frac{(-5)}{1584} + 4 \frac{(-8)}{2304} \right] = 0,028 \cdot F.$$

Находим допускаемую нагрузку:

$$\sigma_A \leq \sigma_{\text{adm}}^c = 110 \text{ МПа}; \quad 0,044 \cdot F \leq 110; \quad F \leq 0,25 \text{ МН}.$$

$$\sigma_B \leq \sigma_{\text{adm}}^p = 24 \text{ МПа}; \quad 0,028 \cdot F \leq 24; \quad F \leq 0,09 \text{ МН}.$$

Допускаемая нагрузка $F = 0,09 \text{ МН}$.

6.4. Задания для расчета на внецентренное растяжение или сжатие

Колонна заданного поперечного сечения с известными размерами нагружена сжимающей силой F , приложенной вне центра тяжести сечения в указанной точке. Требуется:

- 1) Определить положение нейтральной оси;
- 2) Вычислить наибольшие напряжения в опасном сечении колонны;
- 3) Построить эпюры напряжений в опасном сечении.

Данные для расчета взять из таблиц 6.4, 6.5 и табл. П. 1.

Примечание: собственным весом колонны при расчетах пренебречь.

Таблица 6.4

Вариант	Схема сечения	Материал	Размеры сечения, см	Точка приложения силы F	Нагрузка F , кН
1	А	дерево	$b \times h = 15 \times 25$	1	20
	Б	Ст 3	двутавр № 16	2	30
	В	Ст 3	швеллер № 16	3	40
	Г	Ст 3	2 швеллера № 14	4	50
	Д	Ст 3	2 швеллера № 12	5	60
	Е	Ст 3	2 двутавра № 14	6	70
	Ж	чугун	$b = 20$	7	35
	З	чугун	$b \times h = 20 \times 30, D = 10$	8	45
	И	Ст 3	2 швеллера № 12, $a = 10$	1	75
	К	Ст 3	2 двутавра № 14, $a = 10$	2	80
2	А	дерево	$b \times h = 16 \times 27$	2	25
	Б	Ст 3	двутавр № 18	3	35
	В	Ст 3	швеллер № 18	4	45
	Г	Ст 3	2 швеллера № 16	5	50
	Д	Ст 3	2 швеллера № 18	6	60
	Е	Ст 3	2 двутавра № 16	7	70
	Ж	чугун	$b = 30$	8	55
	З	чугун	$b \times h = 25 \times 35, D = 12$	1	65
	И	Ст 3	2 швеллера № 14, $a = 10$	2	65
	К	Ст 3	2 двутавра № 16, $a = 10$	3	75

Продолжение табл. 6.4

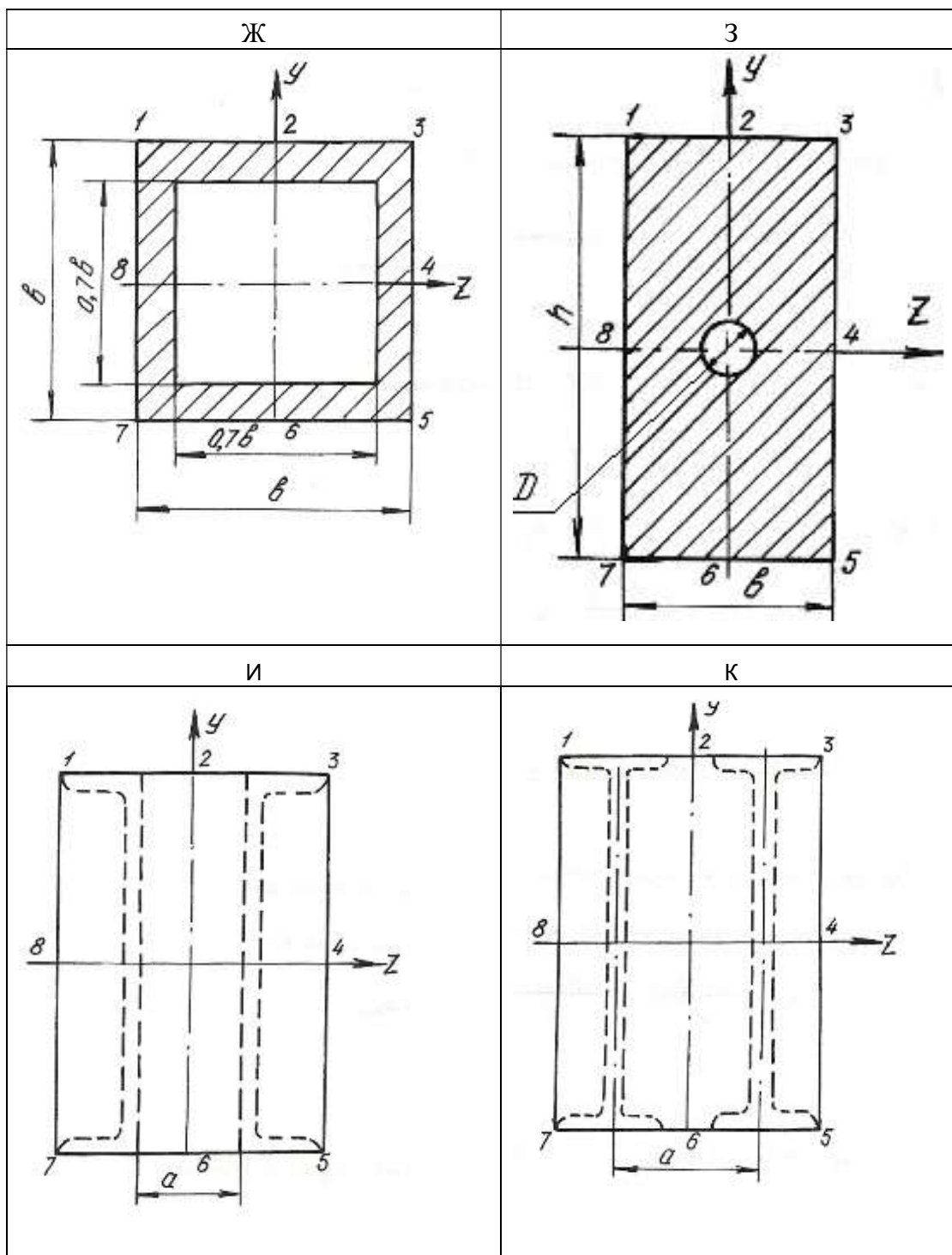
Вариант	Схема сечения	Материал	Размеры сечения	Точка приложения силы F	Нагрузка F , кН
3	А	дерево	$b \times h = 17 \times 28$	3	30
	Б	Ст 3	двутавр № 14	4	40
	В	Ст 3	швеллер № 20	5	48
	Г	Ст 3	2 швеллера № 14	6	52
	Д	Ст 3	2 швеллера № 16	7	62
	Е	Ст 3	2 двутавра № 18	8	72
	Ж	чугун	$b = 32$	1	60
	З	чугун	$b \times h = 24 \times 32, D = 8$	2	70
	И	Ст 3	2 швеллера № 18, $a = 14$	3	66
	К	Ст 3	2 двутавра № 12, $a = 8$	4	74
4	А	дерево	$b \times h = 18 \times 36$	4	40
	Б	Ст 3	двутавр № 20	5	44
	В	Ст 3	швеллер № 20	6	54
	Г	Ст 3	2 швеллера № 18	7	64
	Д	Ст 3	2 швеллера № 16	8	74
	Е	Ст 3	2 двутавра № 14	1	46
	Ж	чугун	$b = 34$	2	38
	З	чугун	$b \times h = 28 \times 36, D = 14$	3	48
	И	Ст 3	2 швеллера № 16, $a = 8$	4	58
	К	Ст 3	2 двутавра № 18, $a = 12$	5	72
5	А	дерево	$b \times h = 20 \times 24$	5	28
	Б	Ст 3	двутавр № 22	6	38
	В	Ст 3	швеллер № 22	7	48
	Г	Ст 3	2 швеллера № 20	8	62
	Д	Ст 3	2 швеллера № 22	1	76
	Е	Ст 3	2 двутавра № 20	2	78
	Ж	чугун	$b = 28$	3	46
	З	чугун	$b \times h = 22 \times 34, D = 6$	4	56
	И	Ст 3	2 швеллера № 20, $a = 6$	5	80
	К	Ст 3	2 двутавра № 20, $a = 12$	6	82

Продолжение табл. 6.4

Вариант	Схема сечения	Материал	Размеры сечения, см	Точка приложения силы F	Нагрузка F , кН
6	А	дерево	$b \times h = 22 \times 38$	6	36
	Б	Ст 3	двутавр № 22	7	46
	В	Ст 3	швеллер № 22	8	48
	Г	Ст 3	2 швеллера № 22	1	68
	Д	Ст 3	2 швеллера № 20	2	72
	Е	Ст 3	2 двутавра № 22	3	74
	Ж	чугун	$b = 24$	4	50
	З	чугун	$b \times h = 24 \times 34, D = 8$	5	60
	И	Ст 3	2 швеллера № 22, $a = 8$	6	74
	К	Ст 3	2 двутавра № 22, $a = 12$	7	69
7	А	дерево	$b \times h = 22 \times 30$	7	25
	Б	Ст 3	двутавр № 24	8	48
	В	Ст 3	швеллер № 24	1	52
	Г	Ст 3	2 швеллера № 24	2	63
	Д	Ст 3	2 швеллера № 22	3	68
	Е	Ст 3	2 двутавра № 20	4	64
	Ж	чугун	$b = 22$	5	43
	З	чугун	$b \times h = 26 \times 36, D = 6$	6	49
	И	Ст 3	2 швеллера № 24, $a = 4$	7	78
	К	Ст 3	2 двутавра № 24, $a = 13$	8	84
8	А	дерево	$b \times h = 18 \times 32$	8	35
	Б	Ст 3	двутавр № 27	1	62
	В	Ст 3	швеллер № 27	2	68
	Г	Ст 3	2 швеллера № 22	3	85
	Д	Ст 3	2 швеллера № 24	4	87
	Е	Ст 3	2 двутавра № 22	5	78
	Ж	чугун	$b = 26$	6	52
	З	чугун	$b \times h = 26 \times 36, D = 9$	7	58
	И	Ст 3	2 швеллера № 27, $a = 5$	8	86
	К	Ст 3	2 двутавра № 27, $a = 14$	1	88

Схемы поперечных сечений колонны

А	Б	В
Г	Д	Е



6.5. Изгиб с кручением

Помимо крутящих моментов валы могут испытывать воздействие изгибающих моментов. Последние возникают от действия собственного веса вала, усилий натяжения приводных ремней, весов шкивов, усилий зацепления в зубьях зубчатых передач и т. п.

Крутящий момент на валу или его участке определяется по формулам:

$$T = 9550 \frac{N}{n}, \quad (6.13)$$

где T – крутящий момент, Нм; N – мощность двигателя, кВт; n – число оборотов вала в минуту, или

$$T = \frac{D}{2} \cdot (t_1 - t_1'), \quad (6.14)$$

где D – диаметр ведущего шкива, соединенного с двигателем приводным ремнем; t_1 – усилие натяжения в набегающей ветви приводного ремня; t_1' – усилие натяжения в сбегающей ветви приводного ремня.

Определив крутящий момент по формуле (6.13) и, зная соотношение между усилиями t_1 и t_1' , определяют эти усилия из формулы (6.14) при известном диаметре шкива. Если усилия t_1 , t_1' последовательно перенести в центр тяжести сечения вала и уравновесить их, то получим два момента пар сил, направленных в противоположные стороны. Равнодействующий момент этих моментов и будет равен крутящему моменту в том сечении, где находится шкив. Вместе с этим в центре этого сечения вала возникнет нагрузка, $S = t_1 + t_1'$, которая может быть направлена под углом к горизонту. В этом случае ее раскладывают на вертикальную и горизонтальную составляющие: $S_y = S \cdot \sin \alpha$; $S_z = S \cdot \cos \alpha$.

При наличии на валу нескольких ведомых шкивов крутящие моменты и изгибающие нагрузки определяются аналогичным способом. Таким образом, вал будет испытывать одновременно деформацию кручения от крутящих моментов и деформацию поперечного изгиба в двух плоскостях – вертикальной и горизонтальной. Дальнейший расчет вала на изгиб с кручением осуществляется в таком порядке:

1. Строится эпюра крутящих моментов T .
2. Вычерчивается схема вала в виде балки на двух опорах и загружается только вертикальными изгибающими нагрузками. С помощью уравнений статики определяются реакции на опорах, и строится эпюра изгибающих моментов от этих нагрузок $M_{из}^B$.

3. Вал загружается только горизонтальными изгибающими нагрузками, от них определяются реакции на опорах, и строится эпюра изгибающих моментов от горизонтальных нагрузок $M_{\text{и}}^{\Gamma}$.

4. В характерных сечениях вала определяются суммарные изгибающие моменты в виде геометрической суммы изгибающих моментов, возникающих в этих сечениях от вертикальных и горизонтальных нагрузок: $M_{\text{и}} = \sqrt{(M_{\text{и}}^{\text{В}})^2 + (M_{\text{и}}^{\Gamma})^2}$. Строится суммарная эпюра изгибающих моментов $M_{\text{и}}$. При построении эпюр выбирается необходимый масштаб, и применяются знаки, принятые в сопротивлении материалов при построении эпюр крутящих и изгибающих моментов.

5. Выбирается опасное сечение по длине вала, где одновременно крутящий и суммарный моменты достаточно большие – на основании эпюр $M_{\text{и}}$ и T .

6. На основании третьей или четвертой теории прочности для опасного сечения определяется расчетный (эквивалентный) момент по формулам:

$$M_{\text{р}}^{\text{III}} = \sqrt{T^2 + M_{\text{и}}^2}; \quad M_{\text{р}}^{\text{IV}} = \sqrt{M_{\text{и}}^2 + 0,75T^2}. \quad (6.15)$$

7. Определяется диаметр сечения вала на основании условия прочности:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{р}}}{W_z} \leq \sigma_{\text{adm}}, \quad (6.16)$$

где $W_z = \frac{J_z}{d/2} = \pi \frac{d^4/64}{d/2} = \frac{\pi d^3}{32}$ – момент сопротивления поперечного сечения вала изгибу.

$$d \geq 3 \sqrt[3]{\frac{32M_{\text{р}}}{\pi\sigma_{\text{adm}}}}. \quad (6.17)$$

Величина диаметра округляется до ближайшего целого.

Пример 6.4.

Шкив с диаметром D_1 и с углом наклона ветвей ремня к горизонту α_1 делает n оборотов в минуту и передает мощность N . Два других шкива имеют одинаковый диаметр D_2 и одинаковые углы наклона ветвей ремня к горизонту α_2 и, каждый из них передает мощность $N/2$ (рис. 6.8).

Требуется:

1. Определить моменты, приложенные к шкивам, по заданным N и n ;

2. Построить эпюру крутящих моментов T ;
3. Определить окружные усилия t_1 и t_2 действующие на шкивы, по данным моментам и заданным диаметрам шкивов D_1 и D_2 ;
4. Принять $t_1 = 2 \cdot t_2$;
5. Определить силы, изгибающие вал в горизонтальной и вертикальной плоскостях (вес шкивов и вала не учитывать);
6. Построить эпюры изгибающих моментов от горизонтальных и вертикальных сил $M_{\text{верт.}}$, $M_{\text{гор.}}$;
7. Построить эпюры суммарных изгибающих моментов, пользуясь формулой $M_{\text{и}} = \sqrt{M_{\text{гор.}}^2 + M_{\text{верт.}}^2}$;
8. При помощи эпюр T и $M_{\text{и}}$ найти опасное сечение и определить максимальный расчетный момент (по третьей теории прочности);
9. Подобрать диаметр вала d при $\sigma_{\text{adm}} = 70$ МПа и округлить его значение.

Решение.

1. Определяем крутящие моменты:

$$T_1 = \frac{9,55 \cdot N_1}{650} = \frac{9,55 \cdot 90}{650} = 1,32 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$T_2 = \frac{9,55 \cdot N_2}{n} = \frac{9,55 \cdot 45}{650} = 0,66 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

2. Строим эпюру крутящих моментов (см. рис. 6.8).

3. Определяем усилия натяжения в ветвях ремней:

$$t_1 = \frac{2 \cdot T_1}{D_1} = \frac{2 \cdot 1,32}{1} = 2,64 \text{ кН}; \quad t_2 = \frac{2 \cdot T_2}{D_2} = \frac{2 \cdot 0,66}{0,6} = 2,2 \text{ кН}.$$

4. Определяем изгибающие нагрузки:

$$S_1 = t_1 + 2 \cdot t_2 = 7,92 \text{ кН}; \quad S_2 = t_2 + 2 \cdot t_2 = 6,60 \text{ кН}.$$

5. Определяем изгибающие нагрузки в вертикальной плоскости и реакции от этих нагрузок:

$$S_1^y = S_1 \cdot \sin \alpha_1 = 7,92 \cdot \sin 75^\circ = 7,92 \cdot 0,9659 = 7,65 \text{ кН};$$

$$S_2^y = S_2 \cdot \sin \alpha_2 = 6,6 \cdot \sin 80^\circ = 6,6 \cdot 0,9848 = 6,49 \text{ кН}.$$

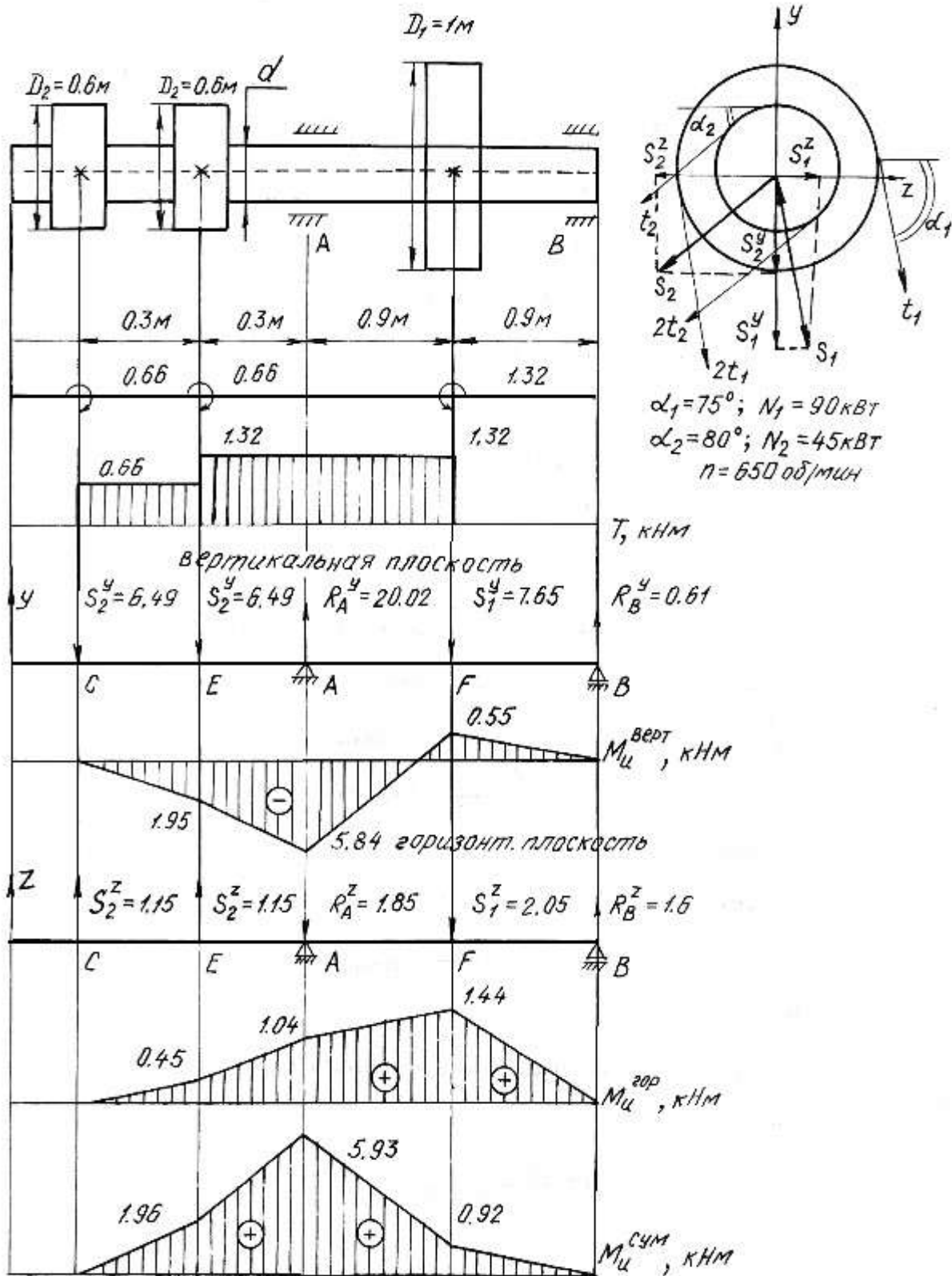


Рис. 6.8.

$$\sum M_A = 0; \quad S_2^y \cdot 0,6 - S_1^y \cdot 0,9 + R_B^y \cdot 1,8 + S_2^y \cdot 0,3 = 0;$$

$$6,49 \cdot 0,6 + 6,49 \cdot 0,3 - 7,65 \cdot 0,9 + R_B^y \cdot 1,8 = 0;$$

$$R_B^y = 0,61 \text{ кН.}$$

$$\sum M_B = 0; \quad S_2^y \cdot 2,4 + S_2^y \cdot 2,1 - R_A^y \cdot 1,8 + S_1^y \cdot 0,9 = 0;$$

$$6,49 \cdot 2,4 + 6,49 \cdot 2,1 - R_A^y \cdot 1,8 + 7,65 \cdot 0,9 = 0;$$

$$R_A^y = 20,02 \text{ кН.}$$

$$\sum Y = 0; \quad -S_2^y - S_2^y + R_A^y - S_1^y + R_B^y = 0;$$

$$-6,49 - 6,49 + 20,02 - 7,65 + 0,61 = 0;$$

$$0 = 0.$$

Строим эпюру изгибающих моментов в вертикальной плоскости:

$$M_{\text{и}}^E = -6,49 \cdot 0,3 = -1,95 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{и}}^A = -6,49 \cdot 0,6 - 6,49 \cdot 0,3 = -5,84 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{и}}^F = R_B^y \cdot 0,9 = 0,61 \cdot 0,9 = 0,55 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

6. Определяем изгибающие нагрузки в горизонтальной плоскости и реакции от этих нагрузок:

$$S_1^z = S_1 \cdot \cos \alpha_1 = 7,92 \cdot \cos 75^\circ = 2,05 \text{ кН};$$

$$S_2^z = S_2 \cdot \cos \alpha_2 = 6,6 \cdot \cos 80^\circ = 1,15 \text{ кН.}$$

$$\sum M_A = 0;$$

$$S_2^z \cdot 0,6 - S_1^z \cdot 0,9 + R_B^z \cdot 1,8 - S_2^z \cdot 0,3 = 0;$$

$$R_B^z = 1,6 \text{ кН.}$$

$$\sum M_B = 0;$$

$$-S_2^z \cdot 2,4 - S_2^z \cdot 2,1 + R_A^z \cdot 1,8 + S_1^z \cdot 0,9 = 0;$$

$$R_A^z = 1,85 \text{ кН.}$$

$$\sum Z = 0; \quad S_2^z + S_2^z - R_A^z - S_1^z + R_B^z = 0;$$

$$1,15 + 1,15 - 1,85 - 2,05 + 1,6 = 0;$$

$$0 = 0.$$

Строим эпюру изгибающих моментов в горизонтальной плоскости:

$$M_{\text{И}}^E = 1,15 \cdot 0,3 = 0,45 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{И}}^A = 1,15 \cdot 0,6 + 1,15 \cdot 0,3 = 1,04 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{И}}^F = 1,6 \cdot 0,9 = 1,44 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

7. Строим эпюру суммарных изгибающих моментов:

$$M_{\text{И}}^E = \sqrt{1,95^2 + 0,45^2} = 1,96 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{И}}^A = \sqrt{5,84^2 + 1,04^2} = 5,93 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{И}}^F = \sqrt{0,55^2 + 1,44^2} = 1,52 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

8. Опасным сечением будет сечение A :

$$M_{\text{И}}^A = 5,93 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad T = 1,32 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Расчетный момент для сечения A :

$$M_{\text{р}}^{\text{III}} = \sqrt{5,93^2 + 1,32^2} = 6,08 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

9. Определяем диаметр сечения вала:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_{\text{р}}}{\pi\sigma_{\text{adm}}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 6,08 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 70}} = 0,096 \text{ м} = 96 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр вала $d = 100 \text{ мм}$.

6.6. Задания для расчета на изгиб с кручением

Трансмиссионный вал делает n оборотов в минуту при мощности N . На шкив с диаметром D_1 с углом наклона ремней ветвей ремня к горизонту α_1 передается мощность N кВт от электродвигателя. Два других шкива имеют одинаковый диаметр D_2 и одинаковые углы α_2 наклона ветвей ремня к горизонту, и каждый из них передает мощность $0,5N$ на станки. Для заданной расчетной схемы и данных размеров и нагрузок требуется:

- 1) определить окружные моменты, приложенные к шкивам, по заданным величинам N и n ;
- 2) построить эпюру крутящих моментов T ;
- 3) определить окружные усилия, действующие на шкивы;
- 4) определить силы, изгибающие вал в горизонтальной и вертикальной плоскостях (вес шкива и вала не учитывать);
- 5) построить эпюры изгибающих моментов от горизонтальных сил $M_{гор}$ и от вертикальных сил $M_{верт}$;
- 6) построить эпюру суммарных изгибающих моментов;
- 7) найти опасное сечение и определить величину максимально-расчетного момента по третьей теории прочности;
- 8) подобрать диаметр сечения вала при $\sigma_{adm} = 80$ МПа.

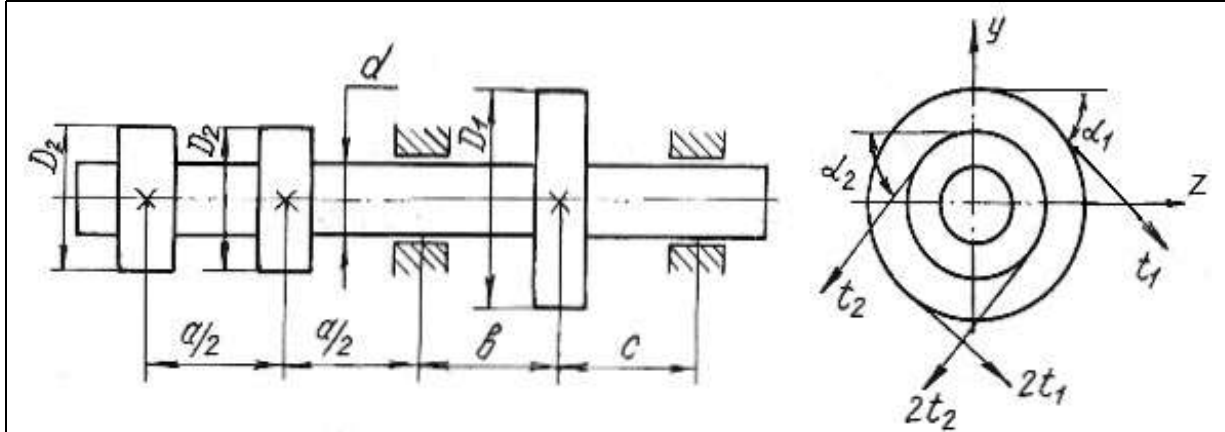
Данные для расчета и схемы взять из табл. 6.6.

Таблица 6.6

Номер варианта	Числовые значения									
	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
1	1,00	0,30	45	40	30	15	250	0,50	1,00	1,00
2	0,80	0,40	15	10	40	20	200	0,50	1,30	1,20
3	1,00	0,40	30	35	30	15	250	0,40	1,25	2,00
4	1,20	0,50	60	55	50	25	200	0,40	1,00	2,50
5	1,40	0,40	45	45	60	30	300	0,60	1,20	1,80

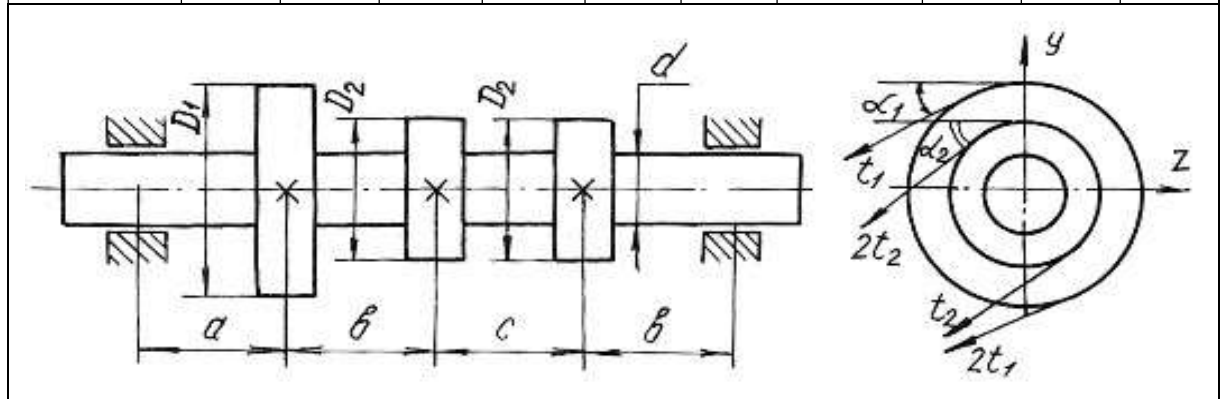
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
6	1,00	0,30	45	40	70	35	400	0,70	1,20	1,30
7	0,90	0,60	55	50	75	38	400	0,50	1,00	1,00
8	1,00	0,70	60	35	80	40	500	0,60	1,00	1,10
9	1,20	0,80	65	30	85	42	550	0,70	1,10	1,20
10	1,20	0,90	70	45	90	45	600	0,70	1,00	1,00



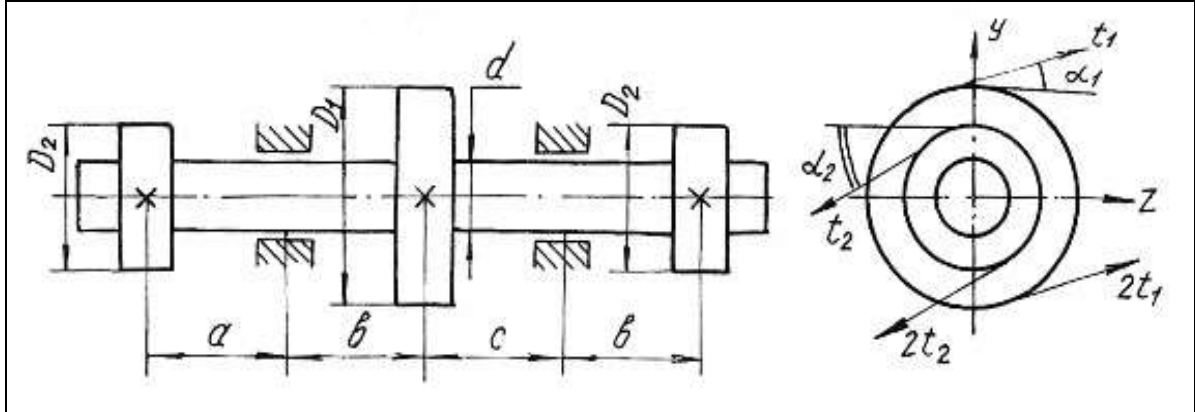
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
11	1,00	0,60	75	80	90	45	650	0,60	0,90	0,90
12	1,20	0,80	80	75	100	50	700	0,50	1,00	1,00
13	1,20	0,70	85	30	110	55	750	0,60	1,10	1,20
14	1,20	0,60	30	85	120	60	800	0,50	1,00	1,00
15	1,00	0,80	35	40	130	65	360	0,60	1,20	1,00



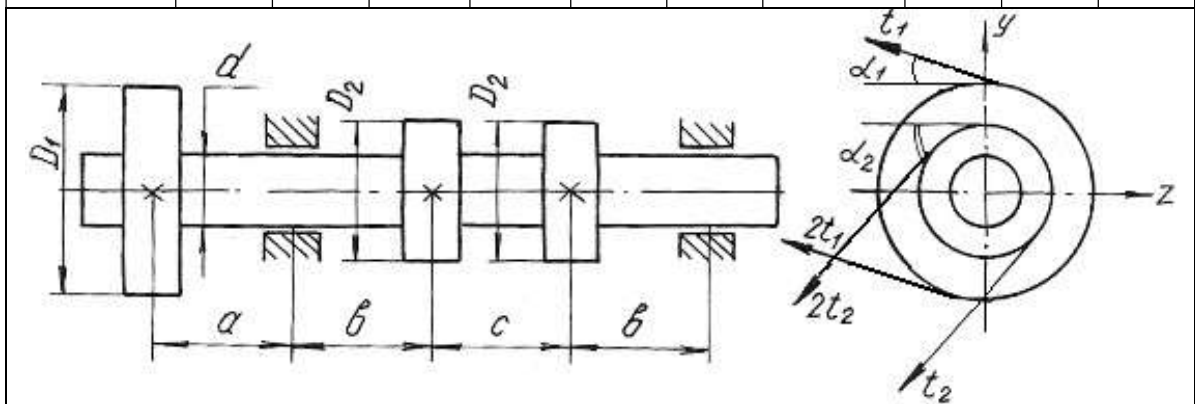
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
16	1,20	0,60	40	35	140	70	400	0,50	1,00	1,00
17	1,40	0,70	45	50	150	75	450	0,50	0,50	1,00
18	1,20	0,60	50	45	160	80	500	0,60	1,00	1,00
19	1,20	0,70	60	65	170	85	550	0,50	0,90	0,90
20	1,00	0,60	65	60	180	90	600	0,60	1,00	0,90



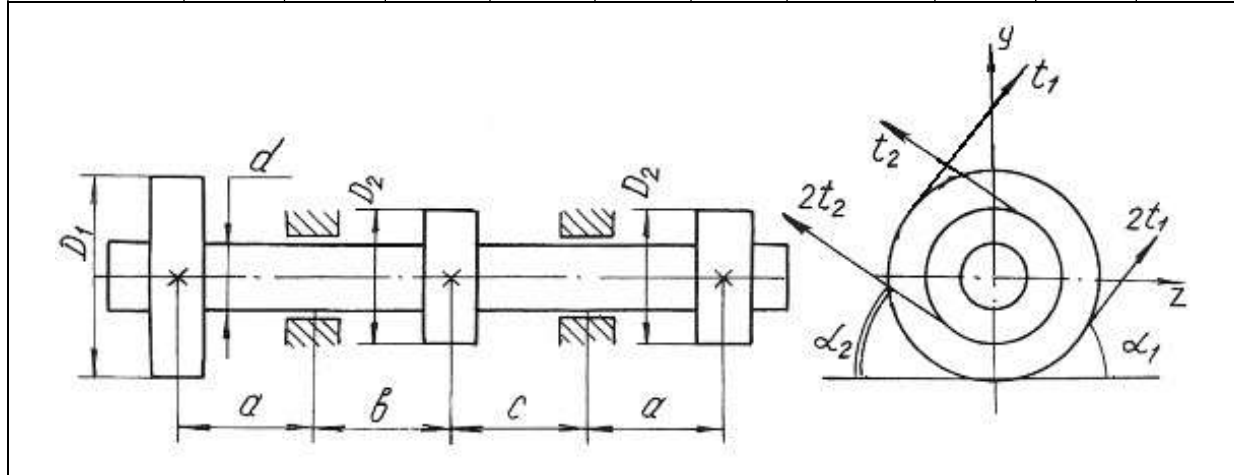
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
21	1,20	0,80	15	25	30	15	250	1,00	0,80	1,20
22	1,00	0,60	25	15	40	20	280	1,20	1,20	1,30
23	0,80	0,50	30	45	50	25	300	1,30	1,30	1,40
24	1,00	0,65	45	60	60	30	450	1,25	1,40	1,50
25	1,20	0,75	60	30	70	35	500	1,40	1,00	1,60



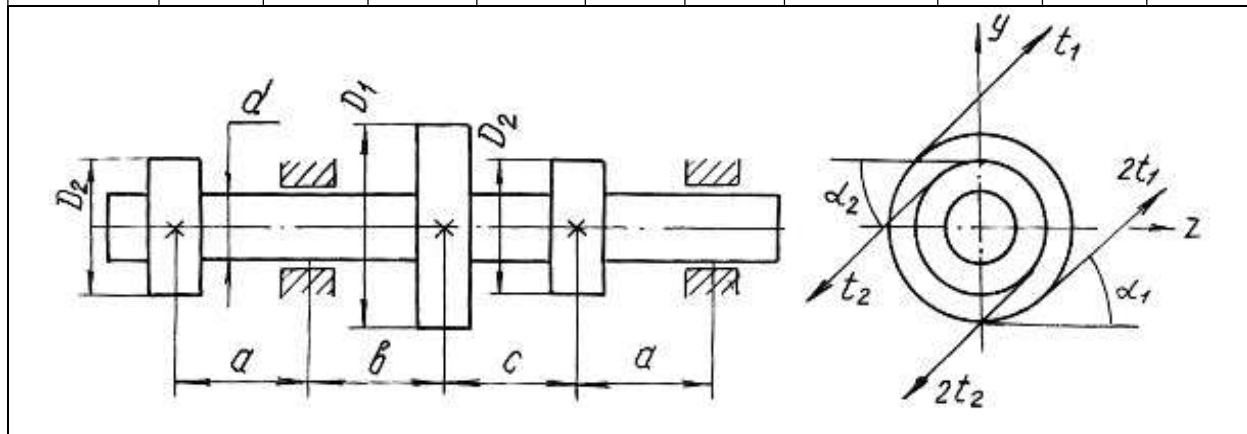
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
26	1,20	0,80	75	15	60	30	500	1,20	1,20	1,40
27	1,00	0,90	30	45	64	32	550	1,00	0,80	1,00
28	0,90	0,80	35	55	70	35	600	0,60	1,00	0,90
29	0,80	0,70	40	50	74	37	650	0,60	0,90	0,80
30	1,10	0,75	55	65	80	40	700	0,80	1,00	0,65



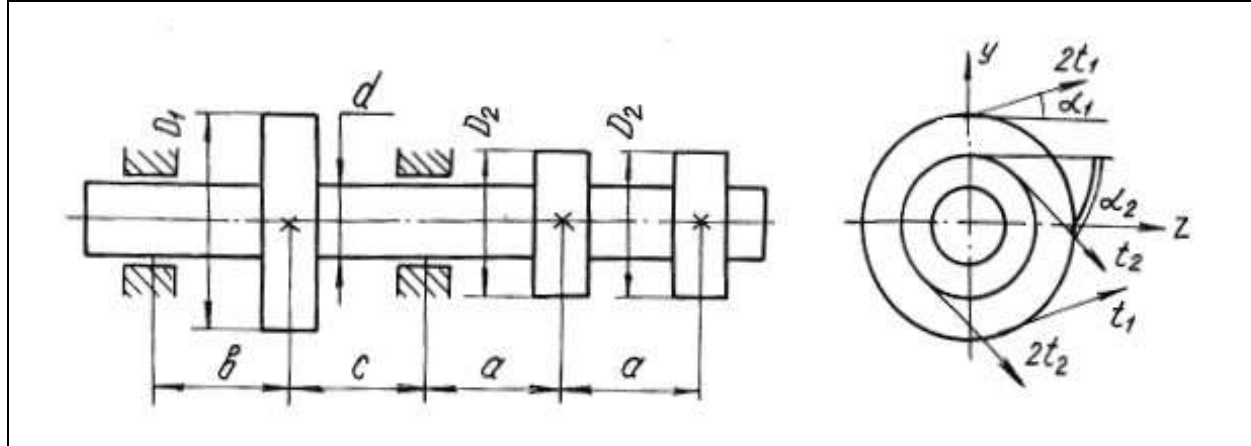
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
31	1,10	0,75	45	45	170	85	500	1,00	0,90	1,10
32	1,20	0,90	60	30	90	45	400	0,90	1,00	0,80
33	0,90	0,70	75	15	95	47	450	0,80	0,90	1,00
34	1,00	0,80	30	45	100	50	500	1,00	1,20	0,90
35	1,20	0,90	25	15	110	55	550	0,90	1,00	1,20



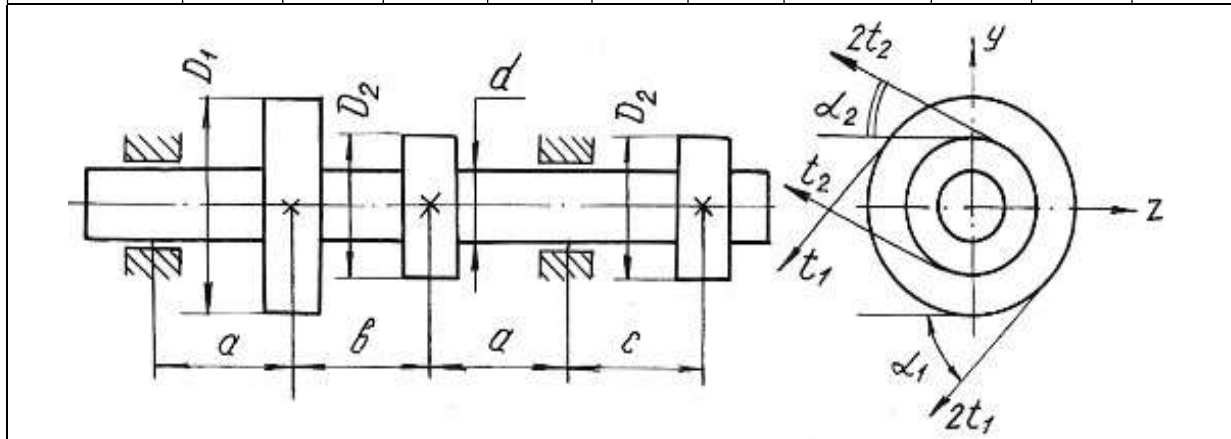
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
36	1,00	0,80	30	20	120	60	600	0,80	1,20	0,90
37	1,20	0,90	35	45	130	65	650	1,00	0,80	0,90
38	1,10	0,80	60	50	140	70	700	0,90	1,00	0,90
39	1,00	0,70	75	15	150	75	300	0,80	1,00	0,70
40	1,00	0,60	60	40	160	80	300	1,00	1,20	1,30



Окончание табл. 6.6

Номер варианта	D_1 , м	D_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	N_1 , кВт	N_2 , кВт	n , об/мин	a , м	b , м	c , м
41	1,00	0,40	40	20	40	20	200	0,50	1,00	0,40
42	0,80	0,50	45	25	50	25	250	0,40	1,10	0,50
43	1,00	0,60	50	30	60	30	300	0,60	0,90	0,40
44	1,20	0,80	55	35	70	35	200	0,40	1,00	0,60
45	1,10	0,50	60	40	80	40	350	0,70	1,20	0,70



Глава 7

УСТОЙЧИВОСТЬ ГИБКИХ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

Стержни, длина которых относительно невелика по сравнению с их поперечными размерами, рассчитываются на сжатие, исходя из условия прочности:

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_{\text{adm}}.$$

При этом полагается, что вплоть до разрушения стержень работает на осевое сжатие и продольная ось его остаётся прямолинейной.

Иная картина наблюдается при сжатии стержней, длина которых значительно больше размеров поперечного сечения. В этих случаях прямолинейная продольная ось стержней может искривляться. Искривление происходит в плоскости наименьшей жесткости стержня.

Деформация, которая возникает при сжатии стержня и сопровождается искривлением продольной оси стержня, называется продольным изгибом, а переход прямолинейной формы продольной оси стержня в криволинейную носит название потери устойчивости. Нагрузка, при которой стержень теряет устойчивость, называется критической силой F_{cr} .

Напряжение, возникающее в поперечном сечении стержня от критической силы, называется критическим напряжением σ_{cr} .

Критические напряжения весьма опасны для сжатых стержней, поэтому необходимо проводить расчёты на устойчивость.

Для стержней, закрепленных на одной или двух опорах, величина критической силы может быть определена по формуле Эйлера:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{\min}}{(\mu l)^2}, \quad (7.1)$$

где E – модуль продольной упругости материала; J_{\min} – минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня; l – длина стержня; μ – коэффициент приведенной длины стержня, отражающий способ закрепления концов стержня (рис. 7.1); μl – приведенная длина стержня.

Критические напряжения

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (7.2)$$

где λ – гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}, \quad (7.3)$$

где i_{\min} – минимальный радиус инерции поперечного сечения стержня

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}, \quad (7.4)$$

Формула Эйлера применима для стержней с гибкостью более гибкости, предельной для данного материала стержня

$$\lambda_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{pr}}}, \quad (7.5)$$

где σ_{pr} – предел пропорциональности материала стержня (напряжение, при котором сохраняется прямая пропорциональность между σ и ε).

Для расчёта сжатых стержней любой гибкости применяется способ, основанный на применении коэффициентов φ . Этот способ расчёта сжатых стержней на устойчивость сводится к расчёту стержня как бы на простое сжатие, только по заниженному допускаемому напряжению с использованием формулы:

$$\sigma_{\text{adm}}^y = \varphi \sigma_{\text{adm}}, \quad (7.6)$$

где σ_{adm}^y – допускаемое напряжение при расчете на устойчивость; φ – коэффициент продольного изгиба (коэффициент понижения основного допускаемого напряжения σ_{adm} на простое сжатие), значения коэффициентов φ для различных материалов приведены в табл. 7.1.

Величина допускаемой нагрузки на устойчивость F_{adm}^y сжатого стержня соответственно будет равна

$$F_{\text{adm}}^y = \sigma_{\text{adm}}^y A = \varphi \sigma_{\text{adm}} A, \quad (7.7)$$

где A – площадь поперечного сечения сжатого стержня.

Между критической и допускаемой нагрузкой на устойчивость существует следующая связь

$$F_{cr} = K_y F_{\text{adm}}^y, \quad (7.8)$$

где K_y – коэффициент запаса на устойчивость.

Таблица 7.1

Гибкость, λ	Значение коэффициента φ				
	Материал				
	Ст. 4, Ст. 3	Ст. 5	Ст. СПБ	чугун	дерево
0	1	1	1	1	1
10	0,99	0,98	0,97	0,97	0,99
20	0,96	0,95	0,95	0,95	0,97
30	0,94	0,92	0,91	0,81	0,93
40	0,92	0,89	0,87	0,69	0,87
50	0,89	0,86	0,83	0,57	0,8
60	0,86	0,82	0,79	0,44	0,71
70	0,81	0,76	0,72	0,34	0,6
80	0,75	0,7	0,65	0,26	0,48
90	0,69	0,62	0,55	0,2	0,38
100	0,6	0,51	0,43	0,16	0,31
110	0,52	0,43	0,35	–	0,25
120	0,45	0,36	0,3	–	0,22
130	0,4	0,33	0,26	–	0,18
140	0,36	0,29	0,23	–	0,16
150	0,32	0,26	0,21	–	0,14
160	0,29	0,24	0,19	–	0,12
170	0,26	0,21	0,17	–	0,11
180	0,23	0,19	0,15	–	0,1
190	0,21	0,17	0,14	–	0,09
200	0,19	0,16	0,13	–	0,08

В зависимости от исходных данных для расчета на устойчивость решение сводится к определению допускаемой нагрузки F_{adm}^y из условий устойчивости сжатого стержня или к подбору площади поперечного сечения сжатого стержня.

Рассмотрим возможные варианты решения на устойчивость сжатых стержней с помощью коэффициента φ на следующих примерах.

Пример 7.1.

Определить допускаемую нагрузку для стойки, изготовленной из Ст. 3 в виде трубы с наружным диаметром $d_1 = 0,04$ м и внутренним $d_2 = 0,03$ м, длиной $l = 1$ м. Концы стойки заземлены. Допускаемое напряжение для материала стержня $\sigma_{adm} = 120$ МПа, предел пропорциональности материала $\sigma_{pr} = 200$ МПа. Коэффициент запаса на устойчивость $K_y = 2$. Модуль продольной упругости материала $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Решение.

Выявим возможность решения данной задачи с помощью формулы Эйлера. Для этого находим предельную гибкость для данного материала стойки

$$\lambda_{кр} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{пр}}} = \sqrt{\frac{3,14^2 \cdot 2 \cdot 10^{11}}{200 \cdot 10^6}} = 99,5.$$

Для определения действительной гибкости данной стойки находим минимальный момент инерции поперечного сечения

$$J_{\min} = \frac{\pi}{64}(d_1^4 - d_2^4) = \frac{3,14}{64}(0,04^4 - 0,03^4) = 8,586 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Площадь сечения

$$A = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2) = \frac{3,14}{4}(0,04^2 - 0,03^2) = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Минимальный радиус инерции

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{8,586 \cdot 10^{-8}}{5,5 \cdot 10^{-4}}} = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Тогда гибкость стойки при $\mu = 0,5$

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} = \frac{0,5 \cdot 1}{1,25 \cdot 10^{-2}} = 40.$$

Сравнивая полученные значения гибкостей, приходим к выводу, что расчет с помощью формулы Эйлера в данном случае не применим, так как $\lambda < \lambda_{кр}$.

Расчет производим с помощью коэффициента φ . Для данной стальной стойки при $\lambda = 40$ коэффициент $\varphi = 0,92$.

Найдем допускаемое напряжение на устойчивость

$$\sigma_{adm}^y = \varphi \sigma_{adm} = 0,92 \cdot 120 = 110,4 \text{ МПа},$$

а допускаемая нагрузка на устойчивость

$$F_{adm}^y = \sigma_{adm}^y A = 110,4 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4} = 60,72 \cdot 10^3 \text{ Н} = 60,72 \text{ кН}.$$

Критическая нагрузка

$$F_{cr} = K_y F_{adm}^y = 2 \cdot 60,72 = 121,44 \text{ кН}.$$

Пример 7.2.

Подобрать двутавровое сечение стойки с одним заземленным, а другим свободным концом. Осевая сжимающая сила $F = 400$ кН, длина стойки $l = 1,5$ м. Основное допускаемое напряжение на сжатие $\sigma_{adm} = 160$ МПа.

Решение.

Решаем задачу методом последовательных приближений. Примем для первого приближения коэффициент $\varphi_1 = 0,5$. В этом случае необходимая площадь поперечного сечения стойки:

$$A_1 \geq \frac{F}{\varphi_1 \sigma_{adm}} = \frac{400 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 160 \cdot 10^6} = 50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

По сортаменту выбираем двутавр № 33 (см. табл. П. 1) с площадью $A_2 = 53,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и минимальным радиусом инерции $i_{min_1} = 2,79 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Соответствующая гибкость стойки при коэффициенте $\mu = 2$

$$\lambda_1 = \frac{\mu l}{i_{min_1}} = \frac{2 \cdot 1,5}{2,79 \cdot 10^{-2}} = 107.$$

С помощью линейной интерполяции находим коэффициент φ_2 между его значениями по табл. 7.1 при $\lambda = 100$ и при $\lambda = 110$. При $\lambda = 100$, $\varphi = 0,60$; при $\lambda = 110$, $\varphi = 0,52$, следовательно, $\Delta\lambda = 10$, $\Delta\varphi = 0,08$:

$$\varphi_2 = \varphi_{\lambda=100} - \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} [(\lambda=107) - (\lambda=100)] = 0,544.$$

Следовательно, при $\lambda = 107$ коэффициент $\varphi_2 = 0,544$.

Проводим проверку по условию

$$F_{расч_1} = \varphi_2 A_2 \sigma_{adm} = F \pm 5 \%,$$

в нашем случае $F_{расч_1} = 0,544 \cdot 53,8 \cdot 10^{-4} \cdot 160 \cdot 10^6 = 468270 \text{ Н} = 468,27 \text{ кН} > F$.

Находим величину расхождения между заданной и расчетной нагрузками

$$\delta = \frac{468,27 - 400}{400} 100 = 17 \% > 5 \%.$$

Делаем новый расчет (приближение)

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = \frac{0,5 + 0,544}{2} = 0,522.$$

Необходимая площадь поперечного сечения

$$A_3 = \frac{F}{\varphi_3 \sigma_{adm}} = \frac{400 \cdot 10^3}{0,522 \cdot 160 \cdot 10^6} = 48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

По сортаменту проката найденной площади соответствует двутавр № 30а (см. табл. П. 1) площадью сечения $A_4 = 49,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и $i_{\min_2} = 2,95 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Тогда гибкость

$$\lambda_2 = \frac{\mu l}{i_{\min_2}} = \frac{2 \cdot 1,5}{2,95 \cdot 10^{-2}} = 101,7 \approx 102.$$

После интерполяции получаем

$$\varphi_4 = 0,6 - \frac{0,08}{10}(102 - 100) = 0,584.$$

Проводим проверку

$$F_{\text{расч}_2} = 0,584 \cdot 49,9 \cdot 10^{-4} \cdot 160 \cdot 10^6 = 466265 \text{ Н} = 466,265 \text{ кН} > F.$$

Величина расхождения между заданной и расчетной нагрузками составляет:

$$\delta = \frac{466,265 - 400}{400} 100 = 16,6 \% > 5 \%.$$

Проверяем двутавр № 30 площадью сечения $A_5 = 46,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $i_{\min_3} = 2,69 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

$$\text{Гибкость } \lambda_3 = \frac{2 \cdot 1,5}{2,69 \cdot 10^{-2}} \approx 112.$$

Коэффициент φ_5 находим линейной интерполяцией между значениями $\lambda = 110$ и $\lambda = 120$. Получим $\varphi_5 = 0,506$.

Проверка

$$F_{\text{расч}_3} = \varphi_5 A_5 \sigma_{adm} = 0,506 \cdot 46,5 \cdot 10^{-4} \cdot 160 \cdot 10^6 = 376500 \text{ Н} = 376,5 \text{ кН}.$$

Величина расхождения между заданной и расчетной нагрузками составляет

$$\delta = \frac{400 - 376,5}{400} 100 = 5,87 \% > 5 \%.$$

Следовательно, из трех рассмотренных номеров двутавров к практическому применению необходимо принять двутавр № 30а с площадью поперечного сечения $A = 49,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, так как нагрузка, которую воспринимает двутавр № 30 меньше заданной нагрузки более чем 5 %.

7.1. Задания для расчета стержней на устойчивость

Подобрать поперечное сечение заданного профиля гибкого стержня при действии осевой сжимающей силы. Решение выполнить методом последовательных приближений с помощью коэффициентов φ . Допускаемые напряжения для материалов стержней на сжатие принять: для стали $\sigma_{adm} = 160 \text{ МПа}$; для чугуна $\sigma_{adm} = 130 \text{ МПа}$; для дерева $\sigma_{adm} = 10 \text{ МПа}$.

Данные для расчетов взять из рис. 7.1, табл. 7.2 и П. 1.

Примечания:

1. Для сечения прямоугольного профиля принять соотношение между размерами как $b:h = 1:2$.
2. Для кольцеобразного сечения принять соотношение между внутренним и наружным диаметрами как $d/D = 0,85$.

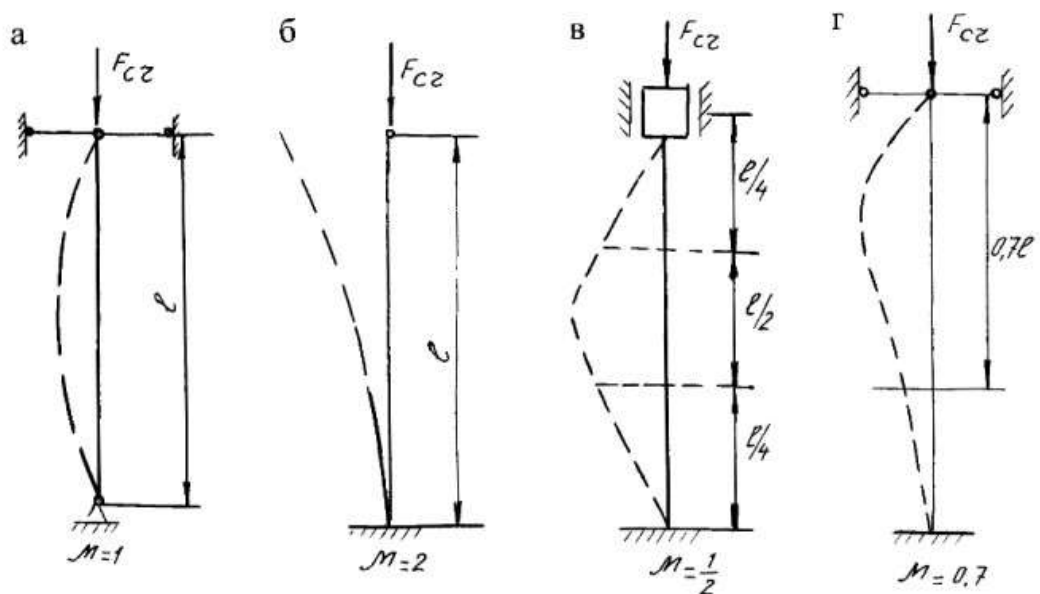
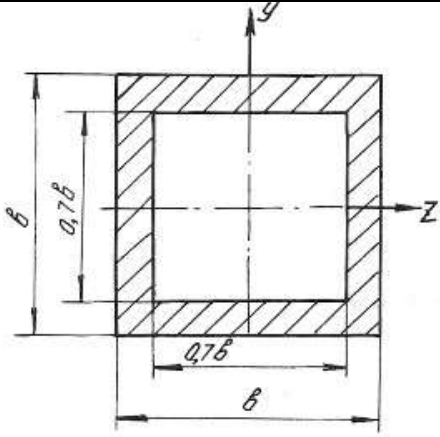
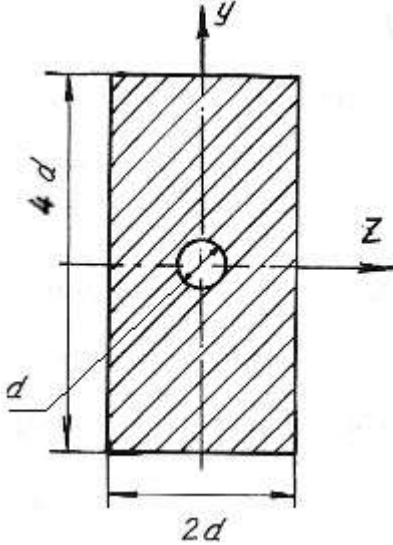
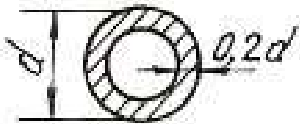
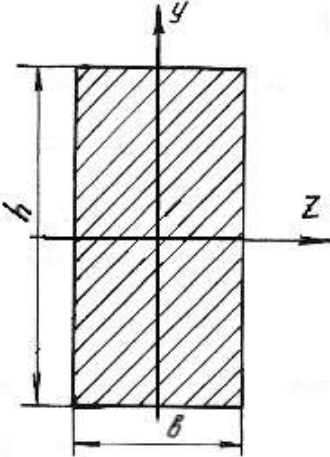
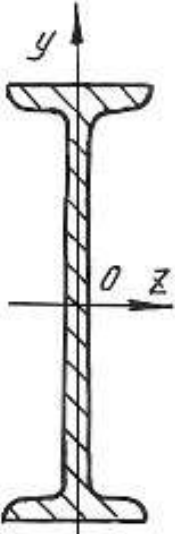
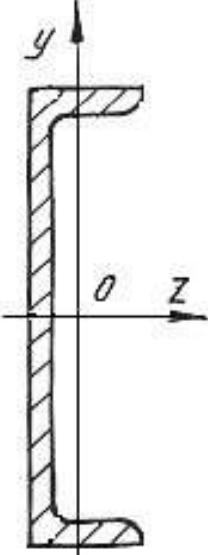


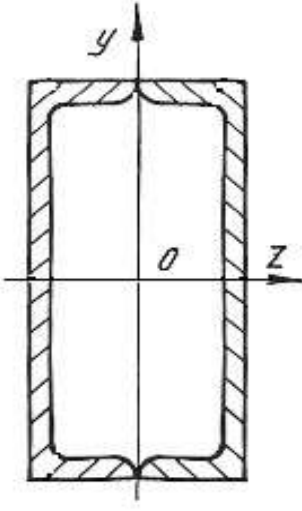
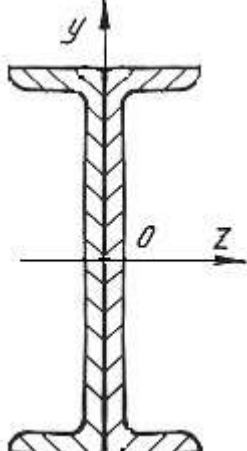
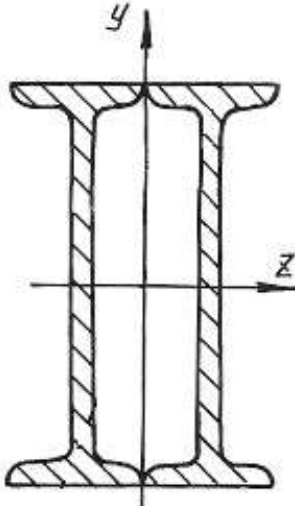
Рис. 7.1.

Таблица 7.2

Номер варианта	Схема поперечного сечения	Материал	Способ закрепления	Длина стержня, м	Сжимающая нагрузка, кН
1		Дерево	а б в г	3 4 4 1,6	90 120 150 60
2		Дерево	а б в г	3,6 5 5 2	140 250 400 180
3		Чугун	а б в г	5,2 4,8 4,5 2,8	600 800 900 700

Продолжение табл. 7.2

Номер варианта	Схема поперечного сечения	Материал	Способ закрепления	Длина стержня, м	Сжимающая нагрузка, кН
4		Чугун	а б в г	4,6 3,8 4,2 3,2	850 600 700 900
5		Сталь 5	а б в г	3,2 3,6 8 2,4	380 700 800 600
6		Сталь 3	а б в г	3,6 4,5 5 2,2	280 650 450 250

Номер варианта	Схема поперечного сечения	Материал	Способ закрепления	Длина стержня, м	Сжимающая нагрузка, кН
7		Сталь 3	а б в г	3 4 5,5 4,8	300 400 250 350
8		Сталь 3	а б в г	5,5 6,6 7 3,5	960 500 800 750
9		Сталь 3	а б в г	3 7 6 4	930 740 830 980



**Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»**

ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

**Практикум по динамике подземных вод
для студентов специализации
«Технология и техника разведки
метасорождений полезных ископаемых»
специальность 21.05.03
– «Технология геологической разведки»**

**Екатеринбург
2018**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»
МИНОБРНАУКИ

ОДОБРЕНО

Методической комиссией

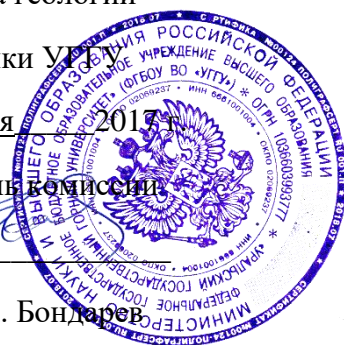
факультета геологии

и геофизики УГГУ

13 апреля 2017 г.

Председатель комиссии

проф. В. И. Бондарев



ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Практикум по динамике подземных вод для студентов
специализации «Технология и техника разведки МПИ»
специальность 21.05.03 – «Технология геологической разведки»

О 62

Р е ц е н з е н т – Савинцев И. А., к. г. м. н., доцент кафедры ГИГГ
УГГУ

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры ГИГГ 22 июня 2016 г. (протокол № 58) и рекомендованы к изданию в УГГУ.

В практикуме изложена программа по проведению опытно-фильтрационных работ (ОФР) и содержание учебных задач. Достаточно подробно представлены основные исходные теоретические и методические положения, которые необходимы для осознанного выполнения задач. В пособии изложены необходимые рекомендации по выполнению основных видов ОФР, уделено значительное внимание чисто практическим аспектам выполнения всех видов работ.

© Тагильцев С. Н., Кибанова Т. Н.,
Тагильцев В. С., Рубцова А. Е., 2018
© Уральский государственный
горный университет, 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ	6
<i>1.1. Основные понятия</i>	<i>6</i>
<i>1.2. Методика проведения опытно-фильтрационных работ</i>	<i>9</i>
1.2.1. Выполнение экспресс-налива	10
1.2.2. Кустовые откачки.....	10
2. СХЕМАТИЗАЦИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ	12
<i>2.1. Особенности интерпретации данных фильтрационных исследований</i>	<i>12</i>
<i>2.2. Схематизация гидрогеологических условий</i>	<i>13</i>
2.2.1. Схематизация режима фильтрации	13
2.2.2. Схематизация структуры и формы потока	15
2.2.3. Схематизация гидравлического состояния потока.....	16
2.2.4. Схематизация основных источников питания пласта.....	19
2.2.5. Схематизация фильтрационной неоднородности.....	20
2.2.6. Схематизация граничных условий	20
2.2.7. Вывод по схематизации.....	21
3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ	22
<i>3.1. Откачки в безграничных пластах</i>	<i>22</i>
<i>3.2. Метод эталонной кривой</i>	<i>23</i>
<i>3.3. Откачки в двухслойных пластах</i>	<i>25</i>
<i>3.4. Обработка данных восстановления уровней</i>	<i>28</i>
<i>3.5. Особенности интерпретации данных одиночных опробований</i>	<i>33</i>
<i>3.6. Влияние емкости ствола скважин на результаты опробования</i>	<i>36</i>
4. УЧЕБНЫЕ ЗАДАЧИ	40
<i>4.1. Обработка опытной откачки в палеогеновом водоносном горизонте (изотропный пласт)</i>	<i>40</i>

<i>4.2. Обработка опытной откачки в палеогеновом водоносном горизонте (анизотропный пласт)</i>	<i>41</i>
<i>4.3. Обработка опытной откачки в хазарском водоносном горизонте</i>	<i>43</i>
<i>4.4. Наливы и откачки с постоянным дебитом в одиночных скважинах</i>	
<i>Налив с постоянным дебитом в скважину 2а</i>	<i>45</i>
5. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ УЧЕБНОЙ ЗАДАЧИ	47
ЛИТЕРАТУРА	50

ВВЕДЕНИЕ

Опытно-фильтрационные работы (ОФР) являются важнейшим видом исследований, проводимых при решении различных гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических задач. Умение правильно ставить, проводить и интерпретировать результаты ОФР в значительной степени определяет уровень квалификации инженера-гидрогеолога, так как эти работы составляют основу гидрогеологической специализации.

В динамике подземных вод непрерывно происходят значительные изменения, которые определяются актуальными гидрогеологическими задачами, возникающими при решении вопросов мелиоративной гидрогеологии, водоснабжения, разработки месторождений полезных ископаемых, загрязнения подземных вод и ряда других направлений. При этом усиливается роль гидродинамического изучения и прогноза все более тонких и сложных гидрогеологических процессов.

Гидродинамические методы развиваются в основном по пути все большего отражения природной (геологической и гидрогеологической) обстановки, учета физико-химических процессов, широкого привлечения аппарата математической физики с использованием математического моделирования как инструмента для решения конкретных задач. Эти преобразования должны, естественно, найти свое отражение в учебных программах и пособиях по курсу «Динамика подземных вод».

В пособии изложены необходимые рекомендации по основным видам учебных ОФР, уделено значительное внимание чисто практическим аспектам выполнения тех или иных видов работ: ведению документации, методике проведения опытов, первичной интерпретации полученных результатов.

1. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

1.1. Основные понятия

Опытно-фильтрационные работы проводятся для решения следующих задач:

1. Определение гидрогеологических параметров водоносных горизонтов - коэффициентов фильтрации, водопроницаемости, пьезо- и уровнепроницаемости, водоотдачи, перетекания, сопротивления подрусловых отложений, действующих гидродинамических радиусов опытных скважин.
2. Изучение характера взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а также взаимодействие водоносных горизонтов между собой.
3. Получение зависимости между дебитом скважины и понижением уровня в ней (при установившемся режиме откачки).
4. Оценка характера связи уровня воды в скважине и в водоносном пласте (оценка инерционности пьезометров – наблюдательных скважин).

Опытно-фильтрационные работы нередко определяют как фильтрационные опробования [3]. Фильтрационные опробования выполняются откачками из скважин, а также наливками и нагнетаниями в скважины. Нагнетание отличается от налива тем, что при нагнетании над устьем скважины создаётся дополнительный напор с помощью специальных технических средств.

Фильтрационные опробования скважин подразделяют на одиночные и кустовые. Одиночное опробование характеризуется тем, что фильтрационный опыт (откачка, налив, нагнетание) производится в отдельной (одиночной) скважине. В этой же скважине выполняются наблюдения за изменениями (возмущениями) уровня подземных вод в ходе фильтрационного опыта. При кустовых откачках (наливах), кроме опытной (центральной) скважины, наблюдения за изменениями уровня подземных вод производятся в других

(наблюдательных) скважинах [1]. Количество наблюдательных скважин может быть любым.

Принято считать, что с помощью одиночных откачек можно получить лишь самые общие сведения о гидрогеологических параметрах водоносных горизонтов, а кустовые откачки дают возможность решать значительно больший круг задач и с более высокой степенью точности. Эти представления являются не совсем верными. Тщательное проведение и квалифицированная интерпретация данных одиночных опробований позволяют получить почти полный набор гидрогеологических параметров водоносного пласта. Кроме того, данные кустовых откачек не позволяют достоверно оценить фильтрационную неоднородность водоносного горизонта. Поэтому правильнее считать, что одиночные и кустовые опробования очень часто решают самостоятельные задачи и во многих случаях должны применяться в комплексе.

При производстве фильтрационных опробований следует ориентироваться на режим постоянного (заданного) дебита. Объясняется это тем, что при режиме постоянного дебита упрощается методика интерпретации откачек и повышается надежность определения гидрогеологических параметров.

При выборе дебита откачки следует исходить из возможностей имеющегося водоподъемного оборудования и фильтрационных свойств водоносного горизонта. Необходимо стремиться к тому, чтобы понижение в дальней скважине куста составляло не менее 0,2 м, т. е. на порядок превышало уровень погрешности измерительных средств (уровнемеров, хлопушек). Очень важно, чтобы наблюдаемые возмущения уровней при фильтрационных опытах всегда существенно превышали значения колебаний уровня подземных вод за счет естественных или техногенных факторов [2].

Основные буквенные обозначения и понятия, которые применяются при проведении ОФР (рис. 1.1), можно условно разделить на четыре группы:

1. Абсолютные отметки точек и уровней, обозначаются «АО».

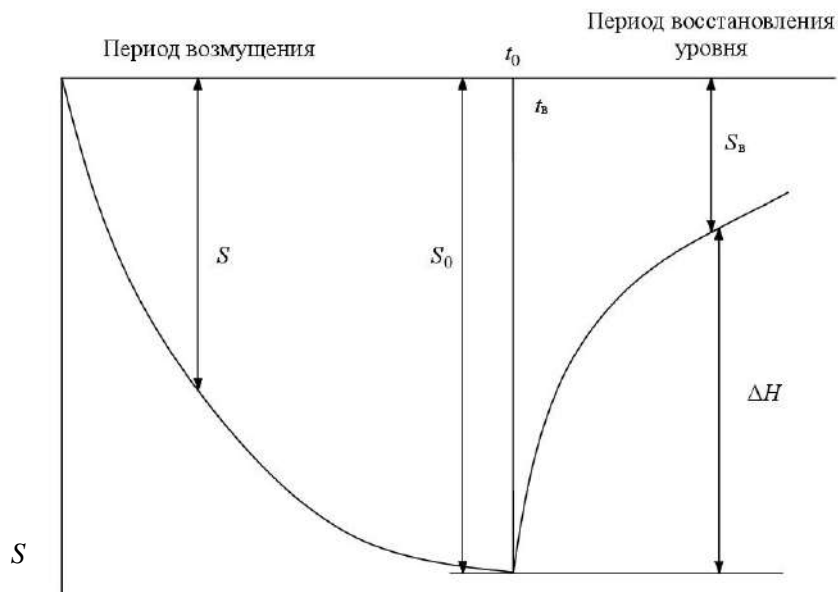
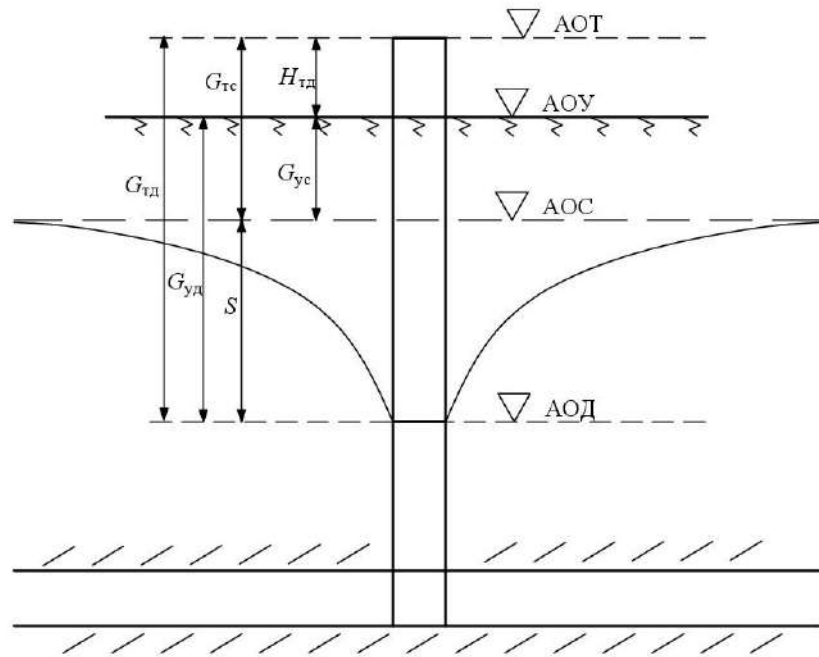


Рис. 1.1. Основные обозначения показателей положения и динамики уровней при опробовании скважин: АОТ, АОУ, АОС, АОД – абсолютные отметки края трубы, устья скважины, статического уровня подземных вод, динамического уровня подземных вод соответственно; $G_{тс}$, $G_{ус}$, $G_{уд}$, $G_{тд}$ – глубины от края трубы до статического уровня воды, от устья скважины до статического уровня воды, от устья скважины до динамического уровня воды, от края трубы до динамического уровня воды; $H_{т}$ – высота обсадной трубы над уровнем земли (над устьем); S , S_0 , $S_в$ – понижение (возмущение) текущее, максимальное на конец возмущения, в период восстановления уровня; t_0 – продолжительность опыта (возмущения); $t_в$ – текущие время от начала восстановления уровня; ΔH – восстановление уровня.

2. Возмущения уровня - разница между статическим и динамическим уровнями при выполнении опробований, обозначается « S ».
3. Высоты и напоры отсчитываются вверх, обозначаются « H ».
4. Глубины отсчитываются вниз, обозначаются « G ».

Продолжительность откачки в общем случае не может быть строго определена. Для обоснования выбора момента прекращения откачек следует использовать «индикаторные» графики зависимости возмущения уровня (S) от логарифма времени проведения опытов ($\lg t$), которые должны строиться непосредственно в процессе проведения опыта.

1.2. Методика проведения опытно-фильтрационных работ

Проведение опытов включает в себя ряд подготовительных операций и собственно сам эксперимент. В период подготовки необходимо подготовить журнал наблюдений, составить схему расположения скважины (скважин), подготовить измерительные средства, измерить положение естественного уровня подземных вод по каждой скважине и заполнить соответствующую таблицу, ознакомиться с устройством для проведения откачки или налива, включая порядок включения и выключения устройства.

Для каждой задачи специально оговариваются элементы техники безопасности в данной ситуации. При проведении кустовой откачки четко оговаривается время начала и конца опыта, специальные сигналы (звуковые, визуальные), которые позволяют точно фиксировать необходимые моменты опыта.

В связи с логарифмическим характером графиков, с помощью которых производится обработка данных, частота измерений регулируется логарифмическим масштабом. Рекомендуемые моменты времени приведены в специальной таблице (табл. 1.1). Если наблюдатель по каким-то причинам не может придерживаться рекомендуемых значений времени, следует стараться

измерять уровни через 10 секунд в первую минуту, через 1 минуту - первые 10 минут и через 2-5 минут - первые полчаса откачки.

Таблица 1.1

Рекомендуемые моменты времени для наблюдений уровней в скважинах при откачках

t , мин	1,0	1,26 (~1'15')	1,59 (~1'40')	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0
$\lg t$	0	0,1	0,2	0,301	0,398	0,477	0,602	0,699	0,778	0,903
t , мин	10	12,5	16	20	25	30	40	50	60	80
$\lg t$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
t , мин	100	120 (2 ч)	160 (2ч40мин)	300 (3ч20мин)	240* (4 ч)	300 (5 ч)	400 (6ч40мин)	500 (8ч20мин)	600 (10 ч)	800 (13ч20мин)
$\lg t$	2,0	2,08	2,2	2,3	2,38	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9

* В первую минуту откачки следует стараться измерять уровень через 10 секунд, после 4-5 часов откачки -- через 1-2 часа.

1.2.1. Выполнение экспресс-налива

После проведения предварительных измерений в скважину выливается определенный объем воды (10-30 литров). Следует стараться выполнить налив за короткое время. Момент начала опыта отсчитывается от момента середины процесса налива. Длительность проведения опыта лимитируется подъемом уровня воды в скважине до устья. Обычная продолжительность опыта составляет 30 минут.

Измерение дебита выполняется перед началом опыта, через каждые 5 минут - в процессе выполнения налива и в конце опыта. Окончание периода возмущения уровня определяется прекращением подачи воды в скважину. Сразу после окончания налива начинаются измерения динамического уровня. Эти измерения продолжаются до полного восстановления уровня (до статического положения).

1.2.2. Кустовые откачки

При кустовой откачке идет откачка воды из центральной скважины и наблюдение за уровнем в наблюдательных скважинах. До начала откачки

измеряется уровень подземных вод в наблюдательных скважинах. Перед началом откачки оговариваются сигналы, точное время начала и окончания откачки. Выполняется подготовка насоса и приведение его в рабочее состояние. Вода из насоса поступает в емкости известного объема (ведра). Расход рассчитывается по общему объему выкачанной воды и продолжительности откачки. В процессе проведения откачки следует поддерживать примерно постоянный дебит. Уровень подземных вод измеряется в процессе откачки и при восстановлении уровня.

Обычная продолжительность откачки составляет 1 сутки. Примерно такой же период времени занимает восстановление уровня.

2. СХЕМАТИЗАЦИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

2.1. Особенности интерпретации данных фильтрационных исследований

Районы работ обычно имеют сложное гидрогеологическое строение, затрудняющее обоснование однозначной гидрогеологической схемы для участков проведения фильтрационных опробований. Геологическая неоднородность в плане и разрезе определяет существенную изменчивость фильтрационных показателей. Разнообразный литологический состав пород, широкое развитие тектонических нарушений, практически повсеместное распространение глинистой коры выветривания, наличие естественных и технических водоемов осложняет диагностику граничных условий опробуемых горизонтов.

Относительно низкие фильтрационные показатели определяют ряд специфических особенностей проведения и обработки ОФР. Большое влияние на индикаторные графики оказывает также осушение стволов скважины (влияние емкости скважины). Данное явление может существенно осложнять интерпретацию временных графиков. Применение скважин большого диаметра значительно увеличивает временной диапазон действия этого фактора. В сложных гидрогеологических условиях становится проблематичной полная идентичность данных понижения и восстановления уровней.

Таким образом, можно указать ряд факторов, осложняющих интерпретацию данных фильтрационных опробований и требующих специального анализа:

1. Сложные и неодинаковые гидродинамические схемы для различных фильтрационных опытов.
2. Сложная форма графиков временного прослеживания.
3. Влияние осушения ствола скважины (влияние ёмкости скважины).

В рассматриваемых условиях значительно повышаются требования к уровню интерпретации данных одиночных и кустовых опробований. При этом

следует помнить, что надежность интерпретации данных ОФР определяется тщательной гидродинамической схематизацией гидрогеологических условий.

Таким образом, прежде чем обрабатывать данные фильтрационных опытов, необходимо выполнить анализ гидрогеологических условий с целью обоснования наиболее вероятных гидродинамических схем.

2.2. Схематизация гидрогеологических условий

Схематизация ведется поэтапно и основывается на неразрывном сочетании качественного анализа гидрогеологических условий и количественных результатов фильтрационных исследований. Схематизация проводится в определенной последовательности. На первом этапе схематизации количественные результаты откачек используются в минимальном объеме, оцениваются режим фильтрации, структура и форма потока, гидравлическое состояние водоносного горизонта. Далее рассматривается фильтрационная неоднородность, источники питания и граничные условия.

2.2.1. Схематизация режима фильтрации

Первоначальный этап при проведении фильтрационных опробований всегда является нестационарным. При обработке данных ОФР с помощью графиков в координатах $S \div \lg t$ четко выявляется изменение S во времени. В центральных скважинах практически мгновенно устанавливается квазистационарный режим, для которого характерна прямолинейная форма графиков (рис. 2.1). Опыт обработки данных по наблюдательным скважинам показывает, что продолжительность нестационарного этапа варьирует в очень широких пределах (от 10 минут до нескольких суток).

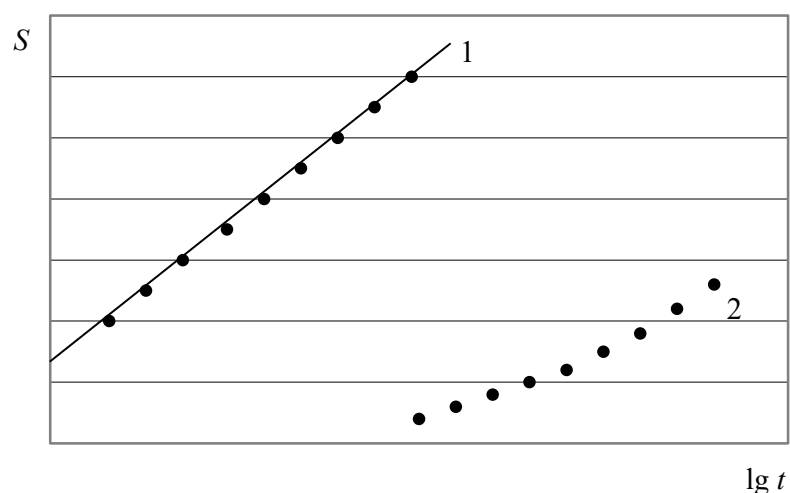


Рис. 2.1. Нестационарный режим при проведении ОФР: 1 – квазистационарный режим (линейная зависимость); 2 – неквазистационарный режим

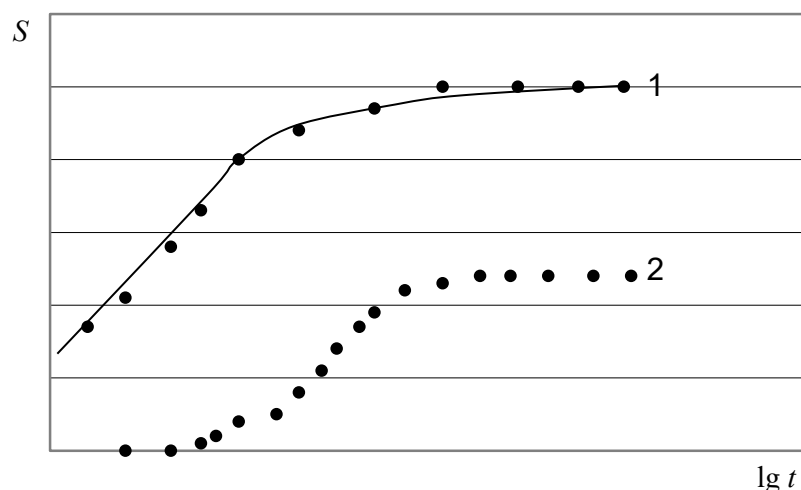


Рис. 2.2. Стабилизация уровней при проведении ОФР: 1 – стационарный режим в центральной скважине; 2 – стационарный режим в наблюдательной скважине

Очень часто наблюдается ложная или истинная стабилизация уровней (рис. 2.2). Стабилизация имеет различную продолжительность. При кратковременных откачках не всегда удается надежно отличить истинную стабилизацию от ложной. Иногда наблюдается несколько (до трех) этапов стабилизации.

2.2.2. Схематизация структуры и формы потока

В водоносном горизонте региональной трещиноватости поток при проведении фильтрационных опробований имеет обычно плано-радиальный характер, но очень часто депрессионная воронка отличается от формы окружности. Это показывает, что плано-радиальный характер потока осложняется плановой фильтрационной неоднородностью различного происхождения.

Сложное строение водоносный горизонт имеет по вертикали. Различные данные показывают, что относительно однородное строение трещинной среды встречается редко. Обычно в разрезе палеозойских пород наблюдается несколько водоносных горизонтов (слоёв), которые связаны с субгоризонтальными зонами повышенной трещиноватости. Хорошая взаимосвязь водоносных трещинных систем наблюдается только в верхней части палеозойских пород до глубины нескольких десятков метров. В целом следует отметить, что фильтрационная вертикальная зональность и структура потока требует специального рассмотрения [4,7,8].

Практически повсеместно на палеозойских трещиноватых породах залегают глинистые покровные образования. Мощность глинистой коры выветривания варьирует по площади и составляет обычно 5 - 15 м. Очень важно отметить, что уровень подземных вод в ненарушенных и слабонарушенных условиях обычно располагается в верхнем (глинистом) слое.

Таким образом, в рассматриваемых условиях наблюдается двухслойное строение, наиболее характерное для большинства комплексов грунтовых вод. Верхняя часть комплекса представлена относительно слабопроницаемыми (покровными) отложениями. В этом случае можно использовать упрощенные представления о структуре потока, основанные на предпосылке перетекания. Основная суть этой предпосылки сводится к представлениям о

горизонтальном движении подземных вод в нижнем трещиноватом горизонте и вертикальной фильтрации в верхнем покровном слое.

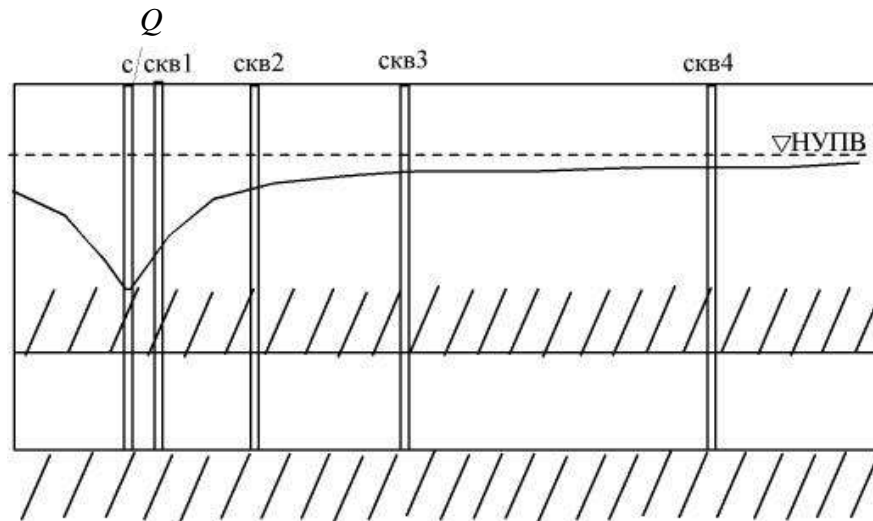
2.2.3. Схематизация гидравлического состояния потока

Рассматриваемые условия обычно классифицируются как безнапорный поток, но двухслойное строение пласта накладывает определенные особенности. Свободная поверхность подземных вод находится в слабопроницаемом слое, перекрывающем трещинный водоносный горизонт. При откачке гравитационная водоотдача со свободной поверхности начинается после сработки некоторой части упругих или емкостных запасов трещинного горизонта. Поэтому трещинный горизонт в естественных условиях нередко обладает определенными свойствами напорного пласта (рис. 2.3).

Для откачки в двухслойном пласте характерны три этапа снижения уровня (рис. 2.4). Этап I связан со сработкой упругих запасов водоносного горизонта. Трещинный горизонт на этом этапе работает как изолированный напорный пласт. Этап II - ложностационарного режима - связан с развитием гравитационной водоотдачи со свободной поверхности. Возникший на первом этапе перепад напоров между слоями приводит к нисходящей, практически вертикальной, фильтрации воды из верхнего слоя в нижний. Этот процесс сопровождается подключением нового источника питания - гравитационной водоотдачи покровного слоя. Ложная стабилизация продолжается до тех пор, пока происходит прирост водоотдачи.

Этап III представляет собой этап преимущественно гравитационного режима водоотдачи. На этом этапе двухслойный пласт работает как единый горизонт с суммарной (упругой и гравитационной) водоотдачей и водопроницаемостью, близкой по величине к водопроницаемости нижнего слоя.

а



б

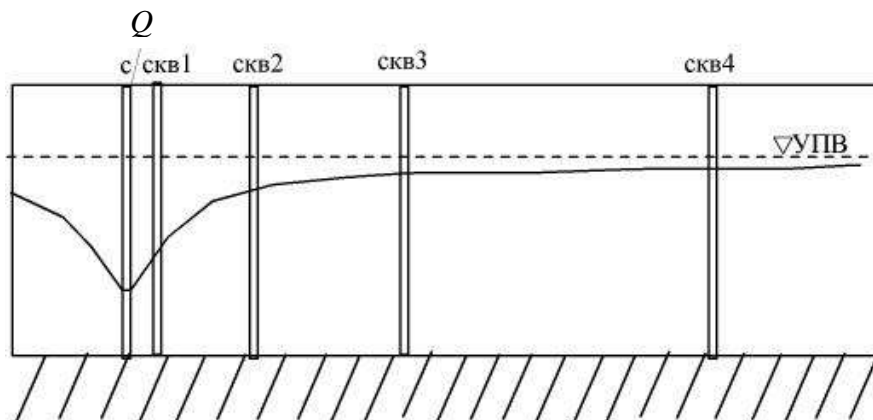


Рис. 2.3. Схемы безграничных пластов: а - напорного,
б - безнапорного

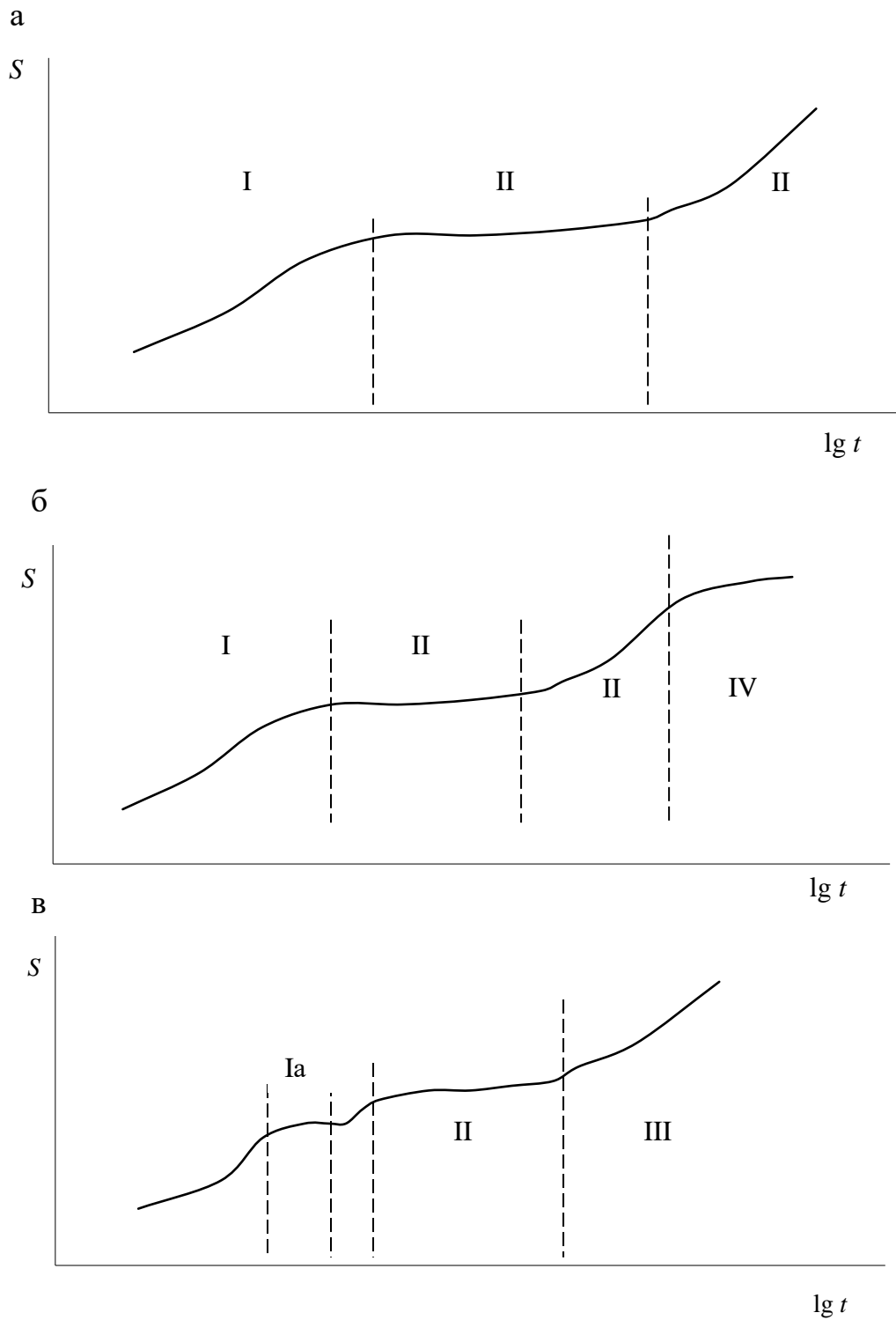


Рис. 2.4. Временные графики в двухслойных пластах

а - безграничный пласт: I - этап упругой водоотдачи, II - этап ложной стабилизации, III - этап гравитационной водоотдачи; б - влияние границы третьего рода: IV - этап стабилизации; в - влияние двойной пористости: Ia - этап ложной стабилизации

2.2.4. Схематизация основных источников питания пласта

Емкостные запасы водоносного горизонта сформировались главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков. Если в зоне влияния откачки отсутствуют дополнительные источники питания, то в процессе фильтрационного опыта идет сработка гравитационных запасов и наблюдается снижение уровня подземных вод.

На рассматриваемой территории расположен ряд естественных и искусственных водоемов, которые, как правило, отделены от трещинного горизонта слабопроницаемым слоем. В зависимости от фильтрационных свойств верхнего слоя может наблюдаться два случая. Если верхний слой на участке развития депрессии является практически водоупорным, то водоем не будет работать как источник питания для конкретной откачки. В противном случае при установлении тесной гидравлической связи между водоемом и водоносным горизонтом наступит окончательная стабилизация уровней при откачке. На временном графике появится характерный IV этап (стационарного режима).

При существенных размерах депрессионной воронки стабилизация уровней при откачке может наступить за счёт площадного питания. Если есть возможность для оценки площади депрессии, то можно рассчитать модуль площадного питания (M_{Π}):

$$M_{\Pi} = Q/\omega, \quad (2.1)$$

где Q – дебит откачки; ω - площадь депрессионной воронки.

Расчётная величина модуля площадного питания позволяет оценивать реальные причины, определяющие стабилизацию уровней при откачке. При отсутствии источников питания модуль имеет значения, близкие к величинам модуля подземного стока (1,5 – 3,5 л/с·км²). В техногенных условиях, при дополнительном питании, указанные значения могут возрасти в 2-3 раза. В случае наличия питающих границ расчётный модуль площадного питания может иметь значения, составляющие десятки л/с·км².

2.2.5. Схематизация фильтрационной неоднородности

Временные закономерности изменения уровня, даже в условиях существенной неоднородности, сохраняются обычно функциональными. Это значит, что элементы неоднородности не получают отражения в форме временных графиков. Плановая неоднородность обычно проявляется в форме депрессионной воронки и в значениях некоторых гидродинамических параметров. Значения параметра водопроницаемости, при правильной интерпретации данных кустовых откачек, сохраняют одинаковые значения для всех наблюдательных скважин.

Кроме крупных элементов плановой неоднородности при опробовании трещинных сред нередко проявляется действие относительно небольших элементов неоднородности, которое получило название «двойной пористости». В трещинной среде проявление эффекта «двойной пористости» чаще всего связано с наличием трещин с разным раскрытием (относительно большим и малым раскрытием). «Двойная пористость» проявляется в виде кратковременного участка ложной стабилизации на временном графике, на начальном этапе откачки (см. рис. 2.4, в). В связи с кратковременностью этого эффекта, участок временного графика, связанный с ним, фиксируется не всегда.

2.2.6. Схематизация граничных условий

В качестве питающих границ трещинного водоносного горизонта могут выступать поверхностные водоемы. В связи с наличием покровных глинистых отложений заранее не известно, какое влияние будут оказывать водоемы на ОФР. На основании геологического строения следует предполагать, что в некоторых случаях на результаты откачек могут оказывать влияние непроницаемые границы (тектонические нарушения с глинистым заполнителем, литологические границы). Диагностику граничных условий

следует проводить путем совместного анализа геологического строения и результатов опытных работ.

2.2.7. Вывод по схематизации

На основании рассмотренных позиций схематизации можно сделать заключение, что в начальный период проведения опытных работ должна проявляться схема безнапорного или напорного пласта двухслойного строения. В этот период пласт следует рассматривать как квазиоднородный и безграничный в плане. Граничные условия могут проявиться в виде изменений формы временного графика при проведении относительно продолжительных откачек. Стабилизация уровня в скважинах, вскрывших трещинный водоносный горизонт, носит, как правило, ложный характер и связана с проявлением эффекта «двойной пористости» и (или) развитием перетекания из горизонта покровных образований.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

3.1. Откачки в безграничных пластах

Развитие депрессионной воронки в безграничном пласте описывается уравнением Тэйса. Форма временных графиков имеет вид, показанный на рис.

2.1. При наступлении квазистационарного режима уравнение Тэйса упрощается. Эта зависимость обычно называется уравнением Джейкоба:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2}, \quad (3.1)$$

где S – понижение (возмущение) уровня в скважине;

Q – расход воды;

T – водопроницаемость;

a – коэффициент уровне- или пьезопроводности;

t – время от начала опыта;

r – расстояние от оси центральной скважины до точки, где измеряется понижение (расстояние до наблюдательной скважины).

При переходе от натуральных к десятичным логарифмам зависимость Джейкоба приобретает вид:

$$S = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25at}{r^2}. \quad (3.2)$$

Последнюю зависимость можно представить в форме прямой (рис. 3.1):

$$S = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25a}{r^2} + 0,183 \frac{Q}{T} \lg t \quad (3.3)$$

$$S = A + C_p \lg t; \quad (3.4)$$

$$A = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25a}{r^2}; \quad (3.5)$$

$$C_p = 0,183 \frac{Q}{T}. \quad (3.6)$$

Основные фильтрационные параметры (T и a) рассчитываются на основании зависимостей:

$$T = 0,183 \frac{Q}{C_p}; \quad (3.7)$$

$$\lg \frac{a}{r^2} = \frac{A}{C_p} - 0,35; \quad (3.8)$$

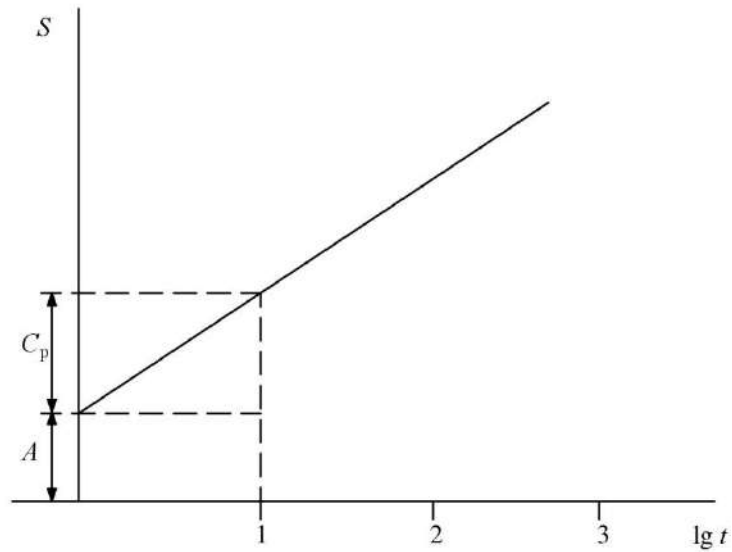


Рис. 3.1. Определение расчетных коэффициентов A и C_p

$$\lg a = \frac{A}{C_p} - 0,35 + 2 \lg r. \quad (3.9)$$

3.2. Метод эталонной кривой

Для обоснования этого способа прологарифмируем уравнение (3.10) и аргумент u :

$$S = 0,183 \frac{Q}{4\pi T} W(u), u = \frac{r^2}{4at}; \quad (3.10)$$

$$\lg S = \lg \frac{Q}{4\pi T} + \lg W; \quad (3.11)$$

$$\lg \frac{1}{u} = \lg \frac{4a}{r^2} + \lg t. \quad (3.12)$$

Если далее построить эталонную кривую по зависимости $\lg W$ от $\lg \frac{1}{u}$ (табл. 3.1) и фактическую кривую зависимости $\lg S$ от $\lg t$ для каждой наблюдательной скважины, то они при одинаковой форме будут сдвинуты по осям на величину $\lg \frac{Q}{4\pi T}$, а по осям абсцисс – на величину $\lg \frac{4a}{r^2}$ (рис. 3.2). Обработка производится графоаналитическим путем: на фактический график временного прослеживания в билогарифмических координатах накладывается

эталонная кривая (предварительно построенная на гальке) так, чтобы опытные точки оптимально совмещались с эталонной кривой. Совпадение формы эталонного и фактического графиков является диагностическим признаком расчетной схемы неограниченного однородного изолированного пласта. С совмещенных графиков считывают координаты любой точки и определяют параметры из выражений

$$\lg \frac{Q}{4\pi T} = \lg S - \lg W; \quad (3.13)$$

$$\lg \frac{4a}{r^2} = \lg \frac{1}{u} - \lg t. \quad (3.14)$$

Таблица 3.1

Значения функции $W(u)$

u	$W(u)$	u	$W(u)$	u	$W(u)$	u	$W(u)$	u	$W(u)$
0,001	6,332	0,11	1,737	0,39	0,719	0,67	0,396	0,95	0,239
0,002	5,639	0,12	1,660	0,40	0,702	0,68	0,388	0,96	0,235
0,003	5,235	0,13	1,589	0,41	0,686	0,69	0,381	0,97	0,231
0,004	4,948	0,14	1,524	0,42	0,670	0,70	0,374	0,98	0,227
0,005	4,726	0,15	1,465	0,43	0,640	0,71	0,367	0,99	0,223
0,006	4,544	0,16	1,409	0,44	0,655	0,72	0,360	1,00	0,219
0,007	4,392	0,17	1,358	0,45	0,625	0,73	0,353	1,10	0,186
0,008	4,259	0,18	1,310	0,46	0,611	0,74	0,347	1,20	0,158
0,009	4,142	0,19	1,265	0,47	0,598	0,75	0,340	1,30	0,135
0,010	4,038	0,20	1,223	0,48	0,585	0,76	0,334	1,40	0,116
0,015	3,637	0,21	1,183	0,49	0,572	0,77	0,328	1,50	0,100
0,020	3,355	0,22	1,145	0,50	0,560	0,78	0,322	1,60	0,086
0,025	3,137	0,23	1,110	0,51	0,548	0,79	0,316	1,70	0,075
0,030	2,959	0,24	1,076	0,52	0,536	0,80	0,311	1,80	0,065
0,035	2,810	0,25	1,044	0,53	0,526	0,81	0,305	1,90	0,056
0,040	2,681	0,26	1,014	0,54	0,514	0,82	0,300	2,00	0,049
0,045	2,568	0,27	0,985	0,55	0,503	0,83	0,294	2,50	0,025
0,050	2,468	0,28	0,957	0,56	0,493	0,84	0,289	3,00	0,013
0,055	2,378	0,29	0,931	0,57	0,483	0,85	0,284	3,50	0,007
0,060	2,295	0,30	0,906	0,58	0,473	0,86	0,279	4,00	0,0038
0,065	2,220	0,31	0,882	0,59	0,464	0,87	0,274	4,50	0,0021
0,070	2,151	0,32	0,858	0,60	0,454	0,88	0,269	5,00	0,0011
0,075	2,087	0,33	0,836	0,61	0,445	0,89	0,265	5,50	$6,4 \cdot 10^{-4}$
0,080	2,027	0,34	0,815	0,62	0,437	0,90	0,260	6,00	$3,6 \cdot 10^{-4}$
0,085	1,971	0,35	0,794	0,63	0,428	0,91	0,256		
0,090	1,919	0,36	0,775	0,64	0,420	0,92	0,251		
0,095	1,870	0,37	0,755	0,65	0,412	0,93	0,247		
0,100	1,823	0,38	0,737	0,66	0,404	0,94	0,243		

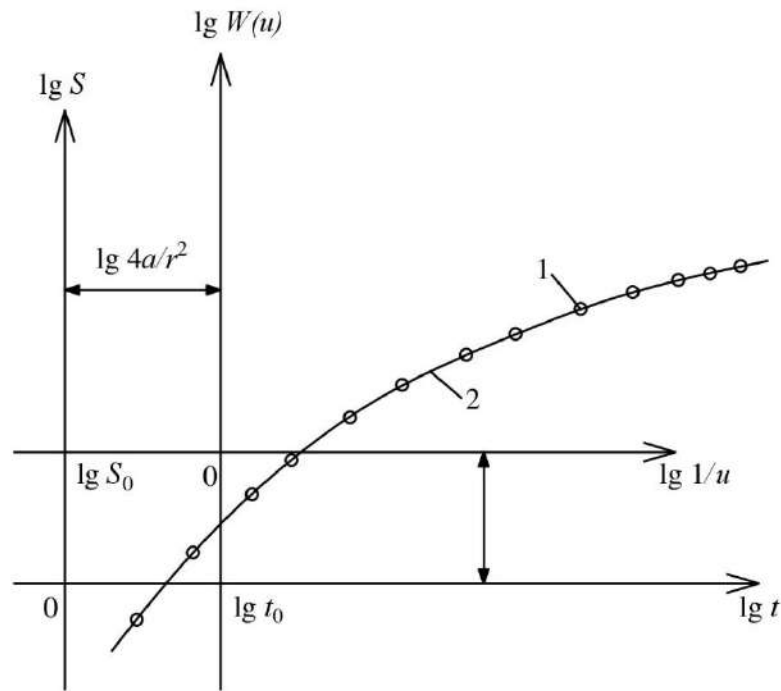


Рис. 3.2. Определение параметров способом эталонной кривой:

- 1 - опытные точки (график $\lg S \div \lg t$);
- 2 - эталонная кривая (график $\lg W(u) \div \lg 1/u$)

Удобно использовать координаты нулевой точки эталонной кривой на фактическом графике (S_0, t_0) , когда в выражениях (3.13), (3.14) $\lg W$ и $\lg \frac{1}{u}$ равны нулю, и, следовательно:

$$T = \frac{Q}{4\pi S_0}; \quad (3.15)$$

$$a = \frac{r^2}{4t_0}. \quad (3.16)$$

3.3. Откачки в двухслойных пластах

Обработка данных откачки в двухслойных пластах достаточно детально рассмотрена в специальной литературе [4, 5, 6, 8]. Чаще всего используется графоаналитический метод обработки, который заключается в интерпретации графиков понижения уровня от логарифма времени откачки ($S \div \lg t$). Менее надёжные результаты позволяет получить обработка данных по восстановлению уровней после окончания возмущения.

На графиках $S \div \lg t$ визуально определяется положение точки перегиба и снимаются значения S_{Π} и t_{Π} (см. рис. 3.2). Положение этой точки можно скорректировать исходя из условия $S_{\Pi} = 0,5 S_{ст}$ (максимальное понижение этапа ложной или окончательной стабилизации). Далее в точке перегиба проводится касательная и определяется ее уклон. Отношение между понижением (S_{Π}) и уклоном касательной в этой точке (C_{Π}) определяется соотношением

$$2,3 \frac{S_{\Pi}}{C_{\Pi}} = e^{-\frac{r}{B}} K_0 \left(\frac{r}{B} \right) = F \left(\frac{r}{B} \right), \quad (3.17)$$

где e - основание натурального логарифма;

B - параметр перетекания;

K_0 и F - специальные функции.

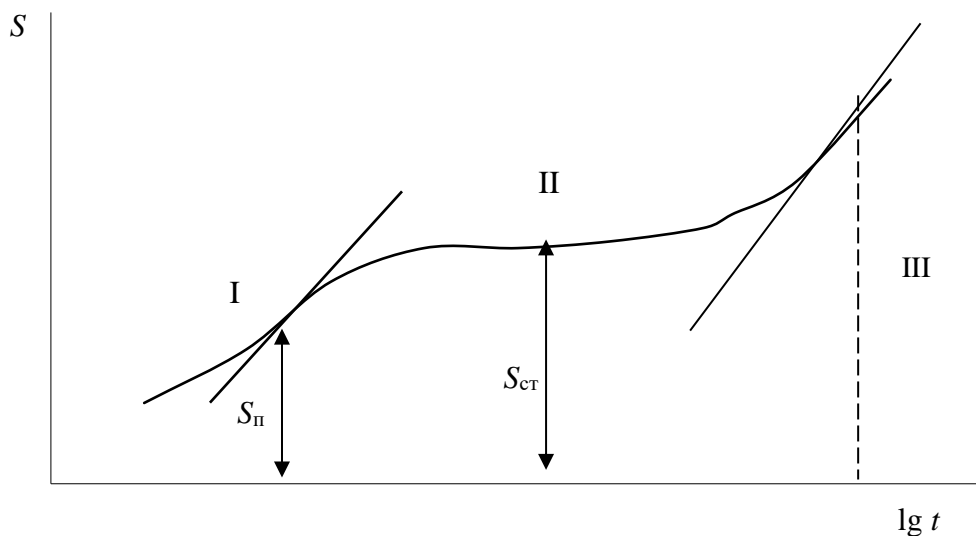


Рис. 3.3. Интерпретация временного графика в двухслойном безграничном пласте

I, III - расчетные участки графика

II- участок ложной стабилизации

Из соотношения (3.17) величина r/B находится по специальной таблице (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Значения специальных функций

$x = r/B$	$\lg x$	$K_0(x)$	$\lg K_0(x)$	e^x	$F(x)=e^x K_0(x)$
0.010	-2.000	4.721	0.674	1.010	4.768
0.020	-1.699	4.028	0.605	1.020	4.109
0.030	-1.523	3.623	0.559	1.030	3.733
0.040	-1.398	3.336	0.523	1.040	3.472
0.050	-1.301	3.114	0.493	1.051	3.273
0.060	-1.222	2.932	0.467	1.061	3.114
0.070	-1.155	2.779	0.444	1.072	2.981
0.080	-1.097	2.647	0.423	1.083	2.868
0.090	-1.046	2.531	0.403	1.094	2.769
0.100	-1.000	2.427	0.385	1.105	2.682
0.200	-0.699	1.752	0.244	1.221	2.140
0.300	-0.523	1.372	0.137	1.349	1.852
0.400	-0.398	1.114	0.047	1.491	1.662
0.500	-0.301	0.924	-0.034	1.643	1.524
0.600	-0.222	0.777	-0.110	1.822	1.416
0.700	-0.155	0.660	-0.180	2.013	1.330
0.800	-0.097	0.565	-0.248	2.225	1.258
0.900	-0.046	0.486	-0.313	2.459	1.197
1.000	0.000	0.421	-0.376	2.718	1.144
1.200	0.079	0.318	-0.498	3.320	1.057
1.400	0.146	0.243	-0.614	4.055	0.988
1.600	0.204	0.188	-0.726	4.953	0.930
1.800	0.255	0.145	-0.839	6.049	0.882
2.000	0.301	0.113	-0.947	7.389	0.841
3.000	0.477	0.034	-1.469	20.085	0.697
4.000	0.602	0.011	-1.959	54.598	0.609
5.000	0.699	0.004	-2.432	148.413	0.547

Величину водопроводимости (T) и значение коэффициента пьезопроводности (a) можно определить из выражений:

$$T = 0,183 \frac{Q}{C_p} e^{-\frac{r}{B}}; \quad (3.18)$$

$$a = \frac{rB}{2t_n}. \quad (3.19)$$

Первый этап откачки завершается периодом ложнестационарного режима. Если откачка достаточно длительная, то на графиках временного прослеживания может наблюдаться третий участок, отражающий работу пласта как единого безнапорного горизонта с суммарной гравитационной водоотдачей.

Для центральных скважин или «близких» наблюдательных, в которых наступил квазистационарный режим, зависимости (3.18), (3.19) и (3.8), (3.10) дают близкие результаты. Поэтому при обработке данных центральных скважин обычно применяются выражения (3.8), (3.17).

При правильной обработке откачек значения параметров водопроводимости, рассчитанные по данным I и III этапов (рис. 3.3), должны практически совпадать, что является дополнительным критерием проверки результатов.

Этапы ложной и окончательной стабилизации используются для расчёта параметра перетекания (B), условных радиусов питания (R_{Π}) и влияния ($R_{\text{вл}}$) откачки, на основании значения понижения уровня, при котором достигнута стабилизация ($S_{\text{ст}}$). Последовательность расчётов следующая:

$$\lg (R_{\Pi}/r) = 2,73 T S_{\text{ст}} / Q; \quad (3.20)$$

$$R_{\Pi} = (R_{\Pi}/r) \cdot r; \quad (3.21)$$

$$B = R_{\Pi} / 1,12; \quad (3.22)$$

$$R_{\text{вл}} = 5 B. \quad (3.23)$$

3.4. Обработка данных восстановления уровней

Прекращение откачки является воздействием на пласт, которое можно рассматривать как самостоятельный опыт или стадию одного опыта. Обработка этой второй стадии отличается определенной спецификой по сравнению с интерпретацией данных, полученных на стадии откачки. Прежде всего это относится к необходимости учета «наследства» первой стадии опыта. Под понятием «наследство» при обработке безграничных пластов обычно понимают продолжающееся снижение уровней в периферийной части депрессионной воронки, когда откачка в центральной скважине уже прекращена и происходит восстановление уровня. «Наследство» требует соответствующих приемов для его учета. Рассматривая «наследство» более

широко, сюда можно включить влияние границ, проявившихся во время откачки, а также влияние перетекания в слоистых пластах, "двойной пористости" и других факторов, осложняющих временной график во время откачки.

Обработка восстановления уровня обычно выполняется путем построения графика $\Delta H \div \lg t_b$ (рис. 3.4, а), хотя этот способ не учитывает "наследство" откачки. Величина ΔH отражает значение восстановления уровня после окончания возмущения и рассчитывается как разность между значением возмущения на конец опыта (S_0) и текущим возмущением в процессе восстановления уровня (S_b):

$$\Delta H = S_0 - S_b. \quad (3.24)$$

Величина t_b отсчитывается от начала восстановления (см. рис. 1.1).

Расчёты выполняются на основании зависимостей (3.25) – (3.32):

$$\Delta H = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2}; \quad (3.25)$$

$$\Delta H = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25at}{r^2}; \quad (3.26)$$

$$\Delta H = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25a}{r^2} + 0,183 \frac{Q}{T} \lg t; \quad (3.27)$$

$$\Delta H = A + C_p \lg t; \quad (3.28)$$

$$A = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25a}{r^2}; \quad (3.29)$$

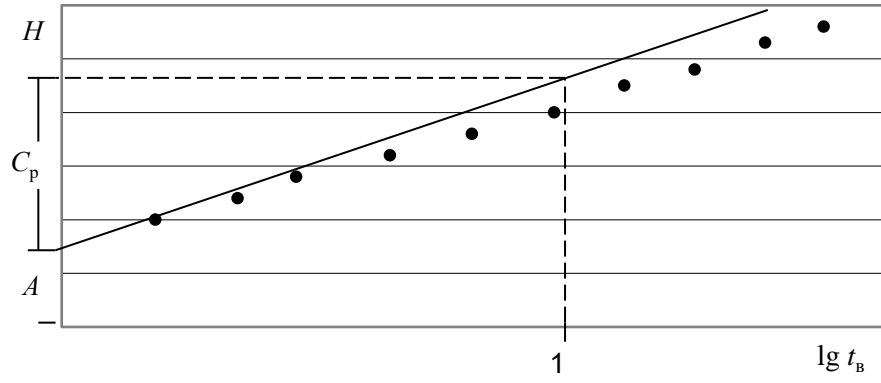
$$C_p = 0,183 \frac{Q}{T}; \quad (3.30)$$

$$T = 0,183 \frac{Q}{C_p}; \quad (3.31)$$

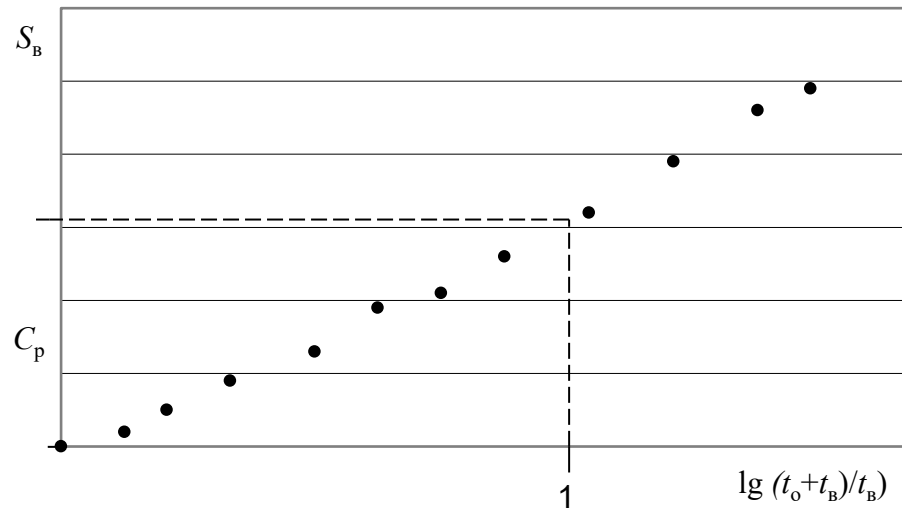
$$\lg \frac{a}{r^2} = \frac{A}{C_p} - 0,35; \quad (3.32)$$

$$\lg a = \frac{A}{C_p} - 0,35 + 2 \lg r. \quad (3.33)$$

а



б



в

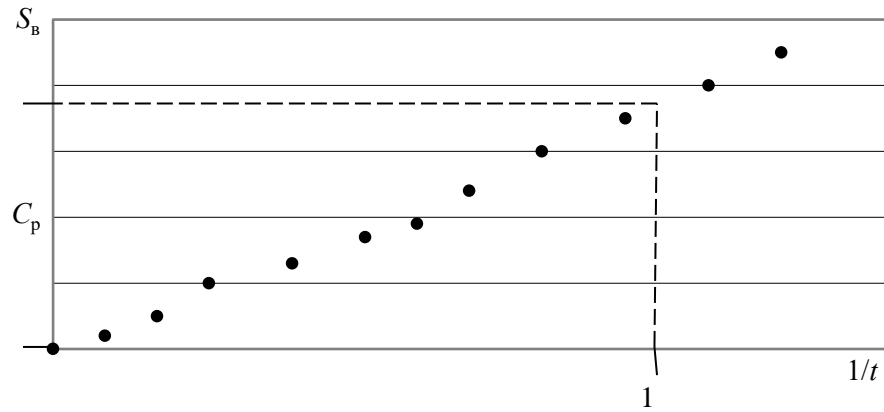


Рис. 3.4. Форма временных графиков в однородных безграничных пластах при обработке данных восстановления уровней

"Наследство" откачки в безграничных однородных пластах учитывается при построении графиков в координатах $S_B \div \lg((t_0 + t_B)/t_B)$ (рис. 3.4б) (S_B - понижение уровня в скважине в процессе восстановления; t_0 - продолжительность откачки). График $S_B \div \lg((t_0 + t_B)/t_B)$ в условиях безграничных однородных пластов приходит в начало координат. Данное свойство имеет важное диагностическое значение и позволяет широко применять график $S_B \div \lg((t_0 + t_B)/t_B)$ для расшифровки различных фильтрационных аномалий:

$$S_B = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_B}{t_B}; \quad (3.34)$$

$$S_B = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_B}{t_B}; \quad (3.35)$$

$$S_B = C_p \lg \frac{t_0 + t_B}{t_B}; \quad (3.36)$$

$$C_p = 0,183 \frac{Q}{T}; \quad (3.37)$$

$$T = 0,183 \frac{Q}{C_p}. \quad (3.38)$$

Для обработки данных экспресс-наливов используется условие, что при $t_0 \ll t_B$:

$$\ln \frac{t_0 + t_B}{t_B} \approx \frac{t_0}{t_B}. \quad (3.39)$$

При использовании последней зависимости уравнение (3.40) принимает вид:

$$S_B = \frac{Q}{4\pi T} \frac{t_0}{t_B}; \quad (3.41)$$

$$S_B = \frac{W}{4\pi T} \frac{1}{t_B}, \quad (3.42)$$

где W – объем воды, залитой в скважину.

Для обработки данных экспресс-налива используется график в координатах $S_B \div 1/t_B$. (рис. 3.4, в). Уклон графика обозначается C_p . Расчет значения водопроницаемости пласта выполняется по зависимостям:

$$S_B = C_p \frac{1}{t_B}; \quad (3.43)$$

$$C_p = \frac{W}{4\pi T}; \quad (3.44)$$

$$T = \frac{W}{4\pi C_p}. \quad (3.45)$$

В рассматриваемых условиях, в связи с двухслойным строением пласта, существенную продолжительность имеет период ложной стабилизации. Время продолжительности откачки (t_0), которое в условиях безграничного пласта включает только нестационарный режим, в рассматриваемых условиях завышается за счет ложностационарного этапа. Это влечет значительный сдвиг графика по оси абсцисс и отклонение представительного участка графика от начала координат (см. рис. 3.4, а).

Важно отметить, что сам по себе сдвиг графика обычно не оказывает значительного влияния на точность расчета величины водопроницаемости при длительных откачках, так как уклон представительного участка практически не меняется. Данное положение объясняется тем, что при построении графика чаще всего $t_0 \ll t_B$, поэтому

$$\lg \frac{t_0 + t_B}{t_B} \approx \lg \frac{t_0}{t_B}. \quad (3.46)$$

Необходимо отметить, что встречаются случаи, когда условие $t_0 \ll t_B$ не выполняется, уклон графика меняется и параметры рассчитываются с определенной погрешностью. Данное замечание очень часто справедливо для ОФР с небольшой продолжительностью.

Полезным свойством информации, получаемой на стадии восстановления уровня, является ее меньшая, по сравнению со стадией понижения, зависимость от колебаний дебита. В качестве негативных моментов следует отметить, что перетекание в слоистых пластах может искажать временной график на стадии восстановления, причем вероятность и величина ошибок практически неопределимы. Следовательно, при опробовании слоистых пластов способы прослеживания понижения и восстановления уровня не являются равноценными. Способ прослеживания восстановления уровня оказывается менее надежным.

С учётом отмеченных моментов, временные графики восстановления уровней в слоистых пластах имеют вспомогательное значение. Эти

зависимости следует применять только для дополнительного контроля расчетных значений водопроницаемости.

3.5. Особенности интерпретации данных одиночных опробований

Данные, полученные по центральным скважинам и при одиночных откачках (опробованиях), принято считать менее надежными и информативными по сравнению с данными по наблюдательным скважинам. Данное положение связано в основном с техническими причинами. Например, выполнение измерений уровня в опытной скважине обычно затруднено в связи с наличием в стволе скважины водоподъемного оборудования. В опытной скважине сильнее, чем в наблюдательной скважине, мешают колебания дебита. Поэтому временной график может иметь более сложную форму и труднее поддается интерпретации.

Очень существенным фактором, затрудняющим расчёт некоторых гидродинамических характеристик пласта, является неопределенность величин действующего гидродинамического (эффективного) радиуса опытной скважины (r'_c). Значение действующего гидродинамического радиуса опытной скважины может в несколько раз и даже в несколько порядков отличаться от фактического радиуса скважины. Данное обстоятельство обычно не позволяет рассчитывать точные значения коэффициента проницаемости (уровнепроницаемости), параметра перетекания и радиуса влияния откачки по результатам одиночных опробований. Ниже будут рассмотрены приемы, позволяющие определять ориентировочные значения указанных параметров.

В ряду положительных свойств, которыми отличаются данные центральных скважин, следует, в первую очередь, отметить диагностические свойства параметра, который называется удельным дебитом опытной скважины ($q_c = Q/S_c$). Из основных аналитических зависимостей динамики

подземных вод следует, что значение q примерно соответствует значению величины T . В зависимости от ряда факторов, различие в значениях указанных параметров может варьировать от 5 % до 2-3 раз, но больше - очень редко. Значение удельного дебита позволяет выполнить диагностику правильности определения основных гидродинамических характеристик, рассчитанных по временным графикам. Удельный дебит позволяет также оценить продолжительность влияния емкости ствола скважины на начальном этапе интерпретации (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Продолжительность влияния емкости скважины

$T, \text{ м}^2/\text{сут}$	1	5	10	20	50	100	500
$t_{\text{см}}, \text{ мин при } r_c=0,05$	113	23	11	6	2	1	0.2
$t_{\text{см}}, \text{ мин при } r_c=0,1$	450	90	45	22	9	5	1
$t_{\text{см}}, \text{ мин при } r_c=0,2$	1800	360	180	88	36	18	4

Временные графики опытных (центральных) скважин имеют ещё и другое преимущество. В опытных скважинах практически с самого начала опробования наступает квазистационарный режим изменения уровня. При этом режиме форма депрессионной воронки не изменяется (воронка опускается параллельно самой себе), а индикаторные графики (временные графики возмущения уровня) должны иметь форму прямой линии в условиях однородного безграничного пласта. Форма графика имеет важное диагностическое значение. Следует помнить, что прямолинейность графика сохраняется только в условиях безграничных и однородных пластов, при отсутствии влияния ёмкости скважины.

Обработка представительного участка временного графика позволяет рассчитать достаточно надежные значения параметров T и a/r_c^2 . Для определения последнего параметра используют зависимости (3.8), (3.32).

Необходимо отметить, что базовым параметром, который следует рассчитывать с максимально возможной точностью, является коэффициент

водопроницаемости. Достоверное определение значения этой характеристики пласта позволяет избежать значительных ошибок при расчётах параметров, стоящих под знаком логарифма.

Значения коэффициента уровнепроводности составляют обычно 10^3-10^4 м²/сут, а коэффициента пьезопроводности – 10^5-10^7 м²/сут. Если известны примерные значения гравитационной водоотдачи пород изучаемого пласта, то коэффициент уровнепроводности можно уточнить, опираясь на выражение:

$$a = T/\mu. \quad (3.47)$$

Этап временного графика, которому соответствуют достаточно надёжные значения коэффициента пьезопроводности или уровнепроводности, можно использовать для достоверного определения значений r'_c :

$$r'_c = \sqrt{a / \left(\frac{a}{r_c^2}\right)}. \quad (3.48)$$

На любом этапе опробования, при наличии надёжного значения r'_c , можно оценить размеры депрессионной воронки. Значение $\lg R_{\Pi}/r'_c$ рассчитывается на основании зависимости (3.20), а значение условного радиуса питания получается на основании выражения:

$$R_{\Pi} = (R_{\Pi}/r'_c)r'_c. \quad (3.49)$$

Следует помнить, что значение R_{Π} существенно меньше размеров фактической депрессионной воронки. Радиус депрессионной воронки в безграничных пластах обозначается как радиус влияния откачки ($R_{ВЛ}$). Соотношение значений радиусов влияния и питания в безграничных пластах составляет 2.33. Размеры депрессионной воронки в двухслойных пластах можно рассчитать на основании зависимостей (3.22), (3.23).

Достаточная надёжность рассчитанных значений параметров обеспечивается:

- малыми вариациями значений параметра уровнепроводности;
- значительным понижением внесённой погрешности при извлечении квадратного корня.

Таким образом, тщательная интерпретация данных одиночных опробований позволяет рассчитать ориентировочные значения практически всех необходимых параметров.

3.6. Влияние емкости ствола скважин на результаты опробования

При проведении исследований в породах со слабыми фильтрационными свойствами или в скважинах большого диаметра начальные периоды понижения и восстановления уровней всегда осложняются участием в формировании дебита откачки емкости (объема) опытной скважины. В качестве критерия, позволяющего оценивать продолжительность влияния емкости опытной скважины на форму графиков временного прослеживания (рис. 3.5), обычно используют выражение

$$\frac{\omega_c S(\Delta H)}{Q t_{ем}} \leq \varepsilon, \quad (3.50)$$

где ω_c - площадь сечения ствола скважины;

$S(\Delta H)$ - понижение или восстановление уровня;

$t_{ем}$ - продолжительность влияния емкости скважины;

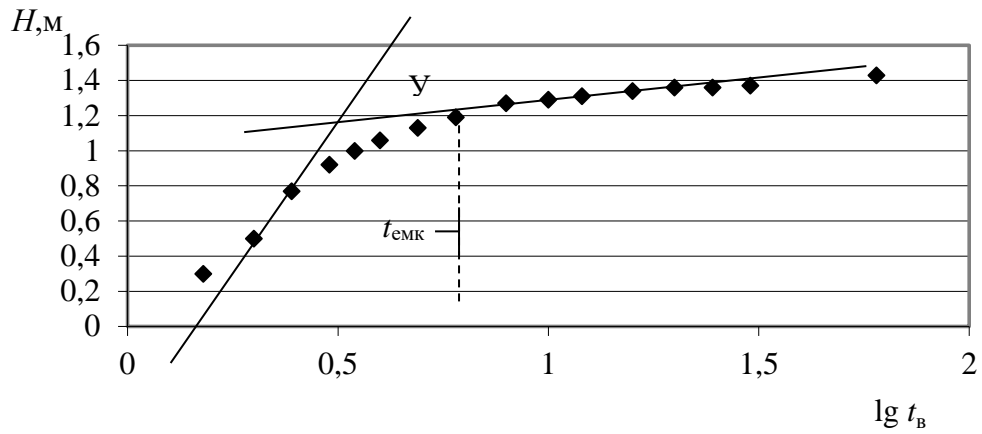
ε - допустимая погрешность.

Если принять, что $\varepsilon=0,1$; $\frac{Q}{S(\Delta H)} \approx T$; $\omega_c = \pi r_c^2$ то для ориентировочных расчетов периода влияния емкости выражение (3.50) упрощается:

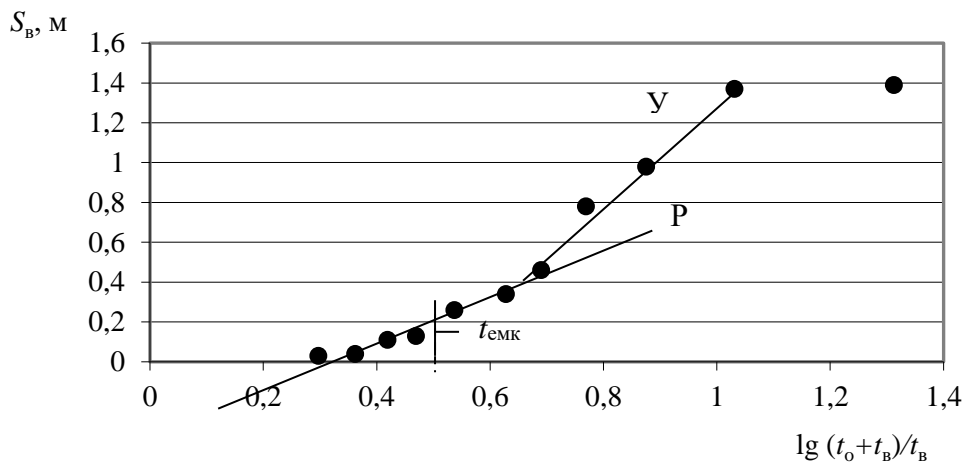
$$t_{емк} = \frac{10\pi r_c^2}{T} = \frac{31,4r_c^2}{T}. \quad (3.51)$$

На основании зависимости (3.51) можно оценить продолжительность влияния емкости скважины, задаваясь типичными для рассматриваемых условий значениями T и r_c^2 (см. табл. 3.3).

а



б



в

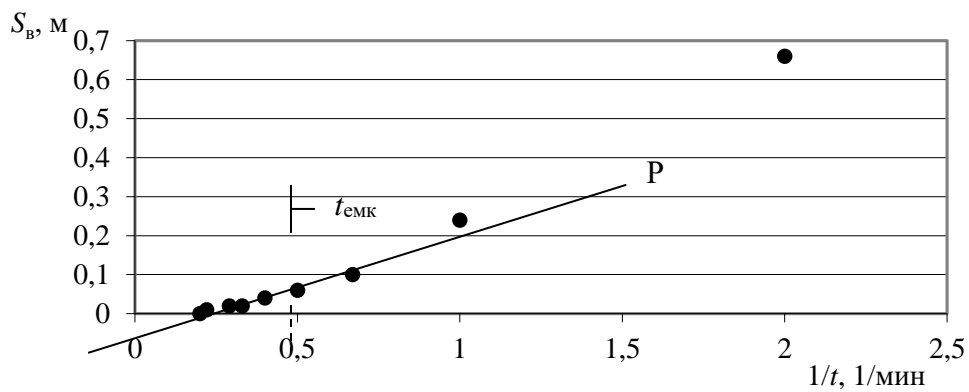


Рис. 3.5. Особенности интерпретации временных графиков; $t_{емк}$ – период влияния емкости скважины; P – расчетный участок; Y – участок для определения условного коэффициента C_y

Результаты расчетов свидетельствуют, что при $T < 50$ м²/сут влияние емкости скважины осложняет временные графики в течение довольно продолжительного периода. При опробовании скважин относительно большого диаметра ($r_c \geq 0,2$), влияние емкости скважины осложняет временные графики на начальном этапе опробования практически всегда.

Использование выражения (3.50) при обработке фактических материалов связано с существенными трудностями, которые определяются недостаточной точностью величин, входящих в данную зависимость. Принимаемое значение допустимой погрешности не является строго определенным. Площадь фактического сечения скважины зависит кроме радиуса скважины от размеров водоподъемного оборудования, занимающего часть ствола скважины, наличия каверн и вывалов в зоне изменения уровней. Значения величин возмущения уровня (S или ΔH), входящие в выражение (3.50), должны определяться на момент окончания периода влияния емкости скважины. Поэтому точное значение этих величин оценить достаточно сложно.

В рассматриваемых гидрогеологических условиях нередко требуется точное определение продолжительности влияния емкости скважины. Наличие других осложняющих факторов, например, этапов ложной стабилизации, приводит к тому, что представительные участки временного графика, пригодные для определения гидродинамических параметров пласта, недостаточно выражены и имеют очень короткую продолжительность.

Хорошие результаты даёт способ диагностики, позволяющий достаточно точно оценивать период влияния емкости ствола скважины, а также достоверно выделять представительный участок временного графика. Этот способ основан на свойстве графика $S_B \div \lg((t_0 + t_B)/t_B)$ приходить в начало координат при отсутствии каких-либо других фильтрационных аномалий. Даже в тех случаях, когда форма временного графика осложняется влиянием этапов ложной стабилизации или граничных условий, участок графика, деформированный влиянием емкости, отличается по форме, уклону и отделяется от представительного (расчетного) участка резким перегибом

(см. рис. 3.5). Форма временного графика позволяет достаточно точно выделить период влияния ёмкости скважины и момент окончания этого эффекта ($t_{ем}$).

При обработке данных фильтрационных опробований влияние ёмкости скважин на форму временных графиков имеет значительную продолжительность при проведении опробований в пластах с относительно низкими фильтрационными свойствами. Неправильный выбор представительного участка временного графика (на участке влияния ёмкости скважины) обычно приводит к занижению фильтрационных характеристик (параметра T) в 3 – 5 раз.

В тех случаях, когда представительный участок графика слабо выражен и рассчитать значение коэффициента C_p с достаточной точностью не представляется возможным, можно определить значение C_y . Последняя характеристика – «условный» коэффициент - определяется по «крутому» участку графика, связанному с влиянием ёмкости ствола скважины. В тех случаях, когда на графиках хорошо выражены участки «Р» и «У», следует рассчитать поправочный коэффициент C_y/C_p . Этот коэффициент можно применять для скважин, расположенных на одном участке и вскрывающих тот же водоносный горизонт.

4. УЧЕБНЫЕ ЗАДАЧИ

4.1. Обработка опытной откачки в палеогеновом водоносном горизонте (изотропный пласт)

Опробуемый водоносный горизонт сложен трещиноватыми опоками и песчаниками палеогена мощностью около 60 м, перекрытыми глинами и диатомитами суммарной мощностью 80-90 м. Снизу водоносный пласт подстилается мощной (около 140 м) толщей глин.

Таблица 4.1

Данные откачки из скв. 60

Время от начала откачки t , сут	Дебит, л/с	Понижение S , м				
		центр. скв. 60 $r_c=0,127$ м	набл. скв. 59 $r=50$ м		набл. скв. 58 $r=140$ м	
0,083	2,7	8,30	0,15		0,02	
0,25	2,7	9,10	0,56		0,05	
0,50	2,75	9,60	0,92		0,10	
0,75	2,65	9,80	1,20		0,17	
1,0	2,7	10,05	1,38		0,25	
1,5	2,7	10,30	1,58		0,36	
2,0	2,7	10,50	1,80		0,57	
3,0	2,7	10,80	2,05		0,80	
4,0	2,7	11,00	2,23		0,97	
5,0	2,7	11,15	2,33		1,10	
6,0	2,65	11,25	2,47		1,22	
7,0	2,25	11,40	2,56		1,32	
8,0	2,8	11,45	2,60		1,42	
9,0	2,8	11,55	2,75		1,55	
10,0	2,75	11,60	2,80		1,60	
12,0	2,75	11,70	2,93		1,70	
14,0	2,7	11,85	3,03		1,78	
Время от начала восстановления t^* , сут			S , м	ΔH^* , м	S , м	ΔH^* , м
0,17		11,2	2,48	0,55	1,76	0,02
0,25		10,5	2,40	0,63	1,73	0,05
0,50		10,3	2,00	1,03	1,62	0,16
0,75		10,0	1,78	1,25	1,48	0,30
1,0		9,9	1,58	1,45	1,38	0,40
1,5		9,7	1,33	1,70	1,20	0,58
2,0		9,2	1,23	1,80	1,12	0,66
3,0		9,0	0,93	2,10	0,93	0,85

Кустовая откачка с двумя наблюдательными скважинами 58, 59 выполнена из скв. 60 практически с постоянным дебитом 2,7 л/с в течение 14 сут при сохранении нестационарного режима фильтрации (табл. 4.1).

4.2. Обработка опытной откачки в палеогеновом водоносном горизонте (анизотропный пласт)

Кустовой откачкой опробован водоносный горизонт трещиноватых опок мощностью 50-60 м, перекрытый диатомитовыми глинами мощностью 8-12 м и подстилаемый плотными глинами мощностью более 40 м. Расположение скважины в кусте показано на рис. 4.1. Откачка проведена в течение 20 сут практически с постоянным дебитом 23,6 л/с. В области влияния откачки отсутствуют геологически выраженные границы пласта; в разрезе он изолирован перекрывающими и подстилающими глинами (рис. 4.2).

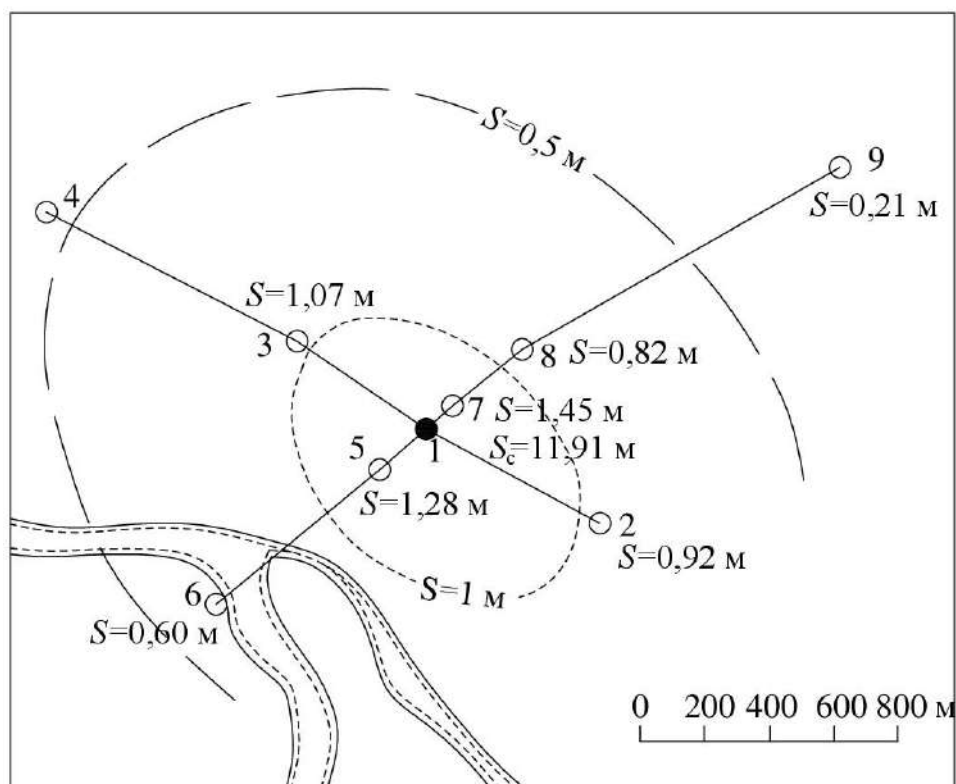


Рис. 4.1. План опытного куста скважин

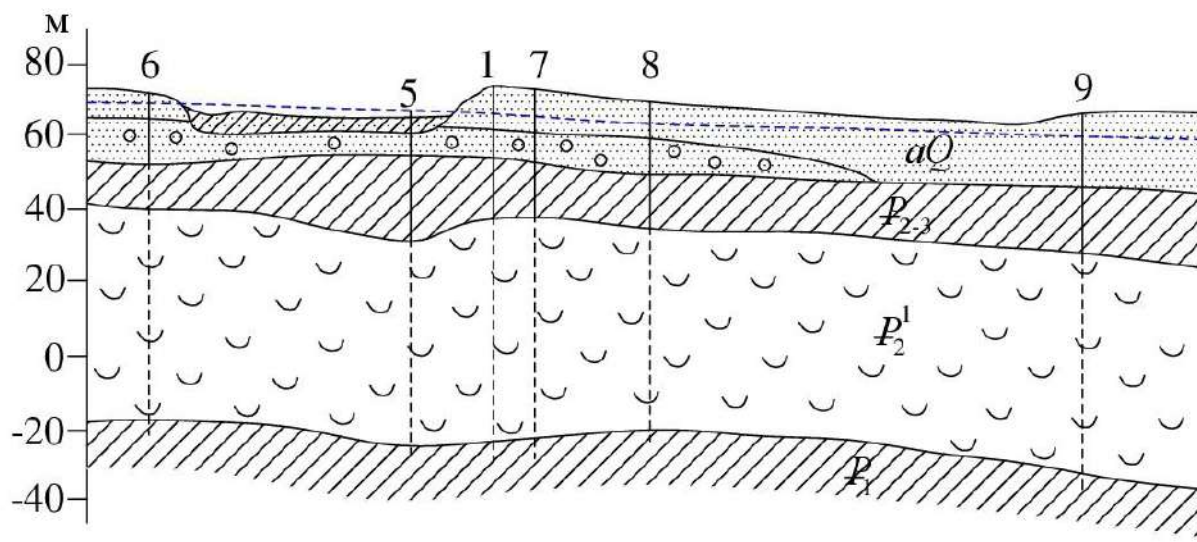


Рис. 4.2. Гидрогеологический разрез

Таблица 4.2

Данные снижения уровней при откачке из скв. 1

Время от начала откачки t , сут	Дебит, л/с	Центр. скв. 1, $r_c=0,076$ м	2 $r=620$ м	3 $r=500$ м	4 $r=1400$ м	5 $r=205$ м	6 $r=880$ м	7 $r=95$ м	8 $r=395$ м	9 $r=1550$ м
0,0104	25,8	1,30						0,0,3		
0,0174	25,8	1,73				0,01		0,08		
0,0243	-	10,79				0,03		0,12		
0,0313	24,7	10,81				0,05		0,15		
0,0417	24,7	10,81				0,07		0,20		
0,0521	-	10,86		0,01		-		-		
0,0625	24,7	10,83		0,02		0,12		0,27		
0,0833	24,3	10,86	0,01	0,03		0,17		0,32		
0,125	23,6	10,87	0,03	0,07		0,23		0,40	0,01	
0,208	24,0	10,91	0,06	0,13		0,33		0,50	0,03	
0,375	23,6	11,01	0,14	0,22		0,46	0,01	0,63	0,08	
0,5	24,0	11,11	0,18	0,27		0,52	0,02	0,69	0,12	
0,75	23,6	11,24	0,26	-	0,01	-	-	-	-	
1,0	23,6	11,40	0,30	0,41	0,02	0,66	0,08	0,83	0,22	
2,0	23,3	11,44	0,44	0,56	0,07	0,81	0,17	0,98	0,35	
3,0	23,3	11,47	0,52	0,65	0,12	0,90	0,23	1,07	0,44	0,01
4,0	23,6	11,67	0,58	0,71	0,16	0,96	0,28	1,13	0,50	0,02
5,0	23,3	11,75	0,63	0,76	0,20	1,0	0,32	1,17	0,55	0,03
6,0	24,0	11,88	0,67	0,80	0,23	1,04	0,36	1,20	0,58	0,04
8,0	23,3	11,74	0,73	0,86	0,28	1,10	0,42	1,26	0,64	0,07
10,0	23,6	11,72	0,77	0,90	0,32	1,14	0,46	1,30	0,68	0,10
12,0	23,6	11,67	0,81	0,94	0,36	1,16	0,49	1,33	0,72	0,13
14,0	23,6	11,77	0,85	0,98	0,38	1,19	0,53	1,36	0,75	0,15
16,0	23,6	11,82	0,87	1,01	0,40	1,23	0,56	1,40	0,78	0,17
18,0	23,6	11,87	0,90	1,04	0,42	1,25	0,58	1,42	0,80	0,19
20,0	23,6	11,91	0,92	1,07	0,43	1,28	0,60	1,45	0,82	0,21

Время от начала восстановления t^* , сут	Понижение S , м								
	Центр. скв. 1, $r_c=0,076$ м	2 $r=620$ м	3 $r=500$ м	4 $r=1400$ м	5 $r=205$ м	6 $r=880$ м	7 $r=95$ м	8 $r=395$ м	9 $r=1550$ м
0,00013									
0,0006	10,22								
0,00138	3,19								
0,0035	2,42						1,44		
0,0069	2,06						1,41		
0,0104	1,83						1,38		
0,0139	1,75						1,35		
0,0174	1,71				1,26		1,33		
0,0208	1,65				1,25		1,31		
0,0278	-				1,24		1,29		
0,0313	1,58				1,23		1,26		
0,0417	-				1,20		-		
0,0521	1,54		1,05		-		1,20		
0,0625	1,49		-		-		-	0,81	
0,0833	1,45		1,04		1,12		1,14	-	
0,0938	1,39	0,91	-		-		-	0,80	
0,125	1,38	-	1,02		1,07		-	-	
0,146	1,29	0,89	-		-		1,02	0,78	
0,167	1,28	-	-		1,03		0,99	-	
0,208	1,24	0,86	0,96		0,99		0,94	0,76	
0,333	1,21	0,82	0,90		0,89		0,85	0,72	
0,458	-	0,77	0,84		0,81	0,55	0,77	0,69	
0,625	-	-	-		-	0,53	0,70	-	
0,875	1,04	0,64	0,69	0,42	0,65	-	-	0,58	
0,958	-	-	-	-	-	0,50	0,62	-	
1,23	0,94	0,57	0,61	-	0,57	-	0,56	0,52	
1,5	0,76	0,52	0,56	0,37	0,52	-	0,52	0,49	
2,04	0,61	0,45	0,48	0,34	0,44	-	0,45	0,43	
3,25	0,52	0,36	0,39	0,28	0,33	0,30	0,35	0,34	
4,13	0,46	0,31	0,32	0,25	0,27	-	0,30	0,29	0,20
5,25	0,39	0,26	0,27	0,22	0,22	0,21	0,25	0,25	0,19
6,13	0,34	0,23	0,23	0,20	0,19	0,18	0,22	0,22	0,18
12,13		0,10	0,08	0,10	0,08	0,06	0,09	0,11	0,15

4.3. Обработка опытной откачки в хазарском водоносном горизонте

Схема опытного куста в водоносном пласте, сложенном мелкозернистыми хазаровскими песками, перекрытыми хвалынскими глинами и суглинками, показана на рис. 4.3. Откачка проведена с постоянным дебитом $Q=2500$ м³/сут в течение трех суток с последующим наблюдением за восстановлением уровней в течение трех суток. Данные понижений S и восстановлений ΔH^* уровней в пьезометрических скважинах приведены в табл. 4.3.

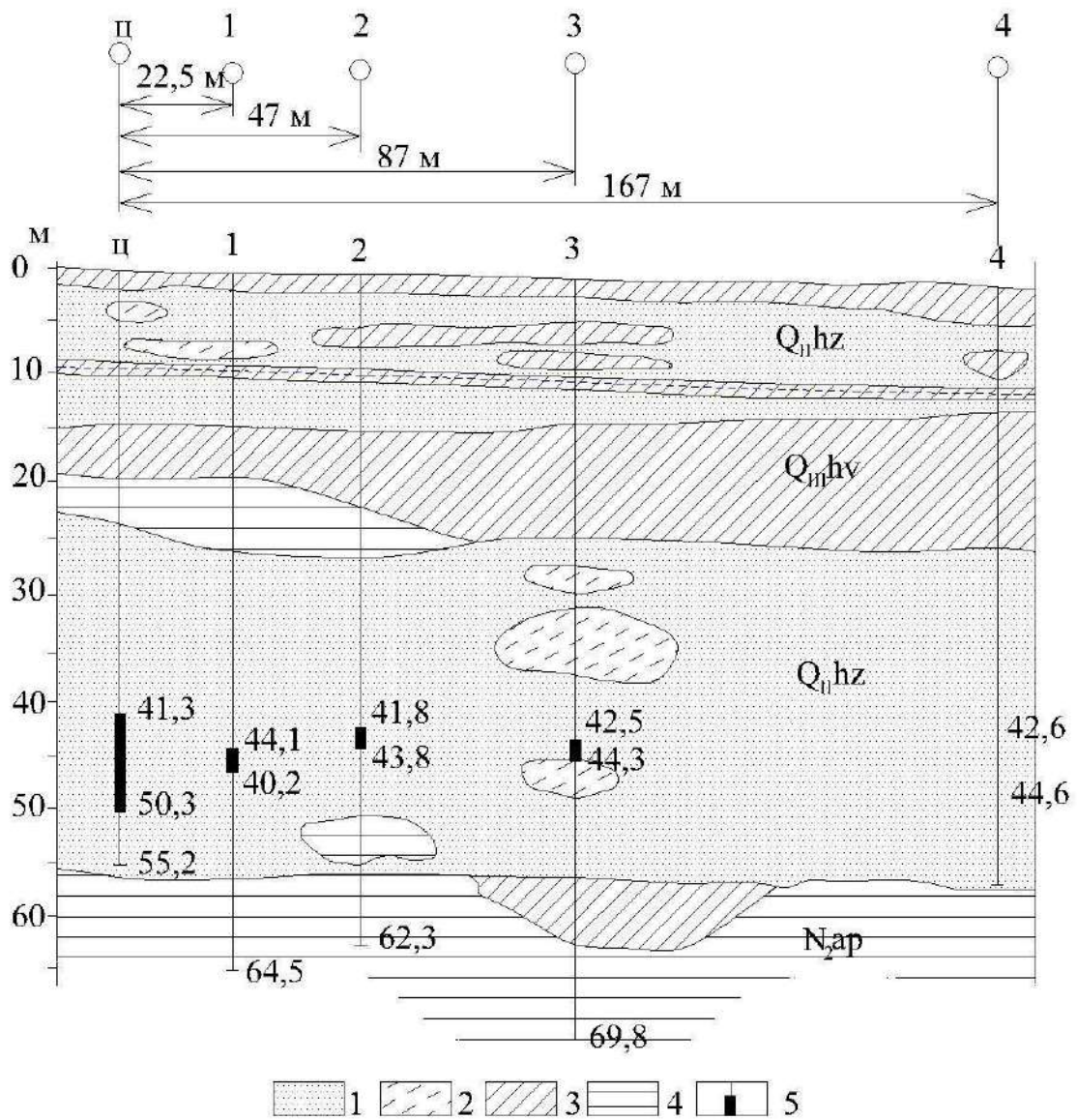


Рис. 4.3 План расположения и разрез по лучу пьезометрических скважин кустовой откачки из хазарских отложений:

1 - песок; 2 - супесь; 3 - суглинок; 4 - глина; 5 - интервал фильтров скважин

Данные наблюдений при откачке

t, мин	Скв. 1 $r_1=22,5$ м		Скв. 2 $r_2=47$ м		Скв. 3 $r_3=87$ м		Скв. 4 $r_4=167$ м	
	S, м	ΔH^* , м	S, м	ΔH^* , м	S, м	ΔH^* , м	S, м	ΔH^* , м
2	0,539	0,4	0,079	0,2	-	0,14	-	-
4	0,77	0,56	0,37	0,38	-	0,12	-	-
6	0,91	0,68	0,48	0,48	0,21	0,19	0,038	-
8	1,01	0,9	0,59	0,62	0,29	0,22	0,05	0,03
10	1,082	0,94	0,67	0,64	0,35	0,3	0,07	0,02
15	1,24	-	0,819	-	0,48	-	0,12	-
20	1,37	1,15	0,919	0,82	0,56	0,44	0,16	0,13
30	1,5	1,33	1,04	1,02	0,66	0,58	0,24	0,18
45	1,7	-	1,22	-	0,84	-	0,36	-
55	-	1,58	-	1,18	-	0,8	-	0,38
60	1,8	-	1,34	-	0,95	-	0,44	-
120	2,02	-	1,57	-	1,19	-	0,68	-
170	-	1,96	-	1,58	-	1,12	-	0,66
320	2,2	-	1,74	-	1,34	-	0,84	-
660	2,57	-	2,09	-	1,72	-	1,19	-
1000	2,67	-	2,22	-	1,84	-	1,28	-
1400	2,74	-	2,31	-	1,88	-	1,36	-
1800	2,77	-	2,31	-	1,92	-	1,39	-
2000	2,81	-	2,31	-	1,93	-	1,43	-
3100	2,84	-	2,34	-	1,94	-	1,46	-
4000	2,84	-	2,41	-	1,942	-	1,46	-
5000	2,842	-	2,42	-	1,96	-	1,48	-

4.4. Наливы и откачки с постоянным дебитом в одиночных скважинах
Налив с постоянным дебитом в скважину 2а

Скважина 2а расположена на полигоне УГГУ. Скважина вскрывает двухслойный пласт. Коренные породы представлены гнейсами протерозойского возраста. Водопроницаемость определяется трещинами горных пород. Коренные породы перекрыты покровными глинистыми образованиями мощностью 5 м.

В скважину 2а произведен налив с постоянным дебитом продолжительностью 30 минут. Данные наблюдений за дебитом и уровнем подземных вод при наливе представлены в табл. 4.4, 4.5, 4.6.

Таблица 4.4

Данные наблюдений за дебитом

t , МИН	5	10	15	20	25	30
Q , л/с	0,14	0,13	0,14	0,15	0,17	0,17

Таблица 4.5

Данные наблюдений за уровнем при наливе

t , МИН	0,16	0,33	0,5	0,67	0,83	1,0	1,66	2,0	2,5	3,0
$G_{ТД}$, М	6,23	6,12	5,97	5,75	5,50	5,30	5,06	5,00	4,90	4,82
S , М	0,05	0,16	0,31	0,53	0,78	0,98	1,22	1,28	1,38	1,46
t , МИН	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	15,0	20,0	30,0	-
$G_{ТД}$, М	4,79	4,73	4,68	4,56	4,53	4,50	4,48	4,40	4,39	-
S , М	1,49	1,55	1,6	1,72	1,75	1,78	1,8	1,89	1,89	-

Таблица 4.6

Данные наблюдений за восстановлением уровня

$t_{В}$, МИН	0,16	0,33	0,5	1,0	1,66	2,0	2,5	3,0
$G_{ТД}$, М	4,54	4,67	4,82	5,19	5,42	5,53	5,69	5,81
$S_{В,М}$	1,74	1,61	1,46	1,09	0,86	0,75	0,59	0,47
$t_{В}$, МИН	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	15,0	20,0
$G_{ТД}$, М	6,0	6,07	6,14	6,20	6,22	6,24	6,26	6,28
$S_{В,М}$	0,28	0,21	0,14	0,08	0,06	0,04	0,02	0

5. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ УЧЕБНОЙ ЗАДАЧИ

Таблица 5.1

Данные для построения зависимости $S \div \lg t$

t , МИН	0,16	0,3	0,5	0,67	0,83	1,0	1,66	2,0	2,5	3,0
$\lg t$	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,2	0,3	0,4	0,5
S , М	0,05	0,16	0,31	0,53	0,78	0,98	1,22	1,28	1,38	1,46
t , МИН	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	15,0	20,0	30,0	-
$\lg t$	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	-
S , М	1,49	1,55	1,6	1,72	1,75	1,78	1,8	1,88	1,89	-

Таблица 5.2

Данные для построения зависимости $\Delta H \div \lg t_B$

t_B , МИН	0,16	0,33	0,5	1,0	1,66	2,0	2,5	3,0
$\lg t_B$	-0,8	-0,5	-0,3	0	0,2	0,3	0,4	0,5
ΔH , М	0,16	0,28	0,43	0,8	1,03	1,14	1,3	1,42
t_B , МИН	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	15,0	20,0
$\lg t_B$	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
ΔH , М	1,61	1,68	1,75	1,81	1,83	1,85	1,87	1,89

Таблица 5.3

Данные для построения зависимости $S_B \div \lg (t_0 + t_B)/t_B$

t_B	0,16	0,3	0,5	0,83	1,0	1,66	2,0	2,5	3,0
$(t_0 + t_B)/t_B$	188,5	91,9	61	37,14	31,0	19,1	16,0	13,0	11,0
$\lg (t_0 + t_B)/t_B$	2,3	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0
S_B , М	1,74	1,61	1,46	1,2	1,09	0,86	0,75	0,59	0,47
t_B	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	15,0	20,0	30,0
$(t_0 + t_B)/t_B$	8,5	7,0	6,0	4,75	4,0	3,5	3,0	2,5	1,0
$\lg (t_0 + t_B)/t_B$	0,93	0,85	0,78	0,68	0,6	0,50	0,48	0,40	0
S_B , М	0,28	0,21	0,14	0,08	0,06	0,04	0,02	0	0

Результаты интерпретации данных налива

Зависимость	$S \div \lg t$	$\Delta H \div \lg t_B$	$S_B \div \lg (t_0 + t_B) / t_B$
$C_y, \text{ м}$	1,90	1,46	1,42
$C_p, \text{ м}$	0,44	0,34	0,34
C_y / C_p	4,32	4,29	4,18
$T, \text{ м}^2/\text{сут}$	5,41	7,0	7,0

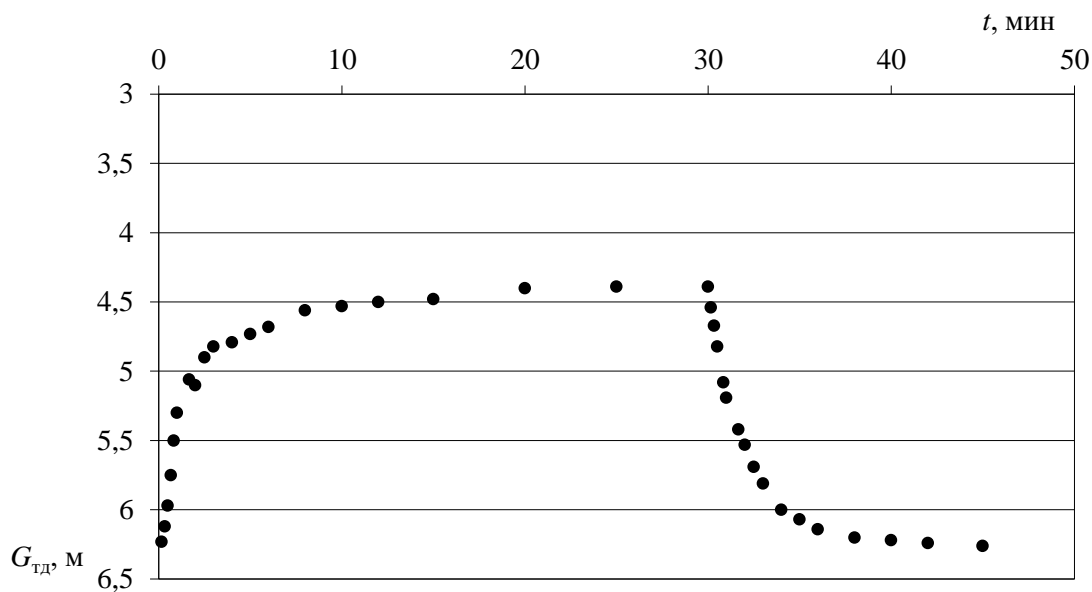


Рис. 5.1. Зависимость $G_{гд} \div t$. Налив в скв. 2а

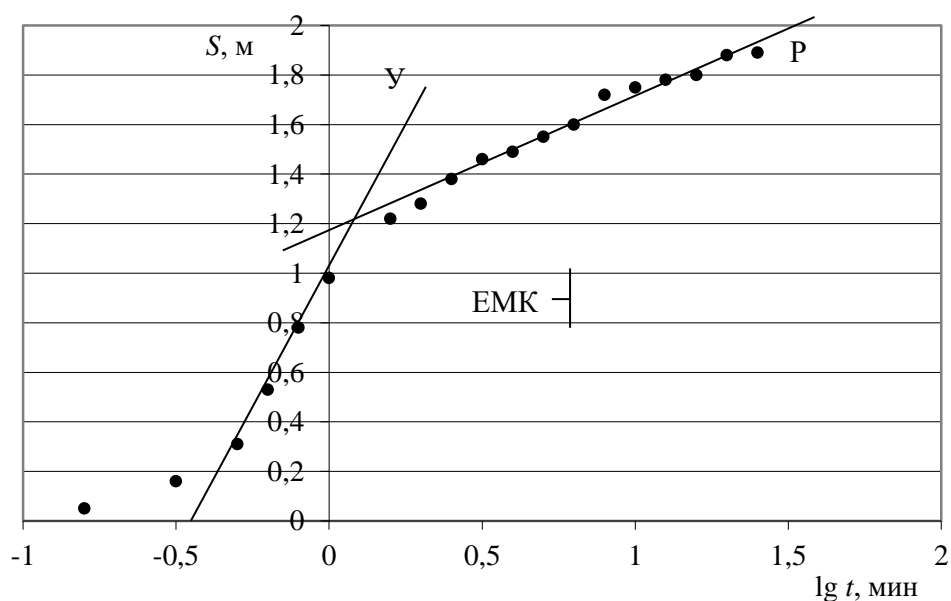


Рис. 5.2. Зависимость $S \div \lg t$. Налив в скв. 2а

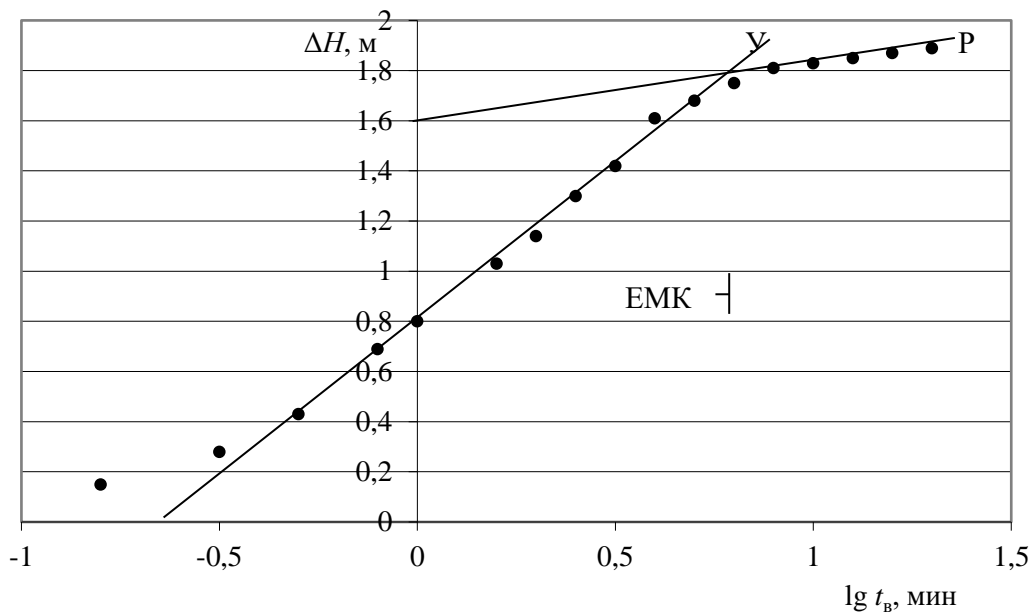


Рис.5.3. Зависимость $\Delta H \div \lg t_B$. Налив в скв. 2а

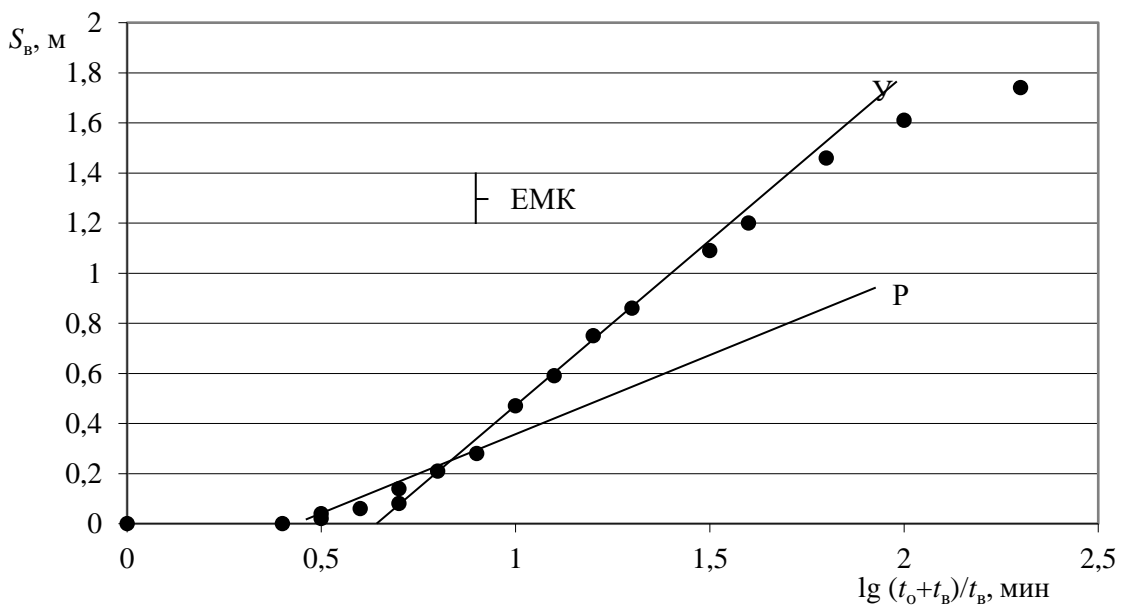


Рис. 5.4. Зависимость $S_B \div \lg (t_0+t_B)/t_B$. Налив в скв. 2а

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. *Планирование кустовой откачки: методические указания по курсовой работе по дисциплине «Динамика подземных вод» для студентов специальности 130302 – «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания (ГИГ)»* / сост.: С. Н. Тагильцев, Т. Н. Кибанова, В. С. Тагильцев; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: УГГУ, 2008. – 31 с.

2. *Синдаловский Л. Н.* Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. - СПб.: Изд-во С.-Пб. ун-та, 2006 - 769 с.

3. *Фисун Н. В., Ленченко Н. Н.* Динамика подземных вод. Краткий курс лекций и лабораторный практикум. – М.: Научный мир, 2016. – 267 с.

4. *Шестаков В. М.* Гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.

Дополнительная:

5. *Мироненко В. А.* Динамика подземных вод. - М.: МГГУ, 2001. 519 с.

6. *Гавич И. К.* Гидрогеодинамика. - М.: Недра, 1988. 358 с.

7. *Мироненко В. А., Шестаков В. М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - М.: Недра, 1978 - 326 с.

8. *Шестаков В. М., Кравченко И. П., Штенгелов Р. С.* Практикум по динамике подземных вод. - М.: МГУ, 1987 - 224 с.

Учебное пособие

Сергей Николаевич Тагильцев
Татьяна Николаевна Кибанова
Викентий Сергеевич Тагильцев
Анна Евгеньевна Рубцова

ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Практикум по динамике подземных вод для студентов специализации
«Поиски и разведка подземных вод
и инженерно-геологические изыскания»
направления 21.05.02– «Прикладная геология»

Редактор Л. В. Устьянцева
Компьютерная верстка А. Е. Рубцова

Подписано в печать 16.02.18

Бумага писчая. Формат бумаги 60x84 1/16. Печать на ризографе.
Печ. л. 3, 25. Уч. – изд. л. 1,61. Тираж 200 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал - макета в лаборатории
множительной техники УГГУ



МИНОБНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО УГГУ)

С.Н. Тагильцев

Динамика подземных вод

**Методические указания
по организации самостоятельной работы
для обучающихся специальности
21.05.03 – Технология геологической разведки**

Специализация № 3 «Технология и техника разведки МПИ»

Форма обучения: очная, заочная


Екатеринбург
2019

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»)

ОДОБРЕНО:

Зав. кафедрой ГИГГ



С.Н. Тагильцев

« 13 » апреля 2019 г.

**С.Н. Тагильцев****Динамика подземных вод**

**Методические указания
по организации самостоятельной работы
для обучающихся специальности
21.05.03 – Технология геологической разведки**

Специализация № 3 «Технология и техника разведки МПИ»

Форма обучения: очная, заочная

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	3
1.	Общие положения	4
2.	Самостоятельная работа студентов, обеспечивающая подготовку к аудиторным занятиям	7
	2.1. Повторение материала лекций	7
	2.2. Самостоятельное изучение тем курса	8
	2.3. Подготовка к практическим и лабораторным работам	8
3.	Другие виды самостоятельной работы	8
	3.1. Подготовка к зачёту	8
	3.2. Подготовка и написание контрольной работы	9
	3.3. Подготовка и написание курсового проекта	9
	3.4. Подготовка к экзамену	9

Введение

Самостоятельная работа в современном образовательном процессе рассматривается как форма организации обучения, которая способна обеспечивать самостоятельный поиск необходимой информации, творческое восприятие и осмысление учебного материала в ходе аудиторных занятий, разнообразные формы познавательной деятельности студентов на занятиях и во внеаудиторное время, развитие аналитических способностей, навыков контроля и планирования учебного времени, выработку умений и навыков рациональной организации учебного труда.

Таким образом, самостоятельная работа – форма организации образовательного процесса, стимулирующая активность, самостоятельность, познавательный интерес студентов.

В методических указаниях рассматриваются вопросы организации самостоятельной работы для студентов Уральского государственного горного университета.

Методическое указание включает три главы, которые логически связаны друг с другом. Первая глава знакомит читателя с теоретическими основами самостоятельной работы студентов и особенностями подготовки к ней в вузе. Во второй и третьей главах представлен материал, который содержит информацию о видах самостоятельной работы по данной дисциплине, а также об источниках информации для осуществления самостоятельной работы. Эмпирической основой разработки системы критериев и показателей оценки форм самостоятельной работы стал практический опыт работы преподавателей кафедры геодезии и кадастров.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Самостоятельная работа студентов всех форм и видов обучения является одним из обязательных видов образовательной деятельности, обеспечивающей реализацию требований Федеральных государственных стандартов высшего образования (ФГОС), созданных на основе Федерального закона от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации».

Конкретные требования к самостоятельной работе студентов определяются в Федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования по направлению.

Нормативные требования к самостоятельной работе студентов дополняются документами локального характера: Уставом Уральского государственного горного университета, рабочей программой дисциплины.

Согласно требованиям нормативных документов, самостоятельная работа студентов является обязательным компонентом образовательного процесса, так как она обеспечивает закрепление получаемых на лекционных занятиях знаний путем приобретения навыков осмысления и расширения их содержания, навыков решения актуальных проблем формирования общекультурных и профессиональных компетенций, подготовки к практическим занятиям, сдаче зачета и экзамена.

Самостоятельная работа студентов представляет собой совокупность внеаудиторных занятий и работ, обеспечивающих успешное освоение образовательной программы высшего образования в соответствии с требованиями ФГОС.

Навыки самостоятельной работы по освоению каких-либо знаний приобретаются человеком с раннего детства и развиваются в течение всей жизни. К началу обучения в вузе каждый студент имеет личный опыт и навыки организации собственных действий, полученные в процессе обучения в школе, учреждениях дополнительного образования, во время внешкольных занятий и в

быту. Однако при обучении в вузе требования к организации самостоятельной работы существенно возрастают, так как они связаны с освоением сложных общекультурных и профессиональных компетенций.

Практика показывает, что студенты различаются по уровню готовности к реализации требований к самостоятельной работе. Выделяются две основные группы студентов. Первая характеризуется тем, что ее представители ориентированы на выполнение заданий самостоятельной работы и обладают универсальными учебными компетенциями, позволяющими успешно справиться с требованиями к ее выполнению (умением понимать и запоминать приобретаемую информацию, логически мыслить, воспроизводить материал письменно и устно, проводить измерения, вычисления, проектировать и т. д.). Студенты второй группы не имеют устойчивой ориентации на постоянное выполнение самостоятельной работы при освоении учебного материала и отличаются низким уровнем развития универсальных учебных компетенций и навыков самоорганизации.

Самостоятельная работа в рамках образовательного процесса в вузе решает следующие задачи:

- закрепление и расширение знаний, умений, полученных студентами во время аудиторных и внеаудиторных занятий, превращение их в стереотипы умственной и физической деятельности;

- приобретение дополнительных знаний и навыков по дисциплинам учебного плана;

- формирование и развитие знаний и навыков, связанных с научно-исследовательской деятельностью;

- развитие ориентации и установки на качественное освоение образовательной программы;

- развитие навыков самоорганизации;

- формирование самостоятельности мышления, способности к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;

- выработка навыков эффективной самостоятельной профессиональной теоретической, практической и учебно-исследовательской деятельности.

Для реализации задач самостоятельной работы студентов и ее осуществления необходим *ряд условий*, которые обеспечивает университет:

- наличие материально-технической базы;
- наличие необходимого фонда информации для самостоятельной работы студентов и возможности работы с ним в аудиторное и внеаудиторное время;
- наличие помещений для выполнения конкретных заданий, входящих в самостоятельную работу студентов;
- обоснованность содержания заданий, входящих в самостоятельную работу студентов;
- связь самостоятельной работы с рабочими программами дисциплин, расчетом необходимого времени для самостоятельной работы;
- развитие преподавателями у студентов навыков самоорганизации, универсальных учебных компетенций;
- сопровождение преподавателями всех этапов выполнения самостоятельной работы студентов, текущий и конечный контроль ее результатов.

Специфическими *принципами организации* самостоятельной работы в рамках современного образовательного процесса являются:

- принцип интерактивности обучения (обеспечение интерактивного диалога и обратной связи, которая позволяет осуществлять контроль и коррекцию действий студента);
- принцип развития интеллектуального потенциала студента (формирование алгоритмического, наглядно-образного, теоретического стилей мышления, умений принимать оптимальные или вариативные решения в сложной ситуации, умений обрабатывать информацию);

- принцип обеспечения целостности и непрерывности дидактического цикла обучения (предоставление возможности выполнения всех звеньев дидактического цикла в пределах темы, раздела, модуля).

Самостоятельная работа студентов планируется преподавателем в рабочей программе дисциплины.

Объем времени, отведенный на внеаудиторную самостоятельную работу, находит отражение: в учебном плане в целом по теоретическому обучению, по каждому из циклов дисциплин, по каждой дисциплине; в рабочих программах учебных дисциплин с ориентировочным распределением по разделам или конкретным темам.

Самостоятельная работа студентов классифицируется: по месту организации (аудиторная и внеаудиторная); по целям организации (цели дисциплины, сформулированные и обоснованные в рабочей программе); по способу организации (индивидуальная, групповая).

Выбор формы организации самостоятельной работы студентов (индивидуальная или групповая) определяется содержанием учебной дисциплины и формой организации обучения (лекция, семинар, практическое занятие, контрольное занятие и др.).

В зависимости от формы промежуточной аттестации виды самостоятельной работы дополняются подготовкой к экзамену, зачету и процедурами текущей аттестации.

2. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ПОДГОТОВКУ К АУДИТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

2.1. Повторение материала лекций

Источники информации по теме лекции:

1) раздаточный материал, который предоставляется студенту в электронном виде перед каждым лекционным занятием;

2) конспект лекции, который студент пишет во время проведения лекционного занятия;

3) учебная литература, которая указана в рабочей программе дисциплины.

2.2. Самостоятельное изучение тем курса

Самостоятельное изучение тем осуществляется при обучении на заочной форме обучения.

Источники информации для самостоятельного изучения тем:

1) раздаточный материал, который предоставляется студенту в электронном виде перед сессией;

2) учебная литература, которая указана в рабочей программе дисциплины.

2.3. Подготовка к практическим и лабораторным занятиям

Типовые задания (примеры) работ, выполняемые на практических занятиях представлены в комплекте оценочных материалов.

Принципы работы на практических занятиях озвучиваются преподавателем на соответствующих лекционных занятиях.

Источники информации для подготовки к практическим занятиям:

1) раздаточный материал, который предоставляется студенту в электронном виде перед каждым лекционным занятием либо в начале сессии;

2) конспект лекции, который студент пишет во время проведения практического или лабораторного занятия (при наличии);

3) учебная литература, которая указана в рабочей программе дисциплины;

4) методические указания по выполнению практических и лабораторных занятий.

3. ДРУГИЕ ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1. Подготовка к зачету

В комплекте оценочных средств представлен перечень тестовых заданий, теоретических вопросов и практико-ориентированных заданий, которые входят в постав билетов.

Источники информации для подготовки к зачету:

- 1) раздаточный материал, который предоставляется студенту в электронном виде перед каждым лекционным занятием либо в начале сессии;
- 2) конспект лекции, который студент пишет во время проведения лекционного занятия (при наличии);
- 3) учебная литература, которая указана в рабочей программе дисциплины.

3.2 Подготовка и написание контрольной работы

Для выполнения контрольных работ студентами кафедрой подготовлены Методические рекомендации и задания к контрольным работам для студентов направления 21.05.02 Прикладная геология.

3.3 Подготовка и написание курсового проекта

Для выполнения курсового проекта кафедрой подготовлены Методические рекомендации по выполнению курсового проекта для студентов направления 21.05.02 Прикладная геология.

3.4 Подготовка к экзамену

В комплекте оценочных средств представлен перечень теоретических вопросов и практико-ориентированных заданий, которые входят в постав билетов.

Источники информации для подготовки к экзамену:

- 1) раздаточный материал, который предоставляется студенту в электронном виде перед каждым лекционным занятием либо в начале сессии;
- 2) конспект лекции, который студент пишет во время проведения лекционного занятия (при наличии);
- 3) учебная литература, которая указана в рабочей программе дисциплины.

Учебное издание

Тагильцев Сергей Николаевич

Динамика подземных вод

Методические указания по организации самостоятельной работы
для обучающихся направления подготовки 21.05.02 – Прикладная геология
(специализация № 2 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические
изыскания»)

Редактор Н.В. Рубан

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60 x 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. Уч.-изд. л. Тираж экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ



**МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО**

**«Уральский государственный горный
университет»**

М. Е. Садовников

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

***Методические указания по организации
самостоятельной работы***

**Екатеринбург
2018**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Тематический план дисциплины	4
2. Тематика лабораторных, практических работ	5
3. Теоретические вопросы к экзамену по дисциплине	7
4. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	8
4.1. Основная литература	8
4.2. Дополнительная литература	9
5. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины	9
6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем	9

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по самостоятельной работе студентов (СРС) определяют виды, требования к выполнению и отчетности, рекомендации по выполнению СРС.

Целью методических рекомендаций является повышение эффективности процесса обучения по основной образовательной программе путем правильной организации и выполнения самостоятельной работы.

Самостоятельная работа есть планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская деятельность студентов, осуществляемая, в основном, во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. В настоящих методических указаниях предметом является самостоятельная учебная работа.

Основными видами самостоятельной учебной работы являются:

самовоспроизводящая – самостоятельное прочтение, просмотр, конспектирование учебной литературы и информации Интернет-ресурсов, прослушивание лекций, аудио- и видеоматериалов, заучивание, пересказ, запоминание, повторение учебного материала и др.;

поисковая – подготовка сообщений, докладов, выступлений на семинарских и практических занятиях, подбор литературы по дисциплинарным проблемам и литературы по теме рефератов, контрольных и курсовых работ и др.;

творческая – написание рефератов, выполнение курсового проекта, подготовка выпускной работы (проекта), выполнение специальных заданий и др.

Самостоятельная учебная работа включает в себя:

- подготовку к аудиторным занятиям (лекциям, практическим, семинарским, лабораторным работам и др.) и выполнение соответствующих заданий;
- самостоятельную работу над отдельными темами учебных дисциплин в соответствии с учебно-тематическими планами;
- написание рефератов, докладов, эссе;
- подготовку ко всем видам практики и выполнение предусмотренных ими заданий;
- выполнение письменных контрольных и курсовых работ;
- подготовку ко всем видам контрольных испытаний, в том числе к коллоквиумам, экзаменам и зачетам, тестированию и интернет-тестированию, государственным экзаменам;
- подготовку к итоговой государственной аттестации, в том числе выполнение выпускной квалификационной работы (проекта) или магистерской диссертации;
- другие виды учебной деятельности, организуемой и осуществляемой вузом, факультетом или кафедрой.

Виды заданий для выполнения самостоятельной работы: сообщение или доклад на семинарском занятии, реферат, расчетно-графическая работа, курсовая работа и курсовой проект, выпускная квалификационная работа, магистерская диссертация. Темы заданий для выполнения учебной самостоятельной работы студентов указывает преподаватель.

Методические рекомендации к планированию и выполнению самостоятельной учебной работы

Приступая к изучению учебной дисциплины, следует ознакомиться с рабочей учебной программой или тематическим планом дисциплины (табл. 1), перечнем обязательной и дополнительной учебной, научной и методической литературы (раздел 4), получить в библиотеке рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, завести новую тетрадь для конспектирования лекций и работы с первоисточниками.

Вопросы для экзамена, указанные в настоящих методических указаниях (раздел 3), могут быть использованы студентом для углубленного изучения содержания дисциплины. Студент имеет право выбирать дополнительно интересующие его темы для самостоятельной работы.

Студентам должны самостоятельно выполнять индивидуальные письменные задания и упражнения, предлагаемые при подготовке к учебным занятиям.

Серьезная организованная работа по подготовке к семинарским занятиям, написанию письменных работ значительно облегчит подготовку к экзаменам и зачетам. При подготовке к зачету, экзамену студент должен повторить, как правило, ранее изученный материал. В этот период играют большую роль подготовленные заранее записи и конспекты.

Контрольная работа (КР) предназначена для выработки умения дать лаконичный аргументированный полный ответ на вопрос изучаемого курса, снабженный выводами. Как правило, она выполняется студентами, обучающимися по заочной форме обучения. Написание ее требует самостоятельности и ответственного отношения, способности работать с литературой по проблеме, знаний истории и теории вопроса, основных теоретических положений. Успешное выполнение контрольной работы учитывается при выставлении экзаменационной оценки. Объем работы не должен превышать 8-10 страниц печатного или рукописного текста, и содержать титульный лист, основную часть работы, список использованной литературы.

Расчетно-графическая работа (РГР) содержит задание на выполнение законченного инженерного расчета по выбору или проверке узлов или составных частей электротехнических систем в составе электротехнического комплекса.

Термин *реферат* (Р) имеет два смысла, во-первых, это краткое изложение содержания документа или его части, научной работы, включающее основные фактические сведения и выводы, необходимые для первоначального ознакомления с источниками и определения целесообразности обращения к ним и, во-вторых, это вид самостоятельной работы студента, под которым понимается краткое изложение в письменном виде или в форме публичного доклада содержания книги, учения, научного исследования и т.п., другими словами, это доклад на определенную тему, освещающий её вопросы на основе обзора литературы и других источников.

Рефераты в как вид самостоятельной работы студента оцениваются по следующим основным критериями: актуальность содержания, теоретический уровень, глубина и полнота анализа фактов, явлений, проблем, относящихся к теме; информационная насыщенность, новизна, оригинальность изложения вопросов; простота и доходчивость изложения; структурная организованность, логичность, грамматическая правильность и стилистическая выразительность; убедительность, аргументированность, практическая значимость и теоретическая обоснованность предложений и выводов.

Для выполнения самостоятельной работы других видов – курсовой работы и проекта, выпускной квалификационной работы, имеются соответствующие методические указания.

1. ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 1 – Тематический план дисциплины

№	Наименование, раздела и темы	Самостоятельная работа, часов		Литература (страницы)
		очная	заочная	
1	Условия эксплуатации электрооборудования на горных предприятиях. Исполнение электрооборудования	6	11	[1] с. 21...45, [3] с. 7...10, 14...23, [5] с. 25...28
2	Уровни напряжения, качество электроэнергии, режимы нейтрали	6	11	[1] с. 45...55, 175...182, [3] с. 10...14, [5] с. 16...20, 39...43,

№	Наименование, раздела и темы	Самостоятельная работа, часов		Литература (страницы)
		очная	заочная	
				[6] с. 53...97
3	Электрооборудование технологических установок горных предприятий	6	11	[1] с. 455...484, [2] с. 215...263, 505...588, [5] с. 305...369, [6] с. 97...107
4	Электрооборудование распределительных сетей горных предприятий	6	11	[1] с. 420...434, 444...455, [2] с. 23...33, 133...142, [3] с. 143...151, [5] с. 207...305, [6] с. 179...220
5	Электрооборудование для управления электроприводами на горных предприятиях	6	11	[1] с. 142...178, [2] с. 23...33, 133...142 [3] с. 143...151
6	Правила выполнения чертежей раздела проекта «Силовое электрооборудование»	6	11	Конспект лекций, ГОСТ 21.614-88, ГОСТ 2.856-75
7	Электрическое освещение	6	11	[1] с. 118...167, [3] с. 23...118, [5] с. 129...171, [6] с. 463...475
8	Расчёт электрических нагрузок и компенсация реактивной мощности	4	11	[1] с. 76...94, [2] с. 369...373, [3] с. 118...137, [6] с. 411...430, РТМ 36.18.32.4-92
9	Выбор числа трансформаторов и трансформаторных подстанций горных предприятий	6	10	[1] с. 411...417, 420...441, [2] с. 55...59, 69...76, 80...86, [3] с. 140...163, [6] с. 251...267
10	Низковольтные распределительные устройства горных предприятий	6	10	[1] с. 23...33, 133...142, [3] с. 163...217, [6] с. 267...281
11	Электрические связи	8	10	[1] с. 369...371, [2] с. 178...215, [4] с. 4...78, [6] с. 286...325
12	Расчёт токов короткого замыкания	6	13	[2] с. 78...137
13	Проверка электрооборудования, электроаппаратов и проводок по действию токов короткого замыкания	6	10	[4] с. 137...149
14	Проектирование мер защиты от поражения человека	5	10	[1] с. 167...249,

№	Наименование, раздела и темы	Самостоятельная работа, часов		Литература (страницы)
		очная	заочная	
	электрическим током на горных предприятиях			[4] с. 149...179, [5] с. 33...129
15	Молниезащита электроустановок горных предприятий	6	10	[6] с. 495...500, СО 153-34.21.122-2003, РД 34.21.122-87
16	Управления электрооборудованием	6	10	[2] с. 94...133, ГОСТ Р МЭК 60204-1-2007

2. ТЕМАТИКА ЛАБОРАТОРНЫХ, ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Таблица 2 – Перечень лабораторных работ

Номер раздела и темы	Наименование тем лабораторных работ	Трудоёмкость, час	
		очная	заочная
5	Рудничная аппаратура дистанционного управления во взрывозащищённом исполнении <i>Литература:</i> [2] с. 94...133, 142...161, 167...175	4	-
11	Изучение силовых кабелей напряжением до 35 кВ включительно <i>Литература:</i> [1] с. 369...371, [2] с. 178...215, [4] с. 4...78, [6] с. 286...325	4	-
14	Изучение устройств непрерывного контроля изоляции в сетях напряжением до 1140 В <i>Литература:</i> [1] с. 167...207, [5] с. 48...91	4	-
16	Изучение релейно-контакторных схем управления электроприводами. <i>Литература:</i> [7] с. 4...25	4	-
Итого:		16	-

Таблица 3 – Перечень практических работ

Номер раздела и темы	Наименование тем практических работ	Трудоёмкость, час	
		очная	заочная
4	Изучение электрооборудования в рудничном нормальном исполнении для распределения электроэнергии в сетях до 1140 В на подземных горных работах <i>Литература:</i> РЭ на изучаемую аппаратуру	4	4
10	Изучение аппаратуры ручного управления в рудничном нормальном исполнении <i>Литература:</i> [2] с. 133...142, 161...167, РЭ на изучаемую аппаратуру	4	4
10	Изучение электрооборудования дистанционного управления в рудничном нормальном исполнении <i>Литература:</i> [2] с. 94...133, 142...161, РЭ на изучаемую аппаратуру	4	4
7	Изучение электрооборудования в рудничном нормальном исполнении для питания ручного электроинструмента и освещения на подземных горных работах <i>Литература:</i>	4	-

Номер раздела и темы	Наименование тем практических работ	Трудоёмкость, час	
		очная	заочная
	[1] с. 136...138, [2] с. 167...175, РЭ на изучаемую аппаратуру		
Итого:		16	16

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Исполнение электрооборудования (категория размещения, климатическое исполнение).
2. Исполнение электрооборудования (степень защиты от внешних воздействий).
3. Исполнение электрооборудования (рудничное нормальное исполнение).
4. Исполнение электрооборудования (взрывозащищённое исполнение).
5. Режимы нейтрали источников питания электроприёмников, их особенности и области применения на горных предприятиях.
6. Различия режимов нейтрали с точки зрения электро- и пожаробезопасности.
7. Электрооборудование технологических установок горных предприятий на ПГР, ОГР, ОФ и ДСФ (особенности, режимы работы).
8. Электрооборудование распределительных сетей горных предприятий (особенности конструкции электрооборудования для ПГР, ОГР ОФ и ДСФ; защиты, блокировки).
9. Электрооборудование для управления электроприводами на горных предприятиях (особенности конструкции электрооборудования для ПГР, ОГР ОФ и ДСФ; защиты, блокировки).
10. Правила черчения электрических схем.
11. Правила черчения планов расположения электрооборудования и прокладки электрических сетей.
12. Вспомогательные элементы чертежей (спецификации, экспликации, виды, разрезы и т. п.)
13. Выбор источников света и световых приборов.
14. Метод удельной мощности для расчёта освещения.
15. Метод светового потока для расчёта освещения.
16. Точечный метод для расчёта освещения.
17. Резервирование осветительной нагрузки.
18. Как выбирается структура распределительной сети горных предприятий?
19. Особенности расчёта электрических нагрузок на ПГР, ОГР и ОФ и ДСФ.
20. Как производится выбор числа трансформаторов трансформаторных подстанций?
21. Как производится выбор числа трансформаторных подстанций для различных видов горных работ.
22. Виды низковольтных распределительных устройств (НКУ),
23. Как производится выбор автоматических выключателей, включая выбор уставок защит. Особенности выбора автоматических выключателей для разных горных работ.
24. Как производится выбор контакторов и пускателей, особенности выбора данных аппаратов для разных горных работ.
25. Выбор типа, сечения и способа прокладки электрических связей распределительных сетей горных предприятий.
26. Как составляются схемы замещения для расчёта токов КЗ.
27. Как производится расчёт сопротивлений схем замещения.

28. Как выполняется расчёт максимальных токов КЗ.
29. Как учитывается при расчёте максимальных токов КЗ подпитка от электроприёмников.
30. Как выполняется расчёт минимальных токов КЗ.
31. Как производится проверка электрооборудования, электроаппаратов и проводок по действию токов короткого замыкания.
32. Как производится расчёт главного заземляющего устройства?
33. Что такое местные заземлители; как устроены сети заземления внутри зданий, на ПГР и ОГР?
34. Как выполняются заземляющие устройства в грунтах с высоким удельным сопротивлением?
35. Что такое пассивная и активная молниезащита.
36. Общие требования к построению схем управления (защиты, блокировки, принципы построения схем управления).
37. Режимы управления (местный/дистанционный; сблокированный/деблокированный);
38. Маркировка электрических цепей.
39. Требования к цветам и местам размещения органов управления и световой сигнализации.
40. Типовые схемы управления электроприводами.
41. Технологические блокировки и блокировки безопасности. Как обеспечивается местное и дистанционное управление.
42. Как обеспечивается защита от потери управляемости в цепях дистанционного управления электрооборудования для ПГР и ОГР.
43. Как обеспечивается защита цепей управления.

4. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1 Основная литература

№ п/п	Наименование
1	Электрификация горного производства [Текст]: учебник для вузов: В 2-х т. Т.1. / А. В. Ляхомский [и др.]; ред. Л. А. Пучков, Г. Г. Пивняк; Московский государственный горный университет. - М.: МГГУ, 2007.- 511 с.: ил.
2	Электрификация горного производства [Текст]: учебник для вузов: В 2-х т. Т.2. / А. В. Ляхомский [и др.]; ред. Л. А. Пучков, Г. Г. Пивняк; Московский государственный горный университет. - М.: МГГУ, 2007.- 595 с.: ил.
3	Электроснабжение и электрооборудование горного производства. Часть 1 [Текст]: учебное пособие / М. Е. Садовников; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: УГГУ, 2016. – 229 с.
4	Электроснабжение и электрооборудование горного производства. Часть 2 [Текст]: учебное пособие / М. Е. Садовников; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: УГГУ, 2016. – 191 с.

4.2 Дополнительная литература

№ п/п	Наименование
1	Электрооборудование и электроснабжение открытых горных работ [Текст]: учебник для вузов / Н. И. Чеботаев. - М.: Горная книга, 2006. - 474 с.: ил.
2	Электроснабжение промышленных предприятий [Текст]: учебник / Б. И. Кудрин. - М.: Интермет Инжиниринг, 2007. - 672 с.: ил.
3	Садовников М. Е. Контактторы, пускатели, электротепловые реле и предохранители [Текст]: учебн. пособие по дисциплине «Электрические и электронные аппараты» для студентов специальности 140604 - «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (ЭГП) очного и заочного обучения / М.Е. Садовников.- Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010.- 64 с.
4	Юнусов Х.Б. Электроснабжение: методические указания по выполнению раздела ВКРИ / Х. Б. Юнусов; Уральский государственный горный университет. - 2-е изд., перераб. и доп. - Екатеринбург: УГГУ, 2010. - 36 с.

5. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО - ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Сайт компании DIAL GmbH - <http://www.dial.de/DIAL/en/dialux-international-download/russkii.html>

Сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) - <https://www.gost.ru/portal/gost//home/standarts/catalognational>

Сайт компании ОАО «ВЭЛАН» - <http://velan.ru/>

Сайт компании ООО "Производственное предприятие шахтной электроаппаратуры" (ШЭЛА) - <http://www.shela71.ru/>

Сайт компании «ЕХС» - <http://www.oaoex.ru/>

Сайт компании Becker Mining Systems <http://www.ru.becker-mining.com/ru/products>

6. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ, ВКЛЮЧАЯ ПЕРЕЧЕНЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

Бесплатное свободно распространяемое версия программное обеспечение для расчёта освещения - пакет DIALux.

Microsoft Windows 8 Professional.

Microsoft Office Standard 2013.

Информационные справочные системы

ИПС «КонсультантПлюс».

Базы данных

Scopus: база данных рефератов и цитирования.

<https://www.scopus.com/customer/profile/display.uri>

E-library: электронная научная библиотека: <https://elibrary.ru>

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Методические указания

по самостоятельной работе студентов

Автор: Хазин М.Л.

Екатеринбург
2021

X12

Рецензенты: Тихонов И. Н., к-т. техн. наук, зав. кафедрой «Электронное машиностроение» УрФУ, Жуков Ю. Н., д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электронное машиностроение» УрФУ

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 05 июня 2018 года (протокол № 6) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Хазин М. Л. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: Методические указания по самостоятельной работе студентов. Урал. гос. горный ун-т – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. – 24 с.

В методических указаниях по самостоятельной работе приведена последовательность выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Материаловедение», изложена методика решения задач, даны задачи, вопросы для самопроверки по разделам.

© Хазин М. Л., 2019
© Уральский государственный
горный университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование производства, выпуск современных разнообразных машиностроительных конструкций, специальных приборов, машин и различной аппаратуры невозможны без дальнейшего развития производства и изыскания новых материалов, как металлических, так и неметаллических.

Материаловедение является одной из первых инженерных дисциплин, основы которой широко используются при курсовом и дипломном проектировании, а также в практической деятельности инженера-машиностроителя.

Прогресс в области машиностроения тесно связан с созданием и освоением новых, наиболее экономичных материалов, обладающих самыми разнообразными механическими и физико-химическими свойствами. Свойства материала определяются его внутренним строением, которое, в свою очередь, зависит от состава и характера предварительной обработки. В курсе "Материаловедение" изучаются физические основы этих связей.

ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ЧАСТЬ I. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Строение металлов

Материаловедение как наука о свойствах металлов и сплавов. Типы связи в твердых телах. Атомно-кристаллическое строение металлов. Процесс кристаллизации.

Рассмотрите типы химической связи в твердых телах, основное внимание обратите на особый тип металлической связи, который обуславливает отличительные свойства металлов: высокую электропроводность и теплопроводность, высокую пластичность и металлический блеск. Металлические тела характеризуются кристаллическим строением. Однако свойства реальных кристаллов определяются известными несовершенствами кристаллического строения. В связи с этим необходимо разобраться в видах несовершенств и особенно в строении дислокаций (линейных несовершенств), причинах их легкого перемещения в кристаллической решетке и влияния на механические свойства.

Термодинамические причины фазовых превращений являются одним из частных случаев общего закона природы: стремления любой системы к состоянию с наименьшим запасом энергии (в данном случае свободной энергии). Уясните теоретические основы процесса кристаллизации, состоящего из двух элементарных процессов: зарождения и роста кристаллов, и влияния на эти параметры степени переохлаждения.

В процессе кристаллизации при формировании структуры литого металла решающее значение имеет реальная среда, а также возможность искусственного воздействия на строение путем модифицирования.

Вопросы для самопроверки

1. В чем сущность металлического, ионного и ковалентного типов связи?
2. Каковы характерные свойства металлов и чем они определяются?
3. Что такое элементарная ячейка?
4. Что такое полиморфизм?
5. Что такое параметр кристаллической решетки, плотность упаковки и координационное число?
6. Что такое мозаичная структура?
7. Виды дислокаций и их строение.
8. Каковы термодинамические условия фазового превращения?
9. Каковы параметры процесса кристаллизации?
10. Что такое переохлаждение?

Теория сплавов

Сплавы, виды взаимодействия компонентов в твердом состоянии. Диаграммы состояния для случаев полной нерастворимости, неограниченной и ограниченной растворимости компонентов в твердом виде, а также для случая образования устойчивого химического соединения.

Необходимо отчетливо представлять строение металлов и сплавов в твердом состоянии. Уясните, что такое твердый раствор, химическое (металлическое) соединение, механическая смесь. Наглядное представление о состоянии любого сплава в зависимости от его состава и температуры дают диаграммы состояния. Нужно усвоить общую методику построения диаграмм состояния для различных случаев взаимодействия компонентов в твердом состоянии.

При изучении диаграмм состояния нужно уметь применять правило отрезков (для определения доли каждой фазы или структурной составляющей в сплаве), правило фаз (для построения кривых нагревания и охлаждения), определять химический состав фаз. С помощью правил Курнакова нужно уметь установить связь между составом, строением и свойствами сплава.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое компонент, фаза, физико-химическая система, число степеней свободы?
2. Приведите объяснение твердого раствора, механической смеси, химического (металлического) соединения.
3. Что представляют собой твердые растворы замещения и внедрения?
4. Как строятся диаграммы состояния?
5. Объясните принцип построения кривых нагревания и охлаждения с помощью правила фаз.

6. Начертите и проанализируйте диаграмму состояния для случая образования непрерывного ряда твердых растворов.

7. Начертите и проанализируйте диаграмму состояния для случая полной нерастворимости компонентов в твердом состоянии.

8. Начертите и проанализируйте диаграмму состояния для случая образования эвтектики, состоящей из ограниченных твердых растворов.

10. Каким образом определяются состав фаз и их количественное соотношение?

Пластическая деформация и механические свойства металлов

Напряжения и деформация. Явление наклепа. Стандартные механические свойства: твердость; характеристики, определяемые при растяжении; ударная вязкость; сопротивление усталости.

Рассмотрите физическую природу деформации и разрушения. Внимание уделите механизму пластической деформации, ее влиянию на плотность дислокаций. Уясните связь между основными характеристиками, строением и механическими свойствами. Разберитесь в сущности явления наклепа и его практическом использовании.

Изучите основные методы исследования механических свойств металлов и физический смысл определяемых при разных методах испытания характеристик.

Вопросы для самопроверки

1. В чем различие между упругой и пластической деформациями?
2. Как изменяется строение металла в процессе пластического деформирования?
3. Как изменяется плотность дислокаций при пластической деформации?
4. Как влияют дислокации на прочность металла?
5. Почему наблюдается огромное различие теоретической и практической прочности?
6. Как влияет изменение строения на свойства деформированного металла?
7. В чем сущность явления наклепа и какое он имеет практическое использование?
8. Какие характеристики механических свойств определяются при испытании на растяжение?
9. Что такое твердость?
10. Какие методы определения твердости вы знаете?

Влияние нагрева на структуру и свойства деформируемого металла

Необходимо знать сущность рекристаллизационных процессов: возврата, первичной рекристаллизации, собирательной (вторичной) рекристаллизации, протекающих при нагреве деформированного металла. Уясните, как при этом изменяются механические, физико-химические свойства и размер зерна. Установите влияние состава сплава и степени пластической деформации на протекание рекристаллизационных процессов. Научитесь выбирать режим рекристаллизационного отжига. Уясните его практическое значение, различие между холодной и горячей пластическими деформациями.

Вопросы для самопроверки

1. Как изменяются свойства деформированного металла при нагреве?
2. В чем сущность процесса возврата?
3. Что такое полигонизация?
4. Сущность процессов первичной и вторичной рекристаллизации.
5. Как влияют состав сплава и степень пластической деформации на температуру рекристаллизации?
6. Что такое критическая степень деформации?
7. В чем различие между холодной и горячей пластическими деформациями?
8. Как изменяются строение и свойства металла при горячей пластической деформации?
9. Каково назначение рекристаллизационного отжига и как он осуществляется?

Железо и его сплавы

Диаграмма состояния железо - цементит. Классификация железоуглеродистых сплавов. ГОСТы на металлы и сплавы. Фазы, образуемые легирующими элементами в сплавах железа. Структурные классы легированных сталей. Чугуны.

Научитесь вычерчивать диаграмму состояния железо - цементит и определять все фазы и структурные составляющие этой системы. С помощью правила фаз постройте кривые охлаждения (или нагревания) для любого сплава; разберитесь в классификации железоуглеродистых сплавов и усойте, что различие между тремя классами (техническое железо, сталь, чугун) не является формальным (по содержанию углерода). Разные классы сплавов принципиально различны по структуре и свойствам. Технические железоуглеродистые сплавы состоят не только из железа и углерода, но и обязательно содержат постоянные примеси, попадающие в сплав в результате предыдущих операций при выплавке.

Изучите влияние легирующих элементов на критические точки железа и стали и объясните, при каком сочетании углерода и соответствующего легирующего элемента могут быть получены легированные стали ферритного, перлитного, аустенитного и ледебуритного классов.

Уясните влияние постоянных примесей на строение чугуна и разберитесь в различии металлической основы серых чугунов разных классов. Запомните основные механические свойства и назначение чугунов различных классов и их маркировку. Обратите внимание на способы получения ковких и высокопрочных чугунов. Изучите физическую сущность процесса графитизации.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое феррит, аустенит, перлит, цементит и ледебурит?
2. Какие превращения происходят в сплавах при температурах A1, A2, A3, A4, Acm?
3. Каковы структуры серых чугунов? 1
4. Каковы структура и свойства технического железа, стали и белого чугуна?
5. Как влияют легирующие элементы на положение критических точек железа и стали?
6. Какие легирующие элементы являются карбидообразующими?
7. Какие легирующие элементы способствуют графитизации?
8. Как влияют легирующие элементы на свойства феррита и аустенита?
9. В чем отличие серого чугуна от белого?
10. Классификация и маркировка серых чугунов.

Теория термической обработки стали

Превращения в стали при нагреве. Превращения переохлажденного аустенита. Мартенситное превращение и его особенности. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении. Превращения при отпуске закаленной стали.

Теория и практика термической обработки стали - главные вопросы металловедения. Термическая обработка - один из основных способов влияния на строение, а следовательно, и на свойства сплавов.

При изучении превращений переохлажденного аустенита особое внимание обратите на диаграмму изотермического распада, устанавливающую связь между температурными условиями превращения, интенсивностью распада и строением продуктов превращения.

Изучите влияние легирующих элементов на кинетику и характер превращения аустенита в перлитной, промежуточной и мартенситной областях. В связи с влиянием легирующих элементов на диаграммы изотермического распада аустенита рассмотрите причины получения различных классов по структуре (перлитного, мартенситного, аустенитного). Уясните влияние ле-

гирующих элементов на превращения при отпуске. Запомните, что легирующие элементы, как правило, затормаживают процессы превращений.

Вопросы для самопроверки

1. Механизм образования аустенита при нагреве стали.
2. Каковы механизмы и температурные районы образования структур перлитного типа (перлита, сорбита, тростита) и бейнита?
3. В чем различие между перлитом, сорбитом и троститом?
4. Что такое мартенсит и в чем сущность и особенности мартенситного превращения?
5. Что такое критическая скорость закалки?
6. От чего зависит количество остаточного аустенита?
7. В чем сущность превращений, происходящих при отпуске?
8. Как влияют легирующие элементы на перлитное превращение?
9. В чем сущность явления отпускной хрупкости?
10. Как влияют легирующие элементы на превращения при отпуске?

Технология термической обработки

Основные виды термической обработки стали. Отжиг, нормализация, закалка, обработка холодом. Прокаливаемость стали. Отпуск стали. Поверхностная закалка.

Уясните влияние скорости охлаждения на структуру и свойства стали и физическую сущность процессов отжига, нормализации, закалки и обработки холодом. При изучении технологических процессов термической обработки особое внимание обратите на разновидности режимов и их назначение. Для выяснения причин брака при термической обработке стали следует прежде всего разобраться в природе термических и фазовых напряжений.

Уясните различие между закаливаемостью и прокаливаемостью стали, а также факторы, влияющие на эти характеристики. Разберитесь в способе получения высокопрочных деталей - термомеханической обработке.

Различные виды поверхностной закалки позволяют получить особое сочетание свойств поверхностного слоя и сердцевины, что приводит к повышению эксплуатационных характеристик изделия.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите определения основных процессов термической обработки: отжига, нормализации и закалки.
2. Какие вам известны разновидности процесса отжига и для чего они применяются?
3. Какова природа фазовых и термических напряжений?
4. Какие вам известны разновидности закалки и в каких случаях они применяются?

5. Каковы виды и причины брака при закалке?
6. Какие Вам известны группы охлаждающих сред и каковы их особенности?
7. От чего зависит прокаливаемость стали и в чем ее технологическое значение?
8. Какие вам известны технологические приемы уменьшения деформации при термической обработке?
9. Для чего и как производится обработка холодом?
10. . В чем сущность и особенности термомеханической обработки.

Химико-термическая обработка стали и поверхностное упрочнение наклепом

Физические основы химико-термической обработки. Цементация. Азотирование. Цианирование. Диффузионная металлизация. Дробеструйный наклеп.

При изучении основ химико-термической обработки следует исходить из того, что принципы химико-термической обработки едины. Процесс химико-термической обработки состоит из выделения атомов насыщающего вещества внешней средой, захвата (сорбции) этих атомов поверхностью металла и диффузии их внутрь металла. Поэтому рассмотрите реакции в газовой среде при цементации или азотировании и усвойте современные представления о процессе диффузии в металлах. В большинстве случаев насыщение может происходить из твердой, жидкой и газовой сред, а поэтому нужно знать наиболее удачные варианты насыщения для каждого метода химико-термической обработки и конечные результаты (поверхностное упрочнение и изменение физико-химических свойств).

Разберитесь в технологии проведения отдельных видов химико-термической обработки. Уясните преимущества и области использования цементации, азотирования, цианирования и различных видов диффузионной металлизации. Объясните влияние легирования на механизм формирования структуры поверхностного слоя. Рассмотрите сущность и назначение дробеструйного поверхностного наклепа и его влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключаются физические основы химико-термической обработки?
2. Химизм процесса азотирования.
3. Химизм процесса цементации.
4. Назначение цементации и режим термической обработки после нее.
5. Для каких целей и как производится нитроцементация?
6. Каковы свойства цементированных и азотированных изделий?
7. Химизм и назначение процесса цианирования.

8. Сущность и назначение процесса борирования.
9. Как изменяются свойства изделий при дробеструйной обработке и какова природа этих изменений?
10. Как влияет поверхностное упрочнение на эксплуатационные характеристики изделий?

Конструкционные стали

Конструкционные стали общего назначения. Цементуемые, улучшаемые, пружинно-рессорные стали. Высокопрочные мартенситостареющие стали. Коррозионно-стойкие и жаростойкие стали и сплавы. Жаропрочные стали и сплавы.

Нужно усвоить принципы маркировки сталей и уметь по маркировке определить состав и особенности данной стали, а также иметь общее представление о разных группах стали.

Разберитесь во влиянии легирующих элементов на изменение структуры и свойств стали, особое внимание уделите технологическим особенностям термической обработки легированной стали различных групп.

Рассмотрите способы классификации, основные принципы выбора для различного назначения цементуемых, улучшаемых, пружинно-рессорных, износостойких, высокопрочных, нержавеющей, жаропрочных и других сталей.

При изучении жаропрочных сталей обратите внимание на особенности поведения металла в условиях нагружения при повышенных температурах. Уясните сущность явления ползучести и основные характеристики жаропрочности; каковы предельные рабочие температуры и области применения сталей различного структурного класса.

В качестве примеров указать две-три марки стали каждой группы, расшифровать состав, назначить режим термической обработки и охарактеризовать структуру, свойства и область применения.

Вопросы для самопроверки

1. Укажите химический состав сталей марок: 40, 20Х, 30ХГСА, 50Г, Г13, ШХ15, 18Х2Н4ВА, 5ХНМ, Х18Н9Т, Н18К8М5Т.
2. Как классифицируются конструкционные стали по технологии термической обработки?
3. Какие требования предъявляются к цементуемым изделиям?
4. Чем определяется выбор марки цементуемой стали для изделий различного назначения?
5. Какова термическая обработка цементуемых деталей?
6. Чем объясняется назначение процесса улучшения для конструкционной стали?
7. Как влияет степень легирования на механические свойства улучшаемой стали?

8. Какие требования предъявляются к рессорно-пружинным сталям?
9. Какие вы знаете износостойкие стали?
10. Каковы требования, предъявляемые к нержавеющей стали?

Инструментальные стали

Классификация и маркировка инструментальных сталей. Стали, не обладающие и обладающие теплостойкостью. Стали для режущего, измерительного и штампового инструмента. Твердые сплавы.

Изучите классификацию инструментальных сталей в зависимости от назначения инструмента и в связи с этим рассмотрите основные эксплуатационные свойства инструмента каждой группы. Особое внимание уделите быстрорежущим сталям. Уясните причины их высокой красностойкости и особенности термической обработки.

Вопросы для самопроверки

1. Укажите химический состав сталей марок: У10, 9ХС, ХВГ, Р18, Р18Ф2, Р9К10, Р9М4К8, Х12, 6ХВ2С, Х12М.
2. Как классифицируются инструментальные стали?
3. Требования, предъявляемые к сталям для режущего инструмента.
4. Приведите примеры углеродистых и легированных сталей, используемых для режущего инструмента.
5. Укажите и расшифруйте основные марки быстрорежущей стали.
6. Что представляют собой твердые сплавы?
7. Каковы свойства и преимущества твердых сплавов?
8. Укажите марки твердых сплавов, их состав и назначение.

Алюминий, магний и их сплавы

Деформируемые и литейные сплавы.

Обратите внимание на основные преимущества алюминиевых и магниевых сплавов, связанные с их высокой удельной прочностью. Рассмотрите классификацию алюминиевых сплавов и обоснуйте технологический способ изготовления изделий из сплавов каждой группы. Разберитесь в основах теории термической обработки (старения) легких сплавов. Обоснуйте выбор способа упрочнения деформируемых и литейных сплавов.

Вопросы для самопроверки

1. Свойства и применение алюминия.
2. Как классифицируются алюминиевые сплавы?
3. Какие сплавы упрочняются путем термической обработки?
4. В чем сущность процесса старения?
5. Какие сплавы не упрочняются путем термической обработки?
6. Какие вы знаете литейные алюминиевые сплавы?

7. Какие вы знаете жаропрочные алюминиевые сплавы?
8. Какие вы знаете порошковые алюминиевые сплавы?
9. Каковы свойства магния?
10. Укажите свойства и назначение сплавов на основе магния.

Медь и ее сплавы

Латуни и бронзы.

Изучите классификацию медных сплавов и уясните маркировку, состав, структуру, свойства и области применения разных групп медных сплавов.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияют примеси на свойства чистой меди?
2. Как классифицируются медные сплавы?
3. Какие сплавы относятся к латуням?
4. Приведите несколько примеров латуней с указанием их состава, структуры, свойств и назначения.
5. Какие сплавы относятся к бронзам? Их маркировка и состав.
6. Укажите строение, свойства и назначение различных бронз.
7. Какой термической обработке подвергается бериллиевая бронза?

Композиционные материалы

Обратите внимание на принципиальное отличие композиционного материала, заключающееся в сочетании разнородных материалов с четкой границей раздела между ними. В связи с тем, что композит обладает свойствами, которыми не может обладать ни один из его компонентов в отдельности, такие материалы становятся весьма перспективными в различных областях новой техники. Укажите свойства композитов в зависимости от вида матрицы и формы, размеров и взаимного расположения наполнителя. Уясните возможность использования композитов в качестве жаропрочных материалов и способы повышения их жаропрочности.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое композиты?
2. Как подразделяют композиты в зависимости от формы и размеров наполнителя?
3. Как подразделяют композиты по виду матрицы?
4. От чего зависят механические свойства композитов?
5. Какие композиционные материалы используют для работы при высоких температурах (жаропрочные)?

ЧАСТЬ II. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Пластические массы

В основе неметаллических материалов лежат полимеры. Обратите внимание на особенности строения полимеров, которые определяют их механические и физико-химические свойства. Классификация полимерных материалов. Свойства и области применения пластмасс.

Пластические массы - искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связывающих веществ, которые являются обязательными компонентами пластмасс. Изучите различные группы пластических масс, их свойства и области применения.

Вопросы для самопроверки

1. Что лежит в основе классификации полимеров?
2. Какие материалы относятся к обратимым и необратимым полимерам?
3. Какие вы знаете наполнители пластмасс?
4. Для чего вводят в пластмассы отвердители?
5. Приведите примеры пластиков с твердыми наполнителями.
6. Укажите область применения термопластов и реактопластов.
7. В чем преимущества пластмасс по сравнению с металлическими материалами? Каковы их недостатки?

Резиновые материалы

Как технический материал резина отличается от других материалов высокими эластичными свойствами, что связано со свойствами самой основы резины - каучука. Уясните состав резины, способы получения и влияние различных добавок на ее свойства. Подробно рассмотрите влияние порошковых и органических наполнителей на свойства резины, изучите физико-механические свойства и области применения резин различных марок.

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой резина?
2. Какие компоненты относятся к совмещающимся и как они влияют на свойства резины?
3. Объясните роль порошковых наполнителей.
4. В каких случаях применяются волокнистые наполнители?

Неорганические материалы

Поскольку большинство неорганических материалов содержит различные соединения кремния с другими элементами, эти материалы получили общее название силикатных материалов. Обратите внимание на внутреннее

строение неорганического стекла. Уясните сущность стеклообразного состояния как разновидности аморфного состояния вещества. Разберитесь в изменении свойств стекла в зависимости от состава. Рассмотрите стеклокристаллические материалы (ситаллы) и их отличие от стекла минерального. Уясните причины образования кристаллической структуры ситаллов.

При изучении керамических материалов обратите внимание на отличие технической керамики от обычной. Разберитесь в химическом и фазовом составе технической керамики, ее свойствах и области применения.

Вопросы для самопроверки

Какие силикатные материалы относятся к минеральному стеклу?

Их отличительные свойства.

Как достигаются электроизоляционные или электропроводящие свойства стекла?

Объясните причины, вызывающие кристаллизацию ситаллов (стеклокристаллитов).

Укажите область применения ситаллов.

5. В чем отличие технической керамики от обычной? Укажите область ее применения.

КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Задания на контрольные работы выдают индивидуально каждому студенту. Задание включает вопросы и задачи по основным разделам курса.

При выполнении контрольных работ студенты изучают методику выбора и назначения сталей и сплавов для изготовления конкретных деталей машин и различного вида инструментов, а также знакомятся с особенностями строения, технологией получения и областью применения наиболее распространенных неметаллических материалов. Одновременно студент должен научиться пользоваться рекомендуемыми справочными материалами, с тем чтобы уметь в дальнейшем правильно выбрать материал при курсовом и дипломном проектировании.

Перечень ГОСТов, необходимых для выполнения контрольных работ, приведен в приложении. Диаграмма состояния железо-цементит и диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали У8 также приведены в приложении (см. рис. 1 и 2).

ЗАДАНИЯ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Вариант 1

1. Что такое ликвация? Виды ликвации, причины их возникновения и способы устранения.

2. Дайте определение ударной вязкости (KCV). Опишите методику измерения этой характеристики механических свойств металла.

3. Вычертите диаграмму состояния железо - карбид железа, укажите структурные составляющие во всех областях диаграммы, опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава, содержащего 3,6% С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости 45...50 HRC. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращений и какая структура получается в данном случае.

5. Как изменяются структура и свойства стали 40 и У12 в результате закалки от температуры 750 и 850° С. Объясните с применением диаграммы состояния железо-цементит. Выберите оптимальный режим нагрева под закалку каждой стали.

Вариант 2

1. Как и почему скорость охлаждения при кристаллизации влияет на строение слитка?

2. Из листа свинца путем прокатки при комнатной температуре была получена тонкая фольга. Твердость и прочность этой фольги оказались такими же, как у исходного листа. Объясните, какие процессы происходили при пластической деформации свинца и какими изменениями структуры и свойств они сопровождались.

3. Вычертите диаграмму состояния железо-карбид железа, укажите структурные составляющие во всех областях диаграммы, опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава, содержащего 0,8% С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Используя диаграмму состояния железо -цементит и кривую изменения твердости в зависимости от температуры отпуска, назначьте для углеродистой стали 40 температуру закалки и температуру отпуска, необходимые для обеспечения твердости 400 НВ. Опишите превращения на всех этапах термической обработки и получаемую структуру.

5. Для каких целей применяется диффузионный отжиг? Как выбирается режим такого отжига? Приведите примеры.

Вариант 3

1. Опишите виды твердых растворов. Приведите примеры.

2. Дайте определение твердости. Какими методами измеряют твердость металлов и сплавов? Опишите их.

3. Вычертите диаграмму состояния железо-цементит, укажите структурные составляющие во всех областях диаграммы, опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава, содержащего 2,2% С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспеч-

печивающей получение твердости 150 НВ. Укажите, как этот режим называется и какая структура получается в данном случае.

5. С помощью диаграммы состояния железо-цементит обоснуйте выбор режима термической обработки, применяемой для устранения цементитной сетки в заэвтектоидной стали. Дайте определение выбранного режима обработки и опишите превращения, которые происходят при нагреве и охлаждении.

Вариант 4

1. Опишите физическую сущность и механизм процесса кристаллизации.

2. Для чего проводится рекристаллизационный отжиг? Как назначается режим этого вида обработки? Приведите несколько конкретных примеров.

3. Опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава, содержащего 0,4 % С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Используя диаграмму изотермического превращения аустенита, объясните, почему нельзя получить в стали чисто мартенситную структуру при охлаждении ее со скоростью меньше критической?

5. После термической обработки углеродистой стали получена структура цементит + мартенсит отпуска. Нанесите на диаграмму состояния железо-цементит ординату заданной стали (примерно) и обоснуйте температуру нагрева этой стали под закалку. Так же укажите температуру отпуска.. Опишите превращения, которые произошли при термической обработке.

Вариант 5

1. Что такое ограниченные и неограниченные твердые растворы? Каковы необходимые условия образования неограниченных твердых растворов?

2. Опишите сущность явления наклепа и примеры его практического использования.

3. Постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава содержащего 1,1% С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. При непрерывном охлаждении стали У8 получена структура троостит + мартенсит. Нанесите на диаграмму изотермического превращения аустенита кривую охлаждения, обеспечивающую получение данной структуры. Укажите интервалы температур превращений и опишите характер превращения в каждом из них.

5. С помощью диаграммы состояния железо - цементит установите температуру полной и неполной закалки для стали 45 и опишите структуру и свойства стали после каждого вида термической обработки.

Вариант 6

1. Начертите диаграмму состояния для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом виде. Укажите структурные составляющие во всех областях этой диаграммы и опишите строение типичных сплавов различного состава, встречающихся в этой системе.

2. Волочение медной проволоки проводят в несколько переходов. В не-

которых случаях проволока на последних переходах разрывается. Объясните причину разрыва и укажите способ его предупреждения.

3. Опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава железа, содержащего 0,5 % С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости 200 НВ. Укажите, как этот режим называется и какая структура получается в этом случае.

5. Используя диаграмму состояния железо-цементит, установите температуры нормализации, отжига и закалки для стали У12. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите структуру и свойства стали после каждого вида обработки.

Вариант 7

1. Опишите явление полиморфизма в приложении к железу. Какое практическое значение оно имеет?

2. Как изменяются свойства деформированного металла при нагреве, какие процессы происходят при этом?

3. Постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава железа, содержащего 0,7 % С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита стали У8. Нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей твердость 20...25 HRC. Укажите, как этот режим называется и какая структура образуется в данном случае.

5. Плашки из стали УНА закалены: первая - от температуры 760° С, вторая - от температуры 850° С. Используя диаграмму состояния железо - цементит, укажите температуры закалки, объясните, какая из этих плашек закалена правильно, имеет более высокие режущие свойства и почему.

Варианта 8

1. В чем сущность процесса модифицирования? Приведите пример использования модификаторов для повышения свойств литейных алюминиевых сплавов.

2. В чем различие между холодной и горячей пластической деформацией? Опишите особенности обоих видов деформации.

3. Опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава железа, содержащего 5,0 % С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Углеродистые стали 35 и У8 после закалки и отпуска имеют структуру мартенсит отпуска и твердость: первая 45 HRC, вторая - 60 HRC. Используя диаграмму состояния железо - цементит и учитывая превращения, происходящие при отпуске, укажите температуру закалки и температуру отпуска для каждой стали. Опишите превращения, происходящие в этих сталях в процессе закалки и отпуска, и объясните, почему сталь У8 имеет большую твердость, чем сталь 35.

5. Сталь 40 подвергалась закалке от температур 760 и 840° С. С помощью диаграммы состояния железо-цементит укажите, какие структуры образуются в каждом случае. Объясните причины образования разных структур и рекоменруйте оптимальный режим нагрева под закалку данной стали.

Вариант 9

1. Охарактеризуйте особенности металлического типа связи и основные свойства металлов.

2. Какими стандартными характеристиками механических свойств оценивается прочность металлов и сплавов? Как эти характеристики определяются?

3. Постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава железа, содержащего 4,8 % С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. С помощью диаграммы состояния железо-цементит установите температуру полного и неполного отжига и нормализации для стали 20, Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите структуру и свойства стали.

5. Почему для изготовления инструмента применяется сталь с исходной структурой зернистого перлита? В результате какой термической обработки можно получить эту структуру? Приведите конкретный режим для любой инструментальной стали.

Вариант 10

1. Опишите явление полиморфизма в приложении к титану. Какое практическое значение оно имеет?

2. Каким способом можно восстановить пластичность холоднокатаной медной ленты? Назначьте режим термической обработки и опишите сущность происходящих процессов.

3. Постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава железа, содержащего 1,4% С. Какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

4. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на нее кривую режима термической обработки, обеспечивающей получение твердости 60...63 НРС. Укажите, как этот режим называется и какая структура при этом получается. Опишите сущность происходящих превращений.

5. С помощью диаграммы состояния железо-цементит опишите структурные превращения, происходящие при нагреве доэвтектоидной стали. Покажите критические точки АС1 и АС3 для выбранной вами стали. Установите режим нагрева этой стали под закалку. Охарактеризуйте процесс закалки, опишите получаемую структуру и свойства стали.

ЛИТЕРАТУРА

Арзамасов Б. Н., Сидорин И. И. и др. Материаловедение: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2008. 648 с.

Батышев А. И., Безпалько В. И., Смолькин А. А. Материаловедение и технология материалов М.: Изд-во Инфра-М, 2012. 288 с.

Богодухов С. И., Козик Е. С.. Материаловедение: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2015. 504 с.

Бондаренко, Г. Г. Кабанова Т. А., Рыбалко В. В. Материаловедение: учебник для бакалавров / под ред. Г. Г. Бондаренко. 2-е изд. М.: Юрайт, 2014. 359 с.

Комаров О. С., Керженцева А. Ф., Макаева Г. Г. Материаловедение в машиностроении. М.: Высшая школа. 2009. 304 с.

Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 2009. 528 с.

Хазин М. Л. Материаловедение: методические материалы. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2008. 208 с.

Хазин М. Л. Материаловедение: учебно-практическое пособие. Урал. гос. горный ун-т – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. – 184 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

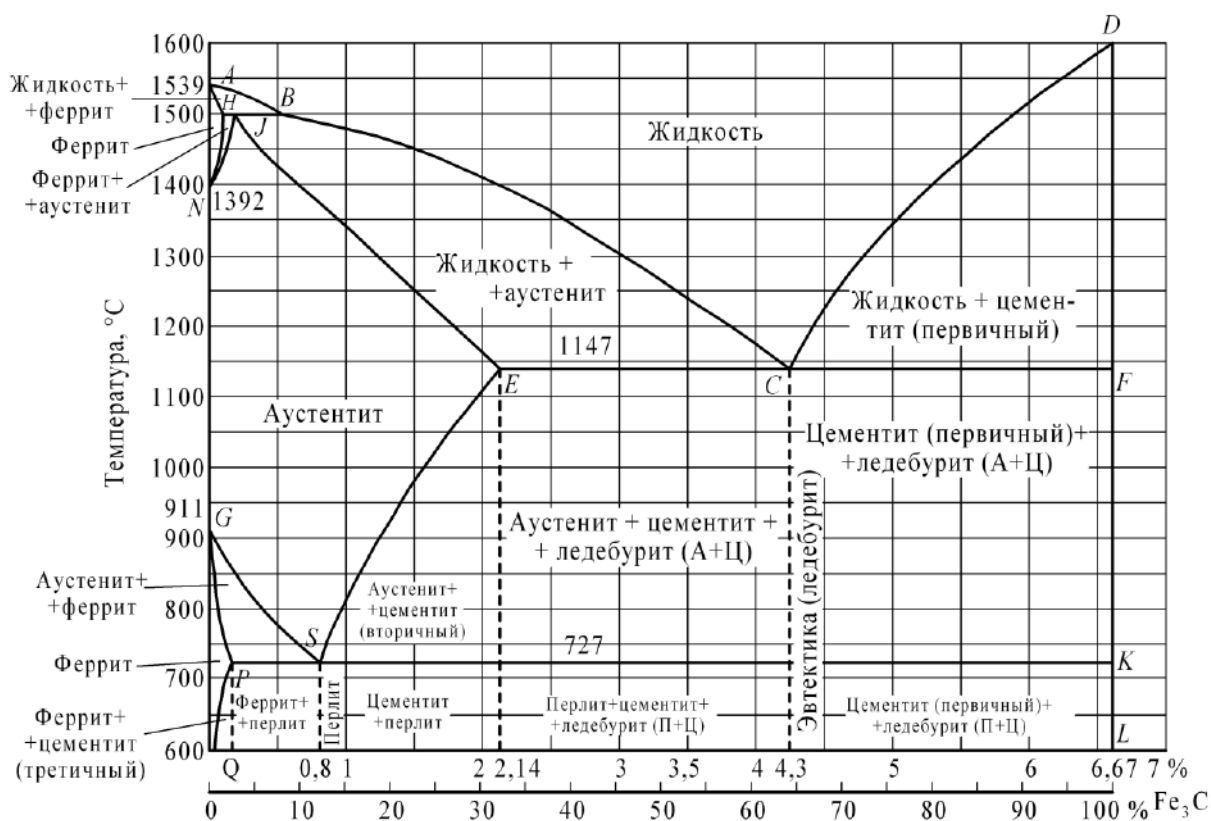


Рисунок 1 – Диаграмма состояния железо-цементит

Перечень ГОСТов на стали и сплавы

1. Сталь

Углеродистая обыкновенного качества – ГОСТ 380-71

Углеродистая качественная – ГОСТ 1050-74

Легированная, конструкционная, качественная, рессорно-пружинная – ГОСТ 1050-74

Углеродистая инструментальная – ГОСТ 1435-74

Легированная инструментальная – ГОСТ 5950-73

Подшипниковая – ГОСТ 801-78

Быстрорежущие стали – ГОСТ 19265-73

Конструкционный повышенной и высокой обрабатываемости резанием – ГОСТ 1414-75

Жаростойкие и жаропрочные – ГОСТ 5632-72

Коррозионностойкие – ГОСТ 5632-72

Сплавы твердые спеченные – ГОСТ 3882-74

Магнитотвердые (для постоянных магнитов) – ГОСТ 6862-71

Электротехнические – ГОСТ 21427.0-75...

ГОСТ 21427.3-75

2. Чугун

Серый – ГОСТ 1412-79

Ковкий – ГОСТ 1215-79

Высокопрочный – ГОСТ 7293-85

Жаростойкий – ГОСТ 7769-75

3. Алюминий и его сплавы

Алюминий – ГОСТ 11069-74

Деформируемые – ГОСТ 4784-74

Литейные – ГОСТ 2685-75

4. Медь и ее сплавы

Медь ГОСТ 859 – 78

Латунь двойная и многокомпонентная

деформируемая – ГОСТ 15527-70

Латунь литейная – ГОСТ 17711-80

Бронза оловянистая деформируемая – ГОСТ 5017-74

Бронза безоловянистая деформируемая – ГОСТ 18175-78

Бронза оловянистая литейная – ГОСТ 613-79

Бронза безоловянистая литейная – ГОСТ 493-79

Медно-никелевые сплавы – ГОСТ 492-73

5. Титановые сплавы – ГОСТ 19807-74

6. Антифрикционные сплавы

Алюминиевые – ГОСТ 14113-78

Цинковые – ГОСТ 21437-75

Баббиты – ГОСТ 1320-74

7. Магний и его сплавы

Магний – ГОСТ 804-72

Деформируемые – ГОСТ 14957-76

Литейные – ГОСТ 2856-79

Учебное издание

Хазин Марк Леонтьевич

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебно-практическое пособие
по выполнению практических и
самостоятельных работ
для студентов очного и заочного обучения
направлений бакалавриата
15.03.01 – «Машиностроение»,
15.03.02 – «Технологические машины и оборудование»
23.03.01 «Технология транспортных процессов»

Редактор Л. В. Устьянцева

Компьютерная верстка автора

Подписано в печать

Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.

Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.

Печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,71. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Рассмотрены электротехнические системы промышленных объектов и технических средств нефтегазовой и горной отраслей минерально-сырьевого комплекса. Приведены топологии полупроводниковых преобразователей частоты, используемых в асинхронных электроприводах. Показаны имитационные модели электроприводов с полупроводниковыми преобразователями. Приведены результаты исследования электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью электроснабжения и приводным электродвигателем.

Васильев Б. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

ВУЗ

Учебное пособие

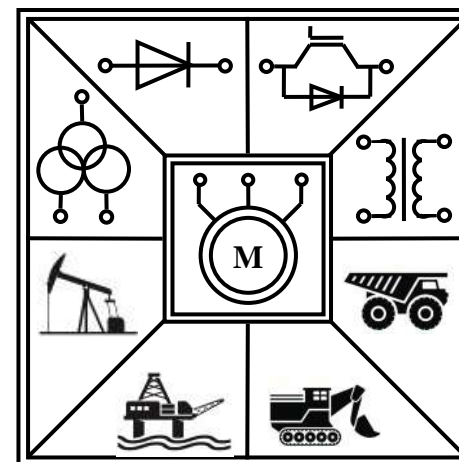


Б. Ю. ВАСИЛЬЕВ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО
КОМПЛЕКСА**

(применение, моделирование, исследование)

Учебное пособие



2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Б.Ю. ВАСИЛЬЕВ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО
КОМПЛЕКСА
(применение, моделирование, исследование)**

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2014

УДК 621.313. 333.07
ББК 31.291
В191

Рассмотрены электротехнические системы промышленных объектов и технических средств нефтегазовой и горной отраслей минерально-сырьевого комплекса. Приведены топологии полупроводниковых преобразователей частоты, используемых в асинхронных электроприводах. Показаны имитационные модели электроприводов с полупроводниковыми преобразователями. Приведены результаты исследования электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью электроснабжения и приводным электродвигателем.

Учебное пособие предназначено для студентов очных и заочных форм обучения специальности 130400 «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства», студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профилю подготовки «Электропривод и автоматика», магистров, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника», программ подготовки «Электроприводы и системы управления электроприводов» и «Автоматизированные электромеханические комплексы и системы», аспирантов профильных специальностей. Учебное пособие может быть полезно инженерно-техническим работникам предприятий минерально-сырьевого комплекса.

Научный редактор проф. *А.Е. Козярук*.

Васильев Б.Ю.

В191 Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование): Учебное пособие / Б.Ю. Васильев; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2014. 139 с.

ISBN 978-5-94211-931-4

УДК 621.313. 333.07
ББК 31.291

ISBN 978-5-94211-931-4

© Б.Ю. Васильев 2014

ВВЕДЕНИЕ

Электропривод на основе асинхронных электродвигателей и полупроводниковых преобразователей, как основа современных энергоэффективных и энергосберегающих электротехнических систем промышленных объектов и технических средств нефтегазовой и горной отраслей минерально-сырьевого комплекса, представляет особый интерес для исследования и совершенствования их структур, алгоритмов управления и характеристик.

В настоящее время, использование имитационного моделирования электромеханических и электромагнитных процессов, протекающих в электроприводах переменного тока с полупроводниковыми преобразователями, является неотъемлемой, и даже обязательной частью процесса исследования электроприводов и выработке рекомендаций по повышению их эффективности, в части электромагнитной [1], электромеханической [2] и энергетической [3,4] совместимости, обеспечения высоких динамических, энергетических, эксплуатационных и других характеристик.

Современные регулируемые электроприводы различных машин и механизмов имеют сложные топологические структуры и архитектуры алгоритмического обеспечения. Для их исследования наиболее широкое распространение получил пакет прикладных программ MatLab, содержащий различные библиотеки, используемые во многих областях науки, в том числе, и библиотеку Sim Power System, для создания имитационных моделей электроприводов с полупроводниковыми преобразователями. Библиотека Sim Power System MatLab содержит стандартные блоки, моделирующие электродвигатели, простые структуры полупроводниковых преобразователей, элементы управления и электротехнические элементы.

В первой главе учебного пособия приведены некоторые примеры использования электротехнических систем с электроприводами и преобразователями частоты на промышленных объектах и в технических средствах нефтегазовой и горной отрасли. Рассмотрены структуры электроприводов на основе асинхронных электродвигателей и приведены их характеристики.

Во второй главе учебного пособия приведены имитационные модели элементов современных электроприводов. Рассмотрены неуправляемые выпрямители повышенной пульсности и активные выпрямители, автономные инверторы и элементы систем управления полупроводниковыми ключами преобразователей.

В третьей главе приведены реализованные в MatLab имитационные модели электротехнических систем промышленных объектов и технических средств нефтегазовой и горной отрасли, которые рассмотрены в первой главе. Изложены их состав и основные параметры. Приведены результаты моделирования полупроводниковых преобразователей частоты, и выполнен анализ электромагнитной совместимости.

1. ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ

1.1. Общая классификация преобразователей частоты асинхронных электроприводов

Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты можно условно разделить на преобразователи с непосредственной связью и двухзвенные преобразователи. Условная классификация приведена на рис. 1.1. Классификация преобразователей на инверторы напряжения и инверторы тока на рис. 1.1 не показана.

В преобразователях с непосредственной связью используется прямое подключение нагрузки к источнику напряжения посредством силовых полупроводниковых ключей. В процессе функционирования потребитель подключается к сети по определенному алгоритму, так, чтобы обеспечить синусоидальность напряжения с заданной амплитудой и частотой. Недостатками непосредственных преобразователей являются: ограниченный диапазон частот выходного напряжения, потребление реактивной мощности и генерирование высших гармоник.

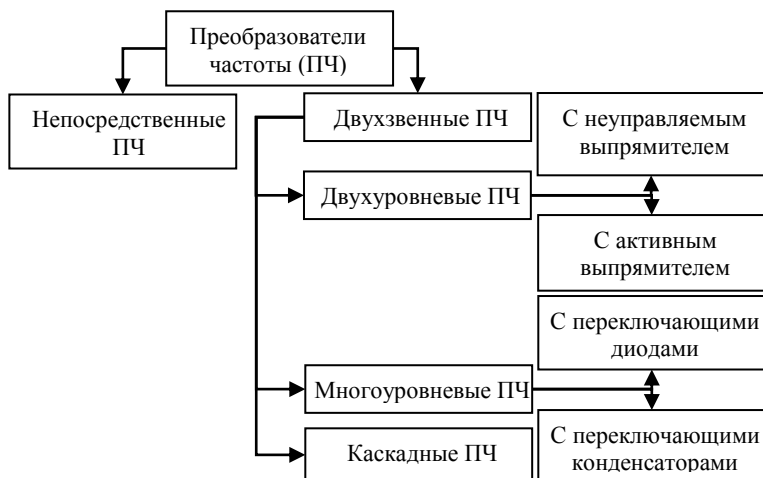


Рис.1.1. Классификация преобразователей частоты

Электромагнитная совместимость двухзвенного преобразователя частоты с сетью электроснабжения и приводным электродвигателем определяется топологией преобразователя, способом формирования требуемого напряжения на выходе автономного инвертора, алгоритмом управления режимами работы электродвигателя и выпрямителя. Звено постоянного тока может питать несколько инверторов, например, в случае многодвигательного электропривода или в случае двигателя с несколькими системами трёхфазных обмоток.

На рис.1.2 представлены приблизительные области предельных значений токов и напряжений различных типов полупроводниковых приборов: MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor), GTO (gate turn-off thyristor), IGCT (integrated gate-commutated thyristor), IGBT (insulated gate bipolar transistor).

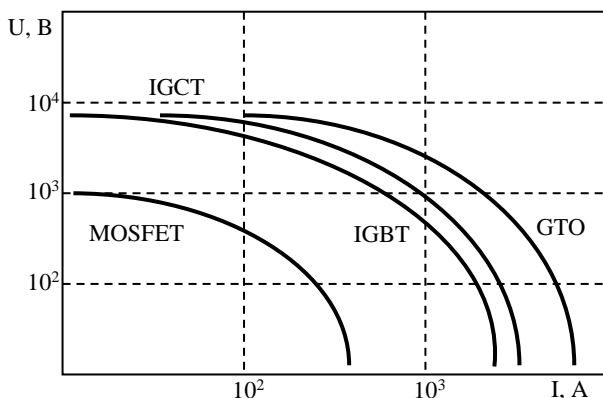


Рис.1.2. Предельные характеристики современных силовых полупроводниковых приборов

Тиристоры типа GTO - это полностью управляемые полупроводниковые ключи. Максимальное напряжение таких тиристоров достигает 6 кВ, а в открытом состоянии GTO тиристор способен пропускать ток величиной до 5 кА. Использование GTO тиристоров требует применения специальных защитных цепей (снабберных цепей) для ограничения скорости нарастания тока (напряжения) при коммутации. Частота переключения (модуляции) GTO тиристоров находится в пределах от 200 до 500 Гц. Среднее время перехода от включенного к выключенному состоянию и обратно составляет от 10 до 30 мкс.

Низкая частота переключения приводит к тому, что токи и напряжения на входе и выходе преобразователя частоты имеют значительные искажения, устранение которых требует применения мощных фильтров. Это увеличивает массогабаритные показатели и стоимость преобразователя. Иногда требуется использование дополнительных охлаждающих устройств, которые являются необходимыми для нормального функционирования приборов.

Тиристоры IGCT, также полностью управляемые ключи, могут использоваться в диапазоне 0,5 - 6 МВА. Частота переключения достигает 600 Гц, однако, применение защитных цепей не обязательно, что является их преимуществом.

Полупроводниковые приборы MOSFET - это полностью управляемые полевые транзисторные ключи. Величина активного сопротивления в открытом состоянии значительно ниже, чем у тиристоров, рассмотренных выше. Это позволяет использовать их в высокочастотных сильноточных схемах. Одной из особенностей транзисторов MOSFET является их высокая чувствительность к статическому электричеству, что необходимо учитывать при хранении и монтаже.

Высокомощные полностью управляемые IGBT транзисторы с обратными диодами, в настоящее время, являются самыми распространенными полупроводниковыми приборами. Устройства IGBT выпускаются в модульном исполнении, поскольку конструкция прижимного типа, характерная для IGCT и GTO, является сложной и дорогостоящей.

При построении преобразователей на IGBT модулях возможно значительное увеличение частоты переключения до нескольких килогерц, что позволяет упростить фильтрацию токов и напряжений на выходе преобразователя. Следует отметить, что с увеличением пропускной способности IGBT устройств, предельное значение частоты модуляции падает вследствие возрастания потерь в приборах. КПД устройств на IGBT составляет до 98%. Топология преобразователя зависит от способа деления напряжения между отдельными ячейками преобразователя частоты и способа формирования выходного напряжения.

Сравнение основных характеристик полупроводниковых приборов, используемых в электроприводах, произведён в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики современных мощных силовых полупроводниковых ключей

Тип прибора	Преимущества	Недостатки	Области применения
SCR	низкие потери во включённом состоянии; высокая перегрузочная способность; высокая надёжность	естественная коммутация при за- крытии; низкая частота переключения	электроприводы постоянного тока; источники питания; сварка; плавление и нагрев
GTO	полностью управляемые; высокая перегрузочная способность; частота переключения до 500 Гц при напряжении до 6 кВ	низкая частота переключения; высокие массогабаритные показате- ли преобразователей; высокие коммутационные потери; высокие потери во включённом со- стоянии	электроприводы; компенсаторы реактивной мощ- ности; системы бесперебойного пита- ния
IGCT	полностью управляемые; высокая перегрузочная способность; частота переключения выше, чем у GTO; нет защитных цепей	частота переключения не более 2000 Гц	выпрямительно-инверторные терминалы линий электропере- дач постоянного тока; электроприводы
MOSFET	высокое входное сопротивление; высокая помехоустойчивость; высокая надёжность; высокая частоты переключения	низкая предельная температура; высокие потери выше 1500 Гц; чувствительны к статическому электричеству	электроприводы; устройства электропитания и зарядные устройства; усилители низкой частоты
IGBT	высокая частота переключения; простота управления; встроенный драйвер	высокий ток управления; зависимость параметров от темпе- ратуры	электроприводы; источники питания; активные фильтры

1.2. Электротехническая система перемещения и динамического позиционирования буровой платформы

Северные и арктические моря, в которых в настоящее время производится разведка и эксплуатация наиболее перспективных шельфовых месторождений углеводородов (нефти, газа, конденсата), представляют собой экстремальную среду для работы электрооборудования, которое используется в составе технических средств освоения шельфа. Воздействие ветра, волн, соленой воды и удаленность от берега делают вопросы надежности и технического обслуживания оборудования чрезвычайно важными.

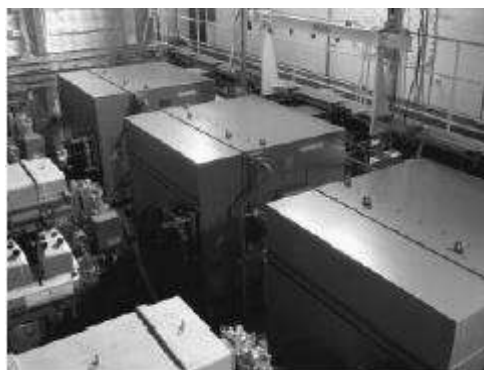
В состав электротехнического оборудования современных буровых и добывающих платформ входит система перемещения и динамического позиционирования. Одной из наиболее современных буровых установок по добыче нефти является платформа Stena Don, которая обеспечивает бурение скважин в Северном море. Внешний вид платформы Stena Don представлен на рис.1.3а [5,6]. Другими задачами платформы также являются открытие новых и эксплуатация существующих месторождений нефти, расположенных на глубине до 500 м.

Вся конструкция платформы, включая буровую вышку, буровое оборудование и вертолетную площадку, располагается на двух скрепленных между собой понтонах, каждый из которых имеет примерно 43 м в высоту и 95 м в длину. Под каждым понтоном установлены три азимутальных поворотных движителя (АПД), которые даже при экстремальных погодных условиях удерживают платформу на заданной позиции с помощью системы динамического позиционирования. По норвежской классификации «Dynamic Positioning» данная система позиционирования отвечает самым высоким требованиям.

Работа всех шести азимутальных поворотных движителей, которые без якорей удерживают буровую платформу в заданном месте и перемещают ее с одной рабочей площадки на другую, осуществляется с помощью системы динамического позиционирования. Структурная схема системы перемещения и динамического позиционирования буровой платформы представлена на рис.1.4.



а)



б)

Рис. 1.3а. Внешний вид буровой платформы Stena Don и электроприводов системы динамического позиционирования

В состав электротехнической системы привода системы перемещения и динамического позиционирования платформы входят следующие элементы: дизель генераторы (девять блоков с номинальной мощностью 4375 кВА); распределительные устройства (три блока с номинальной мощностью 5000 кВА); трансформаторы

(шесть блоков с номинальной мощностью 800 кВА); высоковольтные щиты управления (три блока с номинальной мощностью 800 кВА).

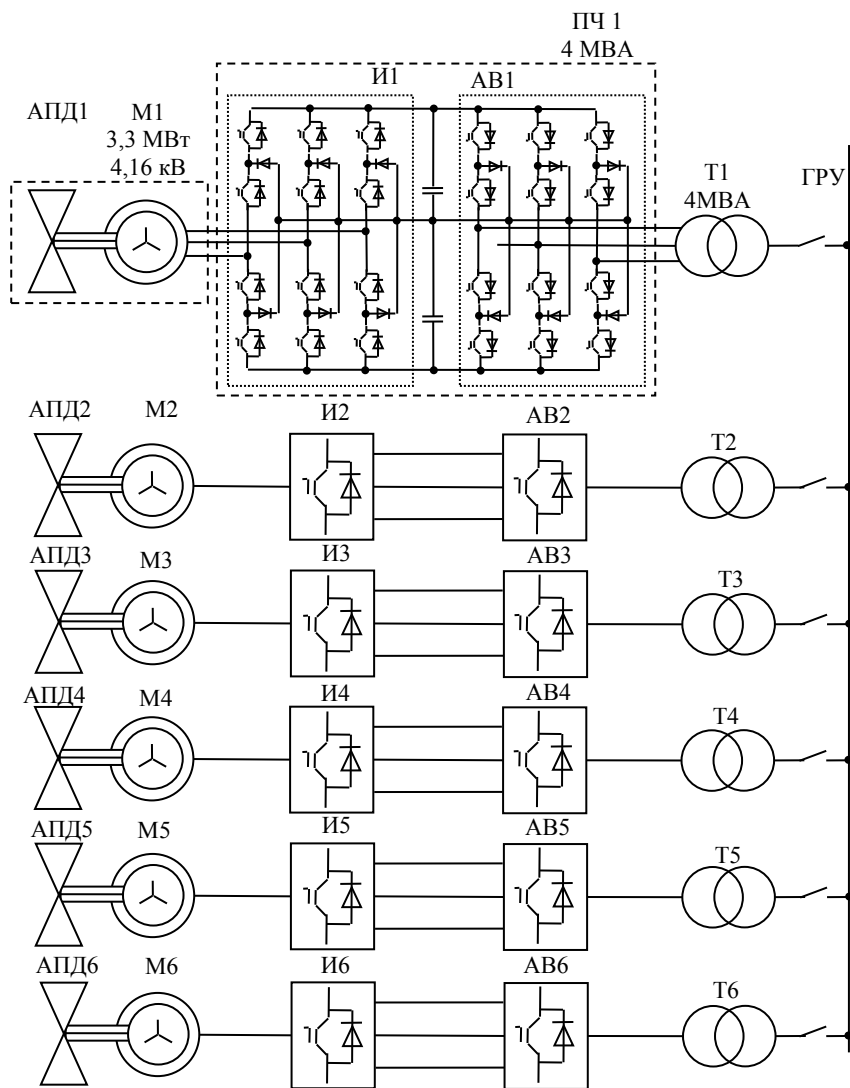


Рис.1.4. Структурная схема системы перемещения и динамического позиционирования буровой платформы

Каждая система электропривода АПД состоит из трех основных элементов: высоковольтного электродвигателя Siemens H-modul мощностью 3,3 МВт; преобразователя частоты Siemens Simovert MV (VFD) мощностью 4,0 МВА; трансформатора Geafol мощностью 4,2 МВА. Внешний вид элементов электроприводов системы динамического позиционирования представлен на рис.1.3б.

Асинхронные электродвигатели, входящие в состав АПД, имеют вертикальную конструкцию и водяное охлаждение. Они представляют собой трехфазные асинхронные 6-полюсные машины переменного тока, работающие при напряжении 4,16 кВ. Двигатели имеют степень защиты IP54.

Преобразователи частоты Siemens Simovert MV мощностью 4000 кВА рассчитаны на напряжение 4,16 кВ. В состав преобразователя частоты входят трехуровневые коммутаторы типа активный выпрямитель и автономный инвертор, выполненные на полностью управляемых транзисторах (IGBT). Их применение позволяет обеспечить высокий уровень электромагнитной совместимости преобразователя без дополнительных силовых схем (фильтров, компенсаторов и других устройств). Звено постоянного тока выполнено в виде конденсаторных накопителей. Преобразователи частоты также имеют водяное охлаждение и степень защиты IP54.

На входе каждого преобразователя частоты установлены трансформаторы Geafol, которые имеют мощность 4200 кВА, рассчитанные на напряжение 11 кВ. Их степень защиты IP23. Для выработки электрической энергии на буровой платформе используются девять дизель-генераторов, а электроснабжение электроприводов АПД осуществляется напряжением 11 кВ.

В электроприводе АПД применяется векторное управление с ориентацией по потокосцеплению ротора. Использование векторного управления в сочетании с трехуровневой структурой коммутаторов преобразователя частоты обеспечивает генерацию синусоидальных токов статора асинхронного двигателя без использования выходного фильтра.

Регулирование частоты вращения АПД позволяет подобрать скорость гребного винта в соответствии с определенными условиями. Так, например, можно запустить все шесть движителей для достижения максимальной скорости перемещения при движении от одной буровой площадки до другой, или удерживать платформу в

определенном положении в сложных погодных условиях. Можно также работать в режиме «холостого хода» при одном или двух запущенных двигателях в условиях спокойного моря.

Система автоматизации плавучей платформы включает системы управления технологическими процессами, электропитанием, а также систему динамического позиционирования и систему телекоммуникации. Система управления электропитанием компании Siemens обеспечивает автоматическое управление и мониторинг процессов генерации и распределения электроэнергии платформы. Она включает меры по обеспечению высокого качества электроэнергии. Всесторонний контроль и мониторинг способствуют увеличению потенциала экономии энергии благодаря использованию регулируемых электроприводов.

1.3. Электропривод двигателей плавучего добывающего комплекса корабельного типа

На борту плавучего добывающего комплекса корабельного типа (Floating Production Unit (FPU)) производится переработка газа, а также разделение газа и конденсата. Внешний вид плавучего добывающего комплекса представлен на рис.1.5. Добывающие комплексы аналогичной конструкции используются при освоения Штокмановского месторождения углеводородов.



Рис. 1.5. Внешний вид плавучего добывающего комплекса корабельного типа

Основной технологический процесс включает сепарацию газа, воды и конденсата, с последующей осушкой первого. Обеспечивается откачка конденсата и раздельное нагнетание газа и конденсата в трубопроводы. Передвижение добывающего комплекса возможно благодаря электроприводной гребной установке, структурная схема которой показана на рис.1.6 [7,8].

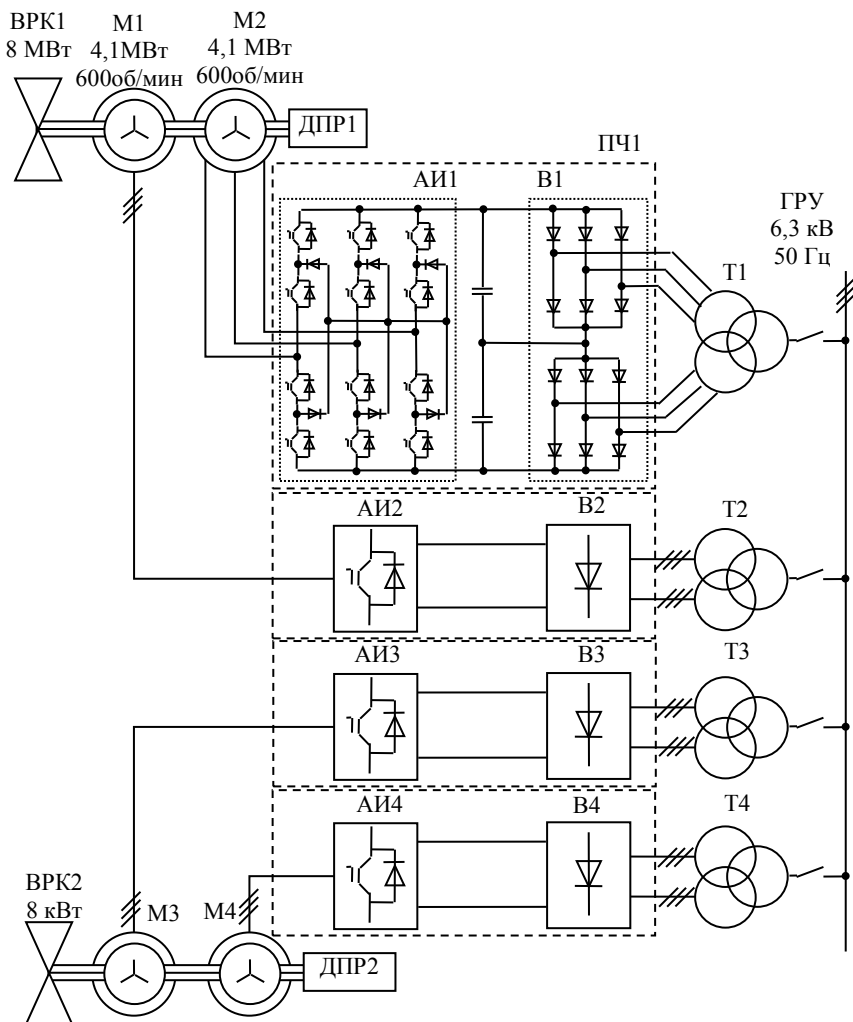


Рис.1.6. Структурная схема гребной установки плавучего добывающего комплекса

В качестве главных источников электроэнергии используются четыре главных дизель-генератора (ГДГ) переменного тока, производства компании «Wartsila» (Финляндия): два синхронных трехфазных генератора мощностью по 6000 кВт и два мощностью по 4500 кВт. Генераторы обеспечивают поддержание напряжения на уровне 6,3 кВ частотой 50 Гц. Частота вращения 750 об/мин.

Главные дизель-генераторы в различных режимах работы судна, например, на ходу и при маневрировании, используются для питания электроприводов гребной установки, подруливающего устройства, общесудовых потребителей, а при стоянке и при спасательных работах - для питания насосов специального пожаротушения, подруливающего устройства и общесудовых потребителей.

Для обеспечения электроэнергией электроприводов гребной установки используется главное распределительное устройство (ГРУ) 6,3 кВ. Компанией производителем такого ГРУ является «Aker Kvaerner Power and Automation Systems» (Норвегия).

В качестве движителей в гребных установках используются две азимутальные винто-рулевые колонки (ВРК), производства компании «Steerprop» (Финляндия). Мощность каждой колонки составляет 8000 кВт. Для привода ВРК используются четыре гребных электродвигателя переменного тока фирмы «Aker Kvaerner Power and Automation Systems». Приводные трехфазные асинхронные электродвигатели имеют номинальную мощность 4100 кВт каждый. Частота вращения 600 об/мин. На каждый вал ВРК установлено по два двигателя, получающих питание от разных секций ГРУ через преобразователи частоты.

Для обеспечения плавного регулирования частоты вращения каждого гребного электродвигателя используются полупроводниковые преобразователи частоты, выполненные по двухзвенной схеме, с емкостным звеном постоянного тока. В состав каждого преобразователя частоты входит трансформатор с двумя вторичными обмотками (Т1). К вторичным обмоткам трансформатора подключен 12-пульсный выпрямитель (В1) с параллельным соединением выпрямительных трехфазных диодных мостов. На выходе преобразователя частоты установлен автономный инвертор (АИ1), выполненный по трехуровневой схеме, на полностью управляемых транзисторах (IGBT). Преобразователь частоты произведен компанией «Aker Kvaerner Power and Automation Systems».

Система автоматического регулирования частоты вращения и мощности приводных электродвигателей выполнена на основе векторного алгоритма. Система управления обеспечивает постоянство мощности во всем диапазоне регулирования частоты вращения ВРК от режима швартовки до режима полного хода, а при увеличении нагрузки на винтах сверх располагаемой мощности, частота вращения ВРК снижается вплоть до нулевого значения, при этом, момент на валу не превышает $1,7 M_{ном}$. Кроме того, система обеспечивает ограничение мощности ГДГ при недостаточном запасе мощности в сети 6,3 кВ (при этом учитывается количество работающих ГДГ и мощность, потребляемая судовым оборудованием).

Основным достоинством регулируемого электропривода ВРК на основе асинхронных двигателей, преобразователей частоты и векторных алгоритмов системы автоматического управления заключается в обеспечении высоких динамических характеристик. Кроме того, для автоматического регулирования мощности ГДГ предусмотрена система управления электроэнергетической установкой, являющаяся частью интегрированной системы управления, контроля и сигнализации.

Несмотря на ряд недостатков асинхронных электродвигателей (потери на скольжении, пониженный коэффициент мощности), их использование дает серьезные преимущества по сравнению с синхронными машинами, которые заключаются в следующем: отсутствие оборудования для системы возбуждения (трансформаторы, система управления возбуждением и т.д.); уменьшение массогабаритных характеристик; повышение надежности; упрощение обслуживания при эксплуатации.

1.4. Электроприводные агрегаты для транспортировки углеводородов по континентальным трубопроводам

В приводе насосных агрегатов на нефтеперекачивающих станциях, в настоящее время, используются синхронные и короткозамкнутые асинхронные электродвигатели. В качестве синхронного привода в основном используются высоковольтные электродвигатели типа СТД (мощностью 1250-8000 кВт) и СТДП (мощностью 630-12500 кВт). В асинхронном электроприводе насосных агрегатов используются высоковольтные электродвигатели типа 4АТД (мощностью 500-5000кВт).

В составе электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях используются как синхронные (СТМ-4000, СТД; СТД-12,5; СДГ-12,5; ЭГПА-25; ЭГПА-Ц-6,3), так и асинхронные электрические (АЗ-4500-1500) двигатели различных производителей. Основные преимущества современных электроприводных ГПА, по сравнению с агрегатами других типов (газотурбинными и газомоторными), заключаются в следующем: высокая надежность; минимальные затраты на капитальный ремонт; большой моторесурс узлов и деталей; простота автоматизации и управления (регулирования); экологическая чистота; пожаробезопасность.

В настоящее время, основу электроприводных установок транспортировки углеводородов составляют синхронные двигатели. Основные преимущества электрических машин этого типа заключаются в следующем: обеспечивают возможность работы электропривода с единичным коэффициентом мощности; обладают меньшей чувствительностью к перепаду питающего напряжения; обеспечивают постоянство частоты вращения при изменении нагрузки на валу. С другой стороны, синхронные двигатели обладают рядом недостатков по сравнению с асинхронными, а именно, их конструкция значительно сложнее. Пуск синхронной машины осуществляется в несколько этапов, а силовые управляющие устройства и их алгоритмическое обеспечение сложнее и менее надежное, чем в асинхронных электроприводах.

Электропривод на основе асинхронных электродвигателей превосходит синхронный практически по всем параметрам. Асинхронные двигатели обладают простой конструкцией. В частотно-регулируемом асинхронном электроприводе обеспечивается простота регулирования частоты вращения во время пуска и поддержание ее в установившихся режимах. Единственным минусом асинхронных электроприводов, который не позволял широко использовать его при больших мощностях, более 6000 кВт, низкий коэффициент мощности и отсутствие возможности его регулирования. В настоящее время, этот недостаток полностью компенсирован за счет использования в преобразователях частоты активных выпрямителей.

В процессе транспортировки углеводородов по магистральным трубопроводам требуется осуществлять плавное регулирование давления и напора на выходе центробежного нагнетателя. Наибольшее распространение получили два способа регулирования: дроссе-

лированием (перепуск части транспортируемого сырья с выхода центробежного нагнетателя обратно на вход) и изменением частоты вращения центробежного нагнетателя.

Преимущества второго способа широко известны, главное из которых заключается в снижении потребления электроэнергии пропорционально частоте вращения центробежного нагнетателя. Для регулирования частоты вращения приводного электродвигателя в современных агрегатах используются полупроводниковые преобразователи частоты, которые могут иметь различную топологию и характеристики. К электротехническим комплексам предъявляются самые высокие требования по уровню электромагнитной совместимости и энергетическим характеристикам, которые в значительной степени определяются структурой и эффективностью управления ЭП агрегата.

В настоящее время, производство высокоэффективных электроприводных перекачивающих агрегатов осуществляется по двум компоновочным схемам [9, 10]: с использованием выносного компрессора и электропривода в виде автономного агрегата; с использованием капсулированной компоновки, при которой агрегат создается в виде герметичного блока, в корпусе которого размещен электропривод с магнитным подвесом, а на консольных участках вала ротора двигателя смонтированы рабочие колеса.

В современных электроприводных транспортирующих агрегатах могут использоваться различные топологии. Одними из наиболее распространенных топологий являются: двухтрансформаторная структура и преобразователь частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором.

Структурная схема двухтрансформаторного преобразователя частоты электропривода центробежного нагнетателя представлена на рис.1.7. В схеме преобразователя осуществляется двойная трансформация напряжения с помощью понижающего (Т1) и повышающего (Т2) высоковольтных трансформаторов. Двойная трансформация позволяет использовать для регулирования частоты относительно низковольтный преобразователь частоты, который выполнен по двухзвенной схеме.

Преобразователи частоты с такой структурой отличают относительная простота практической реализации высоковольтного электропривода. Вследствие этого, они наиболее часто применяются

для управления высоковольтными электродвигателями в диапазоне мощностей до 3 МВт. При большей мощности электропривода трансформатор (Т2) вносит существенные искажения в процесс управления электродвигателем. Основными недостатками двухтрансформаторных преобразователей являются высокие массогабаритные характеристики, меньшие по отношению к другим схемам коэффициент полезного действия и надежность.

В составе преобразователя частоты, выполненного по двухтрансформаторной схеме, могут использоваться как диодные неуправляемые, так и активные выпрямители. Автономный инвертор выполнен по трехфазной мостовой схеме на полностью управляемых транзисторах IGBT. На рис. 1.7 приняты следующие обозначения: В – силовой полууправляемый выпрямитель; LC – силовой фильтр звена постоянного напряжения; АИ – автономный инвертор напряжения; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство; ДР – дроссель.

Преобразователи, выполненные по этой схеме, имеют ограниченный диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя. При снижении частоты на выходе преобразователя увеличивается насыщение сердечника и нарушается расчетный режим работы выходного трансформатора (Т2). Поэтому, как показывает практика, диапазон регулирования ограничен в пределах $0,5n_{\text{ном}} < n < n_{\text{ном}}$. Для расширения диапазона регулирования используют трансформаторы с увеличенным сечением магнитопровода. При увеличении выходной частоты растут потери в сердечнике трансформатора Т2 на перемагничивание и вихревые токи.

Структурная схема другого преобразователя частоты электропривода центробежного нагнетателя представлена на рис.1.8а. Внешний вид агрегата с таким преобразователем частоты представлен на рис.1.8б [11].

Регулирование производительности агрегата осуществляется за счет изменения скорости вращения ротора нагнетателя, соединенного с валом двигателя. Диапазон регулирования скорости вращения: от 50% до 105% (4100 до 8610 об/мин (143.7 Гц)) от номинальной скорости. Параметры двигателя в основных режимах работы приведены в таблице 1.2.

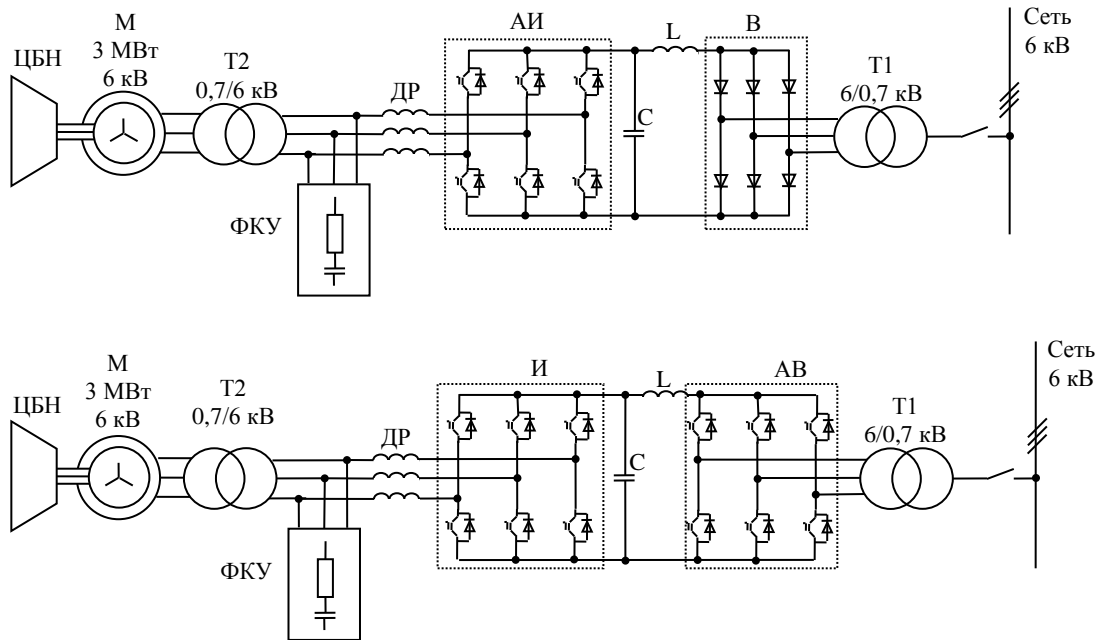


Рис.1.7. Структурные схемы двухтрансформаторных преобразователей частоты электроприводов центробежных нагнетателей

Центробежные нагнетатели природного газа, рассчитанные на конечное давление 5,49 МПа, снабжены сухими газовыми уплотнениями и магнитным подвесом. Преобразователь частоты рассчитан на колебание питающего напряжения от минус 10 до плюс 10 процентов номинального значения по амплитуде и от минус 0,4 до плюс 0,4 Гц по частоте. Температура окружающей среды, при которой допустима эксплуатация преобразователя, находится в пределах от плюс 5 до плюс 40 °С.

Таблица 1.2.

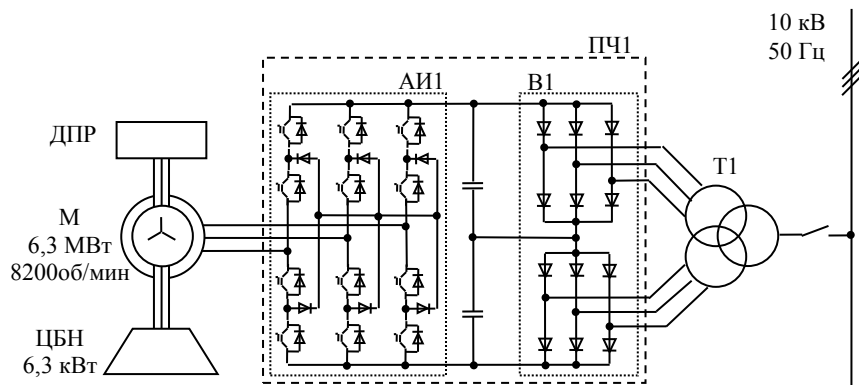
Параметры двигателя
электроприводного газоперекачивающего агрегата

Наименование параметра	Режим максимальной длительной мощности	Режим максимальной длительной скорости	Номинальный режим
Мощность двигателя, кВт	6600	6600	6300
Частота вращения ротора двигателя синхронная, об/мин	8200	8610	8200
Напряжение, В	3300	3300	3300
Ток в фазе, А	1520	1520	1450
Коэффициент мощности двигателя	0,785	0,795	0,785
Частота тока при синхронной частоте вращения, Гц	136,9	143,7	136,9
КПД двигателя	0,97	0,97	0,97
Момент	-	-	7.34

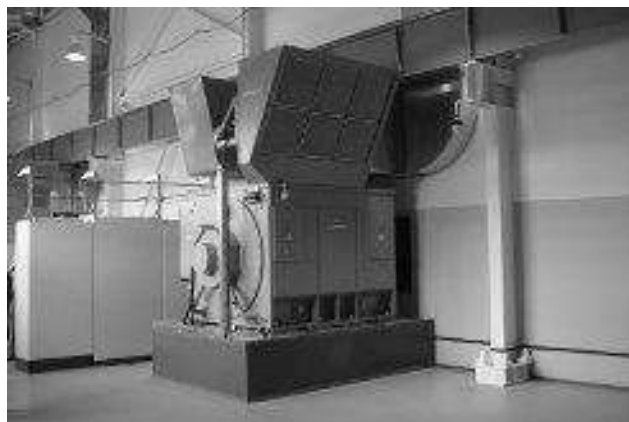
На входе преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем установлен трехобмоточный трансформатор с двумя вторичными обмотками. На выходе выпрямителя установлено звено постоянного тока, состоящее из высоковольтных конденсаторов. Автономный инвертор выполнен на полностью управляемых транзисторах IGBT.

Преобразователь частоты такого электропривода имеет следующие параметры. Мощность преобразователя номинальная (при частоте 143 Гц) 8700 кВА. Мощность преобразователя максимальная (при частоте 143 Гц) 9150 кВА. Напряжение питания номинальное (12-пульсный выпрямитель, через трансформатор) 2·3АС 1850 В.

Частота напряжения питания номинальная 50 Гц. Выходной ток в фазе номинальный 1524 А. Выходной ток в фазе максимальный 1600 А. Выходное напряжение (трёхуровневая широтно-импульсная модуляция), номинальное 3300 В. Выходная частота 137 Гц. Диапазон регулирования скорости (без датчика) 1:20. Точность поддержания скорости (без датчика) 0,5 %.



а)



б)

Рис. 1.8. Структурная схема и внешний вид электропривода газоперекачивающего агрегата

1.5. Подводные электроприводные комплексы для транспортировки углеводородов по шельфовым трубопроводам

Для проектирования, обустройства месторождений и эксплуатации технологических систем добычи, сбора и транспортировки природного газа с шельфовых месторождений требуются огромные капитальные и эксплуатационные вложения.

В настоящее время, для сбора углеводородов на шельфе используют подводные добывающие комплексы, «телом» которых являются манифольды. Манифольд представляет собой закрепленную на морском дне «статическую» конструкцию (не содержащую вращающихся частей), которая объединяет несколько добывающих скважин с помощью подводных промысловых газопроводов. При прохождении через манифольд природный газ очищается от песка и воды и поступает на морскую платформу или транспортное судно, где производятся дополнительные технологические процессы и, дальнейшая транспортировка на берег к перерабатывающему заводу. В Российской Федерации манифольды используют на месторождении «Сахалин-2» в Охотском море на шельфе острова Сахалин в субарктических условиях.

Для снижения затрат на освоение морских месторождений целесообразно использование подводных перекачивающих комплексов на основе регулируемого электропривода для подводного компримирования и транспортировки природного газа.

Использование подводных комплексов позволит обеспечить транспортировку природного газа без использования транспортных судов и минимизирует влияние на хрупкую экосистему Северного Ледовитого океана. Также, обеспечит высокий уровень ресурсосбережения и энергоэффективности процесса освоения месторождений природного газа, за счет экономии топливно-энергетических ресурсов транспортных судов, добывающих платформ и других традиционных технологических комплексов морских месторождений.

Подводный перекачивающий комплекс построен по принципу интеграции различных компонентов в едином корпусе. Так, в подводном перекачивающем комплексе объединена совокупность технических средств (автономного инвертора, электродвигателя, центробежного нагнетателя, микропроцессорных систем связи и диагностики) в едином герметичном корпусе.

Структура подводного перекачивающего комплекса представлена на рис. 1.9 [12]. Его основными элементами являются: приводной регулируемый электродвигатель (3) и один или несколько центробежных нагнетателей (10), интегрированных в единый герметичный корпус (2) и изолированных друг от друга с помощью газодинамических уплотнений (4,5). Электродвигатель и центробежные нагнетатели имеют единый вал (8) с опорами на магнитные подшипники (6,7 и 11). Также, в корпус комплекса интегрированы технические средства регулирования, управления и связи (1). Транспортируемый природный газ подводится и отводится от комплекса по патрубкам (9).

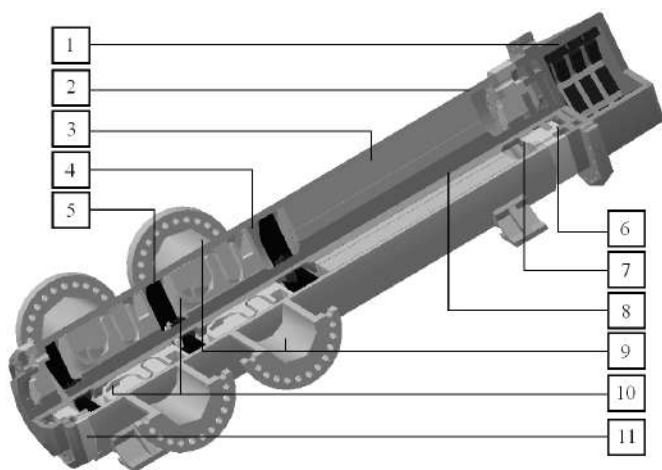
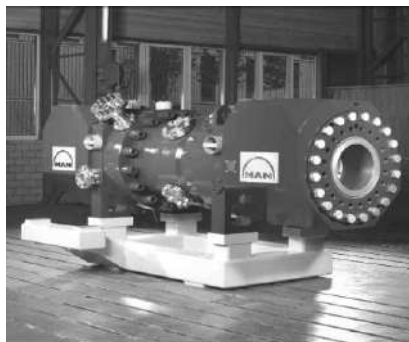


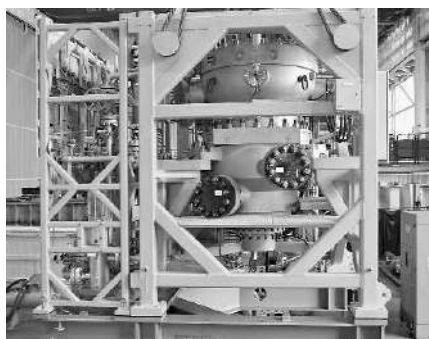
Рис 1.9. Структура подводного перекачивающего комплекса

Мировые нефтегазовые компании, такие как *Shell*, *Exxon*, *Total*, *BP*, *Woodside*, *Statoil* и *Petrobras*, на сегодняшний день, являются лидерами по разработке технических средств подводного компримирования. Первый подводный комплекс был создан компанией *General Electric* мощностью 850 кВт, который был испытан в 1992 году в заводских условиях [13]. В 2001 году *General Electric* и *Aker Kvaerner* в рамках норвежской правительственной программы *Demo 2000* были запущены подводные комплексы на 2,5 и 12,5 МВт. Четыре модуля мощностью 12,5 МВт планируется использовать при освоении месторождения *Ormen Lange* в 2016 году.

Разработки в области подводных технических средств ведутся компаниями *MAN* и *Siemens* в рамках проекта компании *Statoil* для месторождения *Asgard*. В Норвегии была испытана установка *MAN Hofim-type* (рис. 1.10а), а в 2009 году проведены испытания компрессора *Siemens ECO-II* (рис. 1.10б) [14].



а) *MAN Turbo's Hofim-type*



б) *Siemens ECO-II*

Рис. 1.10. Внешний вид подводных перекачивающих комплексов

Одним из основных требований к подводным агрегатам является обеспечение высокой надежности функционирования транспортирующего комплекса в подводном положении. Для этого, с целью оптимизации и сокращения элементов подводного комплекса, электропривод может иметь структуру, представленную на рис. 1.11.

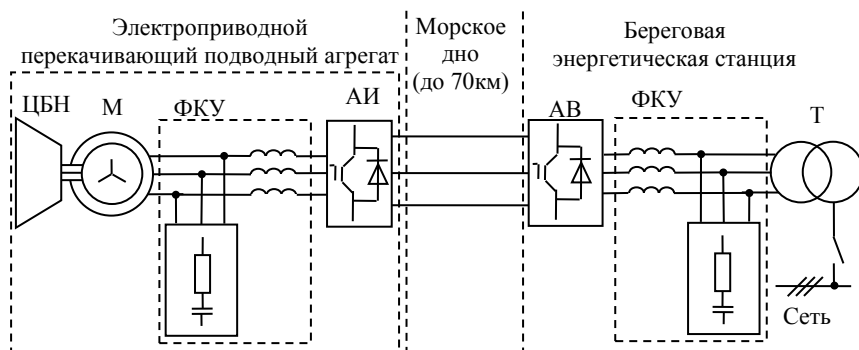


Рис. 1.11. Структура электропривода подводного перекачивающего агрегата

Основной особенностью электроприводов таких агрегатов является то, что высоковольтный активный выпрямитель, входящий в состав преобразователя частоты, расположен на береговой энергетической станции и, таким образом, вынесен из подводной части агрегата, что повышает его надежность. Высоковольтный автономный инвертор, электродвигатель и центробежный нагнетатель размещены непосредственно на морском дне. Электроснабжение автономного инвертора осуществляется по высоковольтной линии постоянного тока (High-voltage direct current - HVDC), проложенной по морскому дну.

1.6. Электропривод механизмов экскаваторно-транспортного комплекса (карьерных экскаваторов и самосвалов)

Внешний вид экскаватора ЭКГ-32 представлен на рис. 1.12. Структурная схема электрического привода экскаватора ЭКГ-32 представлена на рис. 1.13 [13-18]. Комплект электрооборудования электропривода переменного тока экскаватора ЭКГ-32 обеспечивает питание, управление и защиту двигателей и другого оборудования, главных и вспомогательных механизмов карьерного экскаватора с объемом ковша 32 м³.



Рис. 1.12. Внешний вид экскаватора ЭКГ-32.

Электропривод выполнен на основе асинхронных двигателей и содержит в своем составе два привода хода, два привода подъема и один привод поворота. Электроснабжение и управление электрическими двигателями осуществляется с помощью автономных инверторов, выполненных по трехфазной мостовой схеме. На входе преобразователя частоты установлены активные выпрямители.

Такая схема электропривода, по сравнению с системой электропривода, выполненного на основе двигателей постоянного тока, например, на экскаваторах ЭКГ 5 и ЭКГ 10, значительно повышает надежность привода, увеличивает его КПД, улучшает динамические характеристики и снижает энергопотребление.

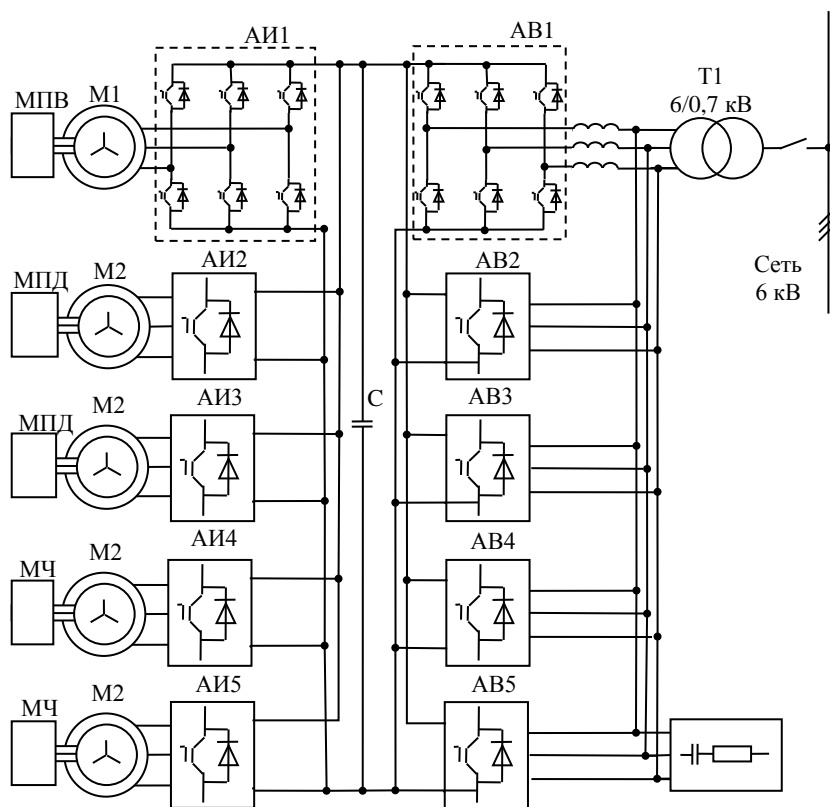


Рис. 1.13. Структурная схема электропривода главных механизмов экскаватора ЭКГ – 32

Электропривод главных механизмов выполнен на основе асинхронных электродвигателей марок: АДРЭ-С 850-6 УХЛ2; АД-РВЭ-С 450-6 УХЛ2; АДРЭ-400-6 УХЛ1, АДРЭ-С 400-6 УХЛ1. Электропривод обеспечивает нормальную работу главных механизмов экскаватора при следующих нормах качества электрической питающей сети: отклонение питающего напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального; отклонение частоты напряжения $\pm 3\%$ от номинальной; провалы напряжения до 30% амплитудного значения и шириной до 10 электрических градусов; коэффициент несинусоидальности напряжения не более 5% . Основные параметры электропривода приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3.

Основные параметры электропривода главных механизмов

Наименование параметра	Значение
Номинальная потребляемая мощность, кВА	2000
Число фаз питающей сети	3
Номинальное напряжение питания, кВ	6
Частота напряжения питания, Гц	50

Карьерные самосвалы компании «БелАЗ» имеют грузоподъемность до 450 т и являются одними из самых больших самосвалов в мире. Отличительной особенностью машин этого типа является применение в движителях мотор-колес, на основе электропривода переменного тока. Внешний вид самосвала «БелАЗ» представлен на рис. 1.14 [13, 14].

Электропривод мотор-колес предназначен для обеспечения тягового, тормозного и стояночного режимов автосамосвала «БелАЗ» грузоподъемностью 360 тонн. В комплект электропривода входит: шкаф управления с системой диагностики; тяговые двигатели ТАД-8 (2 шт.); тяговый генератор ГСТ-2450; преобразователь частоты. Структурная схема электропривода мотор-колес представлена на рис. 1.15. При этом, в структуре электропривода мотор-колес самосвала, возможно применение активного выпрямителя вместо 12-пульсного выпрямителя. Это обеспечит более эффективную работу всей электроэнергетической установки.



Рис. 1.14. Внешний вид самосвала «БелАз»

Выработка электроэнергии для всего самосвала осуществляется с помощью синхронных генераторов мощностью 2450 кВт. В состав преобразователя частоты входит 12-пульсный выпрямитель, выполненный на высоковольтных диодах. Выпрямленное напряжение на выходе разделяется двумя конденсаторами равной емкости, между которыми выпрямленное напряжение разделяется равномерно и формируются контакты подключения автономных инверторов.

Автономные инверторы выполнены по трехфазной мостовой схеме на полностью управляемых транзисторах большой мощности. Управление транзисторными ключами автономного инвертора осуществляется по ШИМ алгоритму. Схема управления режимами работы электродвигателей построена по векторному принципу. Особенности режимов работы привода заключается в экстремальных условиях эксплуатации с ударными нагрузками. В следствии чего возникает необходимость обеспечения максимального быстродействия системы управления электроприводом для обеспечения эффективной работы шасси самосвала. Технические характеристики электропривода мотор-колес представлены в таблице 1.4.

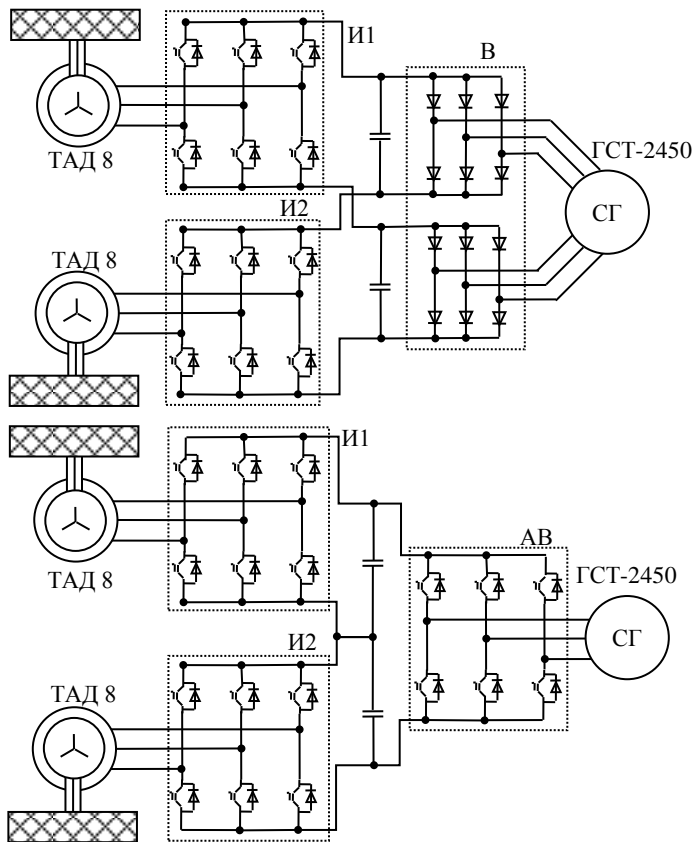


Рис. 1.15 Схема электропривода мотор-колеса самосвала «БелАз»

Таблица 1.4.

Технические характеристики электропривода мотор-колес

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	970
Номинальная мощность генератора, кВт	2450
Частота вращения электродвигателя, об/мин	610/3420
Режим работы	S1 (продолжительный)

1.7. Электропривод механизмов забойных горных машин (проходческих и очистных комбайнов)

На рис.1.16 приведен внешний вид проходческих (справа) и очистных (слева) комбайнов компании Fatig (Польша): в рабочих условиях (сверху); на заводе изготовителя (снизу).

Очистной комплекс содержит следующие элементы: горный очистной комбайн FS 200; механизированную крепь ФАЗОС 10/20-2х2340; крепь для сопряжения, предназначенную для использования в подлавном штреке; укомплектованный лавный конвейер FFC-750 с угледробилкой; укомплектованную поворотную станцию ленточного конвейера; установку высокого давления для питания механизированной лавной крепи; комплект электрооборудования с системой визуализации. Очистной комбайн обеспечивает работу в пластах угля высотой от 1,3 до 1,9 м.

Проходческий комбайн R-2000 предназначен для проведения подземных горных выработок путём механизированного разрушения полезного ископаемого (каменного угля) и/или пустых пород, характеризующихся удельной сопротивляемостью сжатия до 110 МПа и погрузки отбитого материала на шахтные транспортные средства. Максимальное поперечное сечение выработки 34,1 м². Максимальная высота проводимой выработки 4815 мм. Максимальная ширина проводимой выработки 7200 мм.

Условия эксплуатации электроприводов горно-шахтного оборудования имеют специфические особенности, главным образом связанные с ограниченной мощностью, сложностью системы электроснабжения, с динамичной нагрузкой, изменяющейся в широких пределах, и с ограниченными габаритами, предоставляемыми для электрооборудования на подвижных механизмах.

Основные требования к электроприводу забойных горных машин можно сформулировать следующим образом: безопасность; надежность; высокая управляемость моментом электродвигателя при нулевой и на малых скоростях вращения вала; высокий пусковой момент электродвигателя для быстрого разгона; торможение электродвигателя с рекуперацией энергии; реверс электродвигателя; минимальные потери электроэнергии; минимальное потребление реактивной мощности электроприводом; минимальная стоимость и быстрая окупаемость затрат на электропривод.

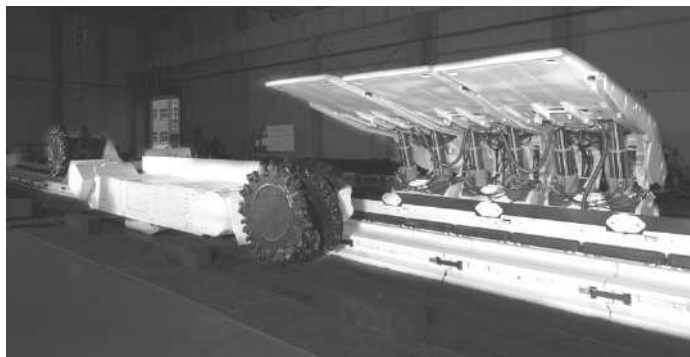


Рис. 1.16. Очистные и проходческие комбайны

Технические характеристики асинхронных двигателей электроприводов, рассмотренных выше проходческих и очистных комбайнов, приведены в таблицах 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5.

Технические характеристики электродвигателей очистного комбайна

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	250
Частота вращения вала электродвигателя, об/мин	1480
Номинальное напряжение, В	1140
Частота питающего напряжения, Гц	50
Номинальный ток статора, А	159
Коэффициент мощности	0,84
Режим работы	S1 (продолжительный)
Класс изоляции	H
IP	55

Таблица 1.6.

Технические характеристики электродвигателей проходческого комбайна

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	51
Частота вращения вала электродвигателя, об/мин	1483
Номинальное напряжение, В	500/1000
Частота питающего напряжения, Гц	50
Номинальный ток статора, А	75/35
Коэффициент мощности	0,91
Режим работы	S1 (продолжительный)
Класс изоляции	F
IP	55

Для управления электродвигателями (рис.1.17а) приводов рассмотренного очистного комбайна используется преобразователь частоты NXP компании Vacon. Смонтированный вид преобразователя частоты в раме очистного комбайна представлена на рис.1.17б.

Мощность преобразователя частоты 400 кВт, напряжение 380 В. Перегрузочная способность до 150%.

Для управления приводным асинхронным электродвигателем используется векторный алгоритм управления с замкнутым конту-

ром скорости. Степень защиты корпуса преобразователя IP 54. Преобразователь обеспечивает защиту двигателя от короткого замыкания, перегрузки и заклинивания. Обеспечивает возможность пуска с определением направления и скорости вращения двигателя. Торможение постоянным током.



а)



б)

Рис. 1.17. Внешний вид приводных асинхронных двигателей и преобразователя частоты очистного комбайна

Структура силовой части преобразователя частоты электропривода очистного комбайна приведена на рис.1.18. Преобразователь частоты состоит из следующих основных элементов: входных дросселей (ВД); диодного выпрямителя (В); тормозных прерывателя (ТП) и сопротивления; инвертора (И); асинхронного двигателя (АД).

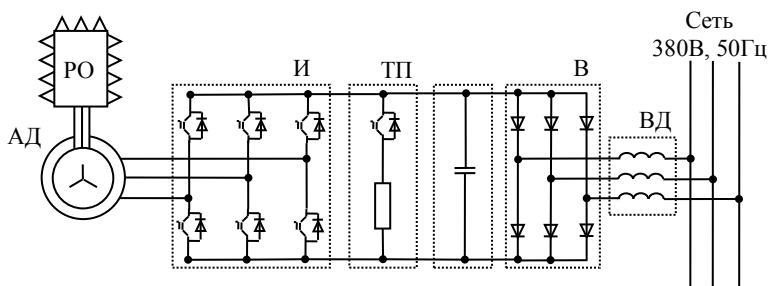


Рис. 1.18. Структурная схема электропривода очистного комбайна

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ

2.1. Структура библиотек MatLab Simulink и SimPowerSystems

Программа MatLab представляет собой высокоуровневый технический вычислительный язык и интерактивную среду для разработки алгоритмов, визуализации и анализа данных, числовых расчетов.

Программа MatLab состоит из большого количества библиотек для моделирования различных технических объектов. Для моделирования электротехнических систем использовались блоки библиотек Simulink и SimPowerSystems.

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:

- Continuous – линейные блоки;
- Discrete – дискретные блоки;
- Functions & Tables – функции и таблицы;
- Math – блоки математических операций;
- Nonlinear – нелинейные блоки;
- Signals & Systems – сигналы и системы;
- Sinks – регистрирующие устройства;
- Sources – источники сигналов и воздействий;
- Subsystems – блоки подсистем.

В состав библиотеки SimPowerSystems входят следующие разделы:

- Electrical Sources – источники электрической энергии;
- Connectors – соединители;
- Measurements – измерительные и контрольные устройства;
- Elements – электротехнические элементы;
- Power Electronics – устройства силовой электроники;
- Machines – электрические машины;
- Powerlib Extras – дополнительные устройства.

Эти библиотеки подробно описаны в следующей литературе [15], [16],[17],[18],[19].

Используя блоки пакетов SimPowerSystems и Simulink, можно создавать имитационные модели электротехнических систем и исследовать их режимы работы.

Ниже будут рассмотрены некоторые блоки библиотеки SimPowerSystems, которые составляют силовую часть электротехнических систем объектов и технических средств минерально-сырьевых ресурсов.

2.2. Имитационные модели библиотеки MatLab SimPowerSystems (стандартные блоки силовых элементов)

Блок «Powergui» - Графический интерфейс пользователя.

Блок является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- расчет схемы комплексным методом;
- расчет установившегося режима;
- дискретизация модели;
- задание начальных условий;
- инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет начался с установившегося режима;
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer;
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи;
- выполнение гармонического анализа;
- создание отчета;
- создание файла характеристик намагничивания для модели нелинейного трансформатора.

Блок «AC Voltage Source» - Идеальный источник переменного напряжения. Блок моделирует работу идеального источника синусоидального напряжения с постоянной амплитудой. Параметры блока приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Параметры блока «AC Voltage Source»

Parameter	Параметр
Peak Amplitude (V)	Амплитуда (В)
Phase (deg)	Фаза (град). Начальная фаза
Frequency (Hz)	Частота (Гц). Частота источника
Sample time	Шаг дискретизации
Measurements	Измеряемые переменные

Блок «3-Phase Programmable Voltage Source» - Трехфазный программируемый источник напряжения. Вырабатывает трехфазную систему напряжений с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты, а также гармонического состава. Параметры блока приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Параметры блока «3-Phase Programmable Voltage Source»

Parameter	Параметр
Positive-sequence: Amplitude (Vrms Ph-Ph) Phase (degrees) Freq. (Hz)	Прямая последовательность: амплитуда фаз (градусы); частота (Гц)
Time variation of:	Изменение во времени: none (нет); amplitude (амплитуда); phase (фаза); frequency (частота)
Type of variation:	Способ изменения: step (ступенчатое изменение); ramp (линейное изменение); modulation (модуляция); table (таблица)
Step magnitude	Уровень ступенчатого сигнала
Rate of change (value/s)	Скорость изменения (величина/с)
Amplitude of the modulation:	Амплитуда модуляции
Frequency of the modulation (Hz):	Частота модуляции (Гц)
Variation timing (s): Start End	Время действия изменения (с): начало; конец
Fundamental and/or Harmonic generation	Наложение прямой, обратной или нулевой последовательности и/или высших гармоник
A: order(n); fmplitude; phase (degrees)	A: гармоника (n); амплитуда; фаза (град)
B: order(n); amplitude phase(degrees)	B: гармоника (n); амплитуда; фаза (град)
Harmonic timing (s): Start; End	Время действия гармоники (с): начало; конец

Блок «Series RLC Branch» - Последовательная RLC-цепь. Блок моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры блока приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3.

Параметры блока «Series RLC Branch»

Parameter	Параметр
Resistance R (Ohms)	Сопротивление (Ом)
Inductance L (H)	Индуктивность (Гн)
Capacitance C (F)	Емкость (Ф)
Measurements	Измеряемые переменные

Блок «Three-phase Transformer (Two Windings)» - Трехфазный двухобмоточный трансформатор. Блок моделирует двухоб-

моточный трехфазный трансформатор. Модель построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника. Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора. Характеристика намагничивания задается аналогично модели нелинейного трансформатора. Параметры блока приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Параметры блока «Three-phase Transformer (Two Windings)»

Parameter	Параметр
Nominal power and fr. Pn(VA) fn(Hz)	Номинальная мощность (ВА) и частота (Гц)
Winding 1 (ABC) connection: Y; Yn; Yg; D1; D11	Схема соединения первичной обмотки: Y – звезда; Yn - звезда с нейтралью; Yg -звезда с заземленной нейтралью; D1–треугольник с опережением в 300 эл. град.; D11– треугольник с отставанием на 300 эл. град.
Winding 1 parameters: V1 Ph-Ph(V); R1(pu); L1(pu)	Параметры первичной обмотки: линейное напряжение (В); активное сопротивление обмотки (о.е.); индуктивность обмотки (о.е.)
Winding 2 (abc) connection Y; Yn; Yg; D1; D11	Схема соединения вторичной обмотки (то же, что и для первичной обмотки)
Winding 2 parameters U2 Ph-Ph(V); R2(pu), L2(pu)	Параметры вторичной обмотки: (то же, что и для первичной обмотки)
Saturable core	Насыщающийся сердечник
Magnetization resistance Rm(pu)	Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)
Magnetization inductance Lm(pu)	Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)
Saturation characteristic (pu)	Характеристика насыщения сердечника
Simulate hysteresis	Учет гистерезиса
Hysteresis Data Mat file	Имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику
Specify initial fluxes	Начальные потоки для фаз ABC (параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора)
Measurements	Измеряемые переменные

Блок «Three-phase Transformer (Three Windings)» - Трехфазный трехобмоточный трансформатор. Блок моделирует трехобмоточный трехфазный трансформатор. Модель построена на

основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника. Параметры блока приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5.

Параметры блока «Three-phase Transformer (Three Windings)»

Parameter	Параметр
Port configuration:	Конфигурация портов: ABC as input terminals – ABC являются входными; ABC as output terminals – ABC являются выходными
Nominal power and frequency Pn(VA); fn(Hz)	Номинальная мощность (ВА) и частота (Гц)
Winding 1 (ABC) connection: Y; Yn; Yg; D1; D11	Схема соединения первой обмотки (то же, что для первичной обмотки трехфазного двухобмоточного трансформатора)
Winding parameters V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)	Параметры первой обмотки: линейное напряжение (В); активное сопротивление обмотки (о.е.); индуктивность обмотки (о.е.)
Winding 2 (abc) connection	Схема соединения второй обмотки (то же, что и для первичной обмотки)
Winding parameters U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)	Параметры второй обмотки: (то же, что и для первичной обмотки)
Winding 3 (abc) connection	Схема соединения третьей обмотки (то же, что и для первичной обмотки)
Winding parameters U3 Ph-Ph(V); R2(pu); L2(pu)	Параметры третьей обмотки (то же, что и для первичной обмотки)
Saturable core	Насыщающийся сердечник
Magnetization resistance Rm(pu)	Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)
Magnetization inductance Lm(pu)	Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)
Saturation characteristic (pu)	Характеристика насыщения сердечника
Simulate hysteresis	Учет гистерезиса
Hysteresis Data Mat file	Имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику
Specify initial fluxes	Начальные потоки для фаз ABC
Measurements	Измеряемые переменные

Блок «Asynchronous Machine» - Асинхронная машина. Блок моделирует асинхронную электрическую машину в двигательном или генераторном режимах. Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины. Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины, а порты a, b и c - обмотки ротора машины. Порт Tm предназначен для подачи момента

сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, скорости вращения вала, а также его углового положения. Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке Sim Power Systems предусмотрен блок Machines Measurement Demux. Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка и модель механической части в виде системы второго порядка. Параметры блока приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6.

Параметры блока «Asynchronous Machine»

Parameter	Параметр
Rotor type: squirrel-cage; wound	Тип ротора: короткозамкнутый ротор; фазный ротор
Reference frame:	Система координат: rotor (неподвижная относительно ротора); stationary (неподвижная относительно статора); synchronous (вращающаяся вместе с полем)
Nom. power, L-L volt. and freq. : Pn (VA); Un (V); fn (Hz)	Номинальная мощность Pn (ВА), действующее линейное напряжение Un (В), номинальная частота fn (Гц)
Stator Rs (Ohm) Lls (H)	Сопrotивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) статора
Rotor Rr (Ohm) Llr' (H)	Сопrotивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) ротора
Mutual inductance Lm (H)	Взаимная индуктивность (Гн)
Inertia, friction factor and pairs of poles: J(kg*m^2), F(N*m*s), p	Момент инерции J (кг·м ²), коэффициент трения F (Н·м·с), число пар полюсов (p)
Initial conditions: s; th(deg); isa, isb, isc(A); phA, phB, phC(deg):	Начальные условия: s – скольжение; th - фаза (град.); isa, isb, isc - начальные значения токов статора (А); phA, phB, phC - начальные фазы токов статора (град.)

Блок «Universal Bridge» - Универсальный мост. Блок моделирует работу полупроводникового моста. Модель позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью

управляемые тиристоры, IGBT и MOSFET транзисторы, шунтированные обратными диодами). В модели можно также выбрать вид зажимов А, В и С). Параметры блока приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7.

Параметры блока «Universal Bridge»

Parameter	Параметр
Number of bridge arms	Число плеч моста (выбирается из списка: 1, 2 или 3)
Port configuration: ABC as input terminals; ABC as output terminals	Конфигурация портов зажимы А, В и С являются входными; зажимы А, В и С являются выходными
Snubber resistance Rs (Ohm)	Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)
Snubber capacitance Cs (F)	Емкость демпфирующей цепи (Ф)
Power Electronic device: Diodes; Thyristors; GTO / Diodes; MOSFET / Diodes - MOSFET IGBT / Diodes – IGBT Ideal Switches	Вид полупроводниковых устройств моста: диоды; тиристоры; полностью управляемые тиристоры, шунтированные обратными диодами; транзисторы, шунтированные обратными диодами; идеальные ключи
Measurements: none; device voltages; device currents; UAB UBC UCA UDC volt; all voltages and currents	Измеряемые переменные: нет переменных для отображения; напряжения на полупроводниковых устройствах; токи полупроводниковых устройств; напряжения на зажимах моста; все напряжения и токи моста

Блок «Three-Level Bridge» - Трехуровневый мост. Блок моделирует работу трехуровневого моста. Модель также позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3) и вид полупроводниковых приборов. В модели можно также выбрать режим работы (выпрямительный или инверторный). Параметры блока приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8.

Параметры блока «Three-Level Bridge»

Parameter	Параметр
Number of bridge arms	Число плеч моста (выбирается из списка: 1, 2 или 3)
Port configuration	Конфигурация портов (то же, что для универсального моста)
Snubber resistance Rs (Ohm)	Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)
Snubber capacitance Cs (F)	Емкость демпфирующей цепи (Ф)
Power Electronic device	Вид полупроводниковых устройств моста (то же, что для универсального моста)

2.3. Имитационные модели полупроводниковых выпрямителей (неуправляемых и управляемых)

Полупроводниковый выпрямитель можно представить в виде структурной схемы, как на рис. 2.1, в которую входят: силовой трансформатор (СТ), полупроводниковый выпрямитель (ПВ), фильтр (Ф), электрическая нагрузка (Н).

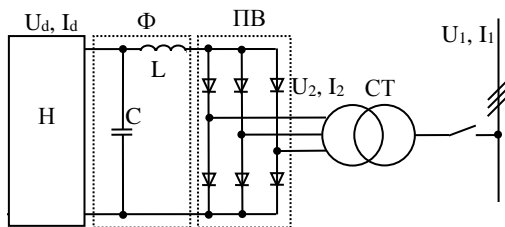


Рис. 2.1. Структурная схема выпрямителя.

Силовой трансформатор обеспечивает согласование уровней напряжений сети электроснабжения и входного напряжения полупроводникового выпрямителя. Другой функцией трансформатора является обеспечение гальванической развязки полупроводникового блока и сети электроснабжения. Активные выпрямители могут строиться по бестрансформаторной схеме, в которых выпрямительный блок присоединяется непосредственно к питающей сети через дроссели.

Полупроводниковый выпрямитель обеспечивает непосредственное выпрямление напряжения и тока. В качестве полупроводниковых ключей могут использоваться неуправляемые диоды, транзисторы с естественной коммутацией или полностью управляемые транзисторы.

Фильтр, установленный на выходе полупроводникового выпрямителя, обеспечивает требуемый уровень пульсаций выпрямленного тока в цепи нагрузки. Фильтр может строиться на основе резисторов, дросселей и конденсаторов.

Шестипульсный диодный выпрямитель (6-пульсный выпрямитель). Схема имитационной модели 6-пульсного выпрямителя представлена на рис.2.2. Она состоит из трех источников пере-

менного напряжения (U_a , U_b , U_c), трехфазного трансформатора (Three-phase Transformer), первичная и вторичная обмотки которого соединены треугольником, трехфазного выпрямителя (Diode bridge), выполненного на полупроводниковых диодах, и нагрузки (RL).

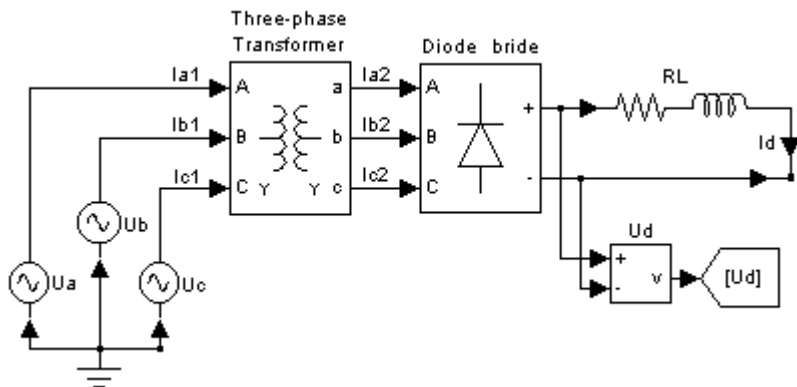


Рис.2.2. Схема имитационной модели 6-пульсного выпрямителя

При выполнении моделирования приняты следующие параметры системы: амплитудные значения фазных напряжений источников питания $U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=0.577$ В; частота напряжения $f=50$ Гц; коэффициент трансформации трехфазного трансформатора $k_T=1$; активное сопротивление нагрузки и индуктивность $R=1000$ Ом, $L=1$ мГн. Остальные параметры трехфазного трансформатора и диодного выпрямителя установлены по умолчанию.

Результаты имитационного моделирования 6-пульсного выпрямителя с помощью представленной модели приведены на рис.2.3а в виде диаграмм токов и напряжений выпрямителя при работе в установившемся режиме. Анализ полученных результатов приведен в таблице 2.9.

При имитационном моделировании 6-пульсного выпрямителя учитываются следующие переменные: выпрямленное напряжение и ток (U_d , I_d); токи первичных и вторичных обмоток трансформатора (I_{a1} , I_{b1} , I_{c1} , I_{a2} , I_{b2} , I_{c2}); линейные напряжения вторичной цепи трансформатора (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca}). Также, на рис.2.3а приведен спектральный состав тока, потребляемого 6-пульсным выпрямителем от источника.

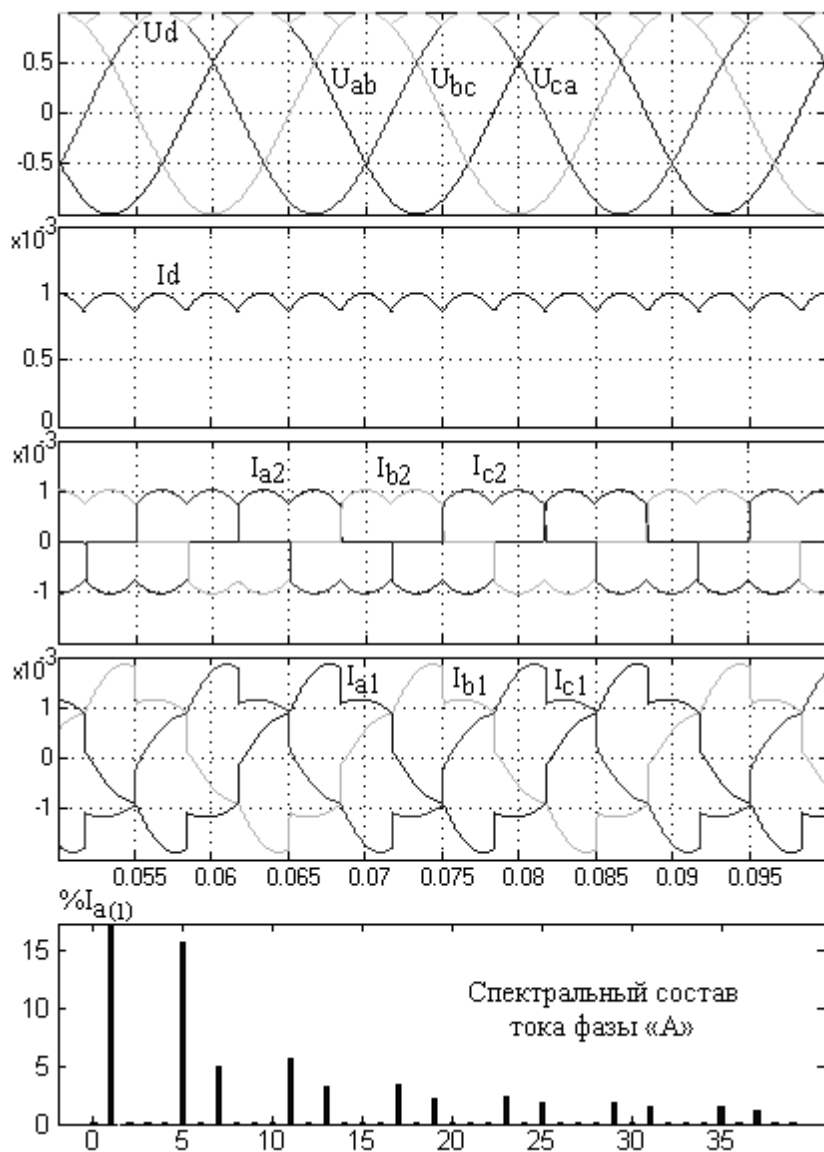


Рис.2.3а. Токи и напряжения 6-пульсного выпрямителя

Таблица 2.9

Анализ полученных результатов моделирования
6-пульсного выпрямителя

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		0.408
Линейное напряжение (действующее), В		0,7071
Ток фазы «А» (действующий), А		$1.15 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 18,77 %
50	100	
250	15,85	
350	4,98	
550	5,61	
650	3,19	
850	3,38	
950	2,27	
1150	2,41	
Трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		0.408
Линейное напряжение вторичной цепи (действующее), В		0,7071
Ток фазы «А» вторичной цепи (действующий), А		$0,707 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А» вторичной цепи		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 29,76%
50	100	
250	25,13	
350	7,89	
550	8,9	
650	4,98	
850	5,36	
950	3,59	
1150	3,82	
Нагрузка		
Выпрямленное напряжение (среднее), В		0,95
Выпрямленный ток (средний), А		$0,95 \cdot 10^{-3}$

На рис.2.36 приведены графики, полученные в результате имитационного моделирования 6-пульсного выпрямителя, и в результате натурного эксперимента. Из графиков видно, что пакет прикладных программ Mat Lab обеспечивает высокую степень схожести результатов моделирования с результатами экспериментов, проводимых на реальных объектах. Это подтверждает адекватность математических моделей, используемых в MatLab для моделирования электромагнитных процессов, протекающих в полупроводниковых преобразователях. Алгоритм проверки адекватности математической модели приведен в Приложении А.

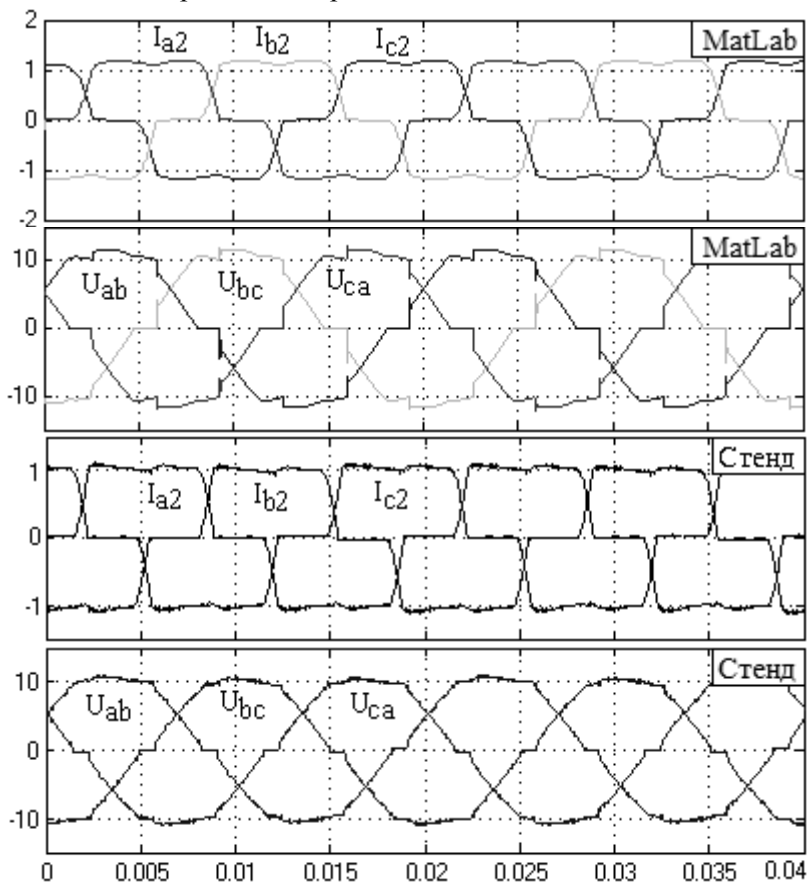


Рис.2.36. Токи и напряжения 6-пульсного выпрямителя, полученные в Mat Lab и в экспериментах

Двенадцатипульсный (12-пульсный) диодный выпрямитель с последовательным соединением мостов. Полупроводниковые преобразователи с 12-пульсными выпрямителями используются для снижения искажения напряжения питающей сети и снижения уровня пульсаций выпрямленного напряжения. В большинстве случаев для обеспечения 12-пульсного режима работы выпрямителей используются трансформаторы с двумя трехфазными вторичными обмотками, одна из которых соединена в звезду, другая – в треугольник. При этом системы трехфазных напряжений на выходе вторичных обмоток сдвинуты относительно друг друга на 30 эл. град.

Схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов, реализованная в Matlab, представлена на рис.2.4.

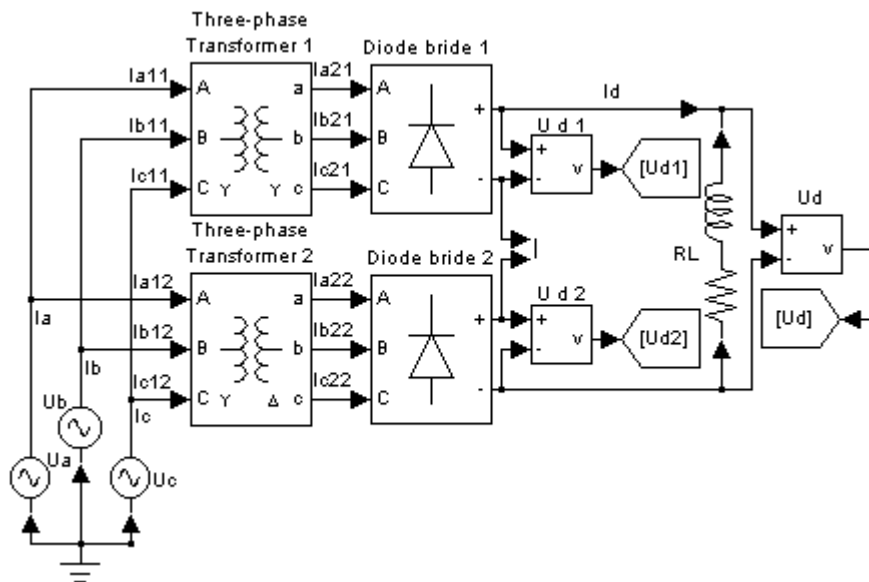


Рис. 2.4. Схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов

Она состоит из трех однофазных источников переменного напряжения (U_a , U_b , U_c), которые образуют трехфазную систему питания. Трехфазный трансформатор с двумя вторичными обмотками

заменен на эквивалентные ему два трехфазных трансформатора. Вторичная обмотка первого трансформатора (Three-phase Transformer 1) соединена звездой, второго трансформатора (Three-phase Transformer 2) - треугольником. Такая структура модели позволяет рассчитать как общий ток, потребляемый 12-пульсным выпрямителем, так и ток, потребляемый каждым диодным мостом. К вторичным цепям трансформаторов подключены трехфазные мостовые выпрямители (Diode bridge 1, Diode bridge 2). Нагрузка выпрямителя выполнена в виде RL цепочки.

Для выполнения имитационного моделирования установлены следующие параметры модели 12-пульсного выпрямителя. Амплитудные значения фазных напряжений источников питания $U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=0.577$ В. Частота напряжения $f=50$ Гц. Коэффициенты трансформации трехфазных трансформаторов $k_T=1$. Активное сопротивление нагрузки и индуктивность $R=1000$ Ом, $L=1$ мГн. Остальные параметры элементов имитационной модели установлены по умолчанию.

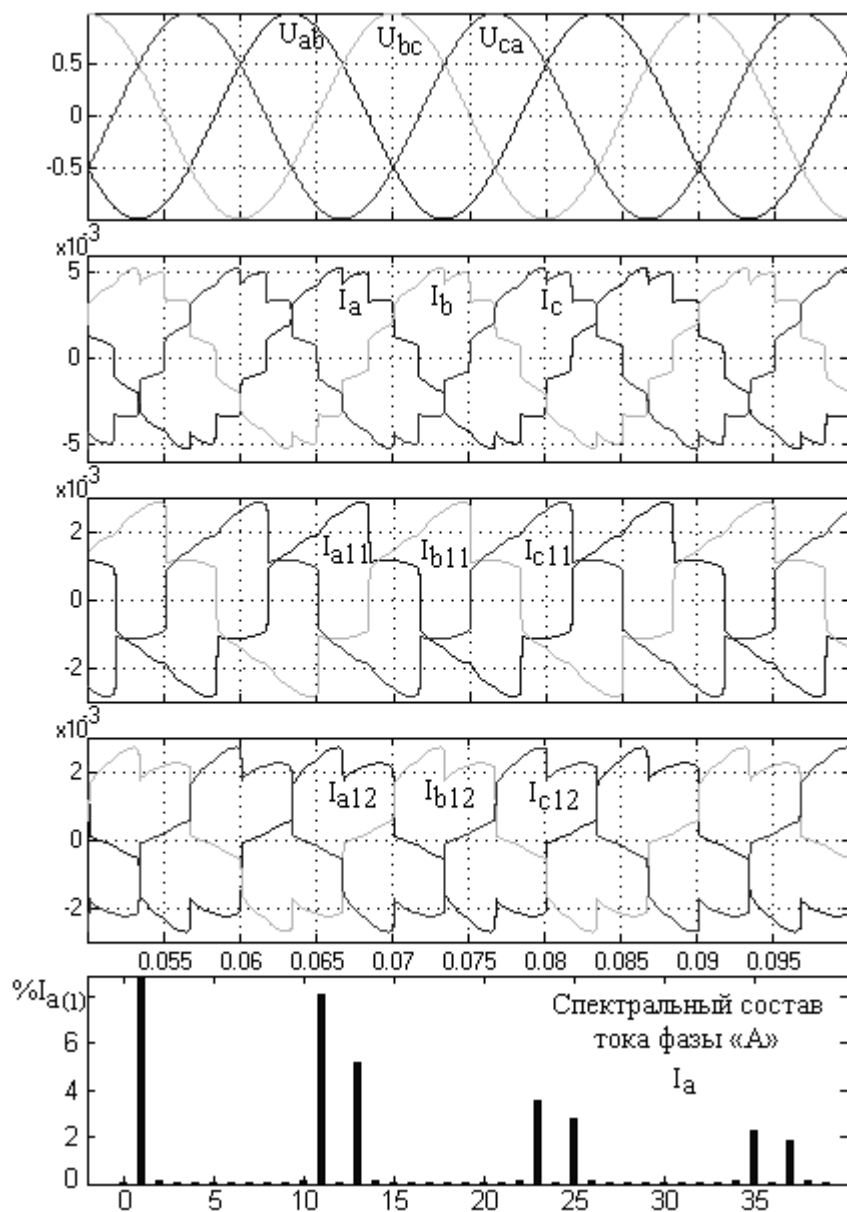
Результаты моделирования 12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов приведены на рис.2.5 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений выпрямителя при работе в установившемся режиме.

При имитационном моделировании учитываются следующие переменные: выпрямленные напряжения (общее (U_d) и на выходе каждого диодного моста (U_{d1} , U_{d2})) и выпрямленный ток (I_d); токи, потребляемые от источника (I_a , I_b , I_c); токи, протекающие в первичных цепях трансформаторов (I_{a11} , I_{b11} , I_{c11} , I_{a12} , I_{b12} , I_{c12}); токи, протекающие во вторичных цепях трансформаторов (I_{a21} , I_{b21} , I_{c21} , I_{a22} , I_{b22} , I_{c22}); линейные напряжения источника электрической энергии (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca}); линейные напряжения вторичных цепей трансформаторов (U_{ab21} , U_{bc21} , U_{ca21} , U_{ab22} , U_{bc22} , U_{ca22}).

Также, на рис.2.5 приведен спектральный состав тока, потребляемого 12-пульсным выпрямителем от источника.

На рис.2.5 выпрямленный ток ($I_d \cdot 10^3$) и выпрямленное напряжение (U_d) на нагрузке, имеющие одинаковые формы, совпадают.

Анализ полученных результатов приведен в таблице 2.10.



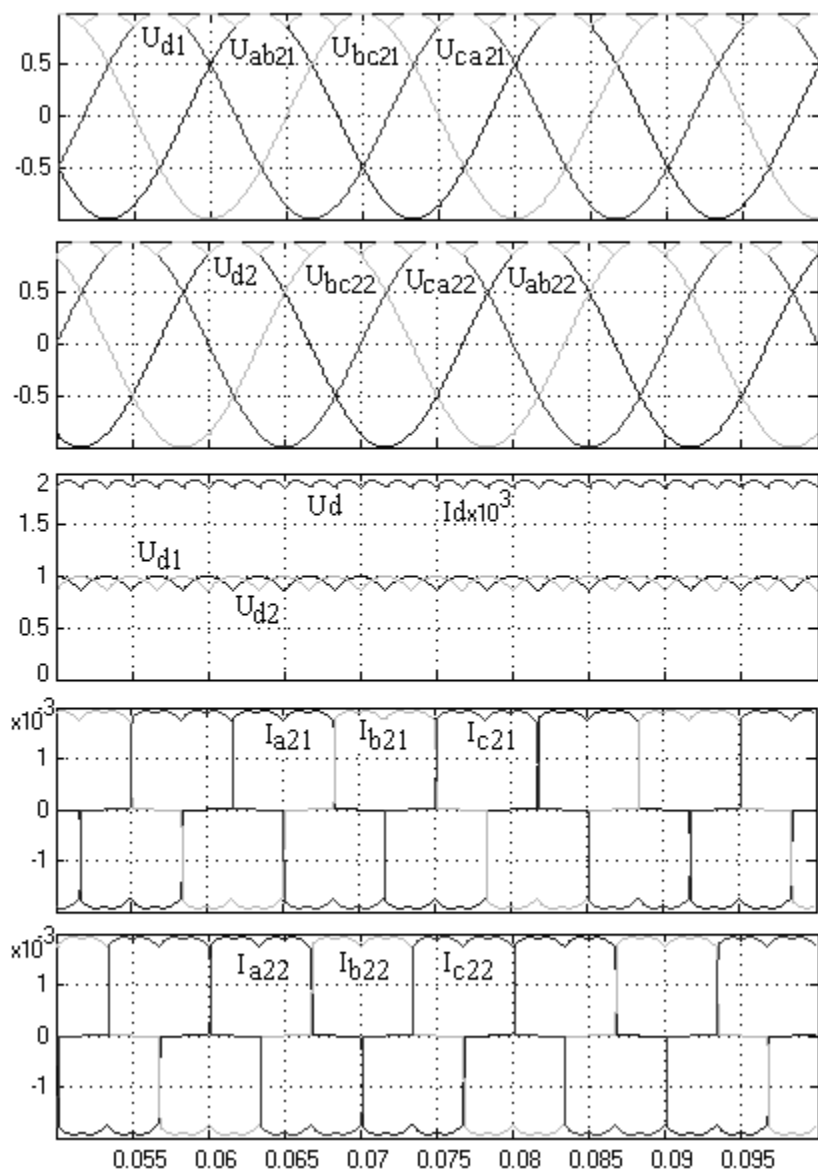


Рис.2.5. Входные и выходные токи и напряжения
12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов

Таблица 2.10

Анализ полученных результатов моделирования
12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		0,408
Линейное напряжение (действующее), В		0,7071
Ток фазы «А» (действующий), А		$3,535 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 10,98 %
50	100	
550	8,07	
1150	3,55	
1250	2,77	
Первый трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		0.408
Ток фазы «А» вторичной цепи (действующий), А		$1,47 \cdot 10^{-3}$
Ток фазы «А» первичной цепи (действующий), А		$1,77 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А» первичной цепи		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 24,41 %
50	100	
250	17,73	
350	10,55	
550	8,09	
650	5,14	
850	4,65	
Второй трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		0.408
Ток фазы «А» вторичной цепи (действующий), А		$1,47 \cdot 10^{-3}$
Ток фазы «А» первичной цепи (действующий), А		$1,77 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А» первичной цепи		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 29,32 %
50	100	
250	21,32	
350	12,68	
550	9,72	
650	6,18	
850	5,59	
Нагрузка		
Выпрямленное напряжение (среднее), В		1,9
Выпрямленный ток (среднее), А		$1,9 \cdot 10^{-3}$

Двенадцатипульсный (12-пульсный) диодный выпрямитель с параллельным соединением мостов. Полупроводниковые преобразователи с 12-пульсными выпрямителями с параллельным соединением мостов обладают теми же преимуществами, что и преобразователи с 12-пульсными выпрямителями с последовательным соединением мостов, но позволяют работать с нагрузками, имеющими более низкое напряжение. Отличительная особенность схем с параллельным соединением мостов заключается в использовании уравнивающих дросселей, предназначенных для ограничения уравнивающих токов, которые замыкаются между мостами и вторичными обмотками трансформатора, не попадая в нагрузку и в питающую сеть.

На рис.2.6 изображена схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов.

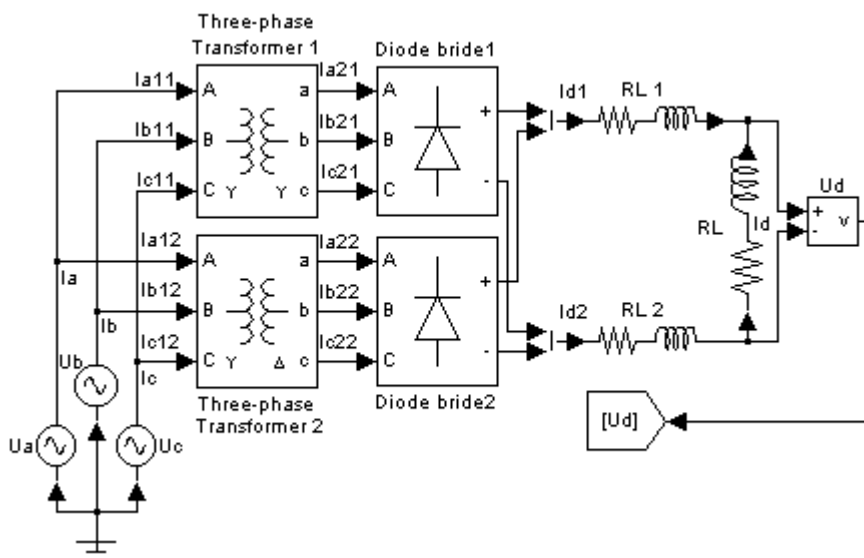


Рис. 2.6. Схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов

Схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов состоит из следующих элементов:

трех источников трехфазного напряжения (U_a, U_b, U_c); двух трехфазных трансформаторов (Three-phase Transformer 1 и Three-phase Transformer 2); двух трехфазных мостовых диодных выпрямителей (Diode bride 1, Diode bride 2); двух уравнильных дросселей (RL1 и RL 2). Нагрузка выпрямителя выполнена в виде RL цепочки.

Как видно из схемы имитационной модели, трехфазный трансформатор с двумя вторичными обмотками также представлен двумя трансформаторами, вторичная обмотка одного из которых соединена треугольником, а другого – звездой. При этом, первичные обмотки этих трансформаторов питаются от одного источника трехфазного напряжения. Такая структура модели позволяет рассчитать как общий ток, потребляемый 12-пульсным выпрямителем, так и ток, потребляемый каждым диодным мостом.

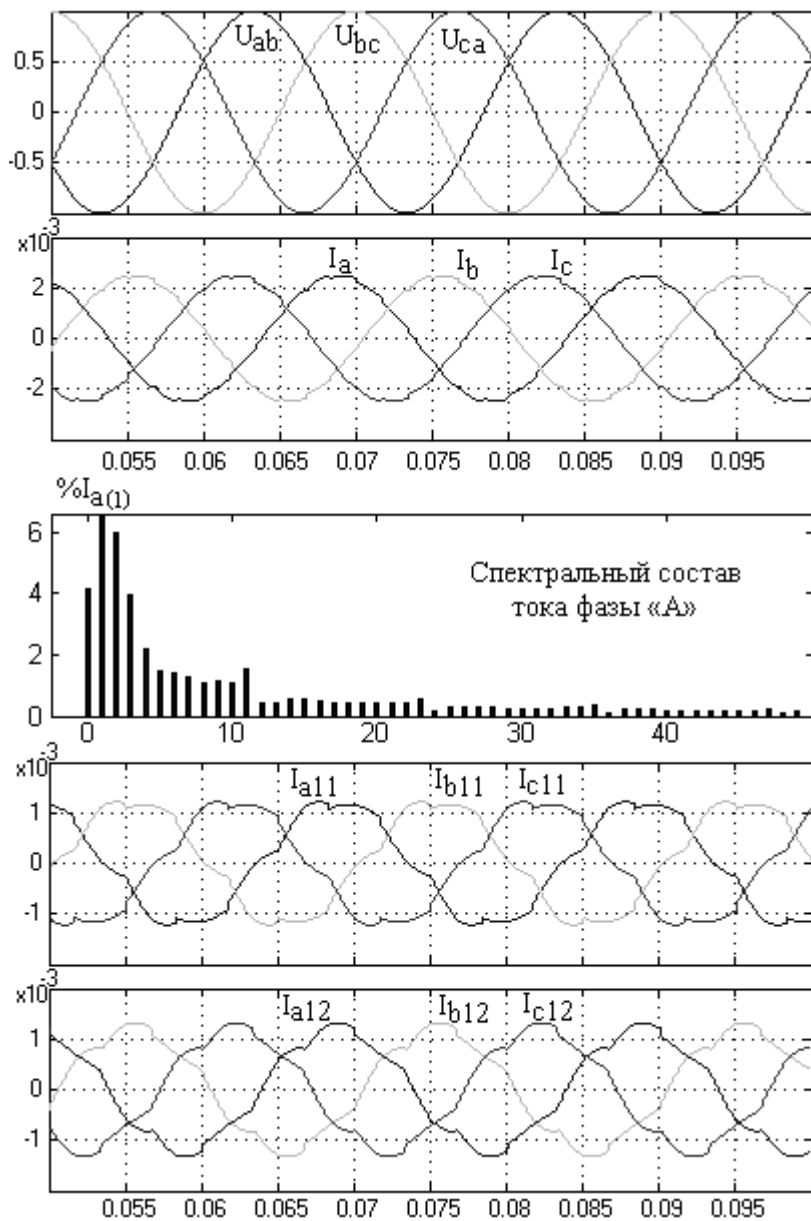
При выполнении моделирования приняты следующие параметры системы: амплитудные значения фазных напряжений источников питания $U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=0.577$ В; частота напряжения $f=50$ Гц; коэффициенты трансформации трехфазных трансформаторов $k_T=1$; активные сопротивления и индуктивности уравнильных дросселей $R_{dr}=1000$ Ом, $L_{dr}=1$ мГн; активное сопротивление и индуктивность нагрузки $R=1000$ Ом, $L=1$ мГн. Остальные параметры элементов имитационной модели установлены по умолчанию.

Результаты моделирования 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов приведены на рис.2.7 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений выпрямителя при работе в установившемся режиме.

При имитационном моделировании 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов производился расчет следующих переменных: выпрямленный ток нагрузки (I_d) и выходные токи каждого диодного моста (I_{d1}, I_{d2}); выпрямленные напряжения (U_{d1}, U_{d2}); токи, потребляемые выпрямителем от источника (I_a, I_b, I_c), и токи, потребляемые каждым трансформатором ($I_{a11}, I_{b11}, I_{c11}, I_{a12}, I_{b12}, I_{c12}$); токи вторичных цепей трансформатора ($I_{a21}, I_{b21}, I_{c21}, I_{a22}, I_{b22}, I_{c22}$); линейные напряжения вторичных цепей трансформаторов ($U_{ab21}, U_{bc21}, U_{ca21}, U_{ab22}, U_{bc22}, U_{ca22}$).

На рис.2.7 приведен спектральный состав тока, потребляемого 12-пульсным выпрямителем от источника.

Анализ полученных результатов приведен в таблице 2.11.



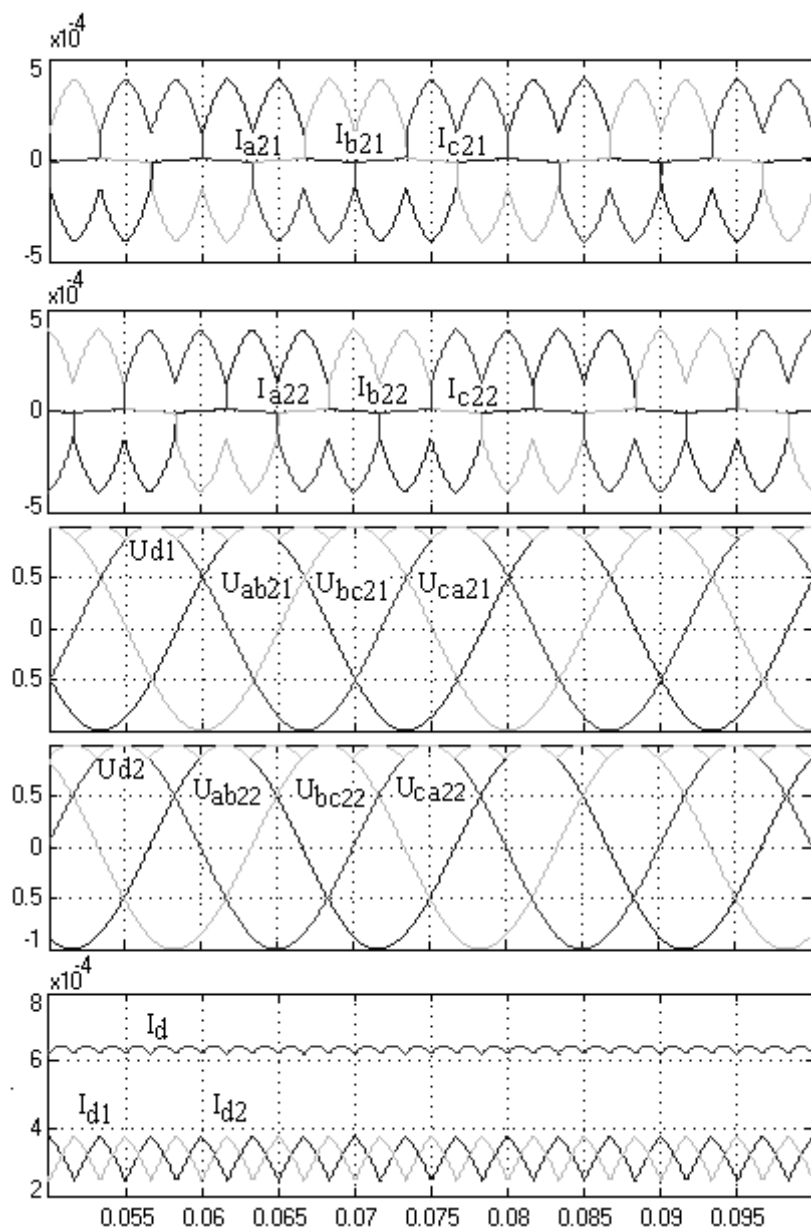


Рис.2.7. Входные и выходные токи и напряжения
12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением

Таблица 2.11

Анализ полученных результатов моделирования
12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		0.408
Линейное напряжение (действующее), В		0,7071
Ток фазы «А» (действующий), А		$1,785 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 8,51%
50	100	
100	6,02	
150	3,96	
200	2,19	
250	1,46	
300	1,43	
350	1,27	
400	1,09	
450	1,13	
500	1,10	
550	1,15	
Первый трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		$0,2346 \cdot 10^{-3}$
Ток фазы «А» вторичной цепи (действующий), А		$1,24 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А» первичной цепи		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 9,99%
50	100	
250	9,55	
350	1,54	
Второй трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		0.408
Ток фазы «А» вторичной цепи (действующий), А		$0,2346 \cdot 10^{-3}$
Ток фазы «А» первичной цепи (действующий), А		$1,24 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А» первичной цепи		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 9,97%
50	100	
250	9,52	
350	1,55	
Нагрузка		
Выпрямленное напряжение (среднее), В		0,95
Выпрямленный ток (среднее), А		$0,6 \cdot 10^{-3}$

Двухуровневый активный выпрямитель (бестрансформаторный). В составе силовой части регулируемых электроприводов, для обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты с сетью электроснабжения, могут использоваться активные выпрямители. Использование в преобразователях частоты активных выпрямителей позволяет обеспечить: форму кривой тока в сети электроснабжения близкую к синусоидальной; работу электропривода с единичным коэффициентом мощности; регулирование выпрямленного напряжения в звене постоянного тока.

Активный выпрямитель может подключаться к сети электроснабжения, как через трансформатор, так и без него, с заменой последнего на дроссели. На рис.2.8 приведена структура имитационной модели активного выпрямителя, подключенного к источнику энергии по бестрансформаторной схеме.

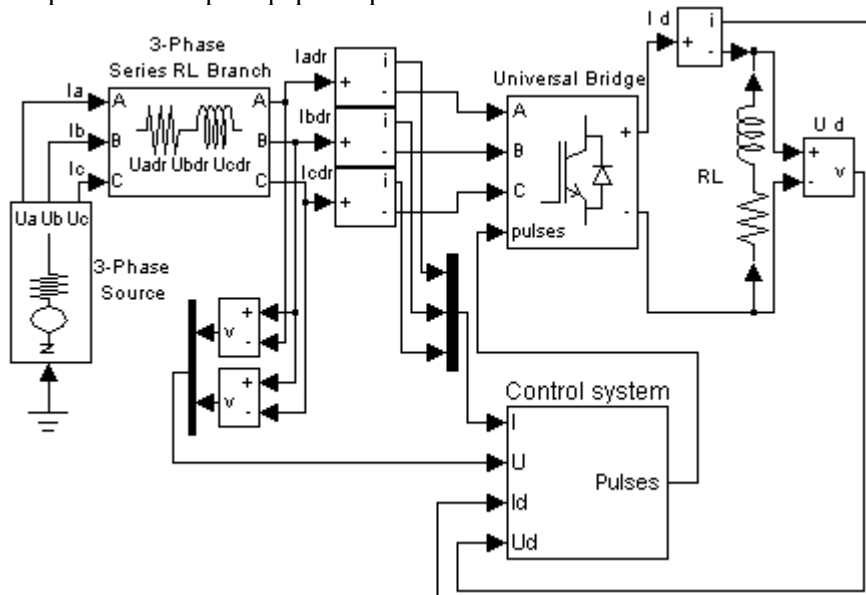


Рис. 2.8. Схема имитационной модели бестрансформаторного двухуровневого активного выпрямителя

Имитационная модель активного выпрямителя содержит следующие элементы: трехфазный источник напряжения (3-Phase Source); входные дроссели (3-Phase Series RL Branch); активный вы-

прямитель (Universal Bridge); блок системы управления (Control system). Нагрузка выпрямителя выполнена в виде RL цепочки.

При выполнении моделирования установлены следующие параметры элементов модели: амплитудные значения фазных напряжений источников питания $U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=0.577$ В; частота напряжения $f=50$ Гц; активные сопротивления и индуктивности входных дросселей $R_{dr}=1$ Ом, $L_{dr}=1$ мГн; несущая частота активного выпрямителя 1000 Гц. Активное сопротивление и индуктивность нагрузки равны $R=1000$ Ом, $L=1$ мГн. Остальные параметры всех элементов имитационной модели установлены по умолчанию. Уставка на уровень выпрямленного напряжения равна 1 В.

Система управления (блок Control system) активным выпрямителем выполнена на основе векторного алгоритма с ориентацией по вектору напряжения сети электроснабжения. Система управления содержит два канала управления компонентами тока, потребляемого активным выпрямителем из сети электроснабжения. Для обеспечения коэффициента мощности сети на уровне единицы при активно-индуктивной нагрузке, уставку на реактивный компонент, потребляемого тока, устанавливают равной нулю. Уставка на активный компонент, потребляемого тока, формируется внешним контуром регулирования выпрямленного напряжения. В контурах регулирования системы управления могут использоваться ПИ и ПИД регуляторы.

Управление полупроводниковыми ключами активного выпрямителя осуществляется по алгоритму широтно-импульсной модуляции. Более подробно алгоритм широтно-импульсной модуляции будет рассмотрено ниже.

Результаты моделирования активного выпрямителя приведены на рис.2.9 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений выпрямителя при работе в установившемся режиме.

При имитационном моделировании активного выпрямителя учитываются следующие координаты: фазные напряжения источника электрической энергии (U_a, U_b, U_c); токи источника электрической энергии (I_a, I_b, I_c); фазные напряжения между дросселем и активным выпрямителем ($U_{adr}, U_{bdr}, U_{cdr}$); токи между дросселем и активным выпрямителем ($I_{adr}, I_{bdr}, I_{cdr}$); выпрямленное напряжение (U_d) и выпрямленный ток (I_d).

Также, на рис.2.9 приведены спектральные составы токов фазы «А», потребляемого активным выпрямителем от источника и то-

ка между дросселем и активным выпрямителем. Анализ полученных результатов приведен в таблице 2.12.

Как видно из приведенных графиков, напряжение и ток, потребляемые из сети, имеют нулевую фазу сдвига относительно друг друга. Причем, напряжение на входе дросселя и потребляемый ток имеют синусоидальную форму. За счет минимального искажения тока и напряжения и их синфазности обеспечивается поддержание коэффициента мощности на уровне единицы.

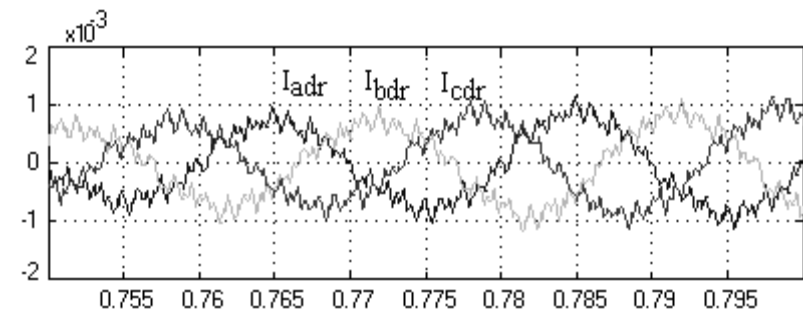
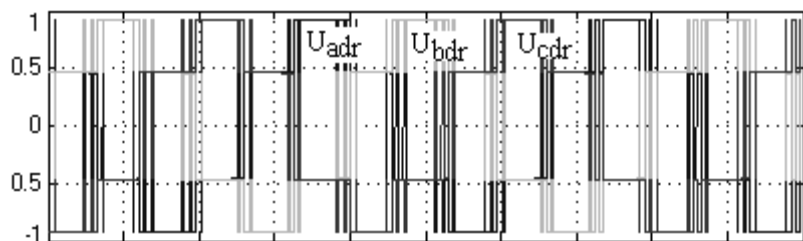
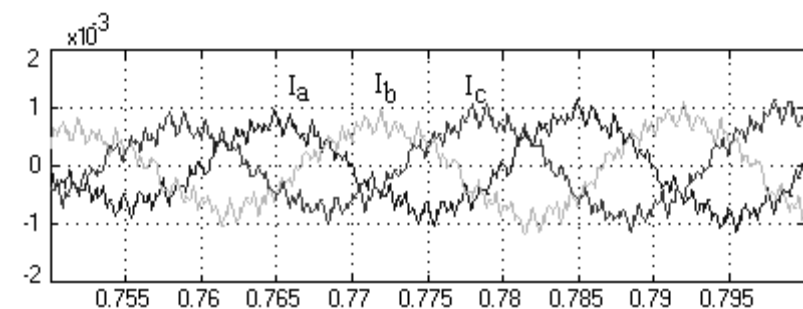
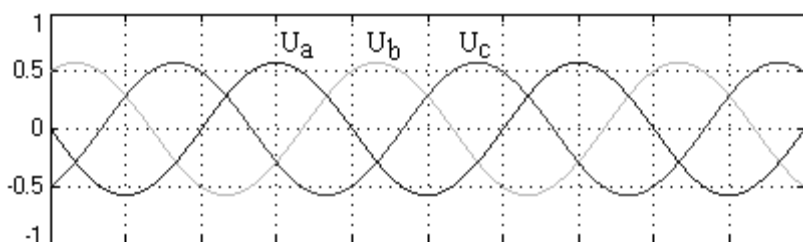
Также их графиков видно, что напряжение на выходе дросселей имеет форму импульсов. Работа активного выпрямителя в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции позволяет регулировать мгновенное значение токов, потребляемых из сети, что позволяет регулировать их синусоидальность.

Использование активного выпрямителя позволяет регулировать уровень выпрямленного напряжения. Как видно из приведенных графиков, выпрямленное напряжение не имеет импульсов, а регулирование его уровня осуществляется с высокой точностью. При этом, минимальный уровень выпрямленного напряжения активного выпрямителя равен уровню напряжения, которое формируется на выходе неуправляемого диодного выпрямителя и не может быть меньше.

Таблица 2.12

Анализ полученных результатов моделирования
двухуровневого активного выпрямителя

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		0,408
Линейное напряжение (действующее), В		0,7071
Ток фазы «А» (действующий), А		$0,85 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 7,13%
50	100	
100	1,15	
150	2,15	
150	6,67	
Нагрузка		
Выпрямленное напряжение (среднее), В		1
Выпрямленный ток (среднее), А		$0,1 \cdot 10^{-3}$



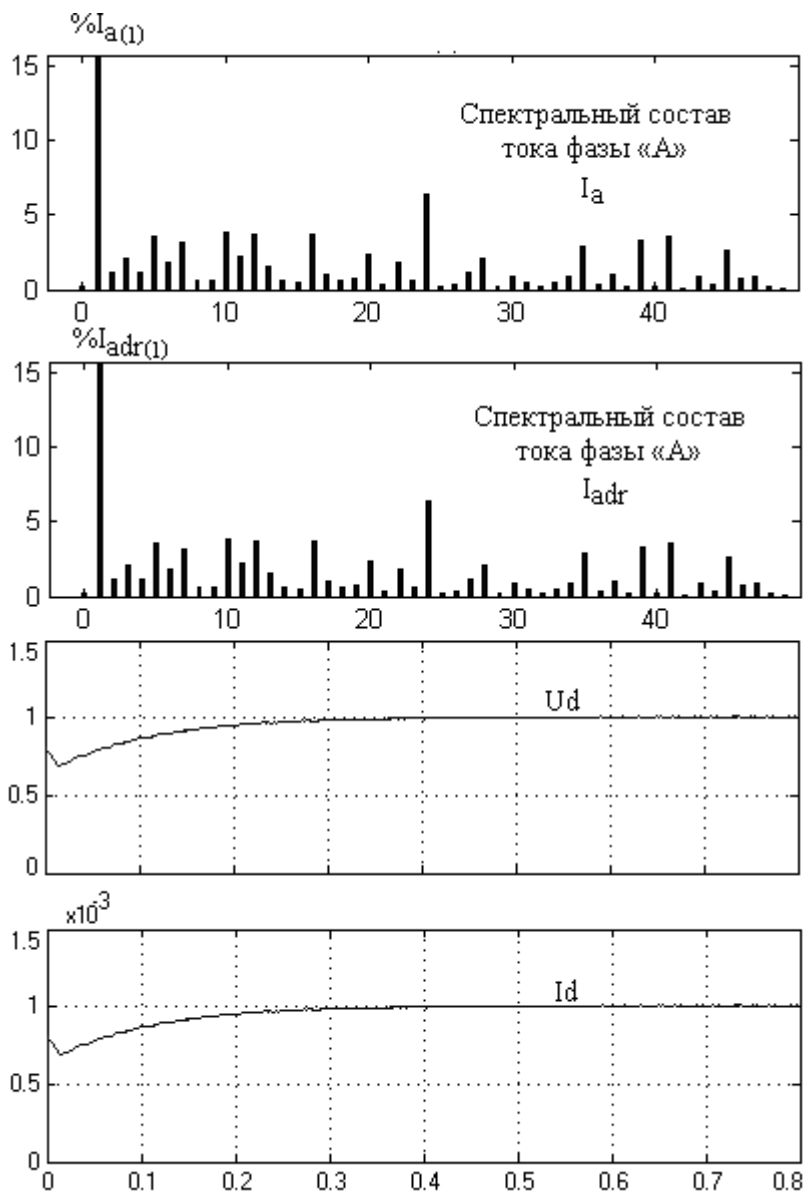


Рис.2.9. Входные и выходные токи и напряжения двухуровневого активного выпрямителя

Трехуровневый активный выпрямитель. В высоковольтных электроприводах большой мощности для управления приводными электродвигателями используют высоковольтные преобразователи частоты. В таких электроприводах наиболее целесообразно использование трехуровневых полупроводниковых преобразователей.

Основные преимущества трехуровневой схемы, по сравнению с трехфазной мостовой схемой заключаются в следующем: преобразование высокого напряжения при использовании низковольтных транзисторов, диодов и конденсаторов; повышение электромагнитной совместимости электропривода с сетью электроснабжения, за счет уменьшения искажения кривой тока; уменьшение динамических потерь в транзисторах активного выпрямителя; повышение единичной мощности преобразователя частоты.

В трехуровневом активном выпрямителе в каждом плече моста устанавливают два транзистора, включенных последовательно. На выходе трехуровневого активного выпрямителя установлено звено постоянного тока, состоящее из двух конденсаторов, которое обеспечивает стабилизацию выпрямленного напряжения. Напряжение звена постоянного тока разделяется между конденсаторами равномерно и между ними образуется точка с нулевым потенциалом. С помощью дополнительных (разделительных) диодов, точка соединения конденсаторов объединяется с точкой соединения транзисторов в каждом плече.

Система управления выпрямленным напряжением на выходе трехуровневого активного выпрямителя, как и двухуровневого, строится на основе векторного алгоритма с ориентацией по вектору тока сети электроснабжения. Управление ключами активного выпрямителя осуществляется по широтно-импульсному алгоритму.

Схемы имитационной модели трехуровневого активного выпрямителя, включенного по бестрансформаторной схеме, приведена на рис.2.10. Имитационная модель содержит следующие блоки: трехфазный источник напряжения (3-Phase Source); входные дроссели (3-Phase Series RL Branch); трехуровневый активный выпрямитель (Three-Level Bridge); конденсаторы (C1 и C2); блок системы управления (Control system). Нагрузка выпрямителя выполнена в виде RL цепочки.

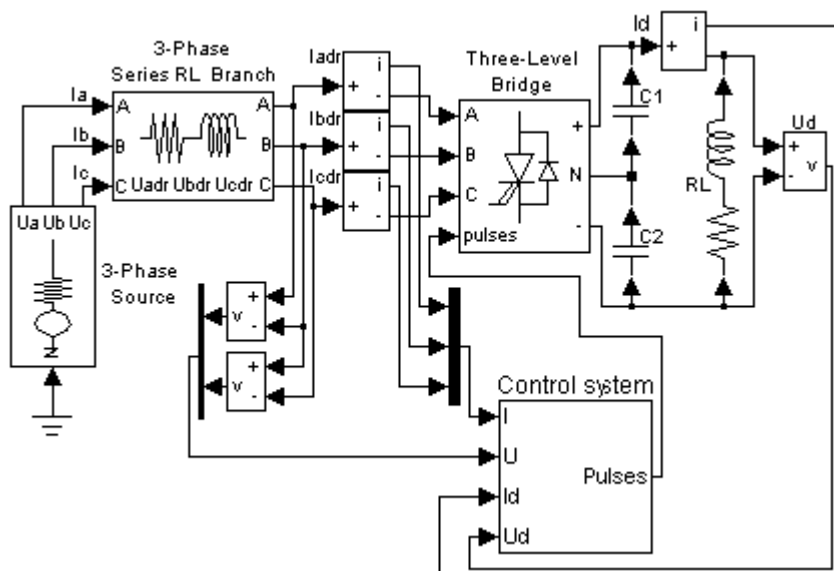


Рис. 2.10. Схема имитационной модели трехуровневого активного выпрямителя

При выполнении моделирования трехуровневого активного выпрямителя приняты следующие параметры схемы: амплитудные значения фазных напряжений источников питания $U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=0.577$ В; частота напряжения $f=50$ Гц; активные сопротивления и индуктивности входных дросселей $R_{dr}=1$ Ом, $L_{dr}=1$ мГн; несущая частота активного выпрямителя 1000 Гц; емкость конденсаторов на выходе активного выпрямителя $C_1=C_2=10$ мФ. Активное сопротивление и индуктивность нагрузки равны $R=5000$ Ом, $L=1$ мГн.

В процессе моделирования трехуровневого активного выпрямителя учитываются следующие координаты: линейные и фазные напряжения, токи источника электрической энергии ($U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$); линейные и фазные напряжения, токи между дросселем и активным выпрямителем ($U_{abdr}, U_{bcdr}, U_{acdr}, U_{adr}, U_{bdr}, U_{cdr}, I_{adr}, I_{bdr}, I_{cdr}$); выпрямленное напряжение (U_d).

Также, на рис.2.11 приведены спектральные составы тока фазы «А», потребляемого активным выпрямителем от источника, и тока между дросселем и активным выпрямителем.

Анализ полученных результатов приведен в таблице 2.13.

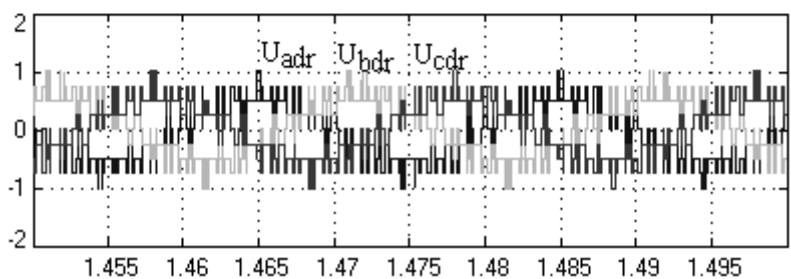
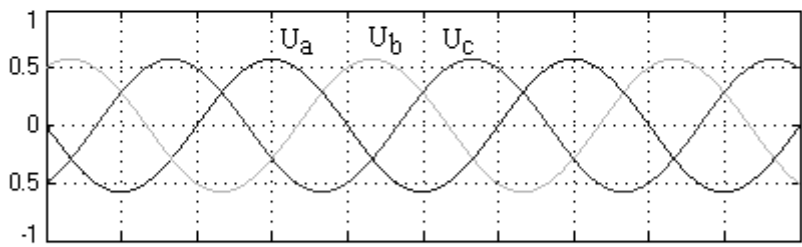
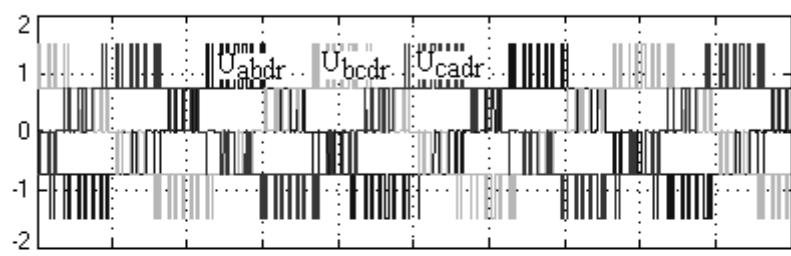
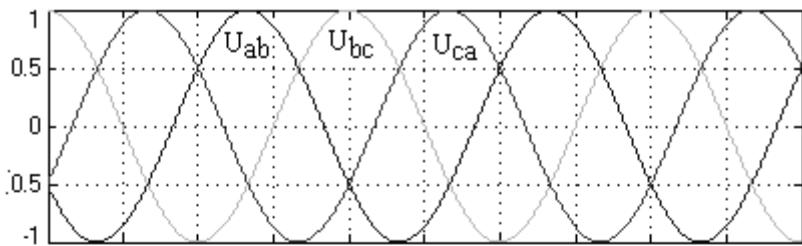
Таблица 2.13

Анализ полученных результатов моделирования
трехуровневого активного выпрямителя

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		0,408
Фазное напряжение (амплитудное), В		0,577
Линейное напряжение (действующее), В		0,7071
Линейное напряжение (амплитудное), В		1
Ток фазы «А» (действующий), А		$0,42 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		$0,6 \cdot 10^{-3}$
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 2,79%
50	100	
100	2,18	
150	1,31	
200	1,18	
250	0,8	
300	0,6	
350	0,56	
400	0,50	
450	0,46	
500	0,42	
Нагрузка		
Уставка на выпрямленное напряжение, В		1,5
Выпрямленное напряжение (среднее), В		1,5
Выпрямленный ток (среднее), А		$0,3 \cdot 10^{-3}$

Отличительная особенность трехуровневого активного выпрямителя заключается в форме напряжения на входе полупроводникового коммутатора. Это напряжение имеет три уровня: 0; $U_{ab}/2$; U_{ab} , где U_{ab} – линейное напряжение на входе дросселя.

За счет повышения количества уровней линейных напряжений обеспечиваются минимальные искажения форм фазных токов, потребляемых активным выпрямителем. При сравнении графиков, видно, что при одинаковой частоте коммутации 1000 Гц трехуровневый активный выпрямитель обеспечивает более синусоидальную форму тока, а, следовательно, и более высокий коэффициент мощности. Качество управления выпрямленным напряжением, также обеспечивается на высоком уровне.



1.455 1.46 1.465 1.47 1.475 1.48 1.485 1.49 1.495

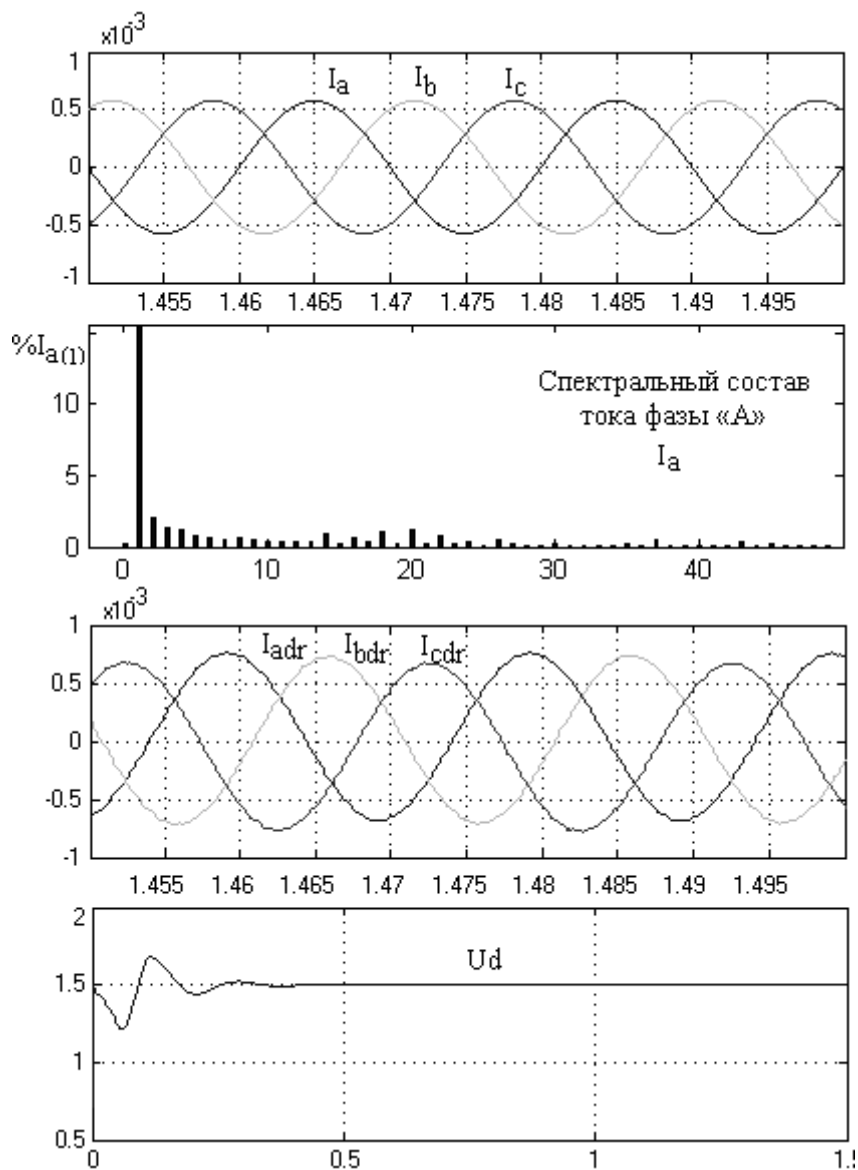


Рис.2.11. Входные и выходные токи и напряжения трехуровневого активного выпрямителя

2.4. Имитационные модели полупроводниковых автономных инверторов

На рис.2.12 представлен пример структуры автоматизированного электропривода, электроснабжение и управление режимами работы которого осуществляется с помощью автономного инвертора, собранного по трехфазной мостовой схеме и выполненного на базе полностью управляемых транзисторов (IGBT). На входе автономного инвертора установлен фильтр, состоящий из двух конденсаторов C , между которыми равномерно распределяется напряжение U_d . Трехфазная нагрузка представлена активными сопротивлениями (R_a, R_b, R_c) и индуктивностями (L_a, L_b, L_c).

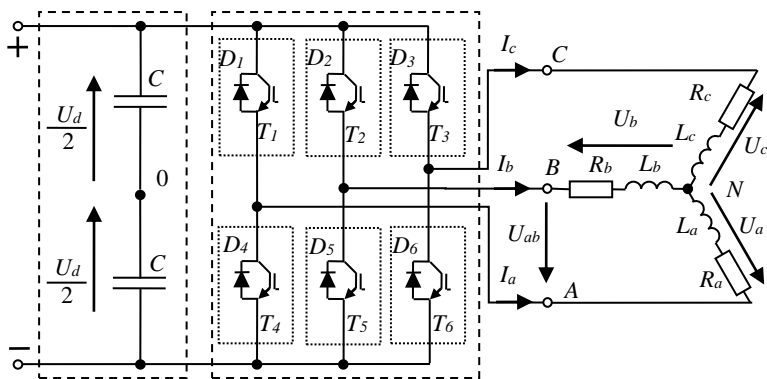


Рис.2.12. Схема автономного инвертора

Транзисторы T_1 и T_4 , T_2 и T_5 , T_3 и T_6 образуют комплементарные пары ключей. Когда один ключ такой пары находится во включенном состоянии, другой – выключен. Транзисторы T_1, T_2, T_3 образуют катодную группу ключей, а транзисторы T_4, T_5, T_6 – анодную.

На годографе результирующего вектора напряжения автономного инвертора, который

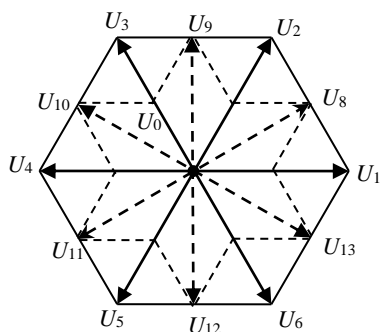


Рис. 2.13. Годограф выходного вектора напряжения

представлен на рисунке 2.13, показаны основные и промежуточные векторы. Основные векторы образуются, если в цикле переключения длительность паузы находится в интервале от 0 эл. град. $\leq \Delta T < 60$ эл. град. Годограф, образуемый этими векторами, на рис. 2.13 показан сплошной линией. Если длительность паузы находится в интервале от 60 эл. град. $\leq \Delta T < 120$ эл. град, то на выходе автономного инвертора образуются векторы с фазовым сдвигом в 30 эл. град. Годограф, образуемый этими векторами, на рис. 2.13 показан пунктирной линией.

В таблице 2.14 представлены возможные комбинации включения полупроводниковых ключей автономного инвертора и формируемые, при этих комбинациях, базовые вектора. Также, в таблице 2.14 приведены уровни линейных и фазных напряжений, формируемые на выходе автономного инвертора.

Таблица 2.14

Линейные и фазные напряжения,
формируемые на выходе автономного инвертора

Основной вектор	Коммутационная функция	Значение выходного вектора напряжения	Фазные напряжения			Линейные напряжения		
			U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
$\bar{U}_0(t)$	$S_4 = S_6 = S_2 = 1$	0	0	0	0	0	0	0
$\bar{U}_1(t)$	$S_1 = S_6 = S_2 = 1$	$\frac{2}{3}U_d e^{j0}$	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	U_d	0	$-U_d$
$\bar{U}_2(t)$	$S_1 = S_3 = S_2 = 1$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\frac{\pi}{3}}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	0	U_d	$-U_d$
$\bar{U}_3(t)$	$S_4 = S_3 = S_2 = 1$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\frac{2\pi}{3}}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$-U_d$	U_d	0
$\bar{U}_4(t)$	$S_4 = S_3 = S_5 = 1$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\frac{3\pi}{3}}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$-U_d$	0	U_d
$\bar{U}_5(t)$	$S_4 = S_6 = S_5 = 1$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\frac{4\pi}{3}}$	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	0	$-U_d$	U_d
$\bar{U}_6(t)$	$S_1 = S_6 = S_5 = 1$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\frac{5\pi}{3}}$	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	U_d	$-U_d$	0
$\bar{U}_7(t)$	$S_1 = S_3 = S_5 = 1$	0	0	0	0	0	0	0

Двухуровневый автономный инвертор. Схема имитационной модели двухуровневого автономного инвертора представлена на рис.2.14.

В состав имитационной модели входят следующие блоки: источник постоянного напряжения (U_d); двухуровневый автономный инвертор (Universal Briage); выходной дроссель (RL Branch); трехфазная нагрузка (3-phase series RL Branch); система управления (Control system).

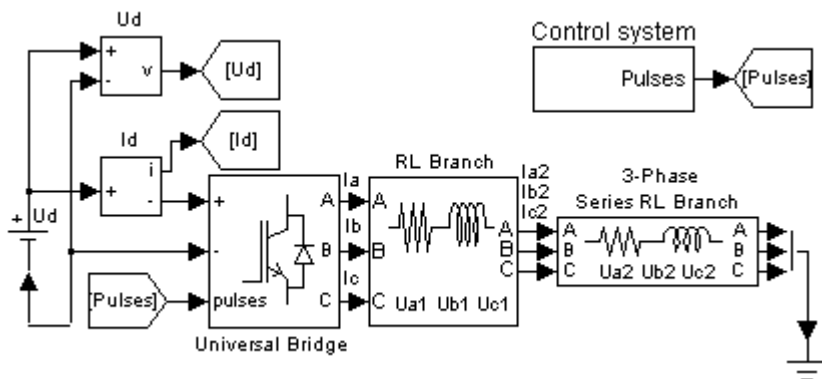


Рис. 2.14. Схема имитационной модели двухуровневого автономного инвертора

При выполнении моделирования двухуровневого автономного инвертора приняты следующие параметры схемы: напряжение источника электрической энергии $U_d=1$ В; активное сопротивление и индуктивность выходного дросселя $R=1$ Ом, $L=1$ мГн; активное сопротивление и индуктивность нагрузки $R=1000$ Ом, $L=1$ мГн; несущая частота автономного инвертора 2000 Гц. Остальные параметры всех элементов имитационной модели установлены по умолчанию. Управление полупроводниковыми ключами автономного инвертора осуществляется по алгоритму широтно-импульсной модуляции.

Результаты моделирования двухуровневого автономного инвертора приведены на рис.2.15 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений при его работе в установившемся режиме.

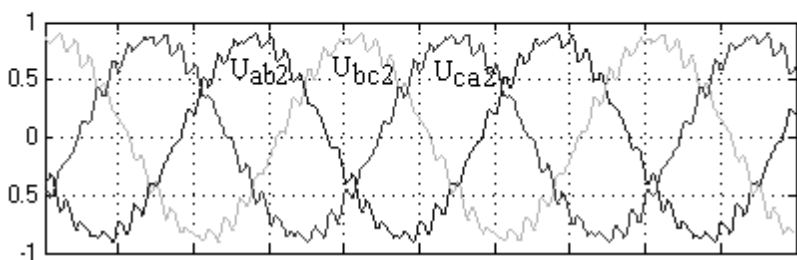
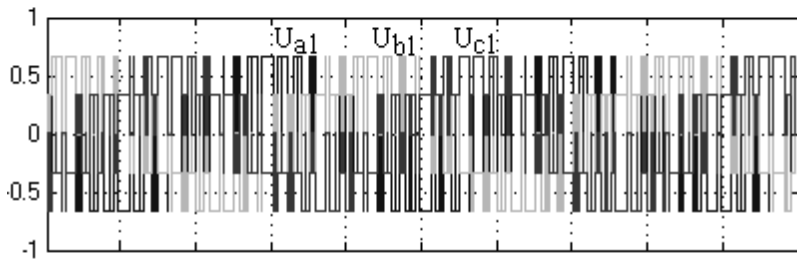
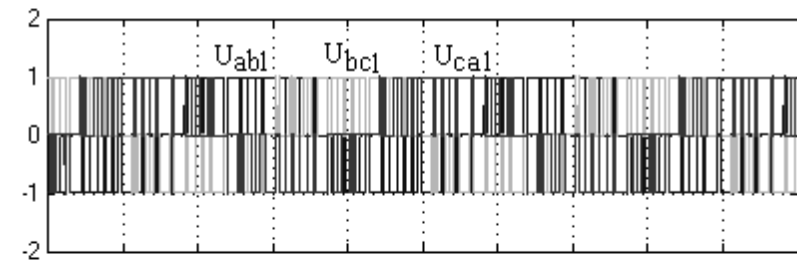
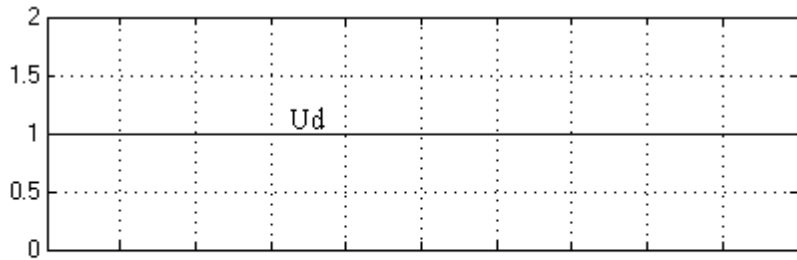
Анализ результатов представлен в таблице 2.15.

При имитационном моделировании двухуровневого автономного инвертора учитываются следующие координаты: напряжение источника электрической энергии (U_d); фазные и линейные напряжения на выходе автономного инвертора ($U_{a1}, U_{b1}, U_{c1}, U_{ab1}, U_{bc1}, U_{ca1}$); фазные и линейные напряжения на нагрузке ($U_{a2}, U_{b2}, U_{c2}, U_{ab2}, U_{bc2}, U_{ca2}$); ток на нагрузке (I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}). Также, на рис.2.15 приведены спектральные составы фазного напряжения и тока фазы «А» на потребителе.

Таблица 2.15

Анализ полученных результатов моделирования двухуровневого автономного инвертора

Напряжение источника		
Постоянное напряжение, В		1
Нагрузка		
Фазное напряжение (действующее), В		0,33
Линейное напряжение (действующее), В		0,601
Ток фазы «А» (действующий), А		$0,33 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности фазного напряжения		
Частоты гармоник напряжения, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDU): 7,67%
50	100	
100	0.9	
150	0.09	
200	0.05	
250	0.08	
300	0.05	
350	0.03	
450	0.02	
500	0.06	
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 7,37%
50	100	
100	0.16	
150	0.9	
200	0.1	
250	0.08	
300	0.07	
350	0.09	
450	0.06	
500	0.04	



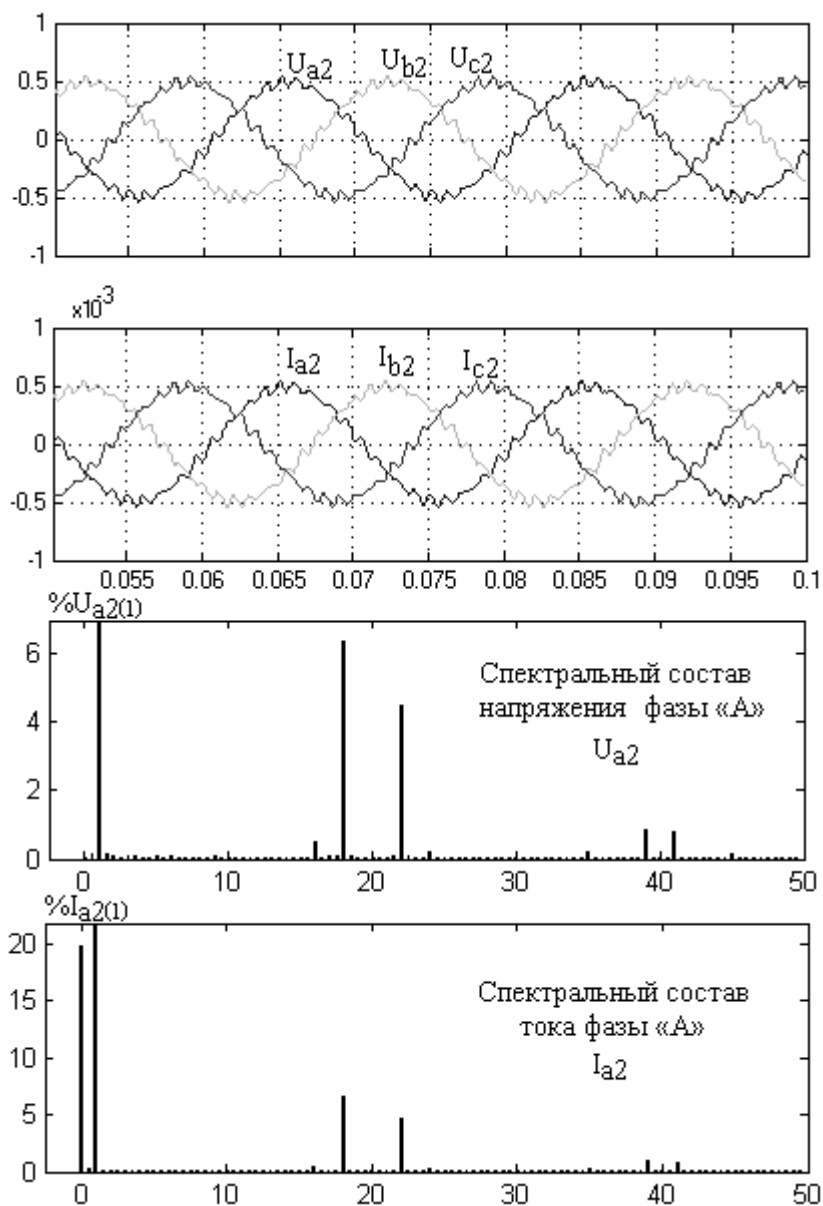


Рис.2.15. Входные и выходные токи и напряжения двухуровневого автономного инвертора

Трехуровневый автономный инвертор. Преимущества трехуровневой схемы автономного инвертора, по сравнению с двухуровневой, заключаются в следующем: обеспечивается минимальное искажение формы выходного тока; обеспечивается более высокий уровень электромагнитной совместимости преобразователя частоты с приводным электродвигателем; использование транзисторов меньшей мощности.

Схема имитационной модели трехуровневого автономного инвертора представлена на рис.2.16. В ее состав входят следующие блоки: источники постоянного напряжения (U_{d1} , U_{d2}); трехуровневый автономный инвертор (Tree Level Bridge); выходной дроссель (RL Branch); трехфазная нагрузка (3-Phase Series RL Branch); система управления (Control system); источники управляющих сигналов (A, B, C).

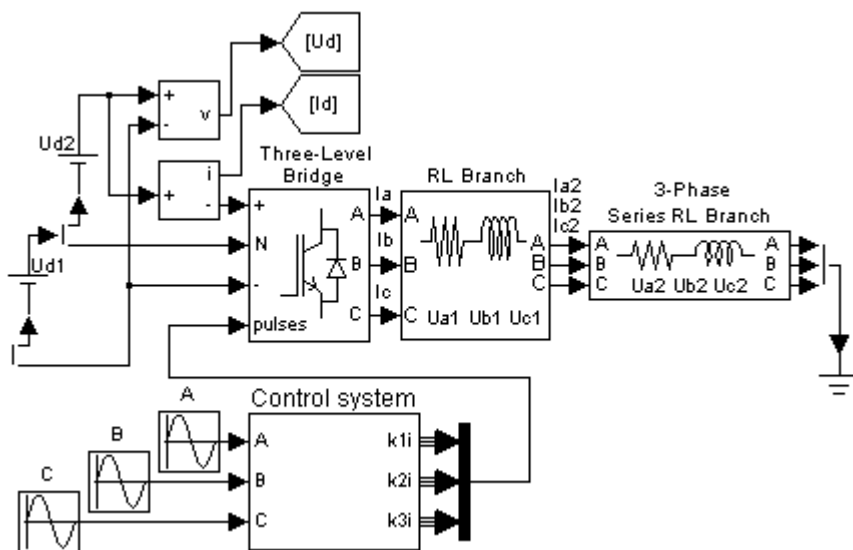


Рис. 2.16. Схема имитационной модели трехуровневого автономного инвертора

При выполнении моделирования трехуровневого автономного инвертора приняты следующие параметры схемы: напряжение источников электрической энергии $U_{d1}=0.5$ В, $U_{d2}=0.5$ В; активное сопротивление и индуктивность выходного дросселя $R=1$ Ом, $L=1$

мГн; активное сопротивление и индуктивность нагрузки $R=1000 \text{ Ом}$, $L=1 \text{ мГн}$; несущая частота автономного инвертора 2000 Гц. Остальные параметры всех элементов имитационной модели установлены по умолчанию.

Для управления полупроводниковыми ключами трехуровневого автономного инвертора используются алгоритмы широтно-импульсной модуляции.

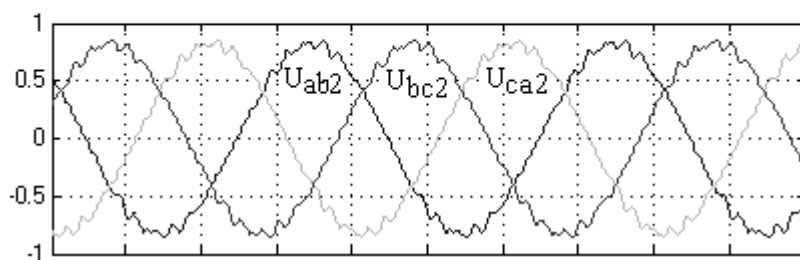
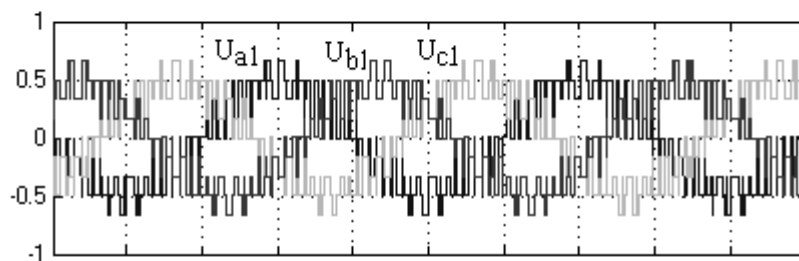
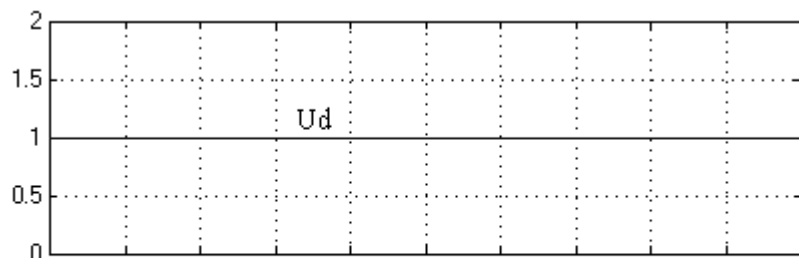
Результаты моделирования трехуровневого автономного инвертора приведены на рис.2.17 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений при его работе в установившемся режиме. Анализ результатов представлен в таблице 2.16.

При имитационном моделировании трехуровневого автономного инвертора учитываются следующие координаты: напряжение источника электрической энергии (U_a); фазные и линейные напряжения на выходе автономного инвертора (U_{a1} , U_{b1} , U_{c1} , U_{ab1} , U_{bc1} , U_{ca1}); фазные и линейные напряжения на нагрузке (U_{a2} , U_{b2} , U_{c2} , U_{ab2} , U_{bc2} , U_{ca2}); ток на нагрузке (I_{a2} , I_{b2} , I_{c2}); ток на выходе автономного инвертора (I_a , I_b , I_c). Также, на рис.2.17 приведены спектральные составы фазного напряжения и тока фазы «А» на потребителе.

Таблица 2.16

Анализ полученных результатов моделирования трехуровневого автономного инвертора

Напряжение источника		
Постоянное напряжение (суммарное), В		1
Нагрузка		
Фазное напряжение (действующее), В		0,33
Линейное напряжение (действующее), В		0,601
Ток фазы «А» (действующий), А		$0,33 \cdot 10^{-3}$
Искажение синусоидальности фазного напряжения		
Частоты гармоник напряжения, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDU): 3,19%
50	100	
100	0.25	
150	0.03	
Искажение синусоидальности тока фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 3,17%
50	100	
100	0.24	
150	0.2	



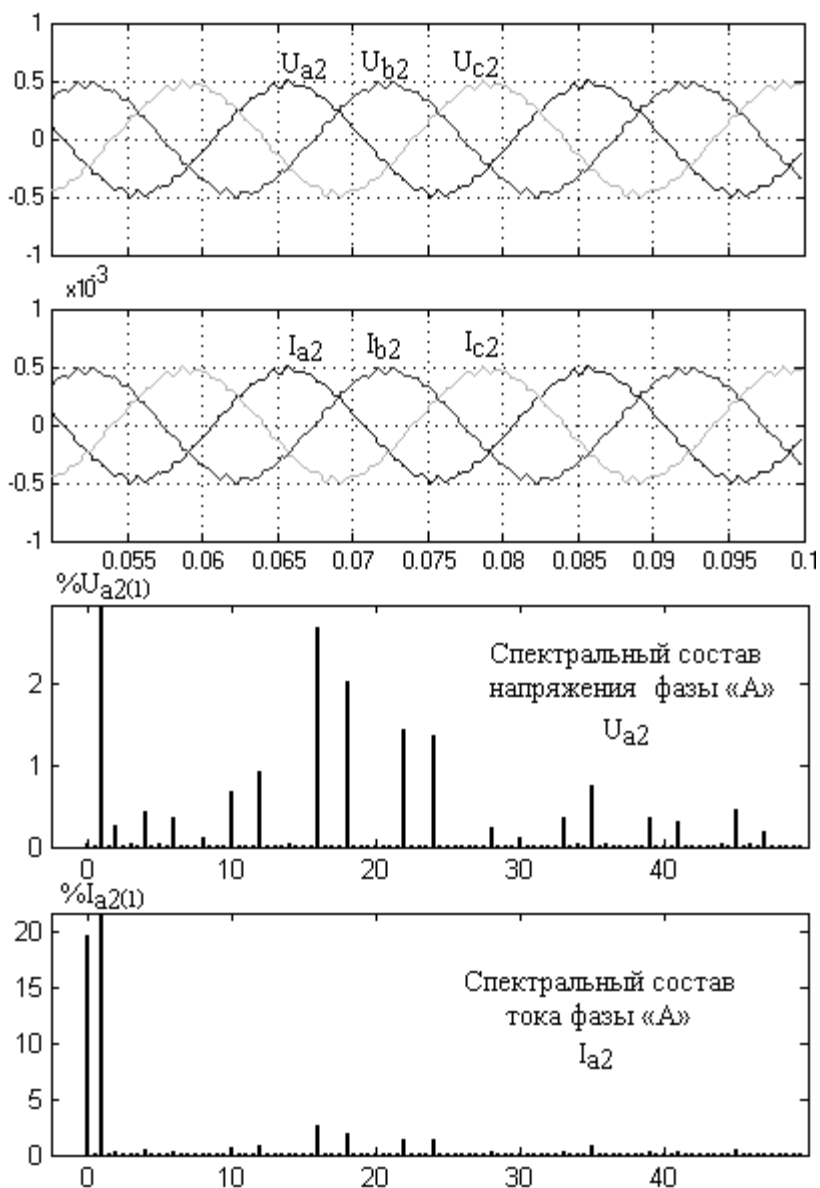


Рис.2.17. Входные и выходные токи и напряжения трехуровневого автономного инвертора

2.5. Структура блоков управления полупроводниковыми преобразователями

Для управления полупроводниковыми ключами автономного инвертора при использовании скалярных и векторных алгоритмов управления приводными машинами переменного тока применяются различные методы **широтно-импульсной модуляции**. На рис. 2.18 сплошными линиями представлена схема управления автономным инвертором с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией.

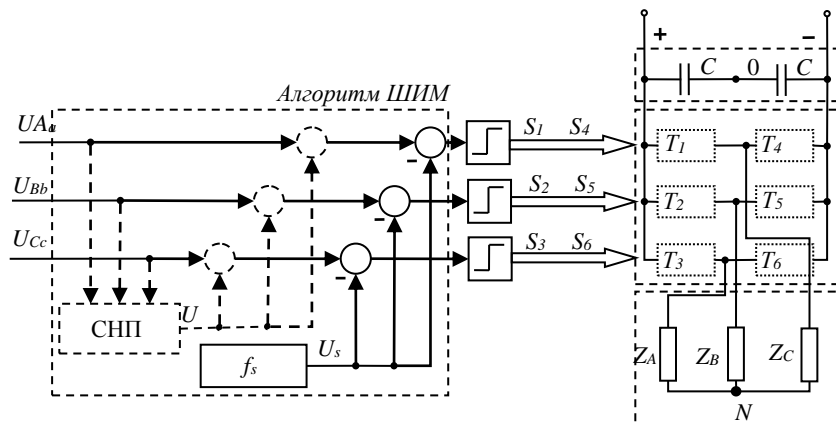
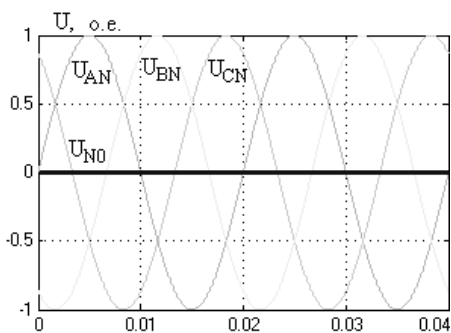


Рис. 2.18. Схема управления автономным инвертором с широтно-импульсной модуляцией

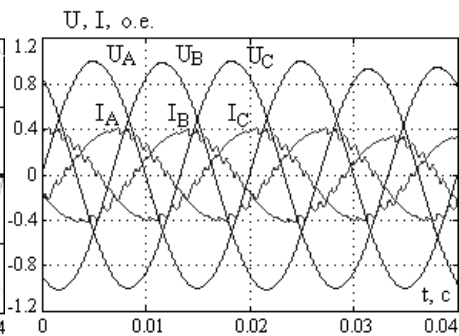
При реализации синусоидальной широтно-импульсной модуляции опорный сигнал U_s , который может иметь различную форму, сравнивается с управляющими сигналами U_a , U_b , U_c . При их сравнении формируются коммутационные функции управления полупроводниковыми ключами S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , S_6 .

На рис.2.19а показан управляющий сигнал синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ).

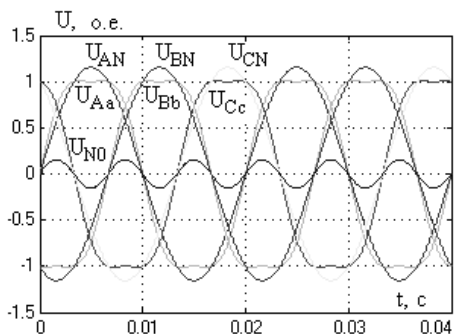
В системе **прямого управления электромагнитным моментом** (*Direct Torque Control - DTC*) результирующий вектор выходного напряжения автономного инвертора и комбинация коммутируемых полупроводниковых ключей выбирается по таблице переключений. В зависимости от структуры электропривода и требований к его динамическим характеристикам таблица переключений может иметь различное внутреннее содержание.



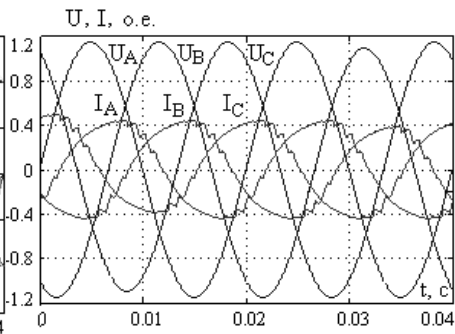
а) синусоидальная ШИМ



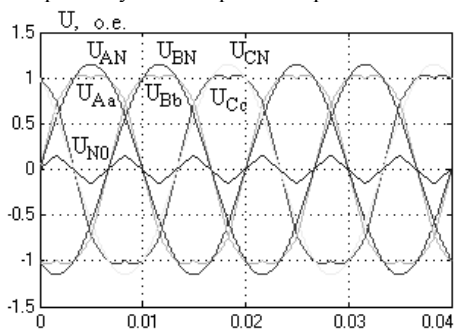
а) синусоидальная ШИМ



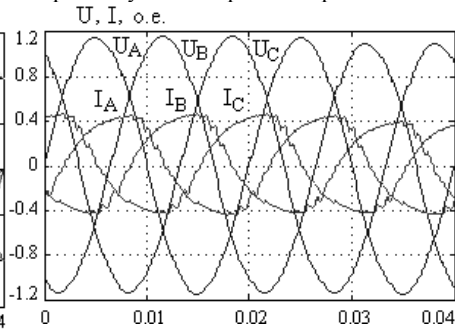
б) ШИМ с синусоидальной
предмодуляцией третьей гармоникой



б) ШИМ с синусоидальной
предмодуляцией третьей гармоникой



с) ШИМ с треугольной
предмодуляцией третьей гармоникой



с) ШИМ с треугольной
предмодуляцией третьей гармоникой

Рис. 1.19. Управляющие функции широтно-импульсной модуляции

Рис. 2.20. Формы выходных токов и напряжения автономного инвертора

Принцип функционирования системы прямого управления проиллюстрирован на рис.2.21. Если вектор Ψ_s в определенный момент времени находится в секторе II и необходимо увеличить его амплитуду и уменьшить электромагнитный момент, то по таблице переключений система управления выберет и сформирует вектор U_4 . Когда вектор Ψ_s переместится в сектор III, вектор U_4 будет выбираться при необходимости уменьшения амплитуды вектора Ψ_s .

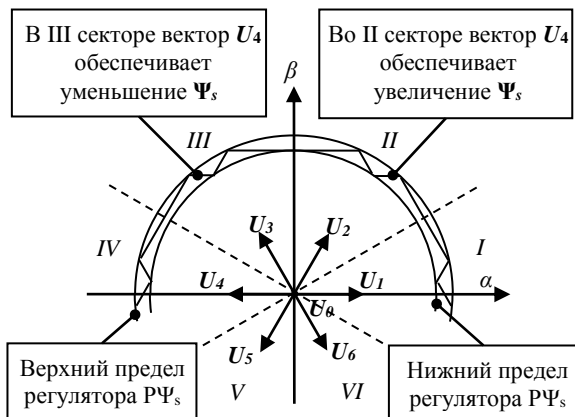


Рис.2.21. Годограф потокосцепления статора асинхронного двигателя

На рис.2.22 представлена схема алгоритма управления автономным инвертором в системе прямого управления моментом. Коммутация автономного инвертора носит стохастический (случайный) характер, а частота коммутации определяется параметрами релейных регуляторов системы управления электроприводом.

Система прямого управления моментом обеспечивает высокие динамические характеристики электропривода, но стохастический характер переключения автономного инвертора приводит к высокой степени искажения формы кривой тока и напряжения, что снижает уровень электромагнитной совместимости автономного инвертора с проводным электродвигателем. Анализ предельных динамических характеристик систем управления асинхронным электроприводом приведен в Приложении Б.

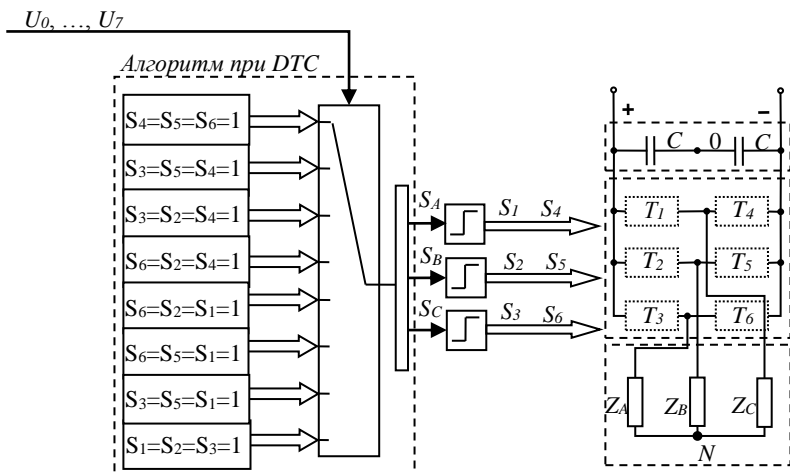


Рис. 2.22. Схема управления автономным инвертором электропривода с прямым управлением

В современных электроприводах для управления ключами автономного инвертора могут использоваться алгоритмы **пространственно-векторной модуляции**. На рис.2.23 представлена структура алгоритма пространственно-векторной модуляции. Этот алгоритм включает в себя следующие этапы расчета: вычисление модуля и фазы эталонного вектора напряжения; определение сектора, в котором находится эталонный вектор напряжения; вычисление интервалов времени включения активных векторов напряжения T_α , T_β , T_γ ; формирование коммутационных функций управления полупроводниковыми ключами автономного инвертора.

Компоненты вектора эталонного напряжения U_α , U_β и U_γ , на первом этапе алгоритма ПВМ, преобразуются из трехфазной системы координат (ABC) в двухфазную – $(\alpha-\beta)$, затем вычисляется модуль и фаза эталонного вектора по следующим выражениям:

$$|\bar{U}| = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}; \varphi_U = \arctan(U_\alpha/U_\beta), \quad (2.1)$$

где U_α , U_β – компоненты вектора эталонного напряжения в двухфазной системе координат $(\alpha-\beta)$. По величине фазы эталонного вектора напряжения определяется сектор, в котором находится этот вектор. Границы секторов образуют активные векторы выходного

напряжения автономного инвертора. Эти секторы представлены в таблице 2.17 и на рис.2.24.

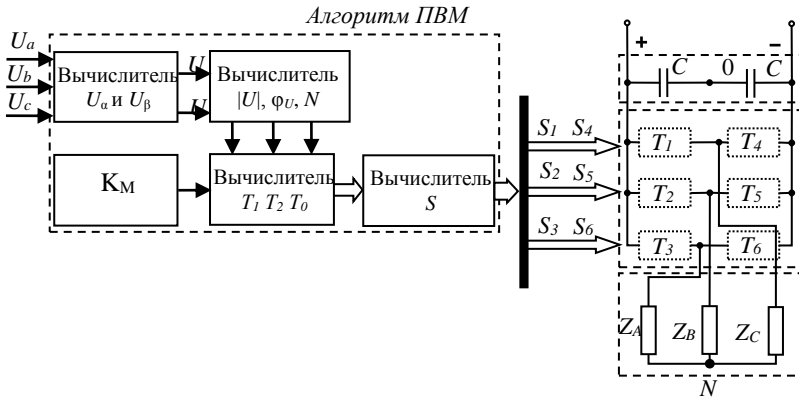


Рис. 2.23. Схема управления автономным инвертором с пространственно-векторной модуляцией

Далее вычисляются временные интервалы действия основных векторов на периоде ПВМ T_c . Если эталонный вектор представить как

$$\bar{U} = U_i \frac{T_1}{T_c} + U_{i+1} \frac{T_2}{T_c} + U_{0,7} \frac{T_0}{T_c}, \quad (2.2)$$

где $i=1 \div 6$ – номер активного вектора, то временные интервалы включения основных векторов для каждого из шести секторов можно определить по выражениям, указанным в таблице 2.17.

Таблица 2.17.

Выражения для расчета временных интервалов

Сектор	1	2	3	4	5	6
T_1	$\frac{3U_\alpha - \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$\frac{3U_\alpha + \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$0U_\alpha + \frac{\sqrt{3}U_\beta}{2}$	$-\frac{3U_\alpha + \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$-\frac{3U_\alpha - \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$0U_\alpha - \frac{\sqrt{3}U_\beta}{2}$
T_2	$0U_\alpha + \frac{\sqrt{3}U_\beta}{2}$	$-\frac{3U_\alpha + \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$-\frac{3U_\alpha - \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$0U_\alpha - \frac{\sqrt{3}U_\beta}{2}$	$\frac{3U_\alpha - \sqrt{3}U_\beta}{4}$	$\frac{3U_\alpha + \sqrt{3}U_\beta}{4}$
T_0	$0.5T_c - T_2 - T_1$					

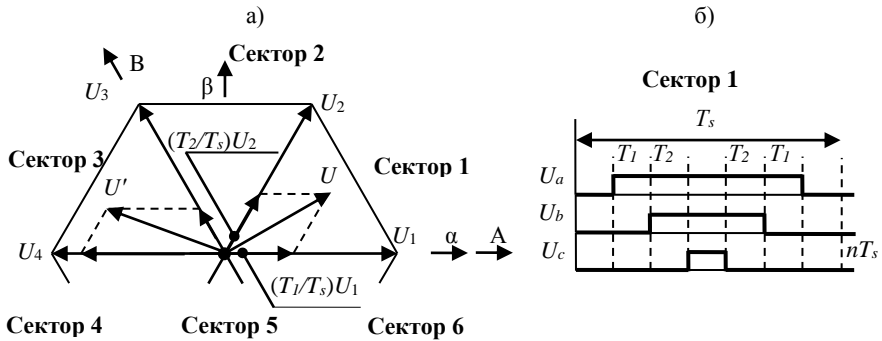


Рис. 2.24. Секторное разбиение координатной плоскости α - β

Если эталонный вектор находится в первом секторе, как это показано на рис.2.24, то для формирования такого же результирующего вектора напряжения на выходе автономного инвертора на одном модуляционном периоде должны последовательно включаться транзисторы, обеспечивающие работу векторов $U_0 - U_1 - U_2 - U_7 - U_2 - U_1 - U_0$ в течении времени T_1 , T_2 и T_0 . Временная диаграмма работы инвертора показана на рис.2.24б.

Повышение эффективности алгоритма широтно-импульсной модуляции

Для повышения амплитуды вектора выходного напряжения автономного инвертора при широтно-импульсной модуляции может использоваться метод предмодуляции управляющего сигнала. Для этого к управляющим сигналам U_{Aa} , U_{Bb} , U_{Cc} добавляют сигнал нулевой последовательности U_{N0} специальной формы и частоты. Схема широтно-импульсного алгоритма с предмодуляцией показана на рис.2.18 с учетом пунктирных линий. Блок «СНП» рассчитывает необходимую частоту и амплитуду сигнала предмодуляции U_{N0} в зависимости от частоты и амплитуды управляющих сигналов U_{Aa} , U_{Bb} , U_{Cc} .

При реализации алгоритма широтно-импульсного управления с синусоидальной предмодуляцией третьей гармоникой, сигнал нулевой последовательности рассчитывается следующим образом:

$$U_{N0} = 0,15A \sin(3\omega t), \quad (2.3)$$

где A - амплитуда управляющего сигнала, ωt - частота управляю-

шего сигнала. При использовании синусоидальной предмодуляции форма управляющего сигнала автономного инвертора имеет форму, представленную на рис.2.19 б.

На рис. 2.19 в представлен сигнал треугольной предмодуляции третьей гармоникой, частота и амплитуда которого определяется по следующему выражению:

$$U_{N0} = 0,25A \arcsin[\sin(3\omega t)]. \quad (2.4)$$

При использовании различных форм сигналов нулевой последовательности обеспечивается различный уровень электромагнитной совместимости автономного инвертора, результаты исследования которой будет представлен ниже.

На рис. 2.20 а, 2.20 б, 2.20 в представлены формы кривых выходных токов автономного инвертора и первой гармоники напряжения при синусоидальной ШИМ, ШИМ с синусоидальной предмодуляцией третьей гармоникой и ШИМ с треугольной предмодуляцией третьей гармоникой, соответственно. Данные кривые получены при коэффициенте модуляции $K_M=1$ и несущей частоте $f_s=1000$ Гц.

На рис.2.25 приведены зависимости коэффициента искажения синусоидальности кривой тока (*Total Harmonic Distortion of input current - THDI*) от коэффициента модуляции при разных несущих частотах и зависимости коэффициента мощности от несущей частоты при разных коэффициентах модуляции при разных способах управления автономным инвертором (рис.2.25а – при синусоидальной ШИМ; рис.2.25б – при ШИМ с синусоидальной предмодуляцией третьей гармоникой; рис.2.25в – при ШИМ с треугольной предмодуляцией третьей гармоникой).

При синусоидальной ШИМ на несущей частоте $f_s=10$ кГц обеспечивается минимальное искажение кривой тока во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции ($THDI=0$). При несущей частоте $f_s=1000$ Гц и коэффициенте модуляции $K_M=1$ коэффициент искажения синусоидальности тока $THDI=5,5\%$.

При ШИМ с синусоидальной предмодуляцией третьей гармоникой на несущей частоте $f_s=10$ кГц обеспечивается минимальное значение коэффициента искажения синусоидальности тока около $7,5\%$. При несущей частоте $f_s=1000$ Гц и коэффициенте модуляции $K_M=1$ коэффициент искажения синусоидальности тока повышается до $9,5\%$.

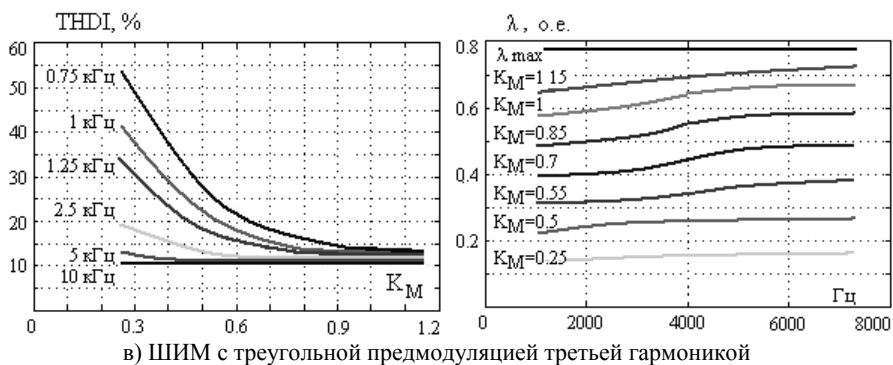
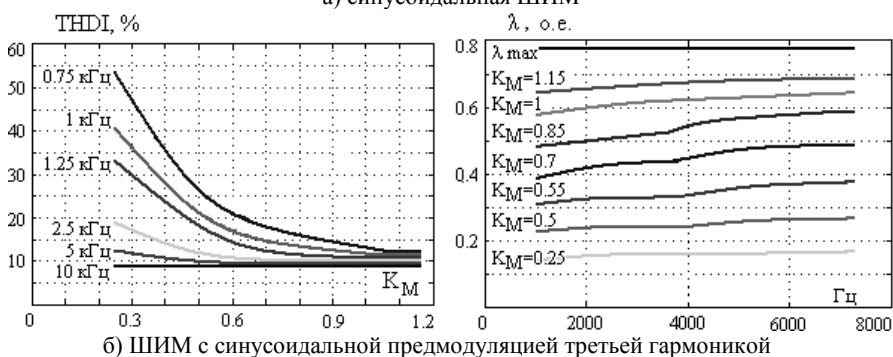
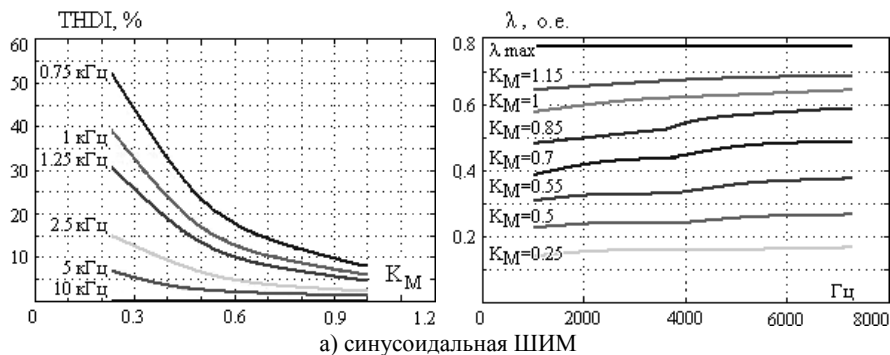


Рис.2.25. Зависимости коэффициента синусоидальных искажений тока от коэффициента модуляции при разных несущих частотах и коэффициента мощности от несущей частоты при разных коэффициентах модуляции

Искажение синусоидальности кривой тока при ШИМ с треугольной предмодуляцией третьей гармоникой самый высокий из трех рассмотренных способов ШИМ автономного инвертора и равен $THDI=13\%$ при несущей частоте $f_s=1000$ Гц и коэффициенте модуляции $K_M=1$. При увеличении несущей частоты до $f_s=10$ кГц и коэффициента модуляции до $K_M=1,15$ коэффициент искажения синусоидальности тока равен 10% .

Амплитуда первой гармоники выходного напряжения при синусоидальной ШИМ равна $78,55\%$ от величины напряжения в звене постоянного тока U_{dc} . При использовании ШИМ с предмодуляцией первая гармоника выходного напряжения равна $100\% U_{dc}$, что обеспечивается за счет возможности увеличения коэффициента модуляции до значения $1,15$.

На рис.2.25 видно, что увеличение коэффициента мощности при увеличении несущей частоты характерно для всех способов управления ключами. При ШИМ с предмодуляцией при коэффициенте модуляции $K_M=1,15$ обеспечивается коэффициент мощности на уровне $\lambda=0,7$ на высоких несущих частотах, при максимально возможном коэффициенте мощности $\lambda =0,7864$.

Повышение эффективности алгоритма пространственно-векторной модуляции

Повысить эффективность работы алгоритма ПВ модуляции можно путем разбиения координатной плоскости на подсекторы. Это позволит обеспечить улучшение формы кривой тока, а именно, снизить коэффициент несинусоидального искажения выходного тока и увеличить амплитуду основной гармоники выходного напряжения. При этом нет необходимости структурного изменения схемы автономного инвертора. Расчет временных интервалов T_1 и T_2 с учетом подсектора (n), в котором находится эталонный вектор, можно осуществить с помощью следующих выражений

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_c|U|}{U_{dc}} \left(\sin \frac{\pi}{3} n \cos \varphi_U - \cos \frac{\pi}{3} n \sin \varphi_U \right); \quad (2.5)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_c|U|}{U_{dc}} \left(-\cos \varphi_U \sin \frac{\pi}{3} (n-1) - \sin \varphi_U \cos \frac{\pi}{3} (n-1) \right), \quad (2.6)$$

На рис. 2.26 а, 2.26 б и 2.26 в показано разбиение координатной плоскости на 36, 72 и 120 подсекторов, соответственно.

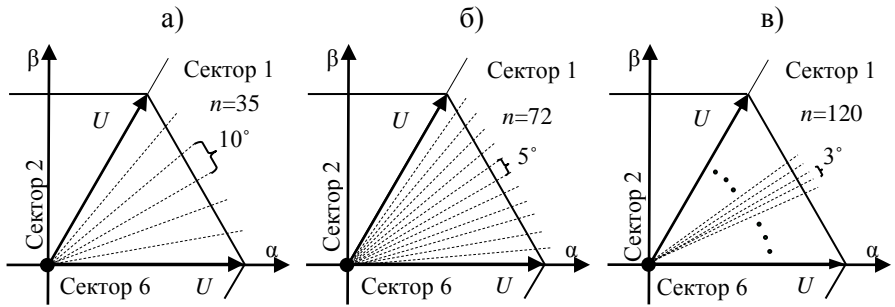


Рис.2.26. Разбиение координатной плоскости α - β на подсекторы

На рис.2.27 представлены формы кривых выходного тока автономного инвертора, фазного напряжения и первая гармоника фазного напряжения при величине подсектора: а- 60° ; б- 10° ; в- 5° ; г- 3° .

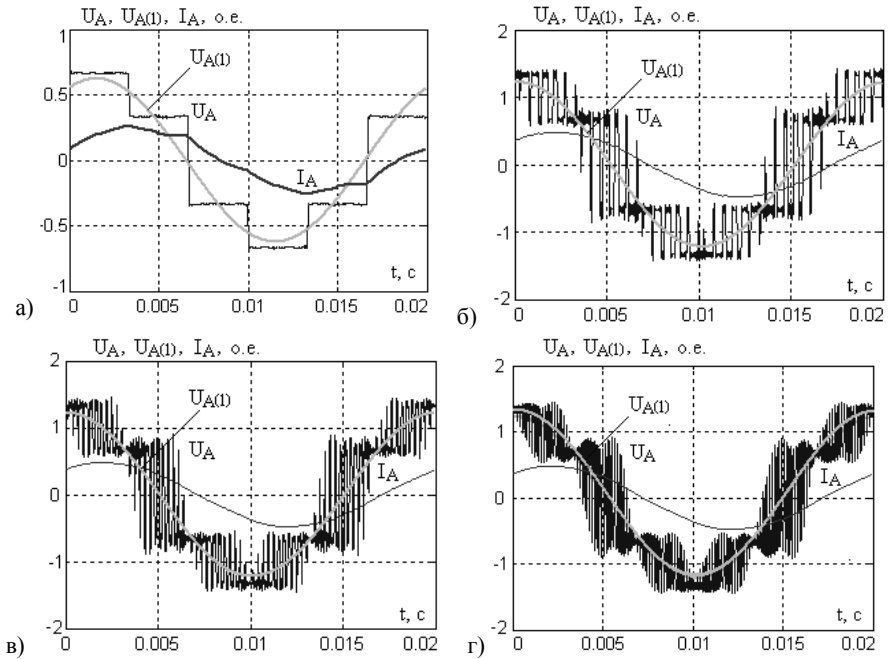


Рис.2.27. Выходной ток автономного инвертора, фазное напряжение и первая гармоника фазного напряжения

При величине сектора 60° характер ПВМ соответствует СШИМ. При уменьшении величины подсекторов и увеличении их количества увеличивается частота коммутации автономного инвертора. В свою очередь это обеспечивает лучшую форму кривой выходного тока автономного инвертора.

Максимальное значение выходного фазного напряжения автономного инвертора равно 66.7% от величины постоянного напряжения на входе автономного инвертора. Максимальное значение основной гармоники выходного фазного напряжения равно 61% постоянного входного напряжения автономного инвертора.

На рис.2.28 представлены зависимости, характеризующие изменение коэффициента несинусоидальных искажений выходного фазного напряжения и тока при изменении относительной длительности коммутации автономного инвертора и величины подсектора.

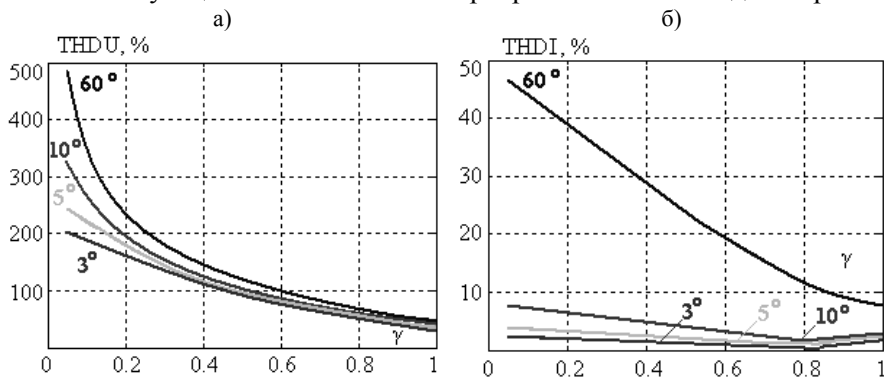


Рис.2.28. Зависимости коэффициента несинусоидальных искажений напряжения ($THDU$) и тока ($THDI$) на выходе автономного инвертора от относительной длительности коммутации (γ) при разной величине подсектора

Минимальное значение коэффициента несинусоидальных искажений выходного тока (рис.2.28 а) достигается при величине подсектора равного 3° и работе автономного инверторе в режиме пере­модуляции т.е. при относительной длительности коммутации выше 0.866. Минимальное значение коэффициента несинусоидального искажения фазного напряжения (рис.2.28 б) достигается при величине относительной длительности коммутации автономного инвер­тора равной 0.866 и находится ниже 3%.

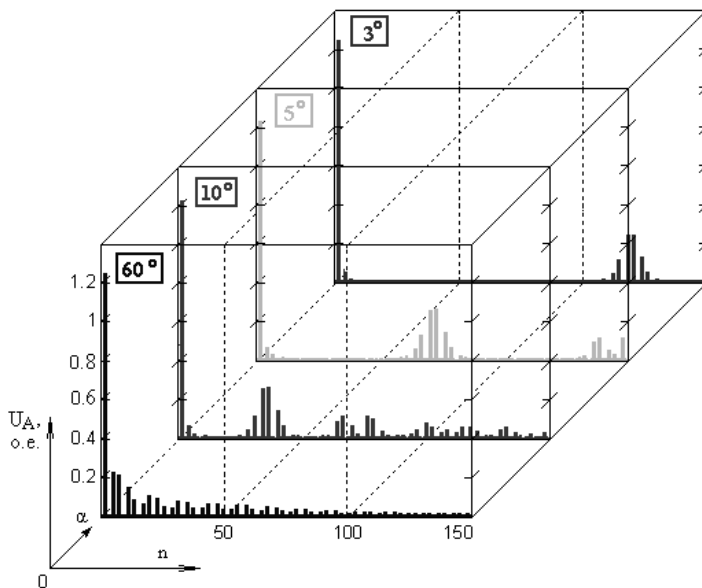


Рис.2.29. Спектры фазного напряжения

При шестидесятиградусной величине сектора и величине относительной длительности коммутации ниже 0.866 гармонический состав фазного напряжения соответствует гармоническому составу СШИМ, а при увеличении относительной длительности коммутации выше 0.866 – ШИМ с предмодуляцией. Из рис.2.29 в видно, как при уменьшении величины подсектора гармоники выходного напряжения, имеющие наибольшую амплитуду, смещаются в зоны высоких частот.

Таким образом, использование ШИМ с предмодуляцией позволяет увеличить амплитуду выходного напряжения автономного инвертора на 15%, при этом увеличивается коэффициент несинусоидальных искажений тока. Для треугольной предмодуляции этот параметр растет сильнее. Пространственно-векторная модуляция по сравнению с широтно-импульсной обеспечивает более высокое значение энергетических характеристик: снижение коэффициентов несинусоидальных искажений фазного напряжения и тока; повышение амплитуды основной гармоники выходного фазного напряжения в режиме перемодуляции; снижение уровня высокочастотных составляющих фазного напряжения.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1. Двухтрансформаторный преобразователь частоты с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

Двухтрансформаторные схемы преобразователей частоты находят широкое применение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. Принципиальная схема и пример использования такой схемы преобразователя частоты приведены в разделе 1.4.

В высоковольтных двухтрансформаторных схемах преобразователей частоты используются низковольтные полупроводниковые выпрямительно-инверторные ячейки и трансформаторы: понижающий – входной; повышающий – выходной.

Имитационная модель такого преобразователя частоты представлена на рис.3.1. Анализ электромагнитных процессов проводился в установившемся режиме работы. Нагрузка преобразователя имеет активно-индуктивный характер. Параметры имитационной модели представлены в таблице 3.1. Параметры блоков, не указанные в таблице, установлены по умолчанию. С помощью блоков Measures осуществляется измерение координат преобразователя.

Таблица 3.1

Параметры имитационной модели двухтрансформаторного преобразователя частоты с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

Элемент силовой схемы	Название блока	Параметры
Трёхфазный источник напряжения	U _a , U _b , U _c	U _{am} =U _{bm} =U _{cm} =8165 В; f _n =50 Гц; φ _a =0°, φ _b =120°, φ _c =-120°
Понижающий трансформатор	Three-phase Transformer 1	P _n =500 кВт; Y/Y; 10/0.7 кВ; f _n =50 Гц
Трёхфазный мостовой выпрямитель	Diode bridge	Diodes
Звено постоянного тока	DC	L=0.001 Гн; C=100 мФ
Трёхфазный автономный инвертор	Inverter	IGBT / Diodes; 2000 Гц
Повышающий трансформатор	Three-phase Transformer 2	P _n =500 кВт; Y/Y; 0,7/10 кВ; f _n =50 Гц
Выходной LC – фильтр	LC Filter	U _n =10 кВ; f _n =50 Гц; L= 0.002 Гн; C=50 мФ
Нагрузка	RL Load	U _n =10 кВ; f _n =50 Гц; P _n =450 кВт; Q _L =30 кВар

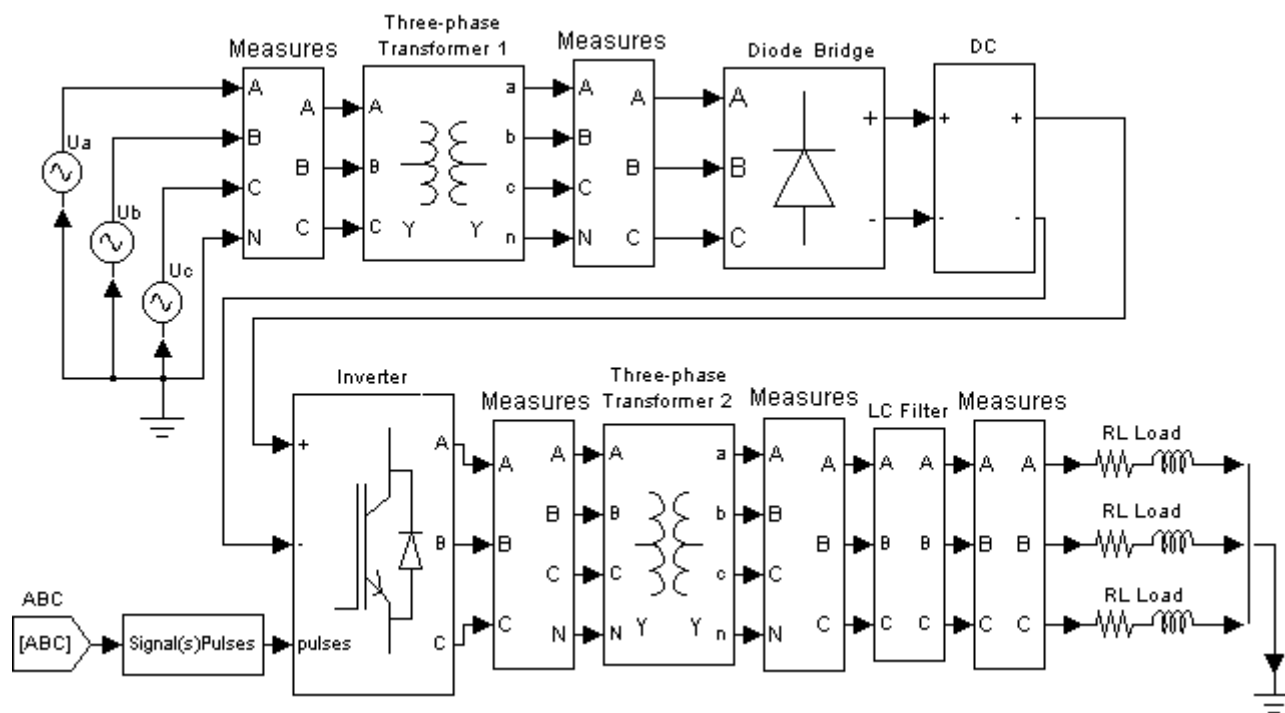


Рис. 3.1. Двухтрансформаторный преобразователь частоты с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

Результаты имитационного моделирования двухтрансформаторного преобразователя частоты с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами приведены на рис.3.2 в виде диаграмм токов и напряжений. Осциллографирование осуществляется с помощью блоков Measures. Анализ полученных результатов приведен в таблице 3.2.

При имитационном моделировании учитываются следующие переменные: линейные напряжения и токи питающей сети (U_{abs} , U_{bcs} , U_{cas} , I_{as} , I_{bs} , I_{cs}); линейные напряжения и токи вторичной цепи понижающего трансформатора (U_{ab12} , U_{bc12} , U_{ca12} , I_{a12} , I_{b12} , I_{c12}); линейные напряжения и токи первичной цепи повышающего трансформатора (U_{ab21} , U_{bc21} , U_{ca21} , I_{a21} , I_{b21} , I_{c21}); линейные напряжения и токи вторичной цепи повышающего трансформатора (U_{ab22} , U_{bc22} , U_{ca22} , I_{a22} , I_{b22} , I_{c22}); линейные напряжения и токи нагрузки (U_{abl} , U_{bcl} , U_{cal} , I_{al} , I_{bl} , I_{cl}).

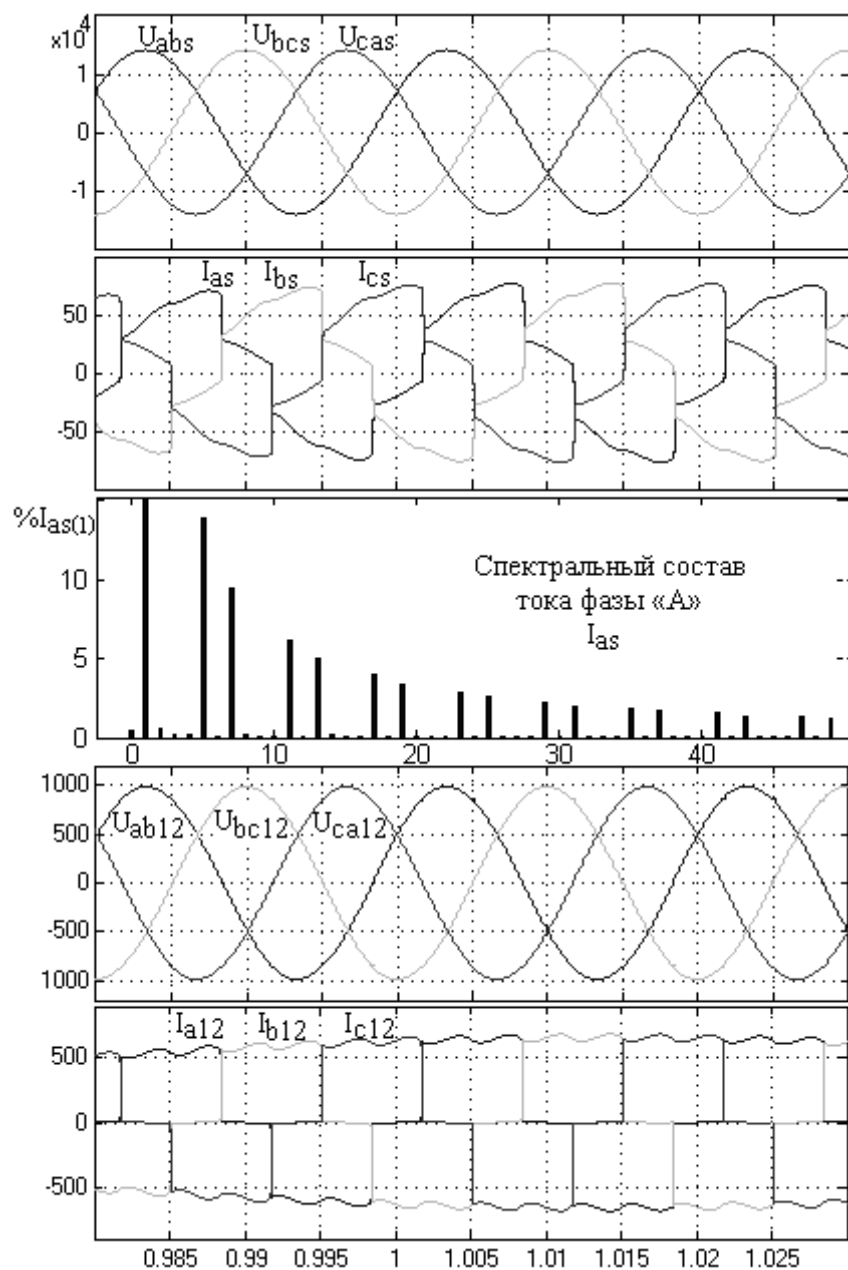
Также, на рис.3.2 приведены спектральные составы токов питающей сети и токов нагрузки, линейных напряжений питающей сети и нагрузки.

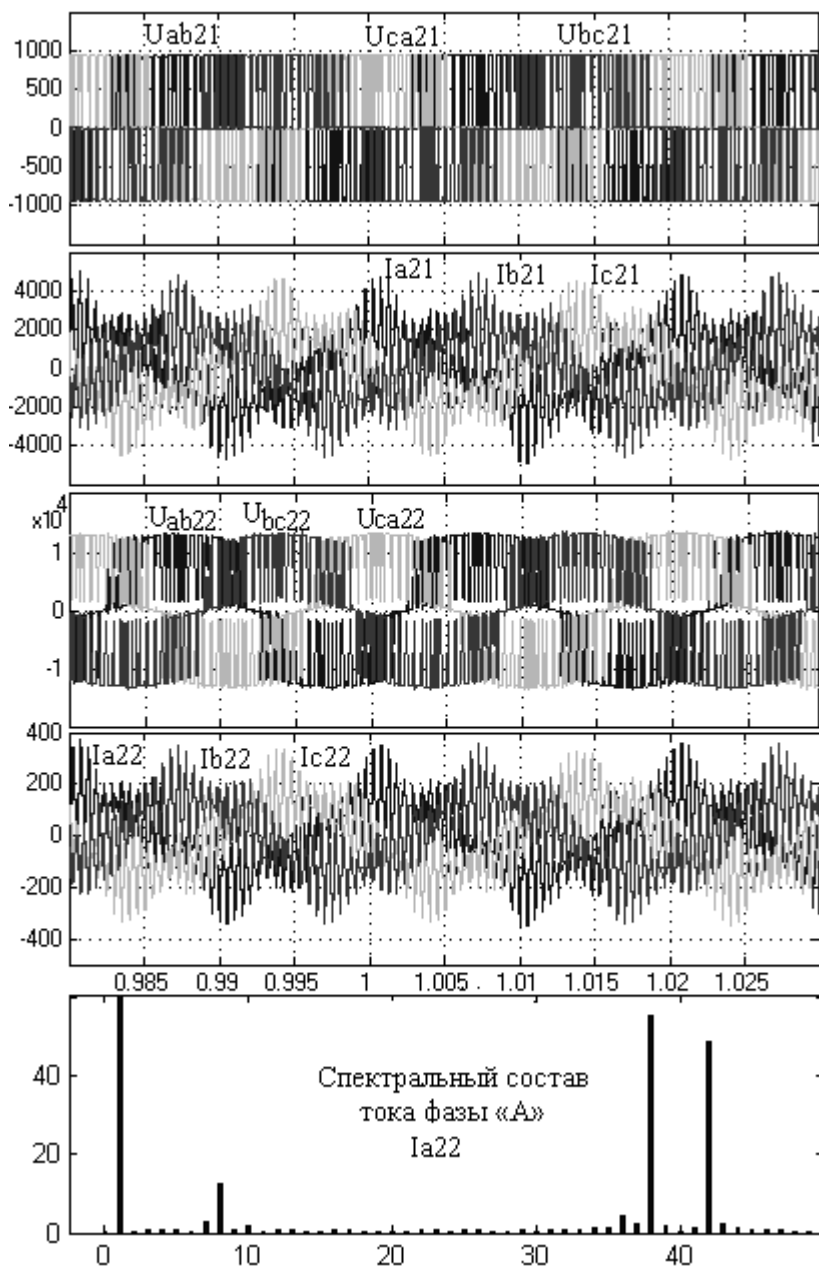
Таблица 3.2.

Анализ результатов моделирования
двухтрансформаторного преобразователя частоты
с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		5777
Линейное напряжение (действующее), В		10000
Ток фазы «А» питающей сети (действующий), А		52,61
Искажение синусоидальности тока фазы «А» питающей сети		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 20,12%
50	100	
250	13,81	
350	9,39	
550	6,11	
650	4,99	
850	3,93	
950	3,39	
1150	2,87	
1250	2,53	
1450	2,25	
1550	2,01	
1750	1,84	

Понижающий трансформатор (входной)		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		488
Линейное напряжение вторичной цепи (действующее), В		690
Ток фазы «А» вторичной цепи (действующий), А		507
Звено постоянного тока		
Выпрямленное напряжение (максимальное значение), В		960
Выпрямленное напряжение (минимальное значение), В		930
Повышающий трансформатор (выходной)		
Фазное напряжение первичной цепи (действующее), В		479
Линейное напряжение первичной цепи (действующее), В		692
Ток фазы «А» первичной цепи (действующий), А		300
Нагрузка		
Фазное напряжение нагрузки (действующее), В		5563
Линейное напряжение нагрузки (действующее), В		9636
Ток фазы «А» нагрузки (действующий), А		20,8
Искажение синусоидальности тока нагрузки фазы «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 1,86 %
50	100	
100	0,14	
150	0,16	
200	0,16	
250	0,16	
300	0,6	
350	0,35	
400	1,41	
450	0,11	
500	0,19	
550	0,11	
Искажение синусоидальности линейного напряжения нагрузки		
Частоты гармоник напряжения, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения напряжения (THDU): 1,69 %
50	100	
100	0,13	
150	0,16	
200	0,14	
250	0,05	
300	0,36	
350	1,19	
400	0,36	
450	0,28	
500	0,05	





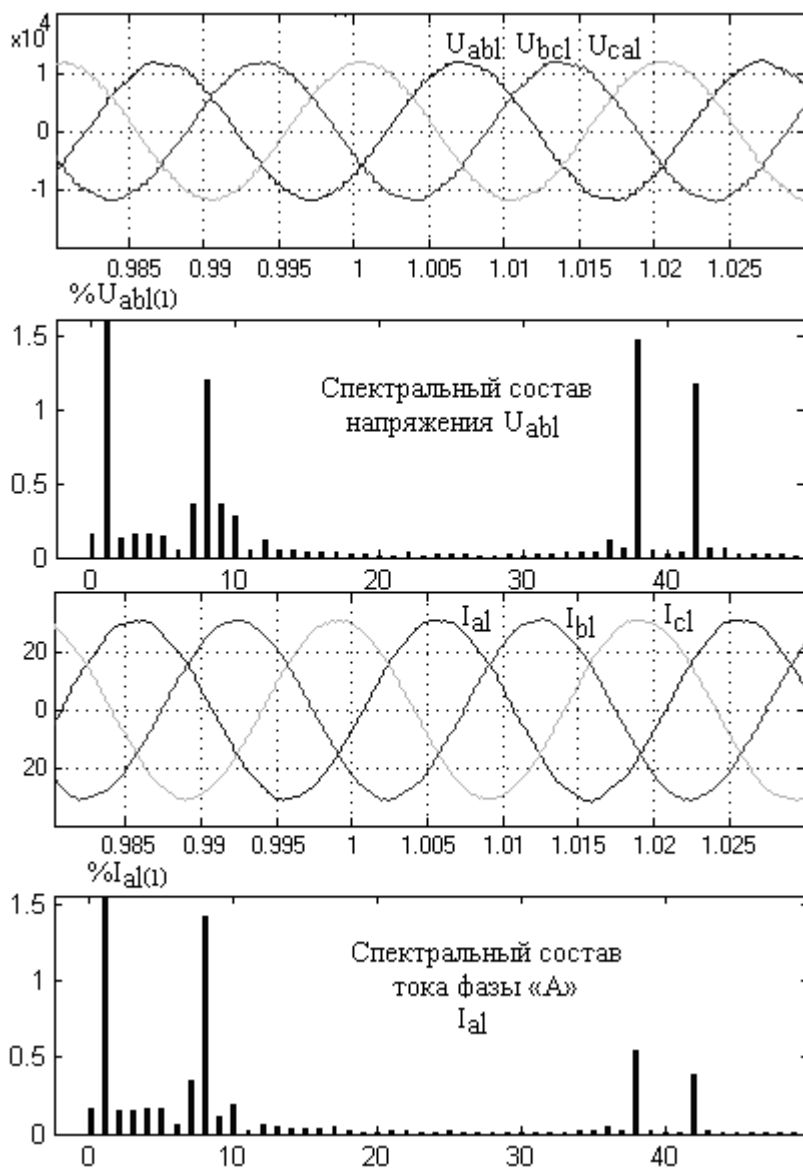


Рис.3.2. Результаты моделирования
двухтрансформаторного преобразователя частоты
с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

3.2. Преобразователь частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

Электропривода с использованием 12-пульсных выпрямителей и трехуровневых инверторов используются на различных предприятиях минерально-сырьевого комплекса. Примеры использования электроприводов такой структуры приведены в разделах 1.3, 1.4 и 1.6.

Анализ электромагнитных процессов, протекающих в таких преобразователях частоты, проводился с помощью имитационной модели, реализованной в MatLab. Схема модели представлена на рис.3.3.

Нагрузка преобразователя частоты имеет активно-индуктивный характер и реализована с помощью блока RL Load. Анализ электромагнитных процессов проводился в установившемся режиме работы. Параметры имитационной модели представлены в таблице 3.3. Блоки А, В и С обеспечивают формирование управляющих сигналов для автономного инвертора. Не указанные параметры блоков имитационной модели установлены по умолчанию.

Результаты имитационного моделирования преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором приведены на рис.3.4 в виде диаграмм токов и напряжений. Осциллографирование осуществляется с помощью блоков Measures. Анализ полученных результатов приведен в таблице 3.4.

При имитационном моделировании учитываются следующие переменные:

- линейные напряжения и токи питающей сети (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , I_a , I_b , I_c);
- линейные напряжения и токи первичной цепи первого трансформатора (U_{ab11} , U_{bc11} , U_{ca11} , I_{a11} , I_{b11} , I_{c11});
- линейные напряжения и токи первичной цепи второго трансформатора (U_{ab12} , U_{bc12} , U_{ca12} , I_{a12} , I_{b12} , I_{c12});
- напряжения на выходе выпрямительных диодных мостов (U_{d1} , U_{d2});
- линейные напряжения на выходе автономного инвертора (U_{abri} , U_{bcrl} , U_{carl});
- линейные напряжения и токи на нагрузке (U_{abl} , U_{bcl} , U_{cal} , I_{al} , I_{bl} , I_{cl}).

Таблица 3.3

Параметры имитационной модели преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

Элемент силовой схемы	Название блока	Параметры
Трехфазный источник напряжения	Ua, Ub, Uc	$U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=8165$ В; $f_n=50$ Гц; $\varphi_a=0^\circ$, $\varphi_b=120^\circ$, $\varphi_c=-120^\circ$
Двухобмоточный трансформатор (первый)	Three-phase Transformer 1	$P_n=10\,000$ кВт; Y/Y; 10/6 кВ; $f_n=50$ Гц
Двухобмоточный трансформатор (второй)	Three-phase Transformer 2	$P_n=10\,000$ кВт; Y/ Δ ; 10/6 кВ; $f_n=50$ Гц
Трехфазный мостовой выпрямитель (первый)	Universal Bridge 1	Diodes
Трехфазный мостовой выпрямитель (второй)	Universal Bridge 2	Diodes
Уравнительные дроссели	RL Branch	$R=0.0001$ Ом; $L=0.01$ Гн
Звено постоянного тока	C1, C2	$R=0.0001$ Ом; $C=1$ Ф
Трехуровневый автономный инвертор	Three-Level Bridge	IGBT / Diodes; 2000 Гц
Нагрузка	RL Load	$U_{ab}=U_{bc}=U_{ac}=8165$ кВ; $f_n=50$ Гц; $P_n=1000$ кВт; $Q_L=300$ кВар

Для анализа электромагнитной совместимости на рис.3.4 приведены спектральные составы напряжений и токов, потребляемых преобразователем частоты из сети электроснабжения, а также спектральные составы токов и напряжений нагрузки.

Из осциллограмм видно, что использование двенадцатипульсного выпрямителя позволяет обеспечить форму тока практически синусоидальной формы, с коэффициентом искажения синусоидальности 12,42%.

Использование трехуровневого автономного инвертора, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции, обеспечивает синусоидальную форму кривой тока, с коэффициентом синусоидальности 5,92%.

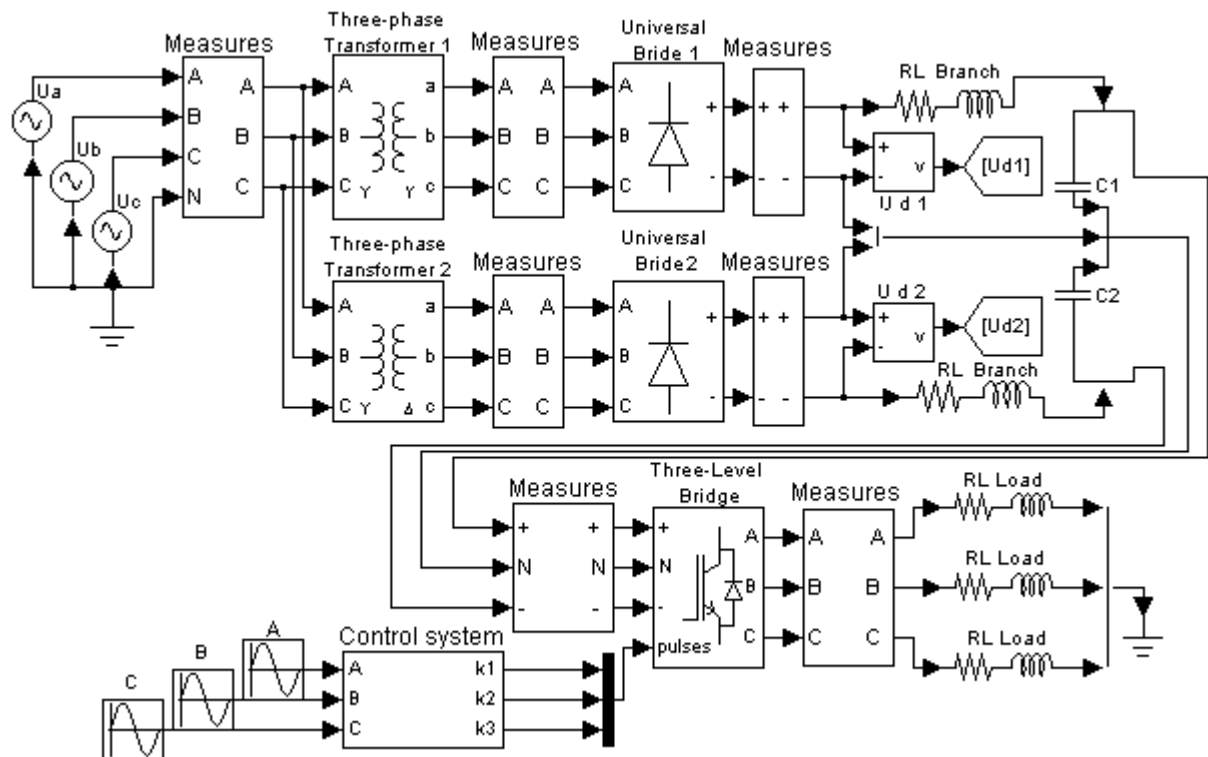
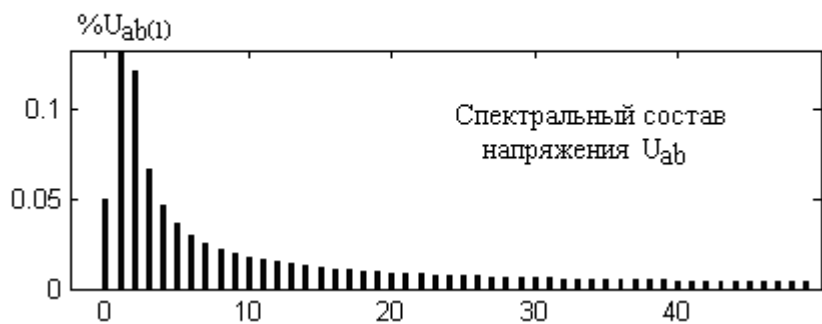
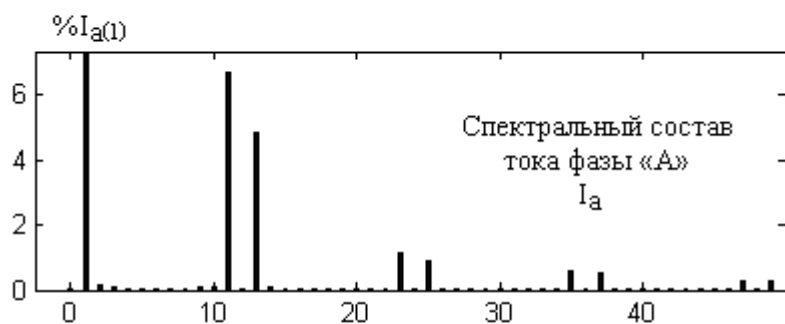
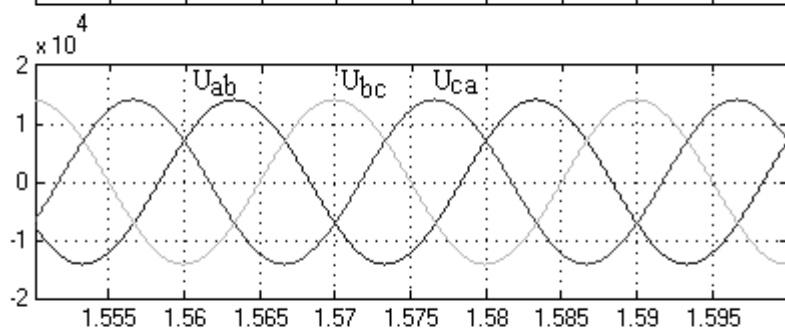
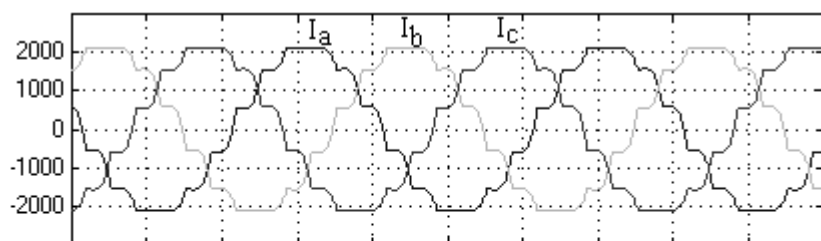


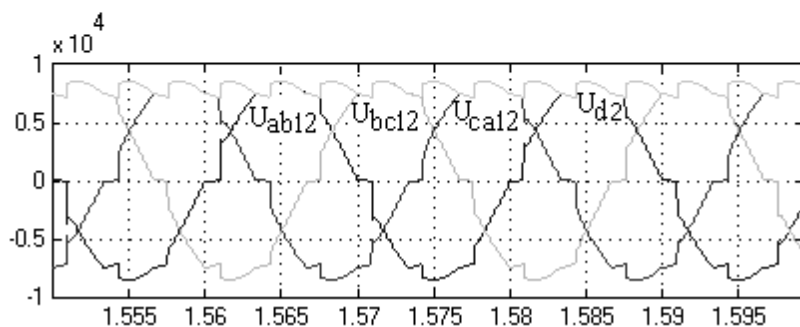
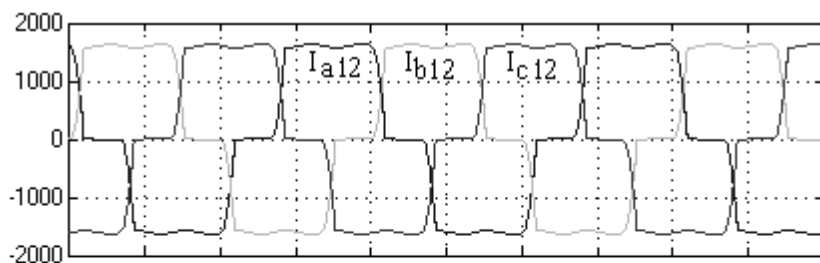
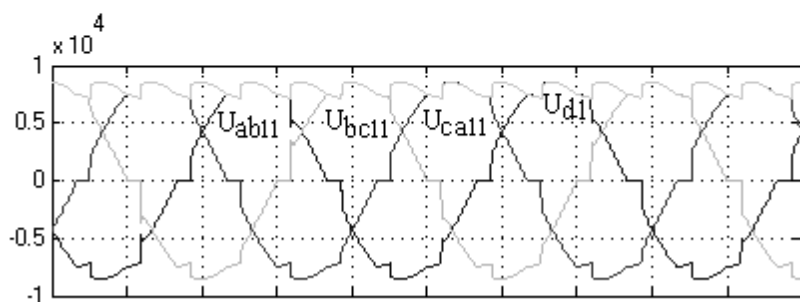
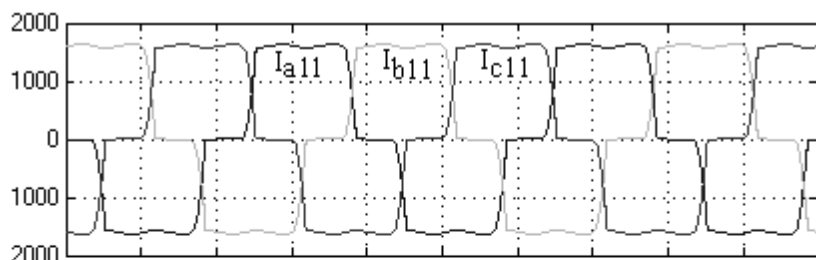
Рис. 3.3. Схема имитационной модели преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

Таблица 3.4.

Анализ результатов моделирования преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

Сеть электроснабжения		
Фазное напряжение (действующее), В		5777
Линейное напряжение (действующее), В		10000
Ток фазы «А» питающей сети (действующий), А		1514
Искажение синусоидальности тока фазы «А» питающей сети		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 12,42%
50	100	
550	13,81	
650	9,39	
1150	6,11	
Первый трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		3454
Линейное напряжение вторичной цепи (действующее), В		5984
Второй трансформатор		
Фазное напряжение вторичной цепи (действующее), В		3454
Линейное напряжение вторичной цепи (действующее), В		5984
Звено постоянного тока		
Выпрямленное напряжение (среднее), В		18900
Нагрузка		
Фазное напряжение нагрузки (действующее), В		6775
Линейное напряжение нагрузки (действующее), В		9581
Ток фазы «А» нагрузки (действующий), А		1537
Искажение синусоидальности линейного напряжения нагрузки		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDU): 9,86 %
50	100	
800	3,53	
900	2,93	
1100	2,46	
1200	2,71	
Искажение синусоидальности тока фазы «А» нагрузки		
Частоты гармоник напряжения, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 5,92%
50	100	
900	2,60	
1100	2,13	
1200	2,20	
1750	1,69	





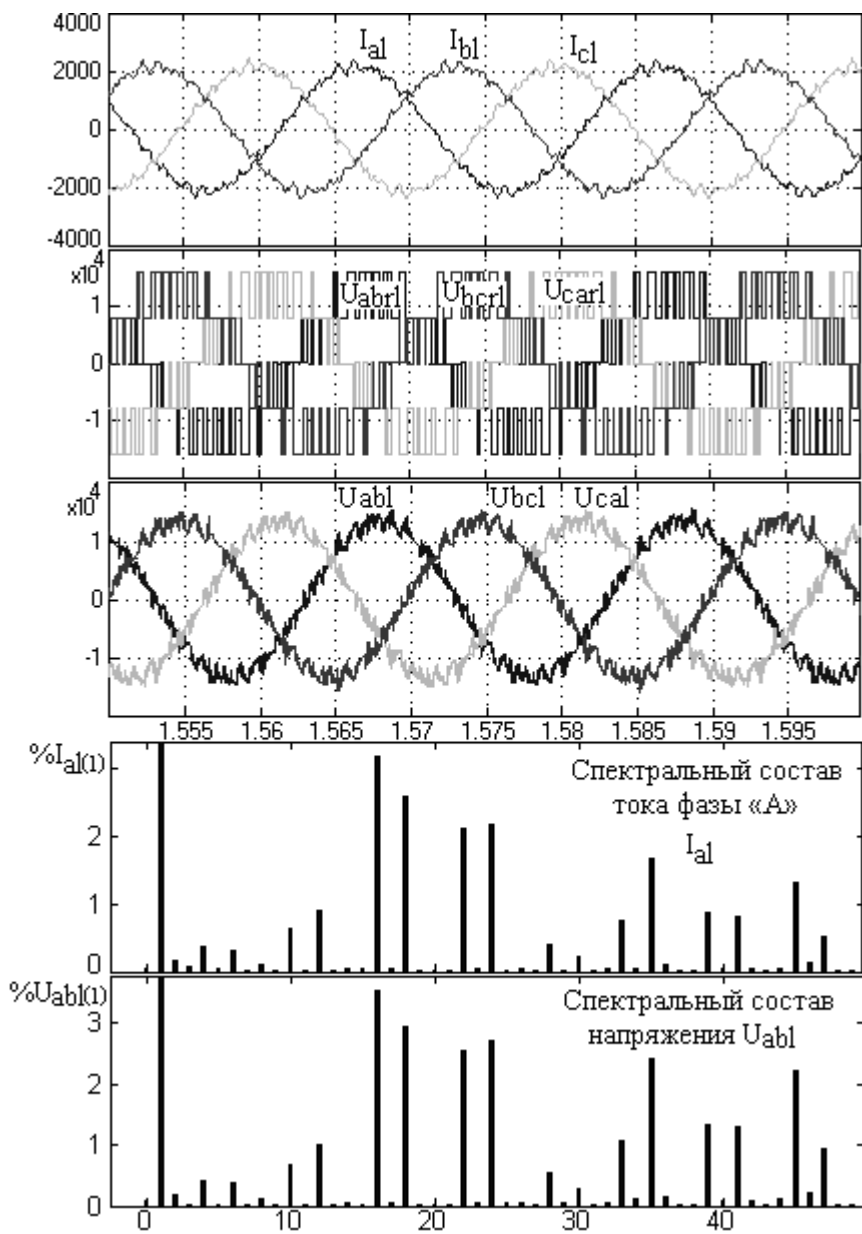


Рис.3.4. Результаты моделирования преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

3.3. Преобразователь частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором

Использование в современных регулируемых электроприводах преобразователей частоты с активными выпрямителями является одним из основных направлений повышения энергетических характеристик электротехнических систем на основе асинхронных электродвигателей. Унифицированные структуры полупроводниковых коммутаторов обеспечивают более высокую надежность преобразователей частоты.

Трехуровневые коммутаторы выполнены на полностью управляемых транзисторах, управление которыми осуществляется с помощью алгоритмов широтно-импульсной модуляции.

Пример использования преобразователя частоты с трехуровневыми активным выпрямителем и автономным инвертором, и принципиальная схема электроприводов с ними, приведены в разделе 1.2.

Схема имитационной модели такого преобразователя частоты, позволяющая исследовать электромагнитные процессы, протекающие в коммутаторах, приведена на рис.3.5. Параметры имитационной модели представлены в таблице 3.5. Параметры блоков, не указанные в таблице установлены по умолчанию. Нагрузка преобразователя частоты выполнена в виде последовательного соединения резистора и катушки индуктивности и имеет активно-индуктивный характер. Блоки А, В и С обеспечивают формирование управляющих сигналов для трехуровневого автономного инвертора

Результаты имитационного моделирования приведены на рис.3.6 в виде диаграмм токов и напряжений. Анализ полученных результатов приведен в таблице 3.6. Осциллографирование осуществляется с помощью блоков Measures. Анализ электромагнитных процессов и уровня электромагнитной совместимости проводился в установившемся режиме работы схемы.

При имитационном моделировании учитываются следующие переменные:

– линейные и фазные напряжения, токи питающей сети (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , U_a , U_b , U_c , I_a , I_b , I_c); активная и реактивная мощности, потребляемые электротехнической системой (P и Q); линейные и фаз-

ные напряжения на входе трехуровневого активного выпрямителя ($U_{ab2}, U_{bc2}, U_{ca2}, U_{a2}, U_{b2}, U_{c2}$); выпрямленное напряжение в звене постоянного тока (U_d); линейные и фазные напряжения на выходе трехуровневого автономного инвертора ($U_{abdr}, U_{bcdr}, U_{cadr}, U_{adr}, U_{bdr}, U_{cdr}$); линейные и фазные напряжения, ток на нагрузке ($U_{abl}, U_{bcl}, U_{cal}, U_{al}, U_{bl}, U_{cl}, I_{al}, I_{bl}, I_{cl}$).

Также, на рис.3.6 приведены спектральные составы тока, потребляемого преобразователем частоты, напряжения и тока на нагрузке.

Таблица 3.5

Параметры имитационной модели преобразователя частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором

Элемент силовой схемы	Название блока	Параметры
Трехфазный источник напряжения	U_a, U_b, U_c	$U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=3400$ В; $f_n=50$ Гц; $\varphi_a=0^\circ, \varphi_b=120^\circ, \varphi_c=-120^\circ$
Входной трехфазный дроссель	Drossel	$R=0.0001$ Ом; $L=0.001$ Гн
Трехуровневый активный выпрямитель	Three-Level rectifier	IGBT / Diodes; 1000 Гц
Звено постоянного тока	DC	$R=0.0001$ Ом; $C=100$ мФ
Трехуровневый автономный инвертор	Three-Level Inverter	IGBT / Diodes; 2000 Гц
Нагрузка	RL Load	$U_{ab}=U_{bc}=U_{ac}$ 4200 кВ; $f_n=50$ Гц; $P_n=3300$ кВт; $Q_L=500$ кВар

Таблица 3.6.

Анализ результатов моделирования преобразователя частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором

Сеть электроснабжения	
Фазное напряжение (действующее), В	2410
Линейное напряжение (действующее), В	4165
Ток фазы «А» питающей сети (действующий), А	670
Искажение синусоидальности тока фазы «А» питающей сети	

Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 10,28%
50	100	
100	1,43	
150	1,22	
200	1,49	
250	3,86	
300	1,55	
350	1,41	
500	4,77	
800	9,41	
Звено постоянного тока		
Уставка на выпрямленное напряжение, В		7400
Выпрямленное напряжение (среднее), В		7400
Нагрузка		
Фазное напряжение нагрузки (действующее), В		2572
Линейное напряжение нагрузки (действующее), В		4455
Ток фазы «А» нагрузки (действующий), А		536,2
Искажение синусоидальности линейного напряжения нагрузки		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения напряжения (THDU): 10,62 %
50	100	
500	2,85	
550	0,09	
600	5,83	
800	6,66	
900	3,96	
1100	2,15	
1200	1,92	
Искажение синусоидальности тока фазы «А» нагрузки		
Частоты гармоник напряжения, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 4,64 %
50	100	
150	1,24	
450	0,85	
500	1,44	
550	0,08	
600	2,69	
650	0,12	
800	2,54	
900	1,4	

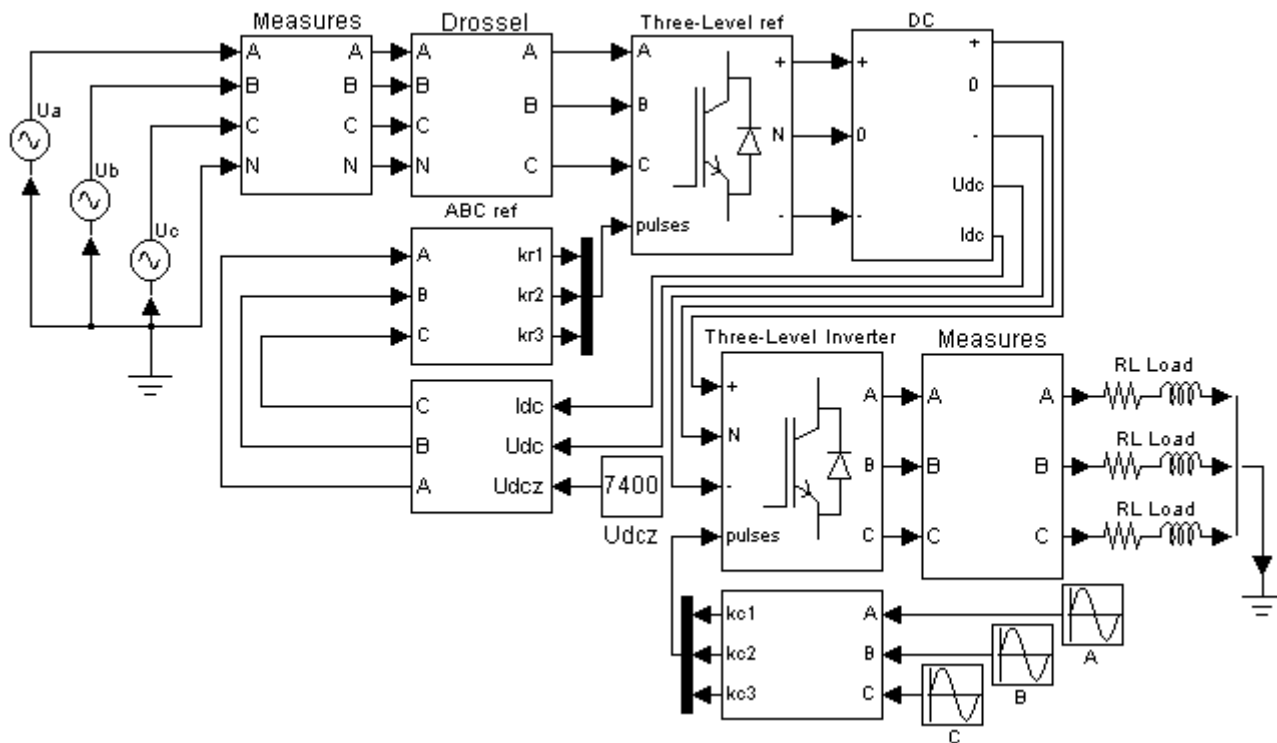
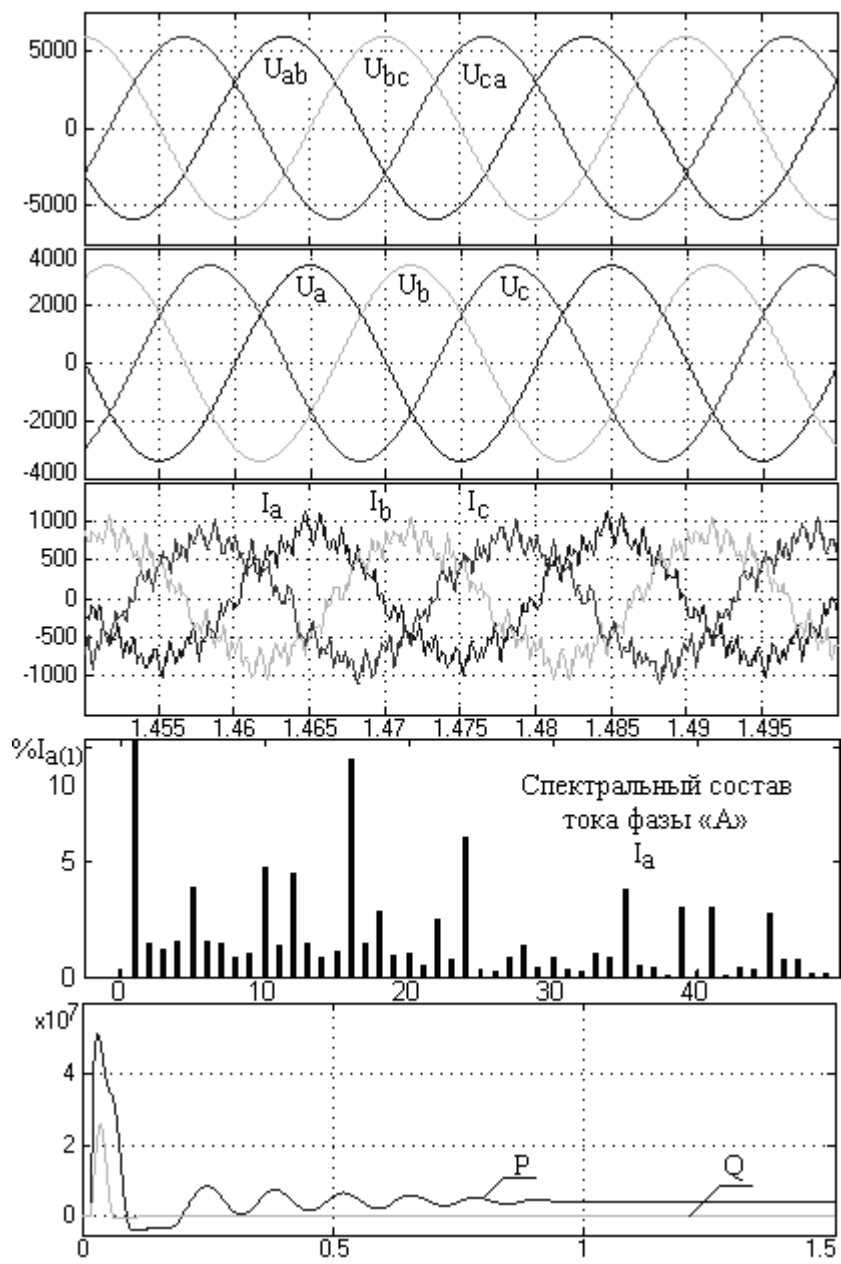
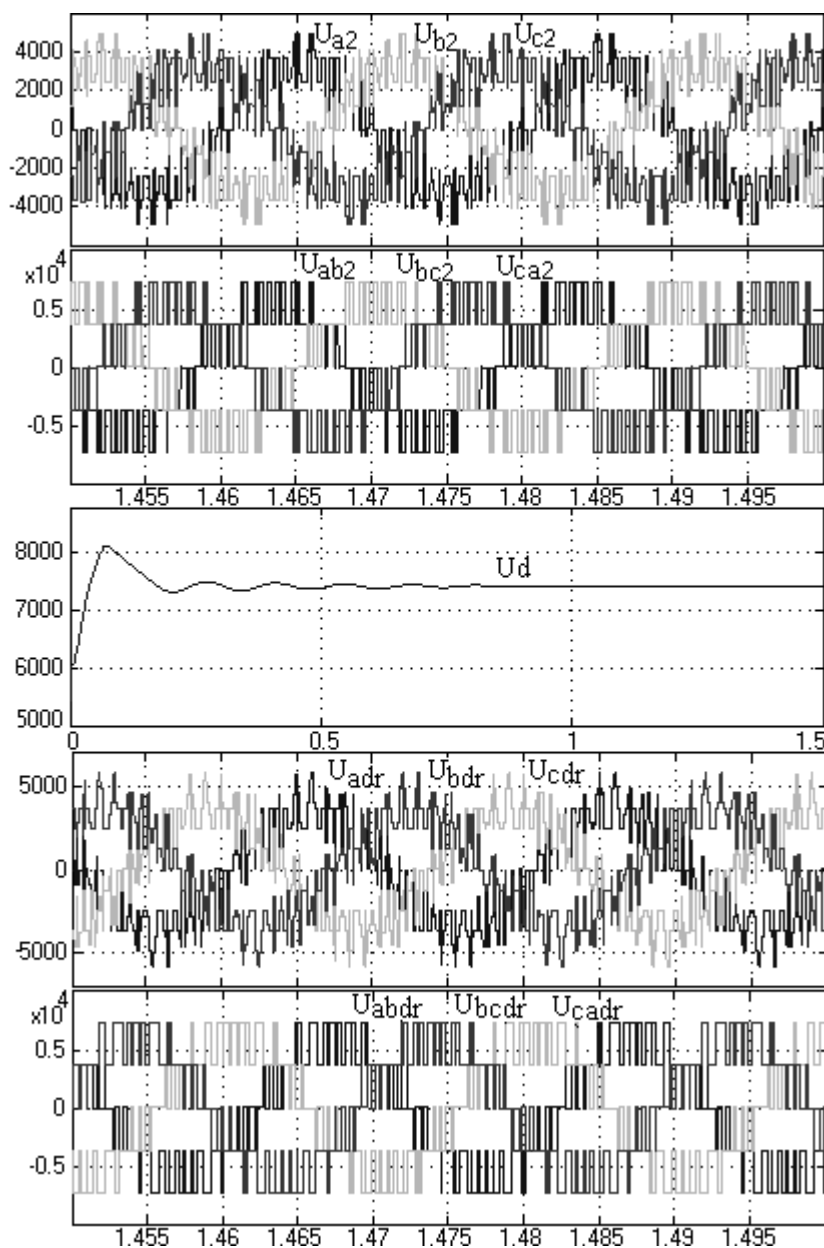


Рис. 3.5. Схема имитационной модели преобразователя частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором





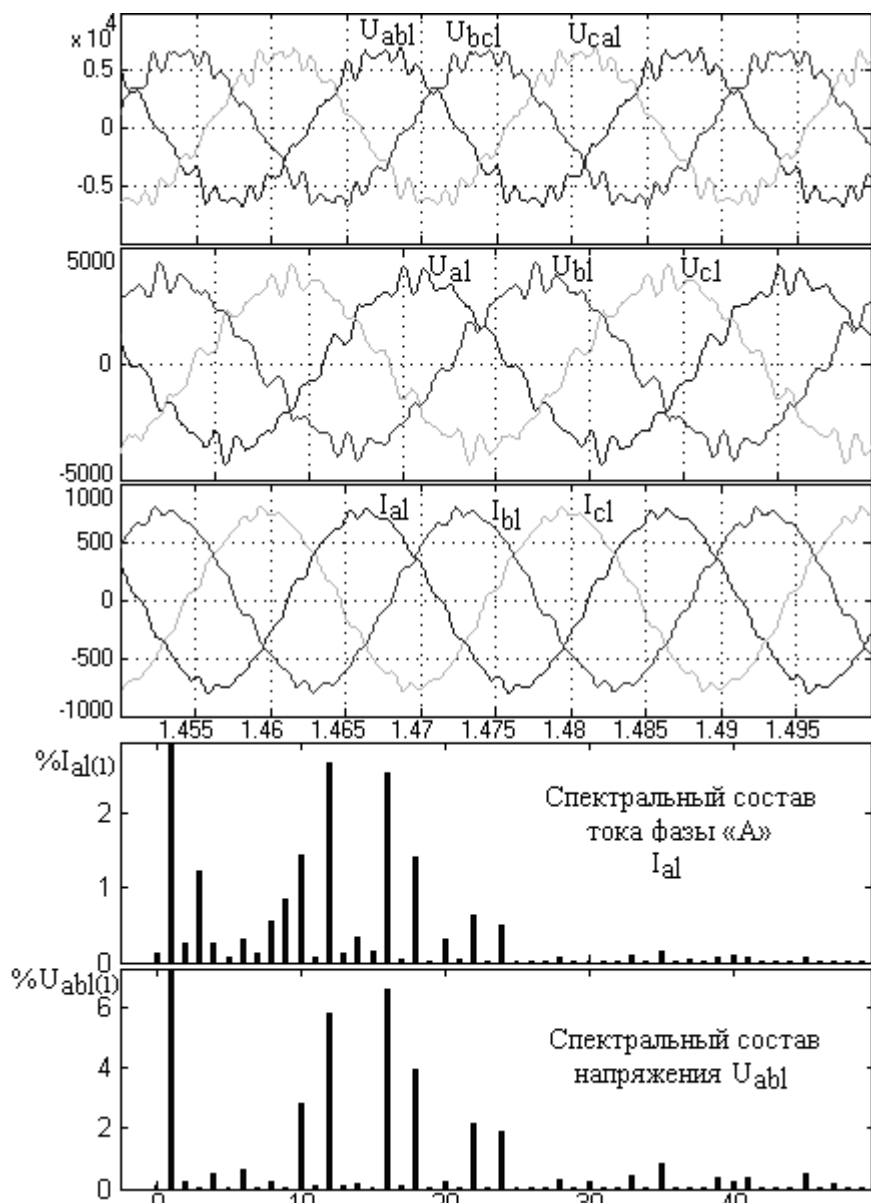


Рис.3.6. Результаты моделирования преобразователя частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором

3.4. Преобразователь частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем

За счет использования активного выпрямителя в преобразователе частоты появляется возможность построения электроприводов с питанием нескольких автономных инверторов от одного выпрямительного устройства. Активный выпрямитель обеспечивает поддержание выпрямленного напряжения в звене постоянного тока, даже при колебании напряжения питающей сети.

Электропривод такой структуры описан в разделе 1.6, как привод мотор-колес. Схема имитационной модели преобразователя частоты такой структуры приведена на рис.3.7. Параметры имитационной модели представлены в таблице 3.7. Параметры блоков, не указанные в таблице, установлены по умолчанию. Нагрузка преобразователя имеет активно-индуктивный характер.

Таблица 3.7

Параметры имитационной модели преобразователя частоты
с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем

Элемент силовой схемы	Название блока	Параметры
Трехфазный источник напряжения	Ua, Ub, Uc	$U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=310\text{ В};$ $f_n=50\text{ Гц};$ $\varphi_a=0^\circ, \varphi_b=120^\circ, \varphi_c=-120^\circ$
Входной трехфазный дроссель	Drossel	$R=0.0001\text{ Ом};$ $L=0.001\text{ Гн}$
Трехуровневый активный выпрямитель	Active Front End	IGBT / Diodes; 1000 Гц
Звено постоянного тока	DC	$R=0.0001\text{ Ом}; C=100\text{ мФ}$
Трехуровневый автономный инвертор	Inverter 1 (Inverter 2)	IGBT / Diodes; 2000 Гц
Нагрузка	RL Load	$U_{ab}=U_{bc}=U_{ac}\text{ 380 В};$ $f_n=50\text{ Гц};$ $P_n=150\text{ кВт}; Q_L=140\text{ кВар}$

Результаты имитационного моделирования преобразователя с параллельным соединением инверторов и активным выпрямителем приведены на рис.3.8 в виде диаграмм токов и напряжений. Анализ полученных результатов приведен в таблице 3.8. Анализ электромагнитных процессов проводился в установившемся режиме работы преобразователя.

При имитационном моделировании учитываются следующие переменные: линейные и фазные напряжения, токи питающей сети ($U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$); активная и реактивная мощности, потребляемые электротехнической системой (P и Q); линейные и фазные напряжения, токи на выходе первого автономного инвертора ($U_{ab1}, U_{bc1}, U_{ca1}, U_{a1}, U_{b1}, U_{c1}, I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}$); линейные и фазные напряжения, токи на выходе второго автономного инвертора ($U_{ab2}, U_{bc2}, U_{ca2}, U_{a2}, U_{b2}, U_{c2}, I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}$); выпрямленное напряжение в звене постоянного тока (U_d). На рис.3.8 приведены спектральные составы токов нагрузки.

Таблица 3.8.

Анализ результатов моделирования преобразователя частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем

Сеть электроснабжения		
Линейное напряжение (действующее), В		380
Ток фазы «А» питающей сети (действующий), А		1025
Искажение синусоидальности тока фазы питающей сети «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 6,03%
50	100	
900	3,58	
900	3,21	
Звено постоянного тока		
Уставка / результирующее выпрямленное напряжение, В		750/750
Нагрузка (автономный инвертор 1)		
Линейное напряжение нагрузки (действующее), В		380
Ток фазы «А» нагрузки 1 (действующий), А		409
Искажение синусоидальности тока фазы нагрузки «А»		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 3,57%
50	100	
150	2,15	
900	1,74	
Нагрузка (автономный инвертор 2)		
Линейное напряжение нагрузки (действующее), В		380
Ток фазы «А» нагрузки (действующий), А		409
Искажение синусоидальности линейного напряжения нагрузки		
Частоты гармоник тока, Гц	Действующее значение, % от основной гармоники	Коэффициент искажения тока (THDI): 3,58 %
50	100	
150	2,15	
900	1,74	

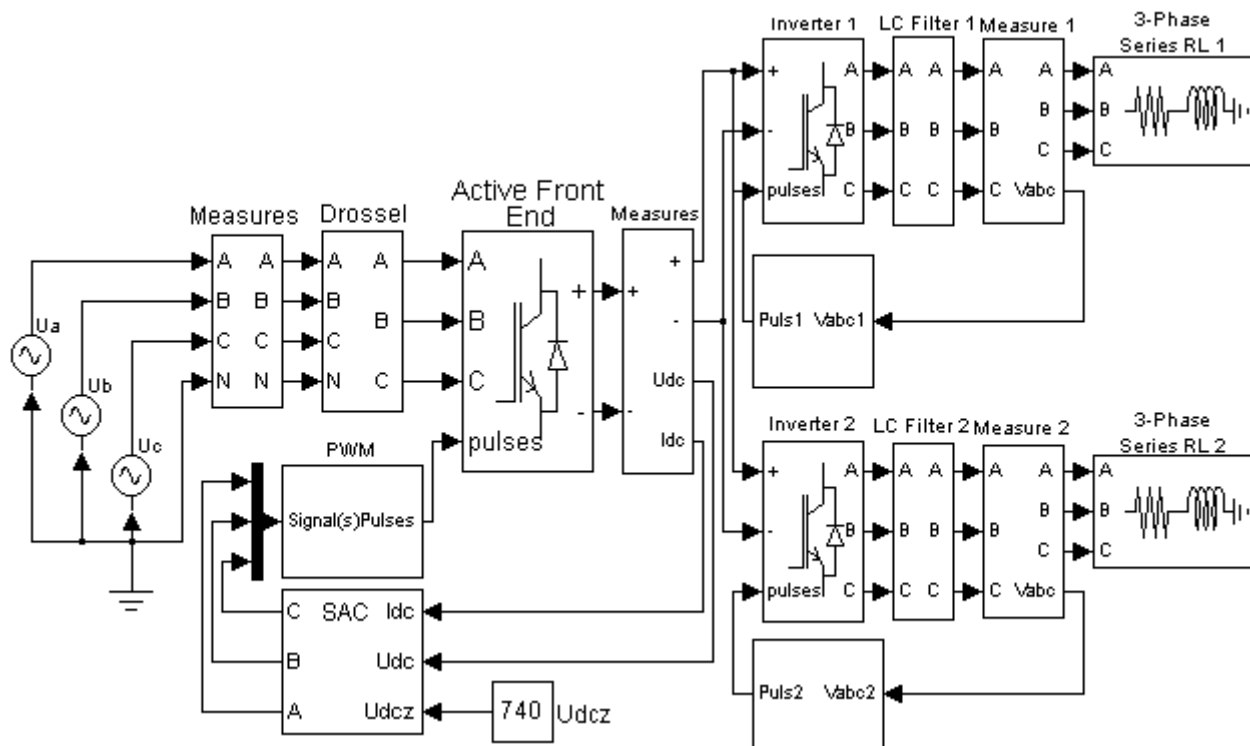
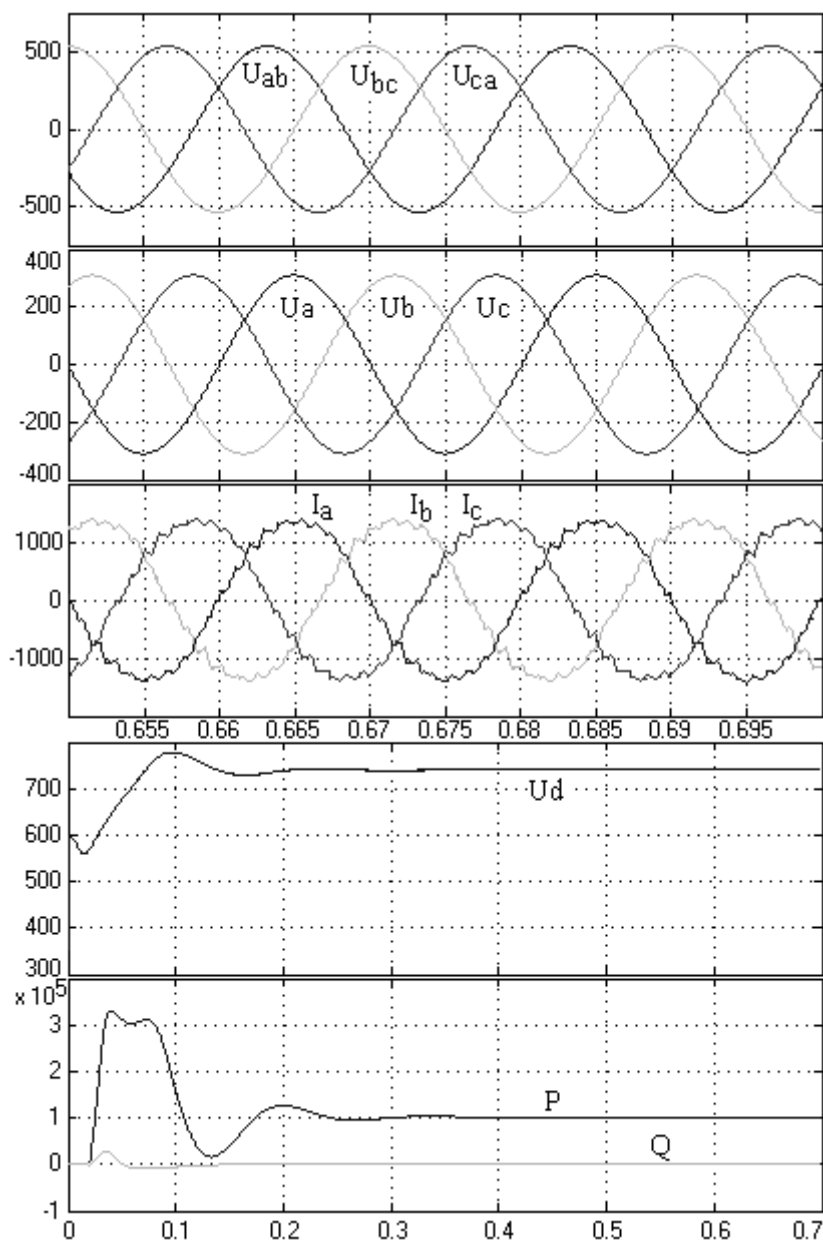
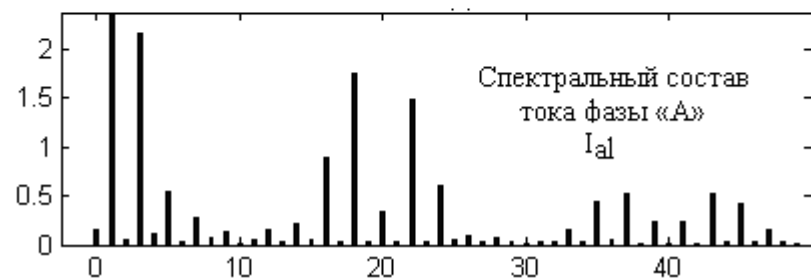
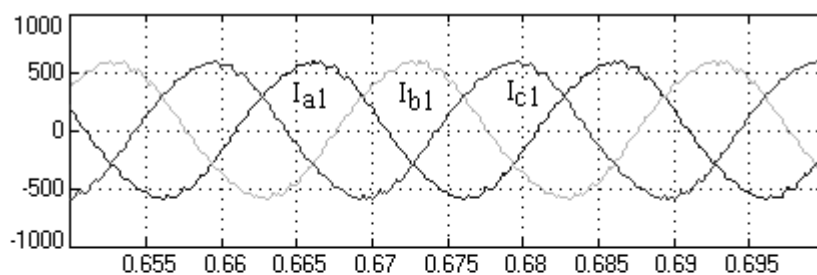
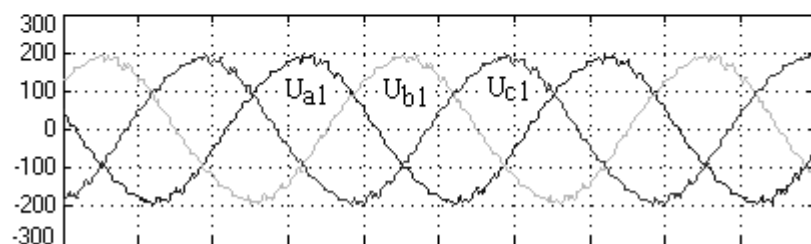
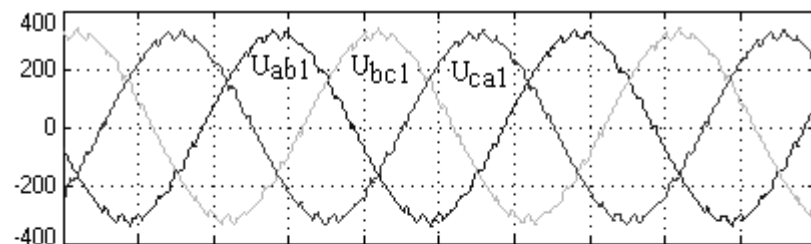


Рис. 3.7. Схема имитационной модели преобразователя частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем





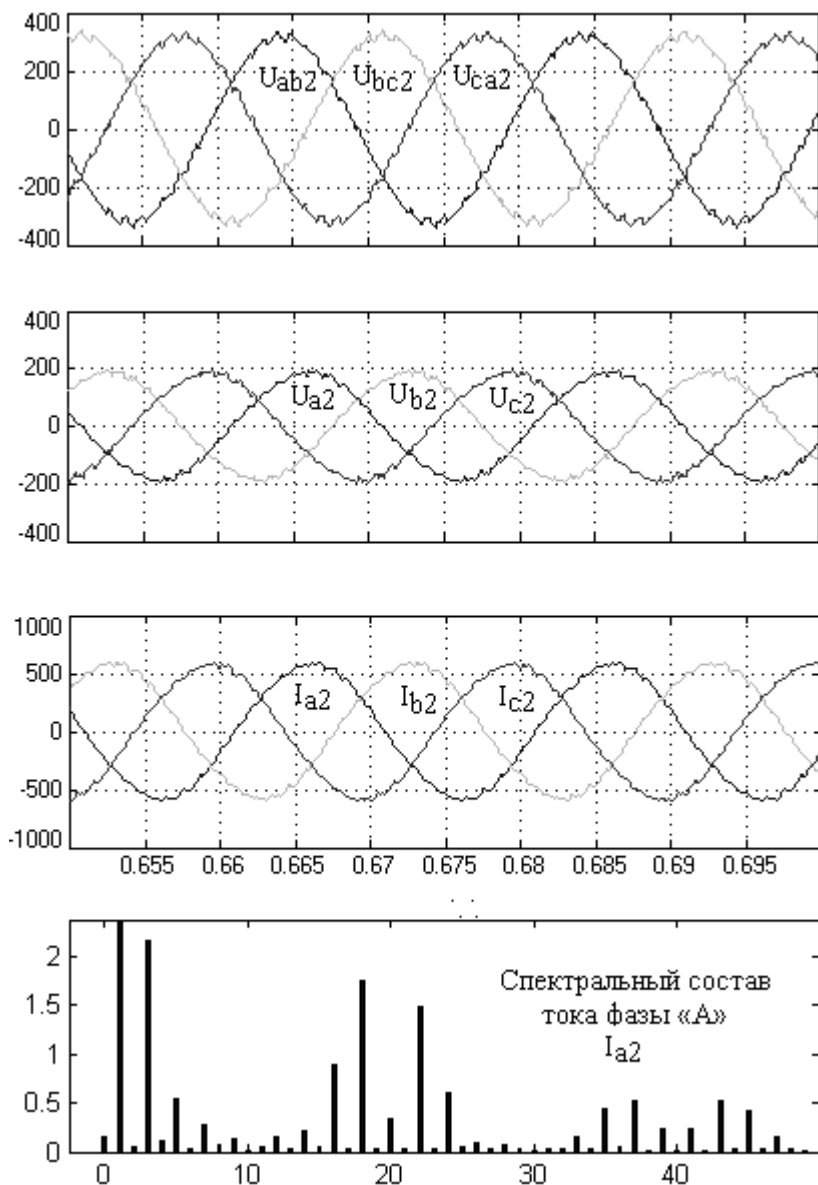


Рис. 3.8. Результаты моделирования преобразователя частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены различные структуры полупроводниковых преобразователей частоты, которые используются в различных электротехнических системах и комплексах с асинхронными электродвигателями.

Использование в выпрямителях и инверторах преобразователей частоты транзисторных ключей обеспечивает высокий уровень электромагнитной совместимости полупроводниковых устройств с сетью электроснабжения и нагрузкой (приводными электродвигателями). Высокочастотные транзисторные преобразователи обеспечивают минимальные искажения тока и напряжения.

За счет модернизации и повышения эффективности алгоритмов управления ключами полупроводниковых преобразователей, можно обеспечить их повышенные энергетические характеристики.

Таким образом, создание и изучение различных структур и алгоритмов управления, и внедрение высокотехнологических решений в этой области в производство, позволит обеспечить значительный рост эффективности промышленных объектов и технических средств нефтегазовой и горной отраслей минерально-сырьевого комплекса.

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.
2. Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е. и др. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. М.: Академия, 2006 – 368 с.
3. Шрайнер Р.Т., Калыгин А.И., Кривовяз В.К. Электропривода переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2012 – 223 с.
4. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. - 654 с.
5. Официальный сайт компании Siemens: www.siemens.com.
6. Frank J., Bartos P. E. Medium-voltage drives shine offshore // Process & control engineering, 2006, № 59 (7).
7. Золотухин А.Б., Гудмestad О.Т., Ермаков А.И. и др. Основы разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и строительство морских сооружений в Арктике. М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2000 – 770 с.
8. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы нефтегазовой промышленности. М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000 – 487 с.
9. Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники, 2005. № 2 (32).
10. Зобов И.Б., Малиновский О.В, Лапшина А.А. Системы частотного регулирования с крупными и высоковольтными электродвигателями // Информационный бюллетень, 2007, № 2.
11. Лядов К.Б., Злобин А.Г., Мордовченко Д.Д. и др. Электроприводные агрегаты нового поколения производства «РЭП Холдинга» // Газотурбинные технологии, 2012, №4.
12. Пат. 2485353 Российская Федерация, RU № 2485353. Подводный газоперекачивающий агрегат для многониточного трубопровода. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государ-

ственный горный университет». № 2012100910/06; завл. 11.01.2012; опублик. 20.06.2013, бюл. № 17.

13. Толстов С.С., Мирзоев Д.А., Ибрагимов И.Э. Подводная технология добычи углеводородов – ключевой фактор освоения ресурсов шельфа Арктики // Газовая промышленность, 2011, №661.

14. Дурыманов В.В., Леонтьев С.А., Седов В.В. На суше и под водой: капсулированный компрессорный агрегат STC-ЕСО-II компании Siemens // Турбины и дизели, 2010, №2.

15. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / Под редакцией Крутякова Е.А. Санкт-Петербург: «Силовые машины» «Электросила», 2003 – 172 с.

16. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение)/Под редакцией Крутякова Е. А. Санкт-Петербург: «Силовые машины» «Электросила», 2004 - 252 с.

17. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока. СПб: СПбЭК, 2005 – 100 с.

18. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. Санкт-Петербург: СПЭК, 2004 – 127 с.

19. Худяков В.Ф., Хабuzов В.А. Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB Санкт-Петербург: ГУАП, 2008 – 332 с.

20. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007 – 288 с.

21. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Изд. Телеком, 2007 – 288 с.

22. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Санкт-Петербург: Люмена, 2001 – 320 с.

23. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2005 – 800 с.

24. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока

с частотным регулированием. М.: Академия, 2007 – 265 с.

25. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: изд. НГТИ, 2001 – 250 с.

26. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУВПО «Ивановский гос. энер. ун-т им В.И.Ленина», 2008 – 298 с.

27. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2006 – 94 с.

28. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. - 654 с.

29. Онищенко Г. Б. Электрический привод М.: РАСХН, 2003 – 320 с.

30. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004 – 256 с.

31. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2006 – л 304 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим алгоритм доказательства адекватности математической модели на примере модели асинхронного двигателя [1А-4А]. Для этого необходимо иметь испытательную установку с асинхронным двигателем и ее математическую модель.

На испытательной установке была проведена серия экспериментов пуска асинхронного электродвигателя. Осциллограммы изменения частоты вращения и электромагнитного момента при пуске электродвигателя приведены на рис. А.1.

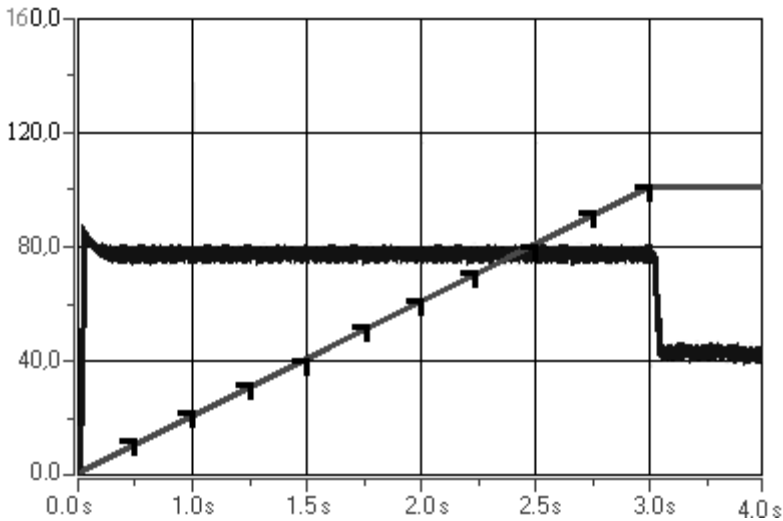


Рис. А.1. Осциллограммы, полученные при пуске асинхронного электродвигателя на испытательной установке

С использованием математической модели был смоделирован пуск такого же асинхронного двигателя в аналогичных условиях. Осциллограммы пуска представлены на рис.А.2.

Проверим адекватность математической модели. Для этого сформулируем нуль-гипотезу H_0 : математическая модель асинхронного электродвигателя адекватна. Альтернативная гипотеза H_1 : математическая модель электродвигателя неадекватна.

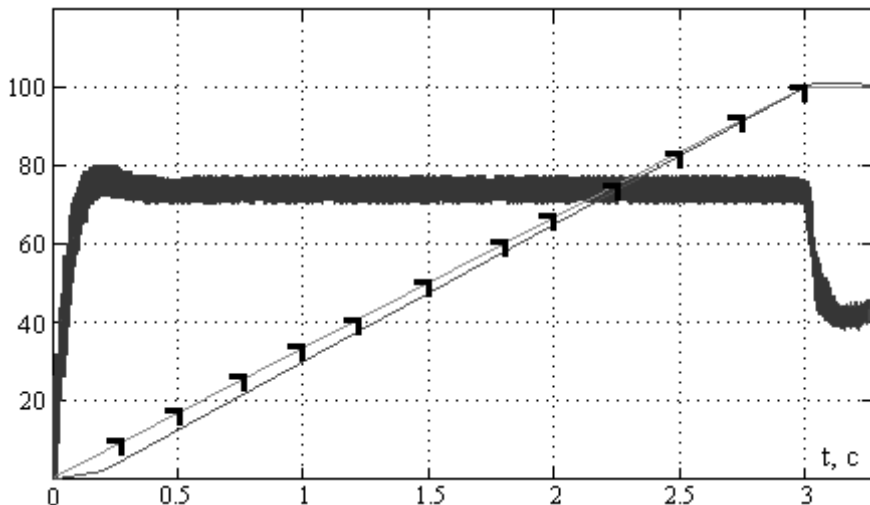


Рис. А.2. Осциллограммы, полученные при пуске асинхронного электродвигателя в MatLab

На стендовой установке было проведено три экспериментальных пуска асинхронного двигателя, т.е. $n=3$. Как говорилось выше, одна из осциллограмм приведена на рис. А.1. На каждой осциллограмме было выделено 13 точек, т.е. $N=13$, которые занесены в таблицу А.1. На теоретической кривой (рис.А2.) выделим точки в эти же моменты времени.

Далее рассчитаем средние значения частоты вращения в определенные таблицей А.1 моменты времени по формуле:

$$\bar{\omega}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}, \quad (i = \overline{1, N}). \quad \text{А.1}$$

Проделав эту операцию для всех 13 моментов времени, запишем результаты в таблицу А.3, во второй столбик.

Следующим шагом рассчитаем значения выборочных дисперсий (т.е. оценок дисперсий) для каждого из 13 моментов времени по следующей формуле

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\omega_{ij} - \bar{\omega}_i)^2, \quad (i = \overline{1, N}). \quad \text{А.2}$$

Таблица А.1. Результаты экспериментов на стенде

t_i, c	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
$\omega_{i,1}, \% \omega_{ном}$	0	8	17	25	31	41	50	58	66	75	84	92	100
$\omega_{i,1}, \% \omega_{ном}$	0	8,9	17,9	25,9	31,7	41,7	50,7	58,7	66,6	75,5	84,3	92,1	100
$\omega_{i,1}, \% \omega_{ном}$	0	7,2	16,3	24,4	30,5	40,6	49,7	57,8	65,9	74,9	83,9	92	100

Таблица А.2. Результаты экспериментов на математической модели

t_i, c	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4
$\omega_{мод}, \% \omega_{ном}$	0	8	17	25	31	41	50	58	66	75	84	92	100

Таблица А.3. Результаты расчета

t_i	$\bar{\omega}_i$	s_i^2	$\hat{\omega}_i - \hat{\omega}(t_i)$	$(\bar{\omega}_i - \hat{\omega}_i)^2$
1.0	0	0	0	0
1.25	8,033333	1,446667	8	0,001111
1.5	17,06667	1,286667	17	0,004444
25	25,1	1,14	25	0,01
31	31,06667	0,726667	31	0,004444
41	41,1	0,62	41	0,01
50	50,13333	0,526667	50	0,017778
58	58,16667	0,446667	58	0,027778
66	66,16667	0,286667	66	0,027778
75	75,13333	0,206667	75	0,017778
84	84,06667	0,086667	84	0,004444
92	92,03333	0,006667	92	0,001111
100	100	0	100	0

Рассчитав, таким образом, все 13 выборочных дисперсий, запишем их также в таблицу А.3, в третий столбик

На следующем этапе проверим выполнение статистической гипотезы об однородности (равенстве) дисперсий во всех опытах, т.е. проверим гипотезу воспроизводимости. Для этого рассчитываем статистику критерия Кохрена по следующей формуле

$$G = \frac{s_{\max}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_N^2} \quad \text{А.3}$$

и сравниваем ее с табличным значением $G_\alpha(\nu_1, \nu_2)$, где соответствующие степени свободы равны

$$\nu_1 = n - 1 \text{ и } \nu_2 = N,$$

при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Из третьего столбца таблицы А.3 видно, что $s_{\max}^2 = 13333,33$. Следовательно

$$G = \frac{1,446667}{\left[\begin{array}{l} 0+1,44+1,286+1,14+0,726+0,62+0,526+ \\ +0,446+0,286+0,206+0,086+0,006+0 \end{array} \right]} = 0,2133'$$

Табличное значение критерия Кохрейна при $\nu_1 = 3 - 1 = 2$ и $\nu_2 = 13$ равно

$$G_{0,05}(2, 13) = 0,5250.$$

Таким образом,

$$G = 0,2133 < G_{0,05}(2, 6) = 0,5250.$$

Так как экспериментальное значение критерия Кохрена меньше табличного, следовательно, гипотеза об однородности дисперсий выполняется, а это означает, что можно рассчитать соответствующие дисперсии:

$$\begin{aligned} s_g^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 = \\ &= \frac{1}{13} \left(0+1,44+1,286+1,14+0,726+0,62+0,526+0,446+0,286+0,206 \right) = \quad \text{А.4} \\ &= 0,5215 \end{aligned}$$

$$s_{\bar{w}}^2 = \frac{1}{n} s_g^2 = \frac{1}{3} 0,5215 = 0,1738. \quad \text{А.5}$$

Для проверки адекватность полученной модели воспользуемся

F -критерием Фишера. Занесем полученные результаты расчета с помощью математической модели в таблицу А.3 в четвертый столбец, а в следующем столбце той же таблицы рассчитаем разность квадратов экспериментального и рассчитанного по модели значений откликов. Затем, рассчитаем величину дисперсии адекватности по формуле:

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^N (\bar{\omega}_i - \hat{\omega}_i)^2, \quad \text{А.6}$$

где k – количество коэффициентов математической модели. В данном случае математическая модель замкнутого контура регулирования скорости имеет следующую передаточную функцию:

$$W_{kc}(p) = \frac{b_0}{1 + a_1 p}. \quad \text{А.7}$$

Таким образом $k = 2$.

Итого значение дисперсии адекватности $s_{ad}^2 = 0,0515$.

Определим экспериментальное значение критерия Фишера

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_{\bar{\omega}}^2} = \frac{0,0515}{0,1738} = 0,0662.$$

Определим теоретическое значение критерия Фишера при $\nu_{ad} = N - k = 13 - 2 = 11$ и $\nu_s = N(n - 1) = 12 \cdot (3 - 1) = 22$.

Таким образом

$$F_{0,05}(11, 22) = 2,6346.$$

Отсюда можно заключить, что экспериментальное значение меньше теоретического, т.е.

$$F = 0,0662 < F_{0,05}(11, 22) = 2,6346,$$

следовательно, гипотеза H_0 : математическая модель адекватна, обоснована.

Список литературы ПРИЛОЖЕНИЯ А:

1А. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975.

2А. Хикс Ч., Основные принципы планирования эксперимента. М.: Мир, 1967.

3А. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.

4А. Саушев А.В. Планирование эксперимента в электротехнике: учебное пособие. СПб.: СПГУВК, 2012.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АСИН- ХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Для построения векторной системы автоматического управления (САУ) электроприводом (ЭП) могут быть использованы любые пары векторов, с помощью которых можно представить электромагнитный момент асинхронного двигателя (АД), который вычисляется следующим образом

$$M = \frac{3}{2} p C (\bar{a} \times \bar{b}), \quad (\text{Б.1})$$

где p - число пар полюсов асинхронного двигателя; C - коэффициент, зависящий от выбора векторов \bar{a} и \bar{b} , которые представлены в таблице Б.1, где $k_s = L_m/L_s$, $k_r = L_m/L_r$, $\sigma = 1 - k_s k_r$ - коэффициенты электромагнитной связи статора, ротора и коэффициент рассеяния соответственно) [1Б].

Таблица Б.1

		\bar{b}				
		Ψ_s	I_s	Ψ_r	I_r	Ψ_m
\bar{a}	Ψ_s	0	1	$-k_s k_r / \sigma L_m$	$-k_1$	-
	I_s	-1	0	$-k_r$	$-L_m$	-1
	Ψ_r	$k_s k_r / \sigma L_m$	k_2	0	-1	-
	I_r	k_1	L_m	1	0	1
	Ψ_m	-	1	-	-1	0

От выбора векторов в значительной мере зависит степень сложности векторной САУ. Желательно, чтобы величины, представленные векторами в уравнении электромагнитного момента были наблюдаемы, т.е., чтобы их можно было непосредственно измерить и воздействовать на них при управлении электромагнитным моментом. У короткозамкнутого АД есть только две такие величины – это напряжение U_s и ток статора I_s , и только одна из них, а именно ток статора I_s , может входить в уравнение момента. Тогда другой величиной может быть только ток ротора

I_r или какое-либо потокосцепление. Ток ротора I_r принципиально ненаблюдаем. Поэтому для выбора остаются три вектора потокосцепления: статора Ψ_s , ротора Ψ_r и основное Ψ_m , т.е. магнитный поток в зазоре АД. Потокосцепление статора Ψ_s и поток в зазоре АД Ψ_m можно непосредственно измерить и использовать этот сигнал в системе управления, что часто и делается при создании приводов высокого качества. В массовых же изделиях разработчики стараются использовать сигналы, доступные без установки датчиков, или вычисленные по мгновенным значениям все тех же токов I_s и напряжений U_s статора. Однако, при выборе потокосцепления статора Ψ_s или основного потокосцепления Ψ_m передаточные функции системы управления получаются довольно сложными и мало подходящими для практического использования.

Простейший вид имеют уравнения электромагнитных процессов в АД в случае представления их через вектор потокосцепления ротора Ψ_r . То обстоятельство, что его невозможно измерить не является препятствием для выбора, т.к. магнитный поток ротора легко вычисляется по потоку статора или по рабочему потоку [1Б-4Б].

Таким образом, выбор векторов тока статора I_s и потокосцепления ротора Ψ_r является наиболее целесообразным с точки зрения сложности структуры векторной САУ. Такие системы, с ориентацией по вектору потокосцепления ротора Ψ_r , получили название Field Oriented Control (FOC) или Trans-Vector [3Б,5Б,6Б]. Структурная схема векторной САУ с ориентацией по потокосцеплению ротора изображена на рис.Б 1.

Структура векторной САУ электроприводом

Векторная САУ построена в виде двух двухконтурных каналов: канал стабилизации модуля потокосцепления ротора и канал управления скоростью вращения ротора АД. Внутренние контуры обоих каналов – контуры регулирования составляющих тока статора I_{s1} и I_{s2} , которые являются проекциями вектора тока статора I_s на оси 1-2, и называются потокообразующими и моментобразующими, соответственно. Структурная схема внутренних контуров регулирования векторной САУ приведена на рис.Б2.

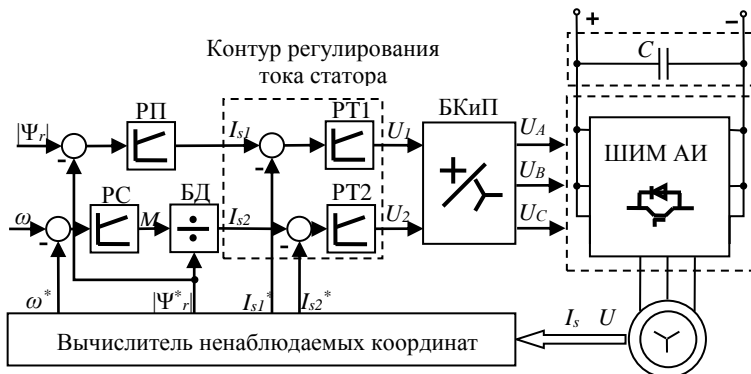


Рис.Б.1. Структурная схема ЭП с векторной САУ, ориентированной по вектору потокоосцепления ротора АД; РП – регулятор потока ротора; РС – регулятор скорости; БД – блок деления; РТ1 и РТ2 – регуляторы составляющих тока статора I_{s1} и I_{s2} , соответственно; БКиП – блок компенсации и преобразования координат; ШИМ АИ – автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией.

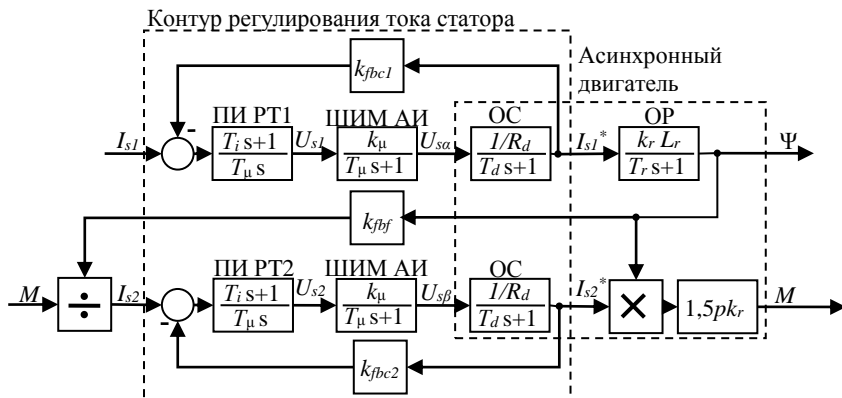


Рис.Б.2. Структурная схема внутренних контуров регулирования векторной САУ

Электромагнитный момент АД для переменных $|\Psi_r|$ и I_{s2} в системе координат, связанной с вектором потокоосцепления ротора Ψ_r , можно представить как [ЗБ]

$$M = \frac{3p}{2} k_r |\Psi_r| I_{s2} \quad (Б.2)$$

При $|\Psi_r| = \text{const}$ электромагнитный момент M пропорционален составляющей тока статора I_{s2} и управление электромаг-

нитным моментом M сводится к управлению составляющей тока статора I_{s2} . Как правило, при настройке контура регулирования составляющей тока статора I_{s2} (и всех внутренних контуров регулирования), который является внутренним для контура частоты вращения, они уподобляются колебательному звену второго порядка с определенным коэффициентом демпфирования, то есть желаемая передаточная функция контура выглядит следующим образом

$$W_i(s) = \frac{1/k}{1 + 2\zeta\hat{\sigma}s + T^2s^2}, \quad (\text{Б.3})$$

где k – коэффициент усиления контура; T – постоянное время; ζ – коэффициент демпфирования.

Параметры желаемой передаточной функции $W_i(s)$ настраиваются таким образом, чтобы получить в контуре переходный процесс минимальной длительности, т.е. обеспечить максимальное быстродействие. Как известно из теории автоматического управления, максимальное быстродействие колебательного звена достигается при $\zeta=1/\sqrt{2}\approx 0,707$ [7Б, 8Б]. Это можно наблюдать на рис.Б3, где в виде трехмерной поверхности показано семейство переходных характеристик $h(t)$ при различных ζ ($k=1$).

Таким образом, передаточная функция колебательного звена, с максимальным быстродействием, имеет следующий вид

$$W_i(s)|_{\zeta=\frac{1}{\sqrt{2}}} = \frac{1/k}{1 + \sqrt{2}\hat{\sigma}s + T^2s^2}. \quad (\text{Б.4})$$

Как видно по рис.Б2 передаточная функция объекта управления в контуре тока выглядит следующим образом

$$W_{CO}(s) = W_\mu(s) W_M(s) = \frac{k_\mu}{\hat{\sigma}_\mu s + 1} \cdot \frac{1/R_d}{\hat{\sigma}_d s + 1}, \quad (\text{Б.5})$$

где $R_d=R_s+k_r^2R_r$ – эквивалентное активное сопротивление АД; T_d – эквивалентная постоянная времени; k_μ – коэффициент усиления ШИМ АИ; T_μ – постоянная времени ШИМ АИ.

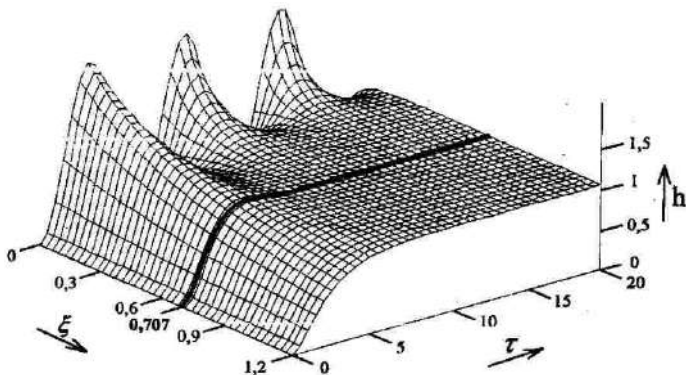


Рис.Б3. Переходные характеристики колебательного звена в зависимости от коэффициента демпфирования ζ (τ – относительное время)

При условии, что $T_\mu = 1/f_{cf}$, где f_{cf} – несущая частота ШИМ АИ, которая в современных автономных инверторах может достигать десятков килогерц, то постоянная времени ШИМ АИ $T_\mu \ll T_d$ и будет оказывать незначительное влияние на динамические характеристики контура регулирования составляющей тока статора. С учетом этого, при $T = \sqrt{2} T_\mu$, передаточная функция регулятора, обеспечивающего максимальное быстродействие в контуре регулирования составляющей тока статора I_{s2} , и передаточная функция замкнутого контура имеет вид

$$W_{R12FOC}(s) = \frac{1}{R_d} \frac{T_d s + 1}{2T_\mu k_\mu k_{fbc2} s}, \quad (Б.6)$$

$$W_{C12FOC} = \frac{1/k_{fbc2}}{2T_\mu s(T_\mu s + 1) + 1}.$$

Учитывая то, что передаточные функции объектов управления в обоих контурах регулирования составляющих токов подобны, то структура регулятора в контуре регулирования I_{s1} , при условии настройки его на максимальное быстродействие, аналогична. Следовательно, передаточная функция регулятора и замкнутого контура выглядят следующим образом

$$W_{R1FOC}(s) = \frac{1}{R_d} \frac{T_d s + 1}{2T_\mu k_\mu k_{fbc1} s}, \quad (Б.7)$$

$$W_{\text{ПИФОС}} = \frac{1/k_{\text{fbcl}}}{2T_{\mu}s(T_{\mu}s+1)+1}. \quad (\text{Б.8})$$

Структура САУ прямого управления моментом электропривода

Для управления ЭП на основе АД могут использоваться САУ на основе алгоритмов прямого управления моментом - Direct Torque Control (DTC). Главные особенности алгоритма прямого управления заключаются в том, что в САУ используются релейные регуляторы, а результирующее управляющее воздействие вычисляется по таблице переключений [9Б-13Б].

Основные преимущества DTC заключаются в простоте, надежности управления, а также инвариантности к внешним и параметрическим возмущениям за счет отсутствия в системе преобразователей координат, непрерывных регуляторов и специальных аппаратных и программных средств для обеспечения модуляционного контроля преобразователя частоты.

Структурная схема ЭП с системой DTC представлена на рис.Б4.

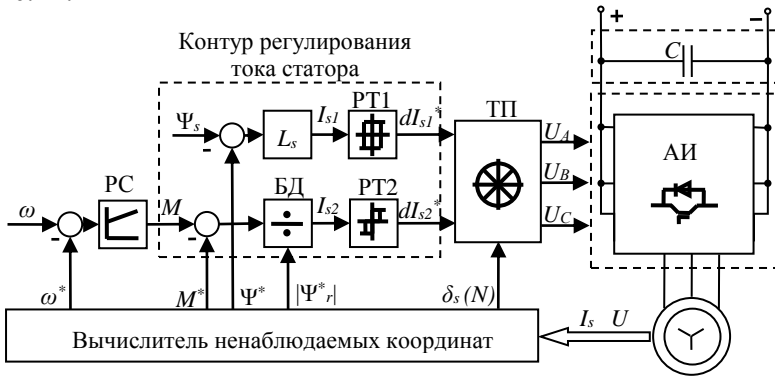


Рис.Б4. Структурная схема ЭП с системой DTC

В САУ установлены следующие регуляторы: регулятор скорости (РС); двухуровневый регулятор потокосцепления статора (РΨ); трехуровневый регулятор момента (РМ). Результирующий вектор выходного напряжения автономного инвертора и комбинация коммутируемых полупроводниковых ключей АИ

вычисляются по таблице переключений (ТП). В зависимости от структуры и требований к его динамическим характеристикам ЭП таблица переключений может иметь различное внутреннее содержание. Примеры таблиц переключений представлены в [Б10-Б13].

Анализ качества переходных процессов в контуре регулирования тока САУ ДТС необходимо начать с линеаризации характеристик нелинейных регуляторов. Для этого можно воспользоваться различными методами линеаризации нелинейностей, представленными в [Б14-Б17]. В данном случае целесообразно воспользоваться способами вибрационной линеаризации, а именно, вибрационной линеаризацией внутренними высокочастотными колебаниями с помощью автоколебаний, искусственно вызванными во внутреннем контуре системы. Это обеспечивается за счет охвата регуляторов запаздывающими обратными связями.

Рассмотрим этот способ линеаризации на примере контура регулирования составляющей тока статора I_{s2} с трехпозиционным релейным регулятором. Обозначим следующие передаточные функции: $W_{RI2DTC}(s)$ – трехпозиционный релейный регулятор; $W_{su2}(s)$ – отрицательная обратная связь. Обозначив коэффициент усиления линеаризованного релейного регулятора через k_2 , можно записать передаточную функцию линеаризованного автоколебаниями регулятора в следующем виде

$$W_{RI2DTC}(s) = \frac{k_2}{1 + k_2 W_{su2}(s)}. \quad (\text{Б.9})$$

Коэффициент k_2 достаточно велик вследствие большой крутизны характеристики релейного регулятора. Поэтому передаточную функцию $W_{RI2DTC}(s)$ можно переписать как

$$W_{RI2DTC}(s) = \frac{1}{1/k_2 + W_{su2}(s)} \approx \frac{1}{W_{su2}(s)}. \quad (\text{Б.10})$$

Если обратную связь выполнить в виде аperiodического звена с передаточной функцией $W_{su2}(s) = k_{su2} / (T_{su2}s + 1)$, то (Б.10) можно записать как

$$W_{RI2DTC}(s) \approx \frac{1}{k_{su2}} (T_{su2}s + 1). \quad (\text{Б.11})$$

Схема линейризованного релейного регулятора приведена на рис.Б5. На осциллограммах, представленных на рис.Б6, приведены сигналы при линейризации релейного регулятора, уставовленного в контуре регулирования тока статора, из которых видно, что сигналы имеют идентичную форму.

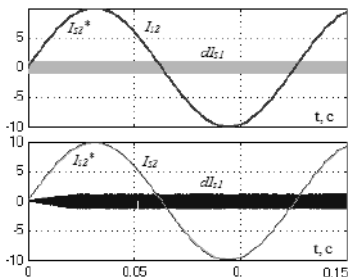
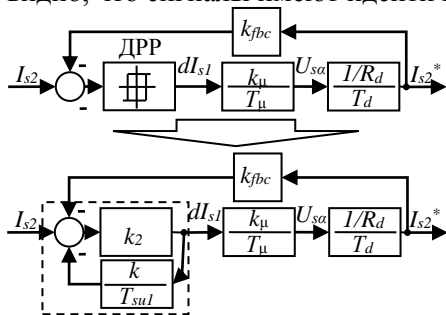


Рис.Б5. Схема линейризованного релейного регулятора

Рис.Б6. Анализ эффективности линейризации регулятора

Структурная схема регулирования тока статора в электроприводе с системой прямого управления моментом с линейризованными релейными регуляторами составляющих тока статора I_{s1} и I_{s2} , представлена на рис.Б7.

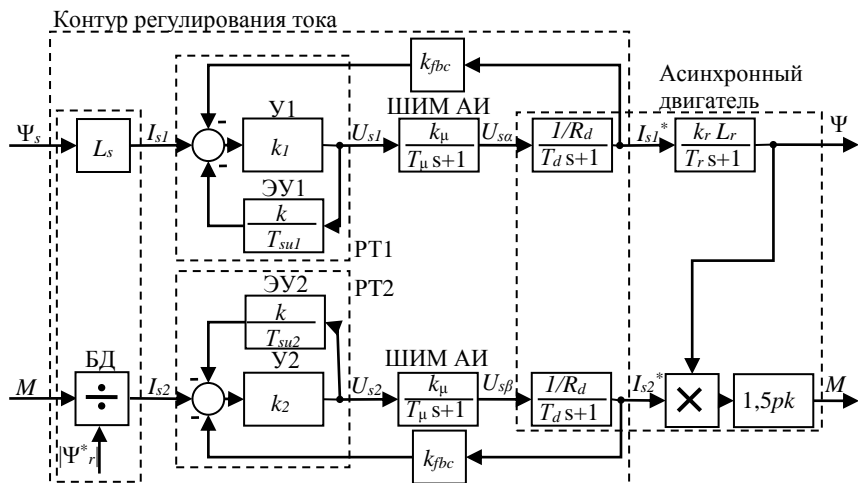


Рис.Б7. Структурная схема контура регулирования тока статора в электроприводе с системой прямого управления моментом

Передаточная функция прямого канала линеаризованного контура регулирования составляющей тока статора I_{s2} , структурная схема которого приведена на рис.Б7, с учетом выше сказанного, выглядит следующим образом

$$W_{RRI2}(s) = W_{RI2DTC}(s) W_{\mu}(s) W_{IM}(s) = \frac{k_2}{1 + \frac{k_2 k_{su2}}{T_{su2}s + 1}} \cdot \frac{k_{\mu}}{T_{\mu}s + 1} \cdot \frac{1/R_d}{T_d s + 1}. \quad (\text{Б.12})$$

Процесс линеаризации релейного регулятора аналогичен процессу модуляции. Релейный регулятор представляет собой модулятор, в котором дополнительное периодическое воздействие соответствует несущей частоте, а внешнее воздействие (управляющий сигнал) - модулирующему сигналу [8Б, 15Б]. Отсюда вытекает соотношение между частотой модулирующего сигнала и несущей, при которой процесс модуляции будет осуществлен без существенных искажений. Поэтому, значение постоянной времени обратной связи целесообразно выбрать $T_{su2} = T_{\mu}$, что также обеспечит компенсацию колебательности, вносимую в контур АИ. Тогда передаточная функция (Б.12) преобразуется к виду

$$W_{RRI2}(s) = \frac{k_{RRI2}}{T_d s + 1}, \quad (\text{Б.13})$$

где $k_{RRI2} = \frac{1}{R_d} \cdot \frac{k_{\mu}}{k_{su2}}$ - коэффициент усиления в прямом канале.

С учетом (Б.13), передаточную функцию замкнутого канала регулирования I_{s2} можно записать как

$$W_{CI2DTC}(s) = \frac{W_{RRI2DTC}(s)}{1 + k_{fbc} W_{RRI2DTC}(s)} = \frac{k_{RRI2}}{T_d s + k_{CI2DTC}}, \quad (\text{Б.14})$$

где $k_{CI2DTC} = 1 + k_{RRI2} k_{fbc}$.

Линеаризация двухпозиционного релейного регулятора в канале регулирования I_{s1} производится аналогичным способом, путем его охвата отрицательной обратной связью с передаточной функцией $W_{su1}(s) = k_{su1} / (T_{su1}s + 1)$. Передаточные функции замкнутого контура регулирования составляющей тока статора

I_{s2} и линейризованного двухпозиционного регулятора будут иметь следующий вид

$$W_{C1DTC} = \frac{k_{RR1}}{T_d s + k_{C1DTC}}, \quad (B.15)$$

$$W_{R1DTC}(s) \approx \frac{1}{k_{su1}} (T_{su1} s + 1), \quad (B.16)$$

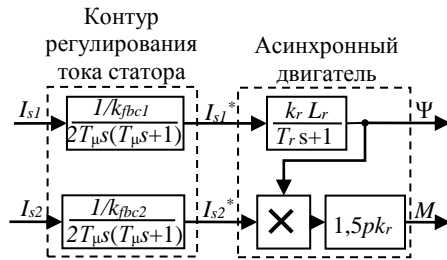
где $k_{C1DTC} = 1 + k_{RR1} k_{fbc}$.

Сравнение результирующих структур контуров регулирования тока статора в асинхронных электроприводах с использованием различных алгоритмов управления

На рис.Б8 приведены структурные схемы каналов регулирования составляющих тока статора.

Как видно из структурных схем на рис.Б8 и выражений передаточных функций (Б.7-Б.8) (Б.13-Б.16) система DTC может обеспечить более высокое быстродействие в контуре тока, чем векторная система управления, т.к. порядок передаточной функции контуров регулирования составляющих токов системы DTC ниже, чем порядок передаточных функции контуров регулирования составляющих токов векторной системы.

При анализе быстродействия различных систем управления необходимо учитывать влияние на длительность переходных процессов структуры вычислителя ненаблюдаемых координат и таблицы переключений.



а) с векторной САУ



б) с САУ DTC

Рис.Б8. Структуры контуров регулирования тока статора

Список литературы ПРИЛОЖЕНИЯ Б:

1Б. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006 – 94 с.

2Б. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский гос. энерг. ун-т им. В.И.Ленина». Иваново, 2008 – 298 с.

3Б. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987 – 136 с.

4Б. Козярук А.Е. Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. СПб.: СПЭК, 2004 – 127с.

5Б. Floter W., Ripperger H. Die trans-vector-regelung fun den feldorientierten betrieb einer asynchron-maschinen // Siemens-Zeitschrift, 1971, № 45 (10).

6Б. Blaschke F., Ripperger H., Steinkönig H. Regelung umrichtergespeister asynchronmaschinen mit eingepprägtem ständerstrom // Siemens-Zeitschrift, 1968, № 42 (9).

7Б. Иванов Б.А. Системы управления электроприводами (теория и курсовое проектирование). Ухта: УИИ, 1997 – 107 с.

8Б. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления. Спб.; Профессия, 2003 – 752 с.

9Б. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor. IEEE trans. ind. appl. 1986, № 22 (5).

10Б. Козярук А.Е. Рудаков В.В. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства. СПб.: 2008 – 99 с.

11Б. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Структура, состав и алгоритмы управления высокоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника, 2013, №2.

12Б. Васильев Б.Ю. Мехатронные перекачивающие комплексы на основе регулируемых электроприводов для подводного компримирования и транспортировки природного газа // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013, №3.

13Б. Васильев Б.Ю., Козярук А.Е. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2013, Т 13,

№2.

14Б. Пугачев В.С. Теория автоматического управления. М.: Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1967 – 680 с.

15Б. Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. Автоматические системы с разрывным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1986 – 168 с.

16Б. Чаки Ф. Современная теория управления: нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Мир, 1975 – 427 с.

17Б. Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. М.: Наука, 1974 – 575 с.

18Б. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974 – 272 с.

19Б. Панкратов, В.В., Нос О.В. Специальные разделы теории автоматического управления. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005 – 104 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖ- ДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ	5
1.1. Общая классификация электроприводов с преобразователя- ми частоты	5
1.2. Электротехническая система перемещения и динамического позиционирования буровой платформы	9
1.3. Электропривод двигателей плавучего добывающего ком- плекса корабельного типа	13
1.4. Электроприводные агрегаты для транспортировки углево- родородов по континентальным трубопроводам	16
1.5. Подводные электроприводные комплексы для транспорти- ровки углеводородов по шельфовым трубопроводам	23
1.6. Электропривод механизмов экскаваторно-транспортного комплекса (карьерных экскаваторов и самосвалов)	26
1.7. Электропривод механизмов забойных горных машин (про- ходческих и очистных комбайнов)	31
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МИНЕРАЛЬНО- СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ	35
2.1. Структура библиотек MatLab Simulink и SimPowerSystems	35
2.2. Имитационные модели библиотеки MatLab SimPowerSys- tems (стандартные блоки силовых элементов)	36
2.3. Имитационные модели полупроводниковых выпрямителей (неуправляемых и управляемых)	42
2.4. Имитационные модели полупроводниковых автономных инверторов	67
2.5. Структура блоков управления полупроводниковыми преоб- разователями	77

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	89
3.1. Двухтрансформаторный преобразователь частоты с низковольтными коммутаторами	89
3.2. Преобразователь частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором	96
3.3. Преобразователь частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором	103
3.4. Преобразователь частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	117
Приложение А	120
Приложение Б	126

Учебное издание

ВАСИЛЬЕВ Богдан Юрьевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО
КОМПЛЕКСА
(применение, моделирование, исследование)**

Учебное пособие

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный»
Адрес университета и РИЦ: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ
ОБУЧАЮЩИХСЯ
ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Специализация №3

Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых

форма обучения: очная, заочная

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	5
САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ.....	6
ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	10
ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ	11
ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ.....	13
ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ.....	13
ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ.....	14

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа - лекционные, практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – дополнение лекционных материалов, подготовка к практическим занятиям, подготовка к участию в деловых играх и дискуссиях, выполнение письменных домашних заданий, Контрольных работ (рефератов и т.п.) и курсовых работ (проектов), докладов и др.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «Эксплуатация и ремонт геологоразведочного оборудования» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к выполнению *контрольной работы* и сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволяют студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Эксплуатация и ремонт геологоразведочного оборудования» являются:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);
- ответы на вопросы для самопроверки (самоконтроля);
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к тестированию;
- подготовка контрольной работы;
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Тема1. Организация ремонта машин.

1. Какие системы ремонта машин находят применение на ремонтных предприятиях горной отрасли?
2. Какие методы ремонта машин Вы знаете?
3. Какие стратегии ремонта оборудования применяются на горнодобывающих предприятиях?
4. Основные элементы системы ППР?
5. Структура ремонтного цикла и формы ее представления.?
6. Существующая система планирования ремонтных работ в горном производстве?
7. Методика расчета графика ППР на планируемый период.
8. Определение трудоемкости ремонтных работ на годовую программу?
9. Расчет штатов ремонтного персонала на парк оборудования?
10. Пути совершенствования системы ППР на ремонтных базах и в полевых условиях.

Тема 2. Подготовка ремонтных работ.

1. В чем заключается организационная подготовка ремонта?
2. Что включает в себя конструкторская подготовка ремонтных работ?
3. Из чего состоит технологическая подготовка ремонта горного оборудования?
4. Построение линейных графиков ремонта.
5. Кем разрабатываются сетевые графики ремонта машин?
6. Что включают в себя и что дают ремонтному производству сетевые графики ремонта?
7. Какое оборудование подлежит ремонту с использованием сетевых графиков ремонта?
6. Что характеризует критический путь на сетевом графике?
7. Назовите основные эксплуатационные документы, применяемые для горного оборудования?
8. Руководящие материалы, входящие в состав ремонтной документации?
9. В чем состоит отличие ремонтного чертежа от конструкторского?

10. Какие технологические карты на изготовление и восстановление деталей Вы знаете?

Тема 3. Дефектация и дефектоскопия.

1. Назовите формы проявления неработоспособности горных машин.
2. Какие методы контроля дефектов деталей Вы знаете?
3. Перечислите основные средства контроля размеров, формы и взаимного расположения деталей горного оборудования?
4. Сущность дефектации и сортировки деталей.
5. Классификация дефектов деталей.
6. Назовите показатели, характеризующие результаты сортировки деталей по группам годности.
7. Назовите методы обнаружения скрытых дефектов деталей, применяемые в ремонтном производстве.
8. Допустимый и предельный износ.
9. Признаки выбраковки деталей.
10. Меры по предупреждению разрушения деталей горных машин.

Тема 4. Технология ремонта типовых деталей.

1. Классификация и общая характеристика способов восстановления деталей машин.
2. Выбор способа восстановления деталей по технологическому, долговечностному и технико-экономическому критерию.
3. Разработка технологии ремонта валов и осей.
4. Ремонт втулок, подшипников скольжения и качения.
5. Основные дефекты корпусных деталей и их ремонт.
6. Расчет режимов восстановления изношенных поверхностей.
7. Расчет режимов механической обработки восстановленных поверхностей.
8. Каким образом осуществляется прогнозирование технического состояния машин?
9. Какое влияние оказывает режим работы и условия эксплуатации на интенсивность изнашивания?
10. Основные закономерности изнашивания деталей машин

Тема 5. Приемка машин после ремонта.

1. Особенности сборки машин после ремонта.
2. Проверка качества сборки и обкатка узлов промышленного оборудования на испытательных стендах.
3. Испытания машин после ремонта в условиях ремонтного предприятия.
4. Порядок проведения работ по приемке оборудования из ремонта.
5. Заполнение паспорта оборудования.
6. Сдача отремонтированных машин заказчику.
7. Состав приемной комиссии.
8. Испытания машин после ремонта в условиях эксплуатации.

9. Сдача отремонтированных машин заказчику.

10. Оформление акта приемки.

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики – это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

- составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;
- перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамки официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);
- обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);
- определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;
- при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и руководителями ВКР, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;
- все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);
- если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;
- следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает

соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьезный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотрное – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться

с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко

сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование - наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Подготовка к практическому занятию включает следующие элементы самостоятельной деятельности: четкое представление цели и задач его

проведения; выделение навыков умственной, аналитической, научной деятельности, которые станут результатом предстоящей работы. Выработка навыков осуществляется с помощью получения новой информации об изучаемых процессах и с помощью знания о том, в какой степени в данное время студент владеет методами исследовательской деятельности, которыми он станет пользоваться на практическом занятии. Следовательно, работа на практическом занятии направлена не только на познание студентом конкретных явлений внешнего мира, но и на изменение самого себя. Вторым результатом очень важен, поскольку он обеспечивает формирование таких общекультурных компетенций, как способность к самоорганизации и самообразованию, способность использовать методы сбора, обработки и интерпретации комплексной информации для решения организационно-управленческих задач, в том числе находящихся за пределами непосредственной сферы деятельности студента. Подготовка к практическому занятию нередко требует подбора материала, данных и специальных источников, с которыми предстоит учебная работа. В ходе самого практического занятия обучающиеся выполняют задания и делают выводы по выполненному практическому заданию.

ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ

Тесты – это вопросы или задания, предусматривающие конкретный, краткий, четкий ответ на имеющиеся эталоны ответов. При самостоятельной подготовке к тестированию студенту необходимо:

1. готовясь к тестированию, проработать информационный материал по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора учебной литературы;

2. четко выяснить все условия тестирования заранее. Студент должен знать, сколько тестов ему будет предложено, сколько времени отводится на тестирование, какова система оценки результатов и т. д.;

3. приступая к работе с тестами, внимательно и до конца нужно прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов; выбрать правильные (их может быть несколько); на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам;

- в процессе решения желательно применять несколько подходов в решении задания. Это позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант;

- не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, нужно переходить к другим тестовым заданиям; к трудному вопросу можно обратиться в конце;

- обязательно необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Контрольная работа – это письменная работа, выполняемая студентами самостоятельно, преимущественно по общим математическим и естественно-научным, а также специальным дисциплинам, в которой, как правило, решаются конкретные задачи.

Цель контрольной работы – оценка качества усвоения студентами отдельных, наиболее важных разделов, тем и проблем изучаемой дисциплины, умения решать конкретные теоретические и практические задачи.

Контрольная работа, как правило, имеет аналитическую или описательную части, может решать проблемные ситуации путем проведения численного моделирования или расчетов, в том числе с использованием ПК. По типу они могут иметь характер задач, расчётов, алгоритмов, программ и т.п.

Контрольные работы выполняются студентами самостоятельно в соответствии с учебным планом.

Структура контрольной работы зависит от специфики изучаемой дисциплины. В общем виде контрольная работа должна содержать: титульный лист, введение, основную часть и заключение.

Во введении приводится формулировка контрольного задания, кратко излагается цель контрольной работы, место и роль рассматриваемого вопроса (проблемы) в изучаемой учебной дисциплине.

Основная часть контрольной работы должна, как правило, содержать основные определения, обоснования и доказательства, описание методики расчёта (формулы), а также иметь ссылки на используемые источники информации. Материал работы и ее отдельные положения должны быть взаимосвязаны. Основная часть может также включать анализ теории вопроса по теме контрольной работы. Здесь же приводятся исходные данные и значения параметров в соответствии с заданием на контрольную работу. После этого излагается ход рассуждений, описывается последовательность расчётов, приводятся промежуточные доказательства и результаты решения всей поставленной задачи.

В заключении формулируются краткие выводы по выполненной контрольной работе, а в её конце приводится список использованных источников информации.

Контрольные работы обучающихся выполняются согласно учебному графику и сдаются преподавателю за месяц до защиты контрольной работы. Преподаватель делает отметку о приеме работы в графике сдачи контрольных работ.

Ведущий преподаватель после проверки на титульном листе ставит оценку («зачтено» или «не зачтено») и подписывается. Выявленные в ходе проверки преподавателем замечания фиксируются на полях работы. Контрольные работы, выполненные с нарушением установленных требований, а также их ксерокопии к рассмотрению не принимаются.

Типичными ошибками, допускаемыми обучающимися при подготовке контрольной работы, являются:

- содержание работы не соответствует цели и поставленным задачам контрольной работы;
- нарушение требований к оформлению контрольной работы;
- использование информации без ссылок на источник;

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «Эксплуатация и ремонт геологоразведочного оборудования» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «Эксплуатация и ремонт геологоразведочного оборудования».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во -первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.



МИНОБРНАУКИ РФ

**ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»**

Л. И. Кралина, Г. А. Усов, Ф. П. Сердюков

**Методическое пособие
к комплексу практических занятий
по дисциплине «Разрушение горных пород при
проведении геологоразведочных работ»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
Очного и заочного обучения**

**Часть 1
Исследование процессов разрушения и физико-
механических свойств горных пород**

**Екатеринбург
2020**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....

1. Исследование свойств горных пород методом вдавливания

Лабораторная работа № 1. Исследование деформационных свойств горных пород и энергоемкости их разрушения.....

Лабораторная работа № 2. Исследование явления скачкообразности процесса разрушения горных пород.....

Лабораторная работа № 3. Исследование влияния микротвердости и структуры кристаллитов и минералов, слагающих горную породу, на абразивные свойства породы.....

2. Исследование механических свойств горных пород при статических и динамических нагрузках

Лабораторная работа № 1. Определение предела прочности горных пород при одноосном сжатии.....

Лабораторная работа № 2. Исследование процесса разрушения горных пород при воздействии динамических нагрузок.....

Лабораторная работа № 3. Определение дробимости горных пород.....

3. Исследование дисперсных сред

Лабораторная работа № 1. Исследование закономерностей изменения удельной поверхности порошков при диспергировании горных пород.....

Лабораторная работа № 2. Исследование влияния среды на процесс разрушения и диспергирования горных пород.....

4. Комплексное исследование свойств и процессов разрушения горных пород

Лабораторная работа № 1. Определение физико-механических параметров скальных горных пород.....

Лабораторная работа № 2. Определение упругих свойств горных пород.....

Лабораторная работа №3. Определение энергоемкости процесса распиловки горных пород алмазным диском.....

Лабораторная работа № 4. Исследование акустического спектра резания горной породы алмазным диском.....

Литература.....

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее методическое пособие предназначено для выполнения практических занятий по профилирующим дисциплинам для студентов специальности 21.05.03 специализация № 3 Технология и техника разведки МПИ. Предложенные в методическом пособии практические занятия выполняются с целью закрепления теоретических знаний, приобретения практических навыков в выполнении работ лабораторного характера, в том числе с элементами НИРС, расчетов, необходимых при изучении студентами профилирующих дисциплин, курсовом и дипломном проектировании. При выполнении работ используются справочные материалы, которые приведены в приложении. Большинство работ рассчитано на выполнение и оформление непосредственно на занятиях. Если работа не закончена, то с разрешения преподавателя она может быть оформлена и сдана к следующему занятию.

Структурно, в зависимости от теоретического характера лабораторных исследований, методическое пособие представлено в трех частях:

часть 1 - Исследование процессов разрушения и физико-механических свойств горных пород;

часть 2 - Исследование буровых промысловых жидкостей и тампонажных растворов;

часть 3 - Методика обработки результатов исследования при выполнении лабораторных работ и справочные материалы.

Список литературы, использованной при написании методического пособия, приведен в конце каждой части.

В подготовке материалов по комплексному исследованию свойств и процессов разрушения горных пород (часть 1) принимал участие студент Сазонов М. В.

Объем данных работ рассчитан, в основном, на 2-4 часа, реже - на 6-8 часов в случае проведения студентами

комплексных исследований повышенной сложности и детальности.

Полученные результаты лабораторных исследований оформляются студентами в виде отчета, содержащего следующие данные и разделы:

1. Полное наименование работы.
2. Состав исполнителей.
3. Руководитель работы.
4. Задание, дата.
5. Исходные данные.
6. Порядок выполнения работы.
7. Выводы и рекомендации по результатам исследований.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ВДАВЛИВАНИЯ

Лабораторная работа № 1. Исследование деформационных свойств горных пород и энергоемкости их разрушения

Целью работы является исследование деформационных свойств горных пород и энергоемкости их разрушения при воздействии на породы высоких механических полей.

Задача работы состоит в определении механических свойств горных пород методом вдавливания штампа, в проведении расчетов параметров деформационных свойств и энергоемкости разрушения пород, а также в технико-технологической оценке результатов лабораторных исследований

При выполнении настоящей лабораторной работы студенты знакомятся с методикой определения показателей механических свойств горных пород методом вдавливания штампа на установке УМГП-3, проводят испытания образцов горной породы и обрабатывают полученные при испытаниях графики "нагрузка-деформация" [1, 2].

Полученные результаты лабораторных исследований являются основой для расчетов показателей твердости, упругости, пластичности и энергоемкости разрушения горных пород при разной степени деформирования. В конце оформления отчета по данной лабораторной работе дается практическая оценка полученных результатов лабораторных исследований применительно к различным технологическим процессам горного производства, сопровождающимся деформацией и разрушением горных пород.

Содержание работы

Исходные материалы: цилиндрические образцы горных пород (керн) высотой 30-50 мм и диаметром 40-60 мм. Лабораторная работа выполняется группой (бригадой) по 3-4 человека в течение 2-х часов. Перед началом выполнения лабораторной работы руководитель выдает каждой группе (бригаде) образцы исследуемых горных пород, решает вопрос о количестве исследуемых образцов. Причем лабораторная работа, выполняемая каждой группой студентов по отдельности, может являться частью целого комплекса исследований физико-механических свойств. В данном случае результаты лабораторных исследований объединяются вместе и подвергаются анализу в их совокупности.

В процессе выполнения лабораторной работы студенты проводят определение показателей механических свойств горных пород методом вдавливания штампа (рис. 1).

Метод вдавливания цилиндрического штампа с плоским основанием в специально подготовленную плоскую поверхность цилиндрического образца (керн) горной породы высотой 30-40 мм и диаметром 40-60 мм является основным методом для получения количественных характеристик механических свойств горных пород, разрушаемых при бурении скважин.

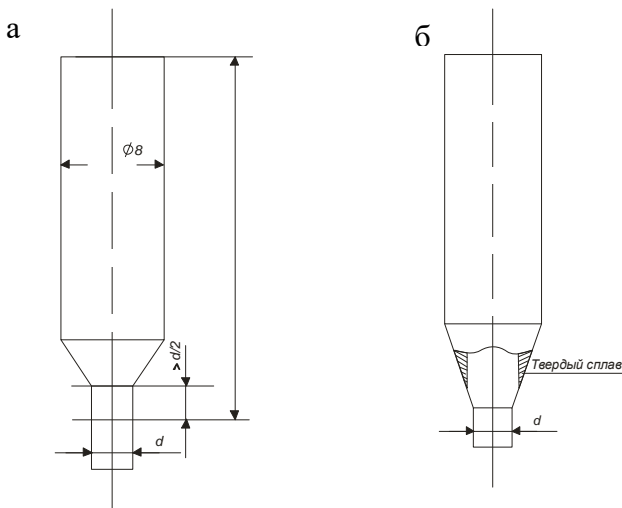


Рис. 1. Виды цилиндрических штампов:

(а - для пониженной твердости горных пород, б - для твердых горных пород)

При вдавливании в твердые горные породы (твердость 3000 МПа) применяются твердосплавные цилиндрические штампы, при меньшей твердости - штампы из закаленной стали. При испытании плотных и однородно пористых пород можно использовать штампы площадью 2 мм², а для пород с величиной зерна больше 0,25 мм лучше использовать штампы площадью 3 мм². Для сильно пористых и малопрочных пород необходимы штампы с площадью основания 5 мм² и более. Эти площади соответствуют притуплению зубьев шарошечных долот. Подготовка установки УМГП-3 к проведению испытаний и испытание ведется аналогично тому, как описано в лабораторной работе 2, за исключением того, что после получения скачка разрушения горной породы (для хрупких, например, гранита и пластично-хрупких пород, например, мрамора) выключается двигатель кнопкой "стоп-нагрузка",

а двигатель записи деформации оставляется включенным до остановки барабана.

Полученные результаты испытаний на установке УМП-3 обрабатывают следующим образом.

Все горные породы по характеру поведения при вдавливании штампа делятся на три класса: I – хрупкие, II – пластичнохрупкие, III – высокопластичные и сильно пористые. Каждому классу пород соответствуют характерные графики "нагрузка-глубина вдавливания" (рис. 2).

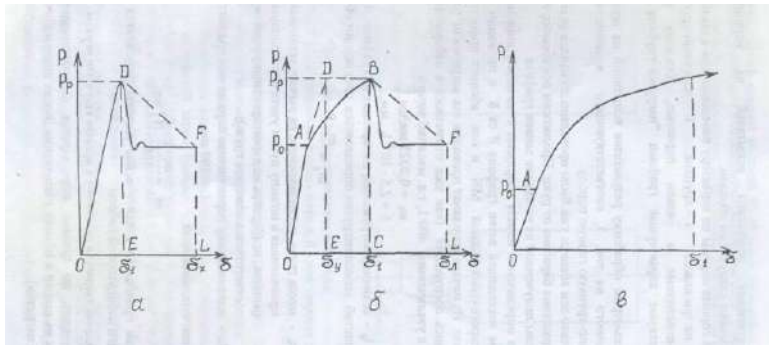


Рис. 2. График «Нагрузка-глубина вдавливания»

Рассмотрим обработку результатов испытаний на примере графика, приведенного на рис. 3, соответствующего вдавливанию штампа в пластичнохрупкую горную породу.

Начало оси абсцисс уже было проведено до начала опыта, когда $P=0$, путем вращения барабана от руки. Продолжим ось абсцисс: на 1-2 см далее за пределы полученной на установке записи графика.

Для определения начала координат совмещаем линейку с линейным участком восходящей ветви графика P от δ и проводим прямую MN . Точку пересечения прямой MN и оси абсцисс принимаем за начало координат. Из начала координат проводим ось нагрузок OP (ось ординат).

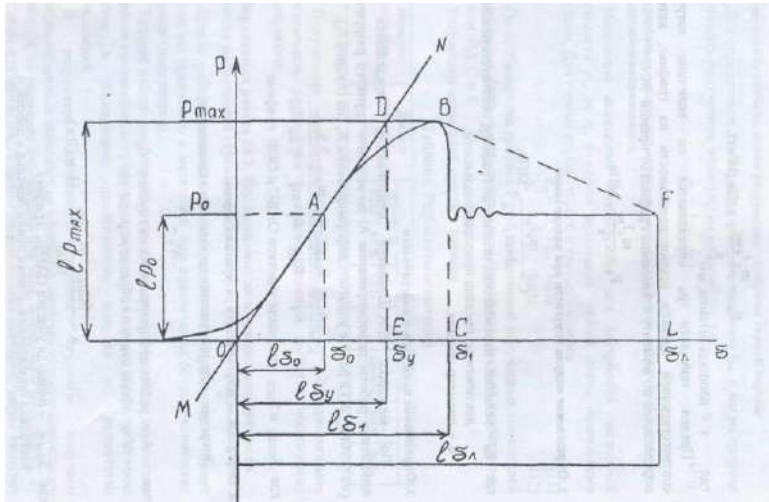


Рис.3. Обработка графика P от δ при вдавлении штампа.

Запись погружения (как уже отмечалось в лабораторной работе 2) ведется с увеличением 400:1, т.е. масштаб записи

$$M_{\delta} = 0,0025 \text{ мм/мм},$$

$$\delta = 2,5 \times 10^{-3} l_g, \text{ мм}, \quad (1)$$

где l_g - величина погружения, измеренная на графике, мм.

Масштаб записи нагрузки определяется следующим образом:

$$m_p = \frac{m_i \cdot g}{L} \quad (2)$$

где m_i - масса груза, установленного на рычаге установки, приведенная к штампу путем учета соотношения плеч рычагов, кг (берется из характеристики установки в соответствии с номером груза);

L - максимальное перемещение пера по оси ординат:

$$L = 100 \text{ мм.}$$

В окончательном виде

$$m_p = \frac{m_i \cdot g}{100}, \text{ Н/мм;}$$

Затем проводятся аналитические расчеты результатов исследований настоящей лабораторной работы.

1. Определение твердости по штампу и предела текучести породы

Твердость по штампу определяется по максимальной величине нагрузки на штамп в момент разрушения (после этого наблюдается резкое падение нагрузки):

$$P_{\text{ш}} = \frac{m_p l_{\text{pmax}}}{S}, \text{ МПа (Н/мм}^2\text{)}, \quad (4)$$

где S - площадь штампа, мм^2 .

Предел текучести p_0 определяется по величине нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности на графике, который определяется по моменту отклонения графика от прямой MN.

$$P_0 = \frac{m_p l_{p0}}{S}, \text{ МПа} \quad (5)$$

2. Определение модуля упругости при вдавливании

$$C = \frac{m_p l_{p0}}{d m_{\delta} l_{\delta 0}}, \text{ МПа,} \quad (6)$$

где $l_{\delta 0}$ - величина перемещения штампа по графику, соответствующая достижению предела пропорциональности;

d - диаметр штампа.

3. Определение показателей пластичности

По методике Л. А. Шрейнера пластичность определяется как отношение работы деформирования A_1 до момента хрупкого разрушения (на глубину b) к работе упругого деформирования A_2 (на глубину δ_y).

$$K = \frac{A_1}{A_y} = \frac{S_{OABC} \cdot m_p \cdot m_\delta}{S_{ODE} \cdot m_p \cdot m_\delta} = \frac{2S_{OABC}}{l_{p \max} \cdot l_{\delta y}}, \quad (7)$$

где S_{OABC} и S_{ODE} - площади участков OABC и ODE графика.

4. Определение энергоемкости разрушения породы

Энергоемкость разрушения породы при вдавливании

$$A_v = \frac{A}{V}, \quad (8)$$

где A - работа деформирования на глубину δ_l ;
 V - объем лунки на образце породы, см^3 .

$$A = \frac{S_{OAFBL} \cdot m_p \cdot m_\delta}{1000}, \text{ Н} \cdot \text{м (Дж)}, \quad (9)$$

где S_{OAFBL} - площади участка OAFBL графика.

Методика определения объема лунки описана в работе 4.

5. Определение глубины лунки разрушения на образце горной породы

Для определения необходимо измерить величину $l_{\delta l}$ в мм на графике и умножить полученную величину на масштаб m_δ , т.е.

$$\delta_l = l_{\delta l}, \text{ мм.} \quad (10)$$

6. Определение предельной интенсивности касательных напряжений и среднего нормального напряжения σ_0 .

Названные показатели используются для построения предельной зависимости σ_{is} от σ_0 в случае испытания горных пород несколькими методами. Для горных пород второго и третьего классов

$$\sigma_{is} = 0,55 p_0, \text{ МПа}, \quad (11)$$

$$\sigma_0 = 0,50 p_0, \text{ МПа}, \quad (12)$$

По особенностям графика Р от δ и величинам полученных показателей механических свойств определить класс горной породы и ее категорию по $P_{ш}$ (или P_0), С и К.

Результаты испытаний свести в таблицу.

Таблица

Результаты испытаний

Название горной породы	Диаметр штампа d, мм	Расчетные показатели						
		$P_{ш}$, МПа	P_0 , МПа	C_1 , МПа	К	A_v , Дж/см ³	σ_{is} , МПа	σ_0 , МПа

Полученные результаты проанализировать и охарактеризовать энергоемкость разрушения и деформационные свойства исследуемых горных пород.

Лабораторная работа № 2. Исследование явления скачкообразности процесса разрушения горных пород

Целью работы является изучение особенностей разрушения горной породы по сравнению с металлами при вдавливании острых конических штампов (инденторов).

Задачей работы является экспериментальное исследование студентами кинетики скачкообразного процесса разрушения горных пород, проведение анализа и

обоснование практических выводов по результатам исследований.

В результате выполнения работы студенты получают экспериментальные зависимости величины нагрузки острого конического индентора от величины деформации для горной породы и металлов [3, 4]. При этом студенты могут лично пронаблюдать скачкообразную кинетику процесса разрушения горной породы, в отличие от процесса разрушения металла, и сделать соответствующие практические выводы. Полученные в ходе лабораторных исследований диаграммные бланки на установке УМГП-3 студентами обрабатываются, строятся графики "нагрузка-деформация" как для образцов горной породы, так и для образцов металла, даются рекомендации по повышению эффективности разрушения горных пород и технологии работы породоразрушающих инструментов.

Содержание работы

Исходные материалы: образцы горной породы в форме цилиндров (например, размером 50×50 мм) со шлифованной торцевой поверхностью и пластинки металла (железо, медь, бронза и др.) размером порядка 30×30×5 со шлифованной испытуемой поверхностью. Лабораторная работа выполняется группой студентов по 3-4 человека в течение 2-х часов. Основная часть лабораторных исследований проводится на установке УМГП-3 (рис. 4, 5).

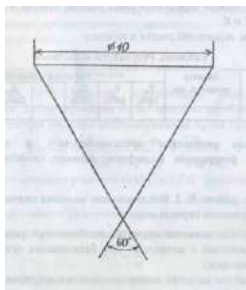


Рис. 4. Острый конус индентора

Устройство установки

Установка УМГП-3 предназначена для изучения по графику деформации механических свойств горных пород и самого процесса разрушения при вдавливании острого конуса и цилиндрического штампа с плоским основанием площадью от 1 до 5 мм² [2].

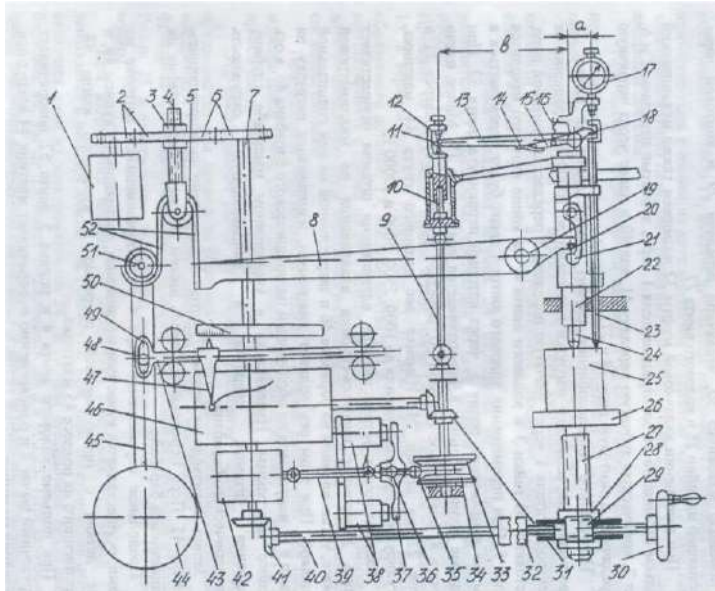


Рис. 5. Схема установки УМГП-3

Установка состоит из четырех частей:

1) подвижного столика, 2) нагрузочного приспособления, 3) устройства для визуального измерения глубины внедрения индентора, 4) устройства для записи диаграммы нагрузка-глубина внедрения при вдавливании инденторов.

Подвижный столик 26 служит для установки вертикального перемещения образца 25 до соприкосновения со штампом 24 и штоком 22 нагрузочного

приспособления. Это перемещение осуществляется вручную с помощью маховичка 30, червячной передачи 29 и винтовой пары, состоящей из гайки 28 и ходового винта 27.

При включении кулачковой муфты 32 возможен также механический подъем столика 26 от электродвигателя 1 через зубчатые передачи 2 и 6, вал 7, коническую зубчатую передачу 41, вал 40 и далее через червячную передачу 29 и винтовую пару 28 и 27.

Нагрузочное приспособление служит для создания на штамп 24 равномерно нарастающей нагрузки предельно до 10000 Н. Вращение от электродвигателя 1 через зубчатую передачу 2 передается винтовой паре, состоящей из гайки 3 и ходового винта 4, на конце которого находится ролик 5. При перемещении ходового винта 4 вверх будет перемещаться в том же направлении ролик 5, через который перекинута лента 52. При подъеме ролика 5 рычаг 8 поворачивается вокруг оси 19. Малое плечо рычага 8, снабженное призмой 20, передает усилие через траверсу 21 и шток 22 на штамп 24. Изменяя вес сменного груза 44 маятника, регулируют предел нагружения до 1000, 2500, 5000 и 10000 Н.

Записывающее устройство при вдавливании штампа осуществляет запись диаграммы нагрузка-глубина вдавливания на миллиметровой бумаге, установленной на барабане 46 и закрепленной на нем специальной защелкой. При этом ось ординат диаграммы, измеряющая нагрузку на штамп в Н, направлена по образующей цилиндрического барабана 46, а ось абсцисс диаграммы. Измеряющая в увеличенном масштабе глубину внедрения штампа, свернута в направляющую окружность цилиндрического барабана.

Запись производится пером 47, которое закреплено на направляющем стержне 43. Перо перемещается вдоль шкалы 50, вычерчивая график на вращающемся барабане.

Продольное перемещение пера 47, пропорциональное нагрузке на штамп, осуществляется кулисным механизмом, состоящим из кулисы 49, в виде детали с прямолинейной прорезью и кулисного камня 48, закрепленного на подвесе 45 маятника.

При подъеме ходового винта 4 и ролика 5 лента 52 поворачивает нагрузочный рычаг 8 и одновременно поворачивает маятник 44 вокруг оси 51 качания маятника.

Поворот подвеса 45 маятника 44 через кулисный выпрямляющий механизм превращается в поступательное движение направляющего стержня 43 и пера 47.

Глубина внедрения штампа 24 передается от верхней головки удлинителя 23 через рычаг, состоящий из двух деталей 15 и 13, имеющих общую ось вращения 18 и связанных между собой плоской пружиной 14. Пружина 16 прижимает правое малое плечо рычага, образуемое деталью 15, к верхней головке удлинителя 23. На левом конце большого плеча, образуемого деталью 13, имеется контактная пластинка 11, которая может контактировать с одним из двух контактов подвижной головки 12, замыкая электромагнитную цепь электромагнитной реверсивной муфты механизма следящей системы.

При быстром перемещении штампа в момент разрушения под ним породы левое плечо рычага 13 опирается о верхний контакт головки 12, а правое плечо поворачивается вокруг оси 18, натягивая пружину 14.

Поворот подвеса 45 маятника 44 через кулисный выпрямляющий механизм превращается в поступательное движение направляющего стержня 43 и пера 47.

Глубина внедрения штампа 24 передается от верхней головки удлинителя 23 через рычаг, состоящий из двух деталей 15 и 13, имеющих общую ось вращения 18 и связанных между собой плоской пружиной 14. Пружина 16 прижимает правое малое плечо рычага, образуемое деталью 15, к верхней головке удлинителя 23. На левом конце большого плеча, образуемого деталью 13, имеется

контактная пластинка 11, которая может контактировать с одним из двух контактов подвижной головки 12, замыкая электромагнитную цепь электромагнитной реверсивной муфты механизма следящей системы.

При быстром перемещении штампа в момент разрушения под ним породы левое плечо рычага 13 опирается о верхний контакт головки 12, а правое плечо поворачивается вокруг оси 18, натягивая пружину 14.

Это предохраняет рычаг от поломки. Механизм следящей системы предназначен для проворота барабана на угол прямо пропорциональный внедрению штампа. Электродвигатель 42 непрерывно вращает фрикционный конический ролик 35 электромагнитной реверсивной муфты. Ролик 35 в нейтральном положении не касается конусов 33 и 34 этой муфты.

При нагружении штампа 24 контактная пластинка 11 рычага 13 замыкается с нижним контактом головки 12. При этом электрическая цепь включает один из электромагнитов 38, задающих направление вращению барабана 46. Рычаг 13 имеет отношение плеч $a:v=1:25$. Передаточные числа шестерен конической передачи 31 и диаметр барабана 46 подобраны таким образом, что при перемещении головки 12 на 1 мм окружность барабана перемещается на 16 мм. Следовательно, окружность барабана 46 перемещается на величину в $25 \times 16 = 400$ раз большую, чем перемещение штампа 24 при его внедрении в образец 25. Поэтому один мм записи деформации на бланке соответствует 2,5 мкм реального перемет штампа. Это необходимо знать при расшифровке диаграмм записи «нагрузка-деформация».

При нагрузке штампа контактная пластина 11 замыкается с верхним контактом головки 12, электрическая цепь включает другой электромагнит 38, срабатывает рычаг 37 с якорем, поворачиваясь вокруг оси 36, ролик 3 прижимается к конусу 33 фрикционной муфты, карданный вал 9 начинает вращаться в обратном направлении, ходовой винт 10 вывинчивается из гайки головки 12, и эта головка

поднимается вверх в исходное положение до отрыва пластинки 11 от верхнего контакта головки 12.

Подготовка установки УМП-3 к работе

1. На барабан установить диаграммный бланк. Для этого открыть замок барабана (защелка на оси барабана), снять барабан с вала, открыть защелку на барабане, установить диаграммный бланк и закрыть защелку на барабане. Установить барабан на вал, закрыть замок.

2. Прочистить перо и заправить его чернилами,

3. Установить требуемое (по заданию) число грузов на рычаг. С этой целью отвернуть гайку с рычага и снять или добавить грузы, закрепить гайку (при пределе измерений свыше 0-1000 Н малый груз не снимается).

4. На поверхность штока установки установить штамп, предварительно измерив с помощью микрометра его диаметр. Торцевую поверхность штампа, прикладываемую к штоку установки, смазать машинным маслом.

5. Установить выбранный образец на столик прибора.

6. Включить вилку прибора в сеть.

7. Включить тумблер "сеть" прибора. При включении тумблера "сеть" загорается сигнальная лампочка на панели прибора.

8. Штурвалом 30 подвести образец породы в соприкосновение со штампом. Соприкосновение штампа с образцом породы считается правильным, если перо прибора не сдвинулось по образующей (нет предварительного нагружения штампа вручную) и горит лампочка "деформация-увеличение". Регулировка длины ножки индикатора деформации производится специальными гайками, устанавливаемыми на обоих концах ножки индикатора. Регулировку вести очень плавно с тем, чтобы четко настроить ножку индикатора на момент включения "Деформация – увеличение" сразу

после сигнала "Деформация-увеличение". Оба этих сигнала контролируются загоранием сигнальных лампочек и слабыми щелчками (включение электромагнитов).

9. Осторожно опустить перо на бланк на барабане и плавным движением барабана дать направление (прочертить) нулевой линии длиной 5-6 см.

Проведение опыта

Одновременным нажатием кнопок "нагрузка" и "деформация" включаются оба электродвигателя. Вдавливание конических штампов в горную породу производится до получения нескольких скачков разрушения или до полного выбора деформации (предел измерения деформации составляет 750 мкм - один оборот барабана), в металле - до ? оборота барабана. Кнопками "стоп" выключают электродвигатели. Включается кнопка "разгрузка". Разгрузка производится до нулевой линии (электродвигатель выключается конечным микровыключателем автоматически). Разгрузку можно производить и вручную (быстрее), для чего штурвал вывести из зацепления в зубчатой муфте и вращением против часовой стрелки, следя за пером, доводят нагрузку до нуля.

При малой нагрузке вращение вести медленно, чтобы не пропустить щелчка микровыключателя, в противном случае будет поломка микровыключателя. После разгрузки установкой штурвалом отвести столик прибора с образцом и включить кнопку электродвигателя "деформация", электродвигатель оставлять включенным до полной остановки барабана (барабан вращается в обратную сторону). При пропуске этой операции в следующем опыте деформация записываться не будет.

После опыта диаграммный бланк снимается с барабана.

Техника безопасности при работе на установке УМГП-3

1. К работе на установке УМГП-3 студенты допускаются только после проверки знаний по правилам работы на установке.

2. Установка УМГП-3 работает от электросети напряжением 380 в. Перед началом работы необходимо убедиться в надлежащем заземлении.

3. Изучение устройства установки вести только после отключения прибора от сети.

После окончания экспериментальных исследований студенты должны на диаграммном бланке записать дату испытания, материал образца (порода или металл) и построить ось нагрузки (ось ординат) и ось деформации (ось абсцисс). Начало координат находится путем совмещения линейки с линейным участком первой восходящей ветви графика нагрузка-деформация и проведения прямой, пересекающей нулевую линию. Из начала координат провести ось нагрузки. По резкому падению нагрузки при вдавливании конуса в породу выделить на графике "нагрузка - глубина вдавливания" первый, второй и третий скачки разрушения. Описать качественное отличие в разрушении металла и горной породы. Сделать выводы и рекомендации по выполненной работе.

Лабораторная работа № 3. Исследование влияния микротвердости и структуры кристаллитов и минералов, слагающих горную породу, на абразивные свойства породы

Цель работы - исследования степени влияния микротвердости размеров и формы составных элементов горной породы (минералов, кристаллитов, цементов, и т.п.) на абразивные свойства горных пород.

Задача работы состоит в определении микротвердости составных элементов горной породы,

определении ее абразивных свойств и определении взаимосвязи между параметрами микротвердости горной породы и ее абразивными свойствами.

В процессе выполнения работы студенты занимаются изучением методики определения микротвердости минералов на приборе ПМТ-3 и методики определения абразивности по методу Барона [5]. Затем производится подготовка проб в соответствии с требованиями вышеуказанных методов и сами лабораторные исследования. По результатам лабораторных

данных строятся графики: $A = f\left(\frac{H_{m,\max}}{H_{m,\min}}\right)$ и $A = f(H_{m,\max})$

[1, 6]. Дается анализ полученных лабораторных данных и их влияния на эффективность разрушения горных пород породоразрушающим инструментом (алмазным, твердосплавным и др.).

Содержание работы

Исходные материалы: шлифовальные образцы горных пород, вдавленные в кристаллы на предметном стекле и шлифовальные образцы в виде дисков (керна) высотой 25-40 мм. Количество образцов определяется руководителем. Лабораторная работа выполняется группой студентов в количестве 3-4 человек и рассчитывается на 4 часа: 2 часа - на изучение методик определения микротвердости и абразивности горных пород, знакомство с приборами и подготовку проб; 2 часа - на проведение исследований и обработку полученных результатов, написание отчета.

Выполнение настоящей лабораторной работы производится в следующем порядке.

1. Определение микротвердости составных элементов, слагающих породу (минералов, кристаллитов, цементов, зон ослаблений и т.п.)

Разрушение породы, например, при бурении или резке камня всегда сопровождается износом породоразрушающего инструмента и, в первую очередь, его вооружения. Горную породу можно рассматривать как агрегаты, состоящие из одного (мономинеральная горная порода) или нескольких (полиминеральная горная порода) минералов. От соотношения твердости минералов, входящих в горную породу, и материалов породоразрушающего инструмента будет зависеть интенсивность износа последнего. В связи с этим возникает необходимость определения микротвердости минералов и металлов. Определение микротвердости минералов и металлов производится на стандартном приборе ПМТ-3, созданном в 1949 году под руководством академика В. Л. Линника. Прибор предназначен для измерения твердости материалов вдавливанием пирамиды от 0,02 до 2Н [1, 2, 5]. Общий вид прибора показан на рис. 6.

Известно, что при вдавливании в хрупкие тела микронаконечников с большими углами заострения хрупкие тела не разрушаются, а при вдавливании образуются пластические отпечатки. Измеряя эти отпечатки и зная нагрузку, при которой проводилось вдавливание, определяют микротвердость.

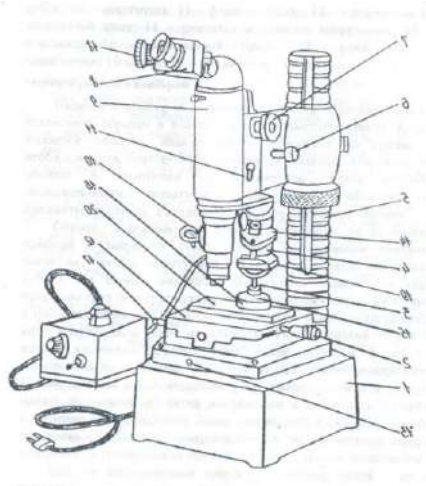


Рис. 6. Прибор ПМТ-3

Устройство прибора ПМТ-3

Общий вид прибора ПМТ-3 приведен на рис. 6. Прибор состоит из следующих основных узлов и деталей: 1 - станина; 2 - координатный винт; 3-стойка механизма нагружения; 4 - механизм нагружения; 5 - стойка; 6 - винт микроподачи; 7 - винт макроподачи; 8-окулярный микрометр, 9-тубус; 10 - осветитель; 11 - флажок-стопор; 12 - предметный столик, 13 -стопорный винт, 14 - рукоятка механизма нагружения, 15 - алмазная пирамида; 16 - испытуемый образец; 17 - ручка; 18 - отсчетный барабанчик; 19 - груз; 20 - предметное стекло.

Порядок работы с прибором

Включить прибор в электрическую сеть. Специальным устройством установить образец в пластилин на предметном стекле. Если студентам выдается образец, вдавленный в пластилин на предметном столе, необходимость повторного вдавливания отпадает. Операция вдавливания образца в пластилин на предметном стекле необходима для параллельности испытуемой

поверхности объекта поверхности предметного стекла, а следовательно, и предметного столика.

Образец с предметным стеклом установить на предметный столик прибора и закрепить стекло сверху прижимными винтами с таким расчетом, чтобы испытываемая поверхность образца оказалась под осью тубуса. На стойку механизма нагружения плавно, без удара, ввести прорезью груз (вес груза указывается преподавателем). Расстопорить тубус с флажком-стопором 11. При этом другой рукой поддерживать тубус за винт макроподачи (винт не вращать). После снятия тубуса со стопора начать медленно вращать винт макроподачи и подвести объектив микроскопа на расстояние 0,5-1 мм от испытываемой поверхности образца. Потом, вращая очень медленно винт макроподачи в обратную сторону, начать поднимать объектив микроскопа и наблюдать в окуляре тубуса получение "светлого" поля. Затем застопорить тубус флажком-стопором и, медленно вращая винт макроподачи, добиться четкого изображения на поверхности (поверхность появляется в поле зрения неожиданно резко).

Вращая координатные винты 2, выбрать, глядя в окуляр, место измерения на поверхности образца (если в поле зрения попали отпечатки, вращая координатные винты 2, вывести их из поля зрения). Вращая столик, плавно до упора перевести испытываемый образец под механизм нагружения. Плавным поворотом (в течение 5 с) рукоятки нагружения одним пальцем до упора против часовой стрелки опустить груз на испытываемую поверхность. В течение 10 с держать пирамиду под заданной нагрузкой для получения отпечатка. Обратным плавным движением разгрузить пирамиду (поднять груз). Убедившись, что пирамида поднята над поверхностью, можно плавно поворачивать столбик обратно на 180° до упора и тем самым перевести образец под объектив.

Измерение диагонали отпечатков

Измерение диагонали отпечатков производится окулярным микрометром АМ9-2 и мерной линейкой, встроенной в тубус, с применением креста нитей и двух рисок, также встроенных в тубус.

Перед измерением диагонали нужно расположить крест нитей так, чтобы он перемещался по одной из диагоналей отпечатка (рис. 7). Само измерение производится следующим образом: фиксируют положение креста нити в начале диагонали отпечатка и берут отсчет. Первая цифра отсчета - целое число делений на мерной линейке, вторая цифра отсчета - десятки делений на барабане окулярного микрометра, третья цифра - единицы делений на барабане окулярного микрометра. Например: на мерной линейке две риски находятся между цифрами 3 и 4, первая цифра отсчета будет 3; на барабане 60, вторая цифра - 6; единиц деления на барабане окулярного микрометра 7, третья цифра будет 7. Первый отсчет - 367.

Затем перемещают крест нити по диагонали отпечатка и в конце диагонали фиксируют положение креста и берут второй отсчет. Например, второй отсчет 442. Величина перемещения креста нитей будет равна $442 - 367 = 75$ (в делениях). Цена деления микрометра АМ9-2 при апертуре $A = 0,65$ равна $0,3$ мкм. Тогда измеренная длина диагонали отпечатка равна $75 \cdot 0,3 = 22,5$ мкм.

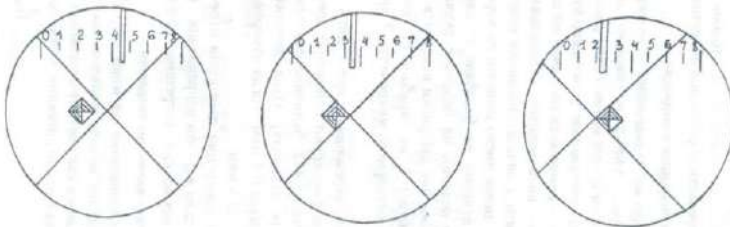


Рис. 7. Расположение креста нитей в тубусе прибора на отпечатке исследуемого элемента горной породы (P выражается в ньютонах, d в мкм).

При измерении диагонали отпечатка необходимо передвигать крест нитей только в одном направлении - или слева направо, или справа налево с целью исключения погрешностей в замерах из-за люфта винта.

Определение величины твердости

При испытании на микротвердость как при обычном испытании на твердость по методу вдавливания пирамиды величина микротвердости определяется как частное от деления нагрузки P на боковую поверхность F отпечатка в предположении, что углы отпечатка такие же, как у пирамиды

$$H_m = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где H_m - микротвердость, Па.

В свою очередь

$$F = \frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

где d - длина диагонали, мкм;

α - угол при вершине пирамиды Виккерса, равный 136° . В окончательном виде

$$H = \frac{1.854 \cdot 10^6 \cdot P}{d^2}, \text{ МПа.} \quad (3)$$

Для ускорения вычисления твердости приведены таблицы твердости 1, 2 и 3 для нагрузок 0,2; 0,5 и 1 Ньютон. При нагрузках в 10 раз больших или меньших эти таблицы

также применимы, соответственно число твердости необходимо уменьшить или увеличить в 10 раз.

2. Определение абразивности образцов горной породы методом Барона

Настоящие методики определения абразивности горных пород разработаны в институте горного дела им. А. А. Скочинского, Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым. Сущность ее заключается в истирании о поверхность образца горной породы торца вращающегося стержня из незакаленной стали и -серебрянки с последующим определением весового износа стержня во время опыта. За критерий абразивности принимается суммарная потеря в весе стержня за стандартное время опыта 10 минут. Опытное потирание стержня производится при осевой нагрузке 150 Н и скорости вращения 400 об/мин [5].

Испытания производятся на установке, выполненной на базе обычного сверлильного станка типа НС - 1 2 А.

Образец горной породы устанавливается в зажимном приспособлении таким образом, чтобы истираемая поверхность была перпендикулярна шпинделю станка. В патроне станка закрепляется эталонный стержень из инструментальной калиброванной стали-серебрянки У8А, диаметром 8 мм. Изготовление стержней производится на токарном станке, где прутки разрезается на части, длиной 70 мм. В одном из торцов каждого стержня высверливается центральное отверстие диаметром 4 мм и глубиной 12 мм.

Определение абразивности породы производят "Сверлением" образца породы эталонным стержнем, предварительно взвешенным на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Исследования производят по схеме парных опытов: сначала "сверление" осуществляется в течение 10 мин одним концом стержня, затем в течение 10 мин – другим.

После опыта стержень очищается и снова взвешивается на аналитических весах с точностью до 0,1 мг.

Коэффициент абразивности породы вычисляется на основании результатов исследований по формуле

$$A = \frac{\sum q_i}{2n_n}, \quad (4)$$

где A - коэффициент абразивности, мг,

q_i - потеря массы эталонного стержня за каждый парный опыт, мг;

n_n - число парных опытов.

На каждом образце горной породы проводится 3-5 парных опытов, а в целом по пробе необходимо провести 9-15 таких опытов

Необходимое число единичных опытов определяется с учетом коэффициента вариации, зависящего от структуры горных пород, на основании величины отношения

$$a = \frac{K_{\text{дон}}}{K_{\text{вар}}} \quad (5)$$

где $K_{\text{дон}}$ - допускаемое отклонение точности определения коэффициента абразивности;

$K_{\text{вар}}$ - коэффициент вариации, принимаемый согласно табл. 4

Согласно абсолютной величины a необходимо определить минимальное число единичных опытов, руководствуясь табл. 5.

Таблица 1

Определение чисел твердости в МПа при испытании алмазной квадратной пирамидой с двухгранным углом при вершине 136° для нагрузки P , равной 0,2 Н

Диагональ от отпечатка, мкм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	-	-	-	-	14840	10300	7560	5800	4580
10	3700	3060	2580	2200	1892	3648	1448	1284	1141	126
20	928	841	766	701	644	594	548	508	473	442
30	412	386	362	340	320	302	286	270	256	244
40	232	220	210	200	191,6	183,2	175,2	168,0	161	154,4
50	148,4	142,6	137,2	132	127,2	122,6	118,2	114,2	110,2	106,6
60	103,0	99,8	95,6	93,4	90,6	87,8	85,2	82,6	80,2	78,0
70	75,6	73,6	71,6	69,6	67,8	66,0	64,2	62,6	61,0	59,4
80	58,0	566	55,2	53,8	52,6	51,4	50,2	49,0	48,0	46,8
90	45,8	44,8	43,8	42,8	42,0	41,0	40,2	39,4	38,6	37,8
100	37,0	38,4	35,6	35,0	34,2	33,6	33,0	32,4	318	31,2
110	30,6	30,2	29,6	29,0	28,6	28,0	27,6	27,0	26,6	26,2
120	25,8	254	35,0	24,6	24,2	23,8	23,4	23,0	22,6	22,2
130	22,0	21,6	21,2	21,0	20,6	20,4	20,0	19,76	19,48	19,2
140	18,92	8,66	18,4	18,14	17,88	17,64	17,40	17,16	16,94	16,7
150	16,48	6,26	16,06	15,84	15,64	15,44	15,24	15,05	14,86	14,68
160	14,48	14,30	14,14	13,96	13,80	13,2	13,46	13,30	13,41	12,98

Таблица 2

**Определение чисел твердости в МПа при испытании
алмазной квадратной пирамидой с двухгранным углом
при вершине 136° для нагрузки P , равной 0,5 Н**

Диагональ отпечатка, d , мкм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	-	-	-	-	14840	25750	18900	14500	11540
10	9250	7650	6450	5500	4730	4120	3620	3210	2860	2570
20	2320	2100	1920	1750	1610	1480	1370	1270	1180	1105
30	1030	965	905	850	800	755	715	67,5	640	610
40	580	550	525	500	479	458	438	420	402,5	38,6
50	371	356	343	330	318	306,5	295,5	285,5	275,5	266,5
60	257,5	249	239	233,5	226,5	219,5	213	2065	200,5	195,0
70	189,0	184,0	179,0	174,0	169,5	165,0	160,5	56,5	152,5	148,5
80	145,0	141,5	138,0	134,5	131,5	128,5	125,5	122,5	120,0	117,0
90	114,5	112,0	109,5	107,0	105,0	102,5	100,5	985	96,5	94,5
100	92,5	91,0	89,0	87,5	85,5	84,0	82,5	81,0	79,5	78,0
MO	76,5	75,5	74,0	72,5	71,5	70,0	69,0	67,5	66,5	65,5
120	64,5	63,5	62,5	61,5	60,5	59,5	58,5	57,5	56,5	55,5
130	55,0	54,0	53,0	52,5	51,5	51,0	50,0	49,4	48,7	48,0
140	47,3	46,6	46,0	45,3	44,7	44,1	43,5	42,9	42,4	41,8
150	41,2	40,7	40,2	39,5	39,1	38,6	38,1	37,6	37,2	36,2
160	36,2	35,8	35,4	34,9	34,5	34,1	33,7	33,2	32,8	32,5

Таблица 3

Определение чисел твердости в МПа при испытании алмазной квадратной пирамидой с двухгранным углом при вершине 136° для нагрузки P , равной 1 Н

Диагональ отпечатка, d , мкм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	18500	15300	12900	11000	9460	8240	7240	6420	5720	5140
10	4640	4200	3830	3500	3220	2970	2740	2540	2360	2210
20	2060	1930	1810	1700	1600	1510	1430	1350	1280	1220
30	1160	1100	1050	1000	958	916	876	840	805	772
40	742	713	686	660	636	613	591	571	551	533
50	515	498	478	467	453	439	426	413	401	390
60	378	368	358	348	339	330	321	313	305	297
70	290	283	276	269	263	257	251	245	240	234
80-	229	224	219	214	210	205	201	197	193	189
90	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
100	153	151	148	145	143	140	138	135	133	130
110	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
120	110	108	106	105	103	102	100	988	974	960
130	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
140	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
150	724	715	707	698	690	681	673	665	657	649
160	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579

Таблица 4

Определение коэффициента вариации $K_{вар}$

Структура пород	Размер зерен, мм	$K_{вар}$, %
Крупнозернистая	5	30
Среднезернистая	3-5	22
Мелкозернистая	0.3-0.2	19
Тонкозернистая с включениями	0.2	34

Таблица 5

Определение минимального числа единичных опытов

a	2,0	0,98	0,69	0,57	0,49	0,48
n	1	4	8	12	16	20

Запись результатов измерений и вычислений производится в таблице 6.

Таблица 6

Определение абразивности горных пород

№	Порода		Номер образца опыта	Масса стержня. $G_{1,2}$, мг		Потеря массы, мг	Абразивность. А, мг				Примечание
	шифр	название		до опыта	после опыта		по опыту	по образцу	среднее по пробе	коэф. вариаци, %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

3. Построение графиков и выводы результатов работы

Построение графиков по результатам измерений и вычислений настоящей лабораторной работы. Количественный и качественный анализ зависимостей

$$A = f\left(\frac{H_{m,\max}}{H_{m,\min}}\right) \text{ и } A = f(H_{m,\max}) \text{ а также степени зернистости}$$

(крупно-, средне-, мелко-, микрзернистости) исследуемых образцов горных пород.

Обосновать практическое значение полученных результатов лабораторных исследований и дать практические рекомендации.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Лабораторная работа № 1. Определение предела прочности горных пород при одноосном сжатии

Целью данной работы является определение предела прочности горных пород путем разрушения образцов правильной формы.

Задачей работы является освоение студентами методики определения предела прочности горных пород при одноосном статическом нагружении и изучение взаимосвязи указанного параметра с известными характеристиками крепости горных пород.

Величина критических сжимающих напряжений, при которых происходит разрушение породы, называется пределом прочности на сжатие. Показатель сопротивления пород одноосному сжатию $\sigma_{сж}$ является наиболее распространенной оценкой прочностных свойств пород и определяется как частное от деления максимальной разрушающей силы P_{max} , полученной при одноосном раздавливании образца горной породы, на начальную площадь поперечного сечения образца S :

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{max}}{S} \quad (1)$$

Это условное разрушающее напряжение называют также прочностью при одновременном сжатии. Однако этот показатель может рассматриваться только как некоторая относительная характеристика, которая может быть использована для сравнения крепости различных пород. Показатель прочности горных пород зависит от ряда факторов, связанных с природным несовершенством строения и структурными особенностями горных пород, таких как:

- неоднородность петрографического состава,
- слоистость;
- наличие микротрещин.

Вместе с тем, прочность образцов в значительной степени зависит от условий и техники проведения испытаний:

- формы и размеров образца;
- соотношения между размерами образцов;
- скорости приложения нагрузки и др.

С учетом перечисленных факторов прочность горных пород на одноосное сжатие определяется по следующей методике [5, 6].

Рекомендуется использовать образцы цилиндрической формы с диаметром $d=42$ мм и отношением высоты к диаметру $h/d = 1$. Отклонения этих величин для диаметра и высоты допускаются в пределах от 40 до 45 мм и до 5 % для отношения высоты к диаметру. Цилиндрические образцы получают при разрезании кернов на части, причем торцевые поверхности должны быть строго параллельны друг другу и перпендикулярны к образующей цилиндра. Отклонение от параллельности образцов по диаметру основания образца и отклонение от перпендикулярности торцов к образующей цилиндра должно быть не более 0,05 мм.

Подготовленный образец помещают между плитами пресса и доводят до разрушения. Значение максимальной нагрузки разрушения фиксируется, а прочность при сжатии определяется по формуле (1). В том случае, если образец имеет отношение высоты к диаметру отличное от 1, необходимо произвести пересчет по формуле:

$$\sigma_N = \frac{9\sigma_{с.ж}}{7 + 2\frac{d}{h}} \quad (2)$$

где σ_N - прочность на сжатие, определенная на образце с иным соотношением $\frac{d}{l}$.

Как уже отмечалось выше, полученное значение прочности может быть использовано для сравнения крепости различных пород. Термин "крепость" применим как для характеристики горных пород в отношении сопротивления их разрушению при добычании, так и в отношении их устойчивости с точки зрения сохранности горных выработок. Он пригоден для характеристики любых видов разрушения и поэтому можно рассматривать крепость как сопротивление разрушению вообще. Мерой крепости горных пород является коэффициент крепости f , предложенный профессором Протоdjяконовым М. М. (см. табл. 9 Приложения)

Определять коэффициент крепости породы проф. Протоdjяконов предложил по величине предела прочности пород на одноосное сжатие

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100 \cdot 10^5} \quad (3)$$

где $\sigma_{сж}$ - предел прочности пород на основе сжатия, Па.

Коэффициент крепости проф. Протоdjяконова М. М. является величиной безразмерной и может иметь максимальное значение, равное 20. В процессе выполнения лабораторной работы студенты знакомятся с методикой оценки прочностных свойств горных пород, в частности, $\sigma_{сж}$, при статическом нагружении образцов на прессе и требованиями к подготовке исследуемых образцов После проведения исследований образцов горных пород на прессе рассчитываются значения предела прочности горных пород при одноосном сжатии - $\sigma_{сж}$, а результаты работы оформляются в виде таблицы В заключении даются анализ

полученных результатов исследований и практические рекомендации по их применению.

Содержание работы

Исследуемые виды горных работ выбираются, преимущественно, с различными прочностными свойствами. Количество образцов пород определяется руководителем и составляет 3-5 штук

Образцы горных пород, предназначенные для исследования студентами, могут быть приготовлены заранее.

Необходимым оборудованием и измерительными приборами для проведения исследований являются:

- пресс любой, например, марки П-50;
- камнерезный и шлифовальный станки,
- штангенциркуль;
- микрокалькулятор.

Лабораторная работа выполняется группой студентов в количестве 2-3 человека и рассчитана на 2 часа без подготовки образцов.

Выполнение настоящей работы производится в следующем порядке:

- подготавливают к работе пресс;
- измеряют площадь поперечного сечения образца и устанавливают его на нижнюю плиту;
- опускают верхнюю плиту до касания ею верхнего торца образца;
- включают двигатель маслососа,
- поворачивая ручку управления по часовой стрелке, осуществляют подачу масла в гидроцилиндр пресса;
- после разрушения образца сбрасывают давление масла и выключают двигатель;
- определяют по шкале нагрузок разрушающее усилие P_T и рассчитывают по следующей формуле предел прочности породы одноосному сжатию:

$$\sigma_{сж} = \frac{4P_{\max}}{\pi d^2} \quad (4)$$

где d - диаметр образца.

При необходимости используется формула (2) эксперимента заносятся в таблицу.

Таблица

Результаты эксперимента

Номер образца	Испытуемая порода	$S, \text{м}^2$	$P_{\max}, \text{Н}$	$\sigma_{сж}, \text{Па}$	f

Обработка и анализ результатов исследований

По формуле (3) определяют коэффициент крепости породы по проф. Протодяконову М. М. Затем дается руководителем задание рассчитать прочность породы на одноосное сжатие, если известен коэффициент крепости по шкале М. М. Протодяконова (например, при $f = 2, 5, 10, 15, 18$) и определить коэффициент крепости f по данной шкале, если известны прочностные пород на одноосное сжатие (полученные при проведении настоящих исследований или заданные руководителем произвольно). Дать практические выводы по результатам исследований прочностных свойств горных пород при статическом одноосном их нагружении.

Лабораторная работа № 2. Исследование процесса разрушения горных пород при воздействии динамических нагрузок

Целью работы является исследование энергозатрат при динамическом нагружении горных пород.

Задача работы состоит в изучении процесса динамического вдавливания в горную породу на копровой установке со свободно падающим ударником с породоразрушающим элементом. При этом исследуются

зависимости удельной объемной работы разрушения, глубины лунки h , объема разрушенной породы $V_{л}$ от кинетической энергии удара T . Такие зависимости представляют большой практический интерес при любых технологических процессах, сопровождающихся разрушением горных пород при динамическом воздействии на них породоразрушающих элементов [3, 7].

Так, например, при бурении скважин имеют место исключительно динамические процессы. Поэтому с точки зрения бурения скважин представляет интерес динамическое приложение нагрузки со стороны элементов породоразрушающего инструмента к горной породе. При экспериментальном изучении динамического деформирования и разрушения пород используются принципы приближенного моделирования, которые реализуются на специальных установках [2].

В процессе выполнения работы студенты знакомятся с устройством копровой установки, на которой производится динамическое вдавливание в породу породоразрушающего элемента, и проводят серию исследований по установленной руководителем программе. Результатами работы являются произведенные студентами расчеты удельной объемной работы разрушения A_y , построенные графики зависимостей $A_y = f(T)$ и $V_{л} = f(T)$, а также практические рекомендации по кинетике разрушения горных пород в различных производственных процессах: в бурении, обработке камня, измельчении и диспергации горных пород.

Содержание работы

Исходными материалами для исследований являются образцы горных пород в форме цилиндров высотой 30-50 мм и диаметром 40-60 мм. Количество испытуемых образцов горных пород определяется руководителем. Лабораторная работа выполняется группой (бригадой) по 3-4 человека в течение 2-х часов.

Опыты проводятся на вертикальном копре (рис. 1). Копер состоит из основания 6, направляющих 7, стойки 8, масштабной линейки 5, ударника 2, сменных грузов 1, плиты для крепления образцов горной породы 9, штанги 4. В штанге прессовой посадкой крепится цилиндрический штамп с плоским основанием.

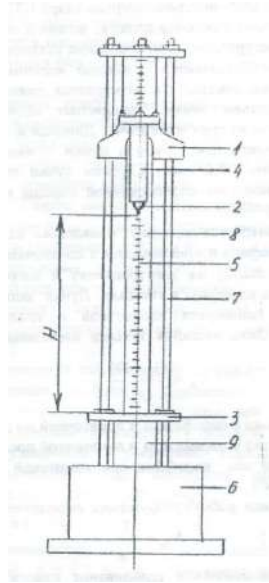


Рис. 1. Копровая установка со свободнопадающим ударником с породоразрушающим наконечником

Выполнение лабораторной работы и обработка результатов исследований проводятся в следующем порядке.

Исследуемый образец устанавливают на основании копра. Крепят плиту, завинчивая гайки "от руки". Гайки устанавливаются как над плитой, так и под плитой. Последние предохраняют штамп от разрушения в случае раскалывания образца. По заданной преподавателем

энергии удара определяется высота сбрасывания ударника по формуле:

$$H = \frac{T}{G} \quad (1)$$

где H - высота сбрасывания;

T - энергия удара (интервал энергии удара 1-10 Дж);

G - вес ударника (включая штангу, штамп и шпильки со сменными грузами, если последние установлены).

Проводится три сбрасывания с каждой величиной энергии удара. Образовавшиеся лунки измеряются. Измеряется длинная и короткая ось лунки, глубина и объем лунки. Замеряемые величины берутся как среднеарифметические из трех измерений. Длинная и короткая оси лунки измеряются штангенциркулем, глубина лунки - индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Глубина лунки измеряется в самой глубокой части, но порошок спрессованной породы под штампом (ядро сжатия) не удаляется.

Объем лунки измеряется методом "плавленого парафина". В тигелек кладется кусочек парафина и взвешивается с лопаточкой на аналитических весах, после чего ставится на электроплитку и нагревается до 70°C - момент расплавления парафина в тигельке. Лунка заливается парафином. Избытки парафина снимаются лопаточкой и кладутся в тигелек с лопаточкой вместе. Охладившийся тигелек взвешивается. Объем лунки определяется так

$$V_l = \frac{G1 - G2}{\gamma_n} \quad (2)$$

где $G1$ - вес тигелька с парафином и лопаточкой до заливки;

$G2$ - вес тигелька с парафином и лопаточкой после заливки;

γ_n - удельный вес парафина при комнатной температуре (9200 Н/м³) Удельная объемная работа разрушения определяется по формуле

$$A_{y\partial} = \frac{T}{V_l} \quad (3)$$

Последующее динамическое вдавливание наносится на расстоянии двух диаметров лунки от предыдущего. Значение $A_{y\partial}$ для одной точки графика определится как среднеарифметическое из 3-х измерений.

По полученным данным построить графики зависимости $A_{y\partial} = f(T)$ и $V_l = f(T)$. Сделать выводы и практические рекомендации.

Техника безопасности при работе на копре

Сбрасывать груз только после того, как убедитесь, что руки товарищей убраны с поражающей штампом поверхности горной породы.

Лабораторная работа № 3. Определение дробимости и горных пород

Целью работы является определение характеристик разрушаемости горных пород под действием динамических нагрузок

Задачей работы является освоение студентами методики проведения исследований и расчета показателей разрушаемости и дробимости горных пород при динамических нагрузках, производимых на вертикальном копре при сбрасывании.

Дробимость горных пород определяется энергетической оценкой разрушения породы в сложном напряженном состоянии.

Это сложное напряженное состояние характеризуется тем, что деформации и напряжения сжатия трансформируются, превращаясь в трудноопределимый

комплекс деформаций и напряжений, вызывающих разрушение породы. Опыты по определению дробимости проводятся на породных образцах, при этом считается, что возникающее в этих образцах сложное напряженное состояние в той или иной мере приближает опыты к технологическим процессам разрушения породы на производстве. Получаемые в результате опытов энергетические характеристики разных пород, сопоставленные между собой, дают представление об энергоемкости процесса разрушения при выполнении технологических горных работ [3, 5, 7].

В процессе выполнения лабораторной работы студенты знакомятся с методикой проведения работы, выполняют экспериментальные исследования разрушения горных пород при действии динамических нагрузок. Затем студентами выполняются расчеты и дается анализ характеристик разрушаемости исследуемых образцов горных пород: показателя разрушаемости V_{\max} показателя дробимости $tg\alpha$ и коэффициента вариации их средних значений.

Содержание работы

Для испытания используют образцы горных пород правильной формы, диаметром и высотой $h = d = 40$ см. Допускается отклонение размеров ± 2 мм. Количество образцов устанавливается руководителем. Разрушение образцов производят на обычном вертикальном копре - грузом массой 16 кг. Разрушенный материал подвергается ситовому анализу на ситах с диаметром отверстий 7,0; 3,0; 0,25 мм. Лабораторная работа выполняется группой студентов в количестве 2-3 человека.

Проведение эксперимента производится в следующем порядке.

Образцы породы взвешивают, затем разрушают грузом массой 16 кг, падающим с высоты 0,5 м.

Разрушенный материал подвергают ситовому анализу. По результатам ситового анализа определяют итоговые показатели. Основным показателем является суммарный выход фракций, крупностью (-7мм), выраженный в кубических сантиметрах.

Дополнительным показателем, характеризующим качество дробления, является $tg\alpha$, вычисленный по известной формуле:

$$tg\alpha = \frac{tgV_{max} - lgV_{min}}{lgd_{max} - lgd_{min}} \quad (1)$$

где V_{max} и V_{min} - объемы фракций, $см^3$, прошедшие через сита с диаметром отверстий $d_{max} = 7$ мм и $d_{min} = 0,25$ мм.

Показатели дробимости и разрушаемости горных пород определяют в соответствии с данными, приведенными в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели разрушаемости горных пород

Класс	Характеристика	V_{max} , $см^3$
I	В высшей степени трудно разрушаемые породы	менее 1,8
II	Весьма трудно разрушаемые	1,8÷2,7
III	Трудно разрушаемые	2,7÷4,0
IV	Породы средней разрушаемости	4,0÷6,0
V	Легко разрушаемые	6,0÷9,0
VI	Очень легко разрушаемые	свыше 9,0

Таблица 2

Показатели дробимости горных пород

Класс	Характеристика	$tg\alpha$
I	Весьма трудно дробимые	менее 1,8
II	Трудно дробимые	0,9-0,7
III	Средней дробимости	0,7-0,5
IV	Легко дробимые 0,7×0,5	

Экспериментальные данные и результаты расчетов заносят в таблицу 3.

Таблица 3

Экспериментальные данные и расчеты

№ П/П	Порода	Плотность, г/см ³			Размеры образца			tgα	Классификация породы
		h, см	d, см	V, см ³	-7 мм	-3 мм	-0,25 мм		

Конечным результатом работы являются средние значения tgα и V_{\max} коэффициенты вариации их средних значений и анализ полученных результатов исследований.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Лабораторная работа № 1. Исследование закономерностей изменения удельной поверхности порошков при диспергировании горных пород

Цель работы исследование кинетики измельчения твердых материалов во времени в зависимости от их физико-механических свойств (прочностных, деформационных, наличия дефектов в структуре, крупности исходного и конечного продукта и прочее).

Задача работы сводится к определению закономерностей изменения удельной поверхности различных сыпучих и твердых материалов (горные породы, цемент, различные композиционные материалы, например, ферритовые порошки и др.) в зависимости от продолжительности их диспергирования в измельчительной машине и от физико-механических свойств твердых материалов. В процессе выполнения данной лабораторной работы студент должен освоить методику определения удельной поверхности сыпучих материалов методом

воздухопроницаемости и получить практические навыки работы на приборе ПСХ-4, широко применяемом на производстве [1, 8].

Выполнение настоящей лабораторной работы включает в себя подготовку проб для определения удельной поверхности сыпучих твердых материалов путем их диспергирования в различных трех-пяти временных режимах различных материалов трех-четырех видов на центробежной мельнице МКЦ-3. Затем проводится определение удельной поверхности выбранных для исследования проб из приготовленных порошков твердых материалов. По результатам измерений лабораторной работы строятся графики $S_{y\sigma} = f(t)$ и $S_{y\sigma} = f(\sigma)$ (где $S_{y\sigma}$ - удельная поверхность, m^2/g ; t - время измельчения, с; σ - прочность твердых материалов, Па). Дается качественная и количественная оценка кинетики измельчения твердых материалов в зависимости от их физико-механических свойств.

Содержание работы

Исходные материалы: цементы различных марок, горные породы, шлаки, композиционные материалы и др. крупностью не более 5 мм. Лабораторная работа выполняется группой (бригадой) по 3-4 человека и рассчитана на 4 часа: 2 часа на изучение методики исследования и подготовку проб (в количестве 6-8 штук) и 2 часа - на работу на приборе ПСХ-4 по определению удельной поверхности порошковых проб, обработку результатов исследований и написание отчета. При выполнении работы студенты обеспечиваются следующими приборами и оборудованием:

1. Мельница для сверхтонкого сухого измельчения твердых материалов (типа каскадной центробежной мельницы МКЦ-3).

2. Прибор для определения удельной поверхности порошков ПСХ-4 (в комплекте с лабораторным гидравлическим прессом до 1,5 МПа).

3. Лабораторные весы.

4. Секундомер.

Перед началом работы руководитель формулирует задание и выдает каждой группе (бригаде) студентов различные виды твердых материалов для проведения выше указанных исследований и решает вопрос о количестве исследуемых проб. После приготовления проб в центробежной мельнице МКЦ-3 студенты знакомятся с устройством и методикой проведения измерений на приборе ПСХ-4.

Назначение прибора

Прибор ПСХ-4 предназначен для определения дисперсности порошкообразных материалов по величине удельной поверхности, которая связана со средним размером частиц соотношением:

$$d_{cp} = \frac{60000}{S_{y\delta}} \quad (1)$$

где $S_{y\delta}$ - удельная поверхность, см²/г;

d_{cp} - средний размер частиц в микронах;

γ - удельный вес, г/см³.

Принцип действия прибора основан на соотношении Козени-Кармана, устанавливающем зависимость между дисперсностью частиц, пористостью слоя и его проницаемостью.

Устройство прибора

Схема прибора ПСХ-4 показана на рис 1. Прибор состоит из кюветы 1, соединительных трубок 2 и 3, верхнего резервуара 4, манометра жидкостного (с контрольными рисками 1,2 и 3, 4, 0), нижнего резервуара 6,

крана 7 и резиновой груши 8 с обратным клапаном. Стеклоанная часть ПСХ-4 смонтирована на панели, прикрепленной к внутренней стенке прибора.

Кювета 1 предназначена для укладки в ней слоя испытываемого порошка. Она представляет собой (рис. 2) металлическую камеру 1, перегороденную на некоторой высоте диском с высверленными в нем отверстиями. Часть камеры, ограниченная диском и дном кюветы, с помощью штуцера и гибкой резиновой трубки присоединена к жидкостному манометру. На внешней поверхности кюветы нанесена миллиметровая шкала 2. Плунжер 3 (рис. 2), посредством которого производится уплотнение слоя материала в кювете, выполнен в виде цилиндра с упорным диском. В теле плунжера просверлен канал и отверстия 4 для прохождения воздуха. Цилиндр подогнан к кювете с просветом 0,15 мм. К вырезу упорного диска прикреплена планка с нониусом, которая со шкалой 2 на внешней поверхности кюветы позволяет измерить толщину слоя испытываемого материала.

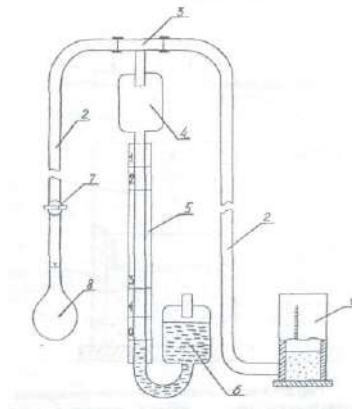


Рис. 1. Общая схема прибора ПСХ-4:

1 - кювета, 2, 3 - соединительные трубки; 4 - верхний резервуар; 5 - манометр жидкостный; 6 - нижний резервуар; 7 - кран; 8 - резиновая груша с обратным клапаном.

В устройстве прибора ПСХ-1 резиновая груша с клапанами служит для создания разрежения под слоем испытываемого материала. Манометр 5 предназначен для определения давления под слоем испытываемого материала и в сочетании с секундомером используется для определения воздухопроницаемости слоя испытываемого материала. Прибор снабжен стеклянным одноколейным манометром длиной около 300 мм, заполненным подкрашенной водой.

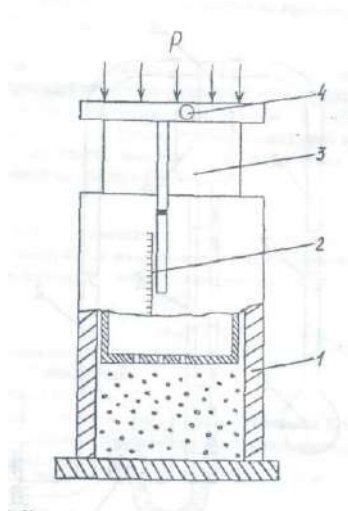


Рис. 2. Кювета для укладки испытываемого порошка:

1 - металлическая камера; 2 - шкала; 3 - плунжер, 4 - отверстие для прохождения воздуха.

В комплект прибора входят гидравлический пресс, секундомер, аптекарские весы и разновесы.

Проведение анализа

Для определения величины удельной поверхности необходимо:

1. Высушить материал до воздушносухого состояния в течение 2-х часов при температуре 105-110 ° (известь-кипелку и цемент высушивать не следует).

2. Для определения удельной поверхности необходимо рассчитать вес пробы в граммах по формуле $Q=3,33 \gamma$, где γ - удельный вес в г/см³. В табл.1 приведен вес пробы для некоторых материалов.

Таблица 1

Перечень материалов и величины навесок для определения удельной поверхности на приборе ПСХ-4

№	Наименование материала	Удельный вес материала	Навеска материала
1.	Известь-пушенка	2,20	7,32
2.	Пегматит	2,38	7,86
3.	Пемза	2,40	7,99
4.	Белая сажа	2,45	8,16
5.	Песок	2,65	8,83
6.	Кирпичный бой	2,66	8,86
7.	Стекольная шихта	2,70	9,00
8.	Ферросилицит	2,70	9,00
9.	Опока	2,73	9,09
10.	Асбестовая галька	2,79	9,32
11.	Известь - кипелка	2,80	9,32
12.	Шлак	2,80	9,32
13.	Известняк	2,80	9,32
14.	Доломит	2,90	9,73
15.	Цемент	3,00	10,00
16.	Зола	3,00	10,00
17.	Клинкер	3,00	10,00
18.	Очажные остатки	3,00	10,00
19.	Силикатная глыба	3,00	10,00
20.	Карборунд	3,20	10,66
21.	Корунд искусственный	3,96	13,20
22.	Двуокись титана	4,00	13,32
23.	Титановый концентрат	4,30	14,30
24.	Гематит	5,10	17,00
25.	Хром. Руда	3,95	13,15
26.	Окалина		17,50

Пробу охладить до комнатной температуры и взвесить с точностью до 0,01 г. В тех случаях, когда

определению подлежит смесь материалов, приведенных в табл. 1, величина навески вычисляется по формуле:

$$Q = 3,33(A/\gamma_1 + B/\gamma_2 + C/\gamma_3)^{-1} \quad (2)$$

где А, В, С - выраженное в весовых долях содержание компонентов в смеси, г;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ соответственно их удельный вес, г/см³.

3. Удельный вес порошка определяют следующим образом. Мерную колбу с 2мя метками заполняют дистиллированной водой до нижней метки при температуре 20° С. От высушенной навески 60 г, взятой с точностью ± 0,01 г, порошок небольшими порциями засыпают в мерную колбу (волюмометр) до тех пор, пока уровень жидкости не достигнет второй метки при сохранении температуры 20° С. Остаток навески Q_0 взвешивают и по разности находят вес порошка в колбе $Q_k = 60 - Q_0$,

Удельный вес γ рассчитывают по формуле:

$$\gamma = \frac{Q_k}{V}, \text{ г/см}^3 \quad (3)$$

где V - объем жидкости в колбе между метками, см³;
 Q_k - вес порошка в колбе, г.

4. Навеску порошка $Q = 3,33 \gamma$, взятую с точностью до 0,0] г, помещают в кювету прибора, в которую предварительно вложен кружок фильтровальной бумаги.

5. Легким постукиванием разравнивают слой, накрывают порошок сверху вторым кружком фильтровальной бумаги и уплотняют плунжером с помощью пресса при давлении $P=100 \text{ кг/см}^2$. Давление по манометру рассчитывается по формуле

$$P = \frac{100D_1^2}{D_2^2},$$

где D_1 - диаметр плунжера, D_2 - диаметр поршня прессы.

6. С помощью нониуса и шкалы измеряют высоту слоя материала H , вычитая из нее толщину двух кружков фильтровальной бумаги, равную 0,02 мм.

7. Удаляют плунжер из кюветы, открывают кран и посредством груши создают разрежение под слоем порошка. Разрежение должно быть таким, чтобы жидкость в манометре поднялась до уровня верхней колбочки.

8. Закрывают кран и измеряют по секундомеру время T прохождения мениска жидкости в манометре между рисками 1-2 или 3-4. Время T берется среднее из 3-х определений.

9. Фиксируют температуру воздуха на градуснике t° , установленном на приборе.

10. По измеренной температуре воздуха t° и высоте слоя порошка в кювете h находят в табл. 2 значение параметра M .

Вычисления

Для расчета величины удельной поверхности следует:

1. По измеренным значениям высоты слоя h и температуре воздуха t° найти в табл. 2 величину параметра M .

2. Произвести вычисление удельной поверхности по формуле:

$$S_{y\partial} = K \frac{M \sqrt{T}}{P} \quad (4)$$

где $S_{y\partial}$ - удельная поверхность порошка, $\text{см}^2/\text{г}$;

K - постоянная прибора для той пары рисков, между которыми наблюдалось падение столба жидкости за время T (значение K содержится в паспорте прибора);

P - величина навески, г.

Проверка исправности прибора

1. Количество жидкости в манометре должно быть таким, чтобы ее уровень приходился против нижней риски. Уровень жидкости проверяется при пустой и открытой кювете.

2. Прибор должен быть герметичен. Для проверки герметичности кювета плотно закрывается пробкой.

В приборе, как описано выше, создается разрежение и наблюдается положение уровня жидкости в манометре. Если прибор герметичен, этот уровень не опускается.

3. Опустить плунжер в кювету, в которую положено два слоя фильтровальной бумаги, и проверить совпадение нулевых делений нониуса и шкалы. Если имеется какое-либо несоответствие (нулевые деления не совпадают), то его следует учитывать при измерении высоты слоя испытуемого материала.

Проверка и определение постоянной прибора k :

Для проверки и определения постоянной прибора k может применяться порошок с известной величиной удельной поверхности. С этим порошком производится такой же опыт, как и при определении удельной поверхности, и постоянная k вычисляется по формуле:

$$k = \frac{S_{y_0} Q}{\sqrt{TM}} \quad (5)$$

где S_{y_0} - известная величина удельной поверхности, $\text{см}^2/\text{г}$; Q , M , T - определяются из опыта.

Величина k зависит от объекта системы, поэтому изменять длину резиновой трубки или заменять ее трубкой другого сечения также, как и заменять другие детали

прибора, запрещается. После каждого ремонта прибора следует проверять постоянную k .

Определение удельной поверхности грубодисперсных порошков

Для определения удельной поверхности грубодисперсных порошков (с удельной поверхностью менее $1500 \text{ см}^2/\text{г}$) следует брать навеску, численно равную удесятеренному удельному весу (см. табл. 1) и измерять время падения столба манометра между рисками 3 и 4.

Величина M в этом случае определяется по табл. 2 (приложение 2) для одной трети измеренной высоты слоя, а расчет удельной поверхности производится по формуле:

$$S_{уд} = 1,73k \frac{M \sqrt{T}}{Q} \quad (6)$$

При окончании эксперимента студенты строят график, характеризующий процесс кинетики тонкого и сверхтонкого диспергирования твердых материалов. Анализируются результаты исследований и даются рекомендации по режимам измельчения твердых материалов, в зависимости от их физико-механических свойств и тонкости помола.

Лабораторная работа № 2. Исследование влияния среды на процесс разрушения и диспергирования горных пород

Цель работы - исследование влияния изменения удельной поверхностной энергии на энергозатраты при разрушении и диспергации горных пород.

Задача работы сводится к определению энергозатрат при взаимодействии ПАВ с горной породой на ее разрушение и диспергирование.

При этом студенты должны изучить теоретические основы настоящей лабораторной работы (приложение 3),

исследовать процесс снижения прочностных свойств горных пород при взаимодействии их с ПАВ, подобрать виды ПАВ, наиболее эффективно снижающие удельную поверхностную энергию пород, и сделать практические выводы- По данным лабораторных исследований необходимо построить график

$$l_{\text{уд}} = f(c),$$

где $l_{\text{уд}}$ - удельные энергозатраты на измельчение горной породы, (Вт·ч)/м²;

c - содержание ПАВ в пробе при сухом измельчении. Конечным итогом исследований является подбор типа ПАВ и разработка рецептуры его использования для наиболее эффективного снижения энергозатрат при разрушении и диспергации исследуемых горных пород.

Содержание работы

Объектом исследования являются:

- различные горные породы;
- цементы;
- шлаки;
- композиционные материалы и др.

Лабораторная работа выполняется группой (бригадой) по 3-4 человека в течение 4-х часов. Из них: 2 часа на подготовку проб для исследования, выбор ПАВ, изучение теоретических основ и методики проведения исследований (приложение 3). При выполнении работы студенты обеспечиваются следующими приборами и оборудованием:

1. Мельница для сверхтонкого сухого измельчения твердых материалов (тип каскадной центробежной мельницы МКЦ-3).
2. Прибор для измерения активной мощности на лабораторной измельчительной установке типа электроизмерительного комплекта К-540.
3. Лабораторные весы.

4. Секундомер.

5. Прибор для определения удельной поверхности порошков ПСХ-4 (в комплекте с лабораторным гидравлическим прессом до 1,2 МПа).

Перед началом работы руководитель формулирует задание и выдает каждой группе (бригаде) студентов различные виды твердых материалов для проведения вышеуказанных исследований и решает вопрос о количестве проведения экспериментов с выбранной пробой. После изучения методик проведения исследований и теоретического материала по данной работе выбираются типы ПАВ и количество содержания ПАВ в пробе каждого эксперимента.

Затем исследуют процесс разрушения твердых материалов на мельнице МКЦ-3 с применением ПАВ до различной степени дисперсности, измеряя и рассчитывая при этом полезную мощность $W_{п}$ расходуемую на измельчение материала на электроизмерительном комплекте К-540: удельную поверхность измельченного продукта на приборе ПСХ-4 и удельные энергозатраты $l_{уд}$ на его разрушение.

По полученным данным в ходе эксперимента строят график $l_{уд}=f(c)$, определяют оптимальную рецептуру применения ПАВ в качестве понизителя твердости для конкретно исследуемой горной породы или другого твердого тела и дают практические выводы о влиянии среды на процесс разрушения горных пород в области технологии бурения скважин, измельчения или обработки камня в зависимости от физико-механических свойств исследуемых пород.

4. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ СОРНЫХ ПОРОД

Задачи комплексного исследования физико-механических свойств горных пород

Задачей исследования является определение в лабораторных условиях кафедры техники и технологии разведки МПИ физико-механических свойств (ФМС) горных пород, влияющих на процесс их механического разрушения алмазным породоразрушающим инструментом.

Основное влияние на процесс разрушения алмазным инструментом оказывают прочностные, абразивные и упругие свойства. Поэтому для определения свойств, влияющих на процесс разрушения, необходимо выполнить:

- лабораторную работу по определению физико-механических параметров, характеризующих динамическую прочность и абразивность горных пород;
- лабораторную работу по определению упругих свойств горных пород.

Для установления влияния ФМС горных пород на процесс механического разрушения выполняются:

- лабораторная работа по определению энергоемкости процесса резания алмазным диском;
- лабораторная работа по исследованию акустического спектра резания алмазным диском.

Лабораторная работа №1. Определение физико-механических параметров скальных горных пород

Для оценки прочностных свойств горных пород определяются коэффициент динамической прочности (крепости и дробимости) F_d , а для оценки абразивных свойств - коэффициент абразивности - $K_{абр}$.

Методика разработана в ЦНИГРИ под руководством Н. И. Любимова и рекомендована для исследований ФМС скальных горных пород [9].

Отбор и подготовка образцов горных пород

Отбор образцов горных пород производится, как правило, из керна. Можно также отбирать образцы произвольной формы соответствующего размера.

Размеры образцов из керна: длина 20-25 см при бурении коронками диаметром 46-59 мм и 15-18 см при бурении коронками диаметром 76-92 мм.

Подготовка проб из образцов осуществляется в следующем порядке:

- исследуемый образец породы разбивается на куски изометрической формы без острых углов размером 1,5-2,0 см в поперечнике;
- набираются две пробы: каждая проба состоит из 25 кусков и разделяется на пять частей по пять кусков.

Оборудование и материалы, необходимые для исследований

При определении прочностных и абразивных свойств горных пород по методике ЦНИГРИ применяются:

- прибор ПОК для определения динамической прочности (крепости) горных пород;
- прибор ПОАП-2М для определения абразивности горных пород;
- весы типа ВЛКТ-100 г / 5-3

Прибор ПОК состоит из трубчатой ступы (рис.1а) и объемомера (рис.1б). Составными частями трубчатой ступы являются: загрузочный стакан 1, направляющая труба 2, удерживающий шплинт 3, гири 4, упор 5, шнур 6 и рукоятка 7.

Объемомер состоит из стакана 1 и поршня со шкалой 2.

Прибор ПОАП-2м, схема которого приведена на рис. 2, состоит из электродвигателя АОЛБ 22-4 мощностью 0,18 кВт с числом оборотов 1420 об/мин., двух рабочих органов с загрузочными камерами и пульта управления со счетчиком оборотов двигателя.

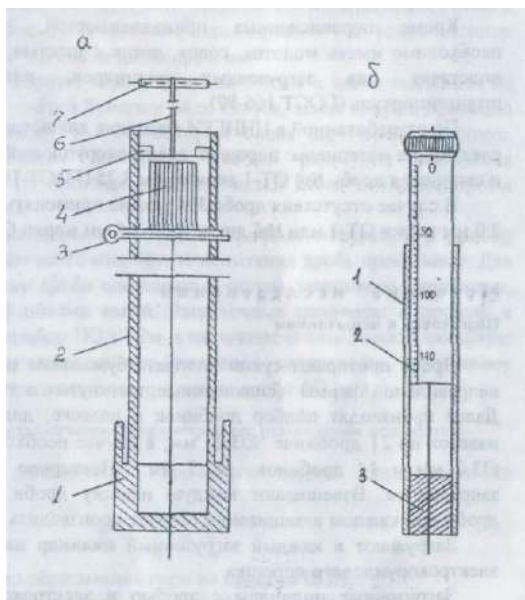


Рис. 1. Прибор ПОК для определения динамической прочности горных пород:

а – трубчатая ступа: 1 – загрузочный стакан; 2 – направляющая труба; 3 – шплинт удерживающий; 4 – гиря; 5 – упор; 6 – шнур; 7 – рукоятка; б – объемомер: 1 – стакан; 2 – поршень со шкалой; 3 – дно.

В приборе ПОАП-2м рабочий орган представляет собой жесткое сварное соединение 8, трех загрузочных камер 4, шатуна 7 и эксцентрикового вала 2, совершающего колебательно-вращательное движение в шариковых подшипниках 10.

Опорой рабочего органа служат маятниковые шатуны 3, которые с помощью шариковых подшипников 6 шарнирно связывают рабочий орган с плитой прибора.

Загрузочные цилиндры вставляются в камеры 4 прямоугольной формы и закрываются крышками 5 при помощи натяжных замков.

Привод рабочего органа прибора осуществляется от электродвигателя 1 через эксцентриковый вал 2 с насаженным на него маховиком 9. При помощи вала 2 загрузочные камеры совершают возвратно-поступательное движение, обеспечивающее интенсивное перемешивание помещенного в них материала.

Механический редуктор-счетчик оборотов 12, который присоединяется к валу электромотора при помощи двух шкивов и приводного ремня, позволяет контролировать число колебаний рабочего органа.

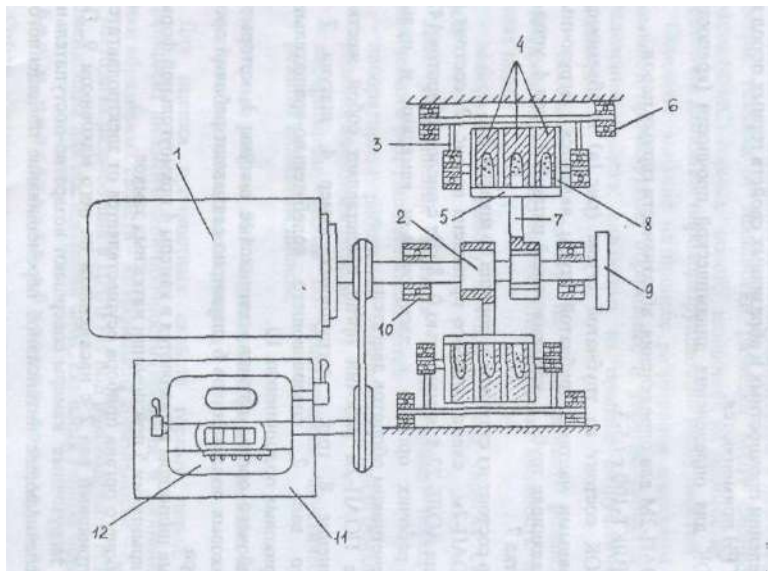


Рис. 2. Схема прибора ПОАП-2М для определения абразивности горных пород:

1 – электродвигатель; 2 – эксцентриковый вал; 3 – шатуны; 4 – загрузочные цилиндры; 5 – крышка; 6 – опоры; 7 – шатун; 8 – рабочие органы; 9 – маховик; 10 – подшипники; 11 – пульт управления; 12 – счетчик.

Весы типа ВЛКТ-100г/5-3 предназначены для определения потери веса эталонного материала при определении абразивности пород с требуемой точностью

Для исследований на приборах ПОК и ПОАП-2м используются:

- загрузочные цилиндры из стекла органического СОЛ (ГОСТ 15809-70) - 18 шт. (6 для проведения опыта, 6 - для промывки дробы после опыта, 6 - запасные);
- сито из сетки №5 (ГОСТ 3826-66),
- мерка емкостью 1 см³.

Кроме перечисленных принадлежностей, учтенных в ОСТе, необходимо иметь молоток, совок, лоток с шестью ячейками для дробы, подставку для загрузочных цилиндров, пластинку, лопаточку, штангенциркуль (ГОСТ 166-80).

По разработанной в ЦНИГРИ методике для исследований необходимы следующие материалы: порошок электрокорундовый №12 (ГОСТ 3647-80) и свинцовая дробь №4 ОТ-1 диаметром 3.25 (ГОСТ 7837-76).

В случае отсутствия дробы №4 можно применять дробь №5 диаметром 3.0 мм марки ОТ-1 или №3 диаметром 3.5 мм марки ОТ-П.

Методика исследований

Подготовка к испытаниям

Дробь протирают сухим хлопчатобумажным материалом. Дробинки неправильной формы (сплюсненные, вытянутые и т.п.) отбраковываются. Далее производят подбор дробинки в навеске, для чего заготавливают 6 навесок по 21 дробинке Ø 3,25 мм; в случае необходимости 26 дробинки Ø 3,0 мм и 14 дробинки Ø 3,5 мм. Повторное использование дробы запрещается. Взвешивают каждую навеску дробы. Определение массы дробы при каждом взвешивании следует производить с точностью до 5 мг.

Загружают в каждый загрузочный цилиндр навеску дробы и 1 см электрокорундового порошка.

Загрузочные цилиндры с дробью и электрокорундовым порошком помещают в прибор и включают его на 20 минут, при этом электродвигатель

должен совершить 28 тыс. оборотов, которые контролируются счетчиком прибора.

Каждую навеску дроби после указанного опыта помещают в сосуд с водой и после перемешивания (всполаскивания) извлекают и протирают насухо чистым хлопчатобумажным материалом.

Промытую дробь взвешивают. Потеря массы дроби в каждой пробирке должна быть 200 ± 10 мг. В случае отклонения потери массы дроби от указанного необходимо изменить количество дробинки в навеске и повторить тарировочные работы вновь.

Проведение испытаний

Каждую часть пробы, состоящую из 5 кусков, помещают в стакан прибора ПОК и производят 10 сбрасываний гири массой 2,4 кг с высоты 600 мм (груз поднимается до упора). Продукт разрушения всех пяти частей каждой пробы породы просеивается через сито с размером стороны ячейки а свету 0,5 мм. Прошедшую через сито фракцию 0,5 мм и менее ссыпают в трубу объеммера (рис. 2). В трубу свободно вставляют до упора цилиндр и снимают отсчет "h" по шкале цилиндра в мм

Раздробленную горную породу фракции 0,5 мм и менее высыпают из объеммера на лист чистой бумаги в виде конуса, затем конус с помощью пластинки разворачивают в диск, который снова пересыпают в конус. Процесс перемешивания повторяют два-три раза для получения однородной среды. Из противоположных частей диска отбирают пробы объемом 1 см^3 каждая.

Загрузочные цилиндры с дробью и пробами помещают в прибор ПОАП-2м и включают на 20 мин. После испытания дробь промывают. Для этого каждую навеску дроби помещают в чистые загрузочные цилиндры, заполненные на $2/3$ объема водой. Загрузочные цилиндры с дробью и водой помещают в прибор ПОАП-2м и включают его на 3 мин. Промытую дробь протирают сухим

хлопчатобумажным материалом, взвешивают каждую навеску и определяют потерю массы дробы ΔQ (мг).

Определение физико-механических параметров по результатам испытаний

Коэффициент динамической прочности породы определяет по формуле:

$$F_{\partial} = \frac{20n}{h} = \frac{200}{h}, \quad (1)$$

где $n=10$ - число сбрасываний гири на приборе ПОК;
 h - отсчет по шкале цилиндра объемомера в мм.

Коэффициент абразивности исследуемой породы определяют по формуле:

$$K_{абр} = \frac{\Delta Q}{100} \quad (2)$$

где ΔQ - потеря массы дробы, мг.

Коэффициенты динамической прочности и абразивности определяются по двум пробам.

За средние значения F_{∂} или $K_{абр}$ принимаются среднеарифметические двух определений при условии:

$$Z = \frac{X_1 - X_2}{(X_1 + X_2)/2} \cdot 100 < 25\% \quad (3)$$

где X_1 и X_2 - значения двух определений F_{∂} и $K_{абр}$.

В случае отклонения от приведенного условия проводятся дополнительные определения. Из полученных значений F_{∂} и $K_{абр}$ выбираются те два, для которых выполняется условие (3).

На основании определенных опытным путем значений динамической прочности F_{∂} и коэффициента абразивности $K_{абр}$ можно определить объединенный комплексный показатель бурности ρ_m по формуле:

$$\rho_m = 3F_{\partial}^{0.8} \cdot K_{абр} \quad (4)$$

Лабораторная работа № 2. Определение параметров упругости

Параметры упругости скальных горных пород наиболее целесообразно определять динамическим способом, измеряя скорость прохождения в образцах продольных волн v_p ультразвуковых колебаний (УЗК). При этом используются известные соотношения между модулем продольной упругости E (модуль Юнга), коэффициентом Пуассона ν , плотностью ρ и скоростью прохождения продольных волн v_p УЗК, установленные в теории упругости для горных пород.

Формулы, характеризующие эти взаимосвязи, имеют следующий вид:

в неограниченной упругой среде - массиве горной породы

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad (1)$$

в образце горной породы, имеющем форму стержня

$$v_{pcc.} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (2)$$

в образце горной породы, имеющем форму тонкой пластины

$$v_{pIII} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)^2}}; \quad (3)$$

Где v_p - скорость продольных волн УЗК, м/с;

E - модуль продольной упругости, Па;

ν - коэффициент Пуассона;

ρ - плотность, кгс/м³.

Подготовка образцов горных пород для измерения скорости прохождения продольных волн

Образцы горных пород должны иметь прямоугольную форму стержня или пластины. Торцы образцов, прижимаемые к пьезодатчикам ультразвукового генератора колебаний, должны быть строго параллельны и хорошо отполированы.

Длина образца должна быть не менее половины длины продольной волны источника УЗК. Расчет длины волны λ УЗК используемого измерительного прибора производится по формуле:

$$\lambda = \frac{v_p}{f_{рез}}, \quad (4)$$

где λ - длина волны, м;

v_p - скорость прохождения продольных волн, м/с;

$f_{рез}$ - резонансная частота кристалла датчика колебаний прибора, 1/с (берется из паспорта прибора)

Например, при частоте 25 кГц и скорости продольных волн 2500 м/с длина волны составит 0,1 м.

Оборудование для измерения скорости продольных волн в образце горной породы

Для исследований упругих свойств горных пород динамическим методом используется дефектоскоп ДУК-20. Принцип измерения скорости прохождения УЗК через образец горной породы следующий (рис. 3). К одной из граней образца прижимают пьезоэлектрический датчик УЗК, а к противоположной - пьезоприемник. Датчик и приемник УЗК сделаны из кристаллов сегнетовой соли. Генератор УЗК 1 посылает к датчику 2 электрические импульсы длительностью 1-2 мкс через каждые 0,04 с. Эти импульсы кристаллом пьезоэлектрика в датчике 2 преобразуются в механические колебания с резонансной частотой кристалла $f_{рез} = 25$ кГц и в виде продольной волны

проходят через образец 3, преобразуются приемником 4 в электрическое колебание с частотой $f_{рез}$. Далее электрические импульсы через усилитель поступают на вход осциллографа 5 ждущей разверткой, где можно снять время задержки импульса, прошедшего через датчик и образец, от момента выхода импульса из генератора (рис. 4).

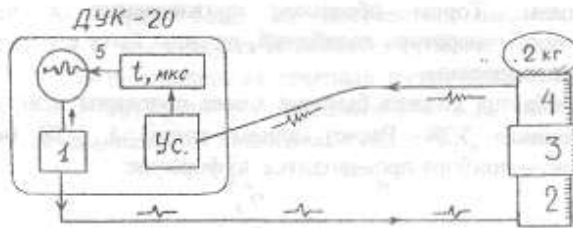


Рис. 3. Схема измерения скорости продольных волн УЗК в образцах горных пород:

1 - генератор УЗК; 2 - датчик; 3 - образец; 4 - приемник; 5 - осциллограф.

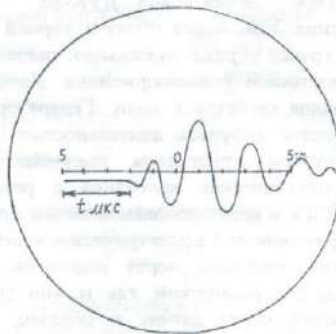


Рис. 4. Вид на экране осциллографа трассы УЗК.

Методика измерения скорости продольных волн в образце горной породы на приборе ДУК-20

Измеряется длина образца штангенциркулем с точностью до 0,01 мм. Измерения скорости продольных колебаний на ДУК-20 необходимо проводить в следующей последовательности.

1. Включить дефектоскоп. Ручками "смещение х", "смещение у" установить начало развертки луча осциллографа в левую часть экрана. Ручками "задержка мкс", "развертка" установить масштаб развертки сигнала на экране.

2. Совместить приемник и датчик, определить время задержки УЗК в датчиках $t_{дат}$.

3. Смазать торцевые грани образца вязкой смазкой (солидол, вазелин и т.п.).

4. Поместить образец между датчиками в вертикальном положении и придавить грузом.

5. Снять 4-6 раз время задержки УЗК в образце датчика t (рис А).

6. Определить время задержки в образце $t_{обр}$ по результатам 4-6 наблюдений t из условия:

$$t_{обр} = t - t_{дат} \quad (5)$$

7. Провести расчет скорости продольных колебаний в образце по формуле:

$$v_p = \left(\frac{1}{\bar{t}_{обр}} \right) \cdot 10^3 \quad (6)$$

где v_p - скорость продольных колебаний, м/с;

l - длина образца, мм;

$\bar{t}_{обр}$ - время прохождения в образце продольной волны,

как среднее арифметическое 4-6 наблюдений, мкс.

Для оценки достоверности измерений на ДУК-20 рассчитать коэффициент вариации измерения 1 из условия:

$$K_{\text{вар}} = \frac{S}{\bar{x}} 100 \quad (7)$$

где $K_{\text{вар}}$ - коэффициент вариации, %;

$\bar{x}(\bar{t}_{\text{обр}})$ - среднее арифметическое значение измеряемого параметра, мкс;

S - среднее квадратическое отклонение результата наблюдения.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

где n - количество наблюдений.

Для оценки точности вычисления определяется величина стандартной ошибки среднего арифметического:

Результаты наблюдений и расчетов заносятся в табл.1.

Таблица 1

Результаты наблюдений

Наблюдения $t_{\text{обр}}$ и расчетные параметры	Обр. 1 l_1 , мм	Обр. 2 l_2 , мм	Обр. 3 l_3 , мм	Обр. 4 l_3 , мм
1				
...				
б				
t , мкс				
$K_{\text{вар}}$, %				
S_x , мкс				
Скорость волны V_p , м/с				

Методика определения плотности образца горной породы

Плотность породы определяется методом прямых измерений массы и объема образца. Для этого измеряются линейные размеры образца в мм и вычисляется объем

образца в см³. Затем образец взвешивают с точностью до 0,1 г. Плотность образца вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

где ρ - плотность, г/см³;

m - масса образца, г;

V - объем образца, см³.

Результаты измерений и расчетов параметров образца заносятся в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений при определении ρ

Параметры	Обр. 1	Обр. 2	Обр. 3	Обр. 4
Масса образца m , г				
Объем образца V , см ³				
Плотность ρ , г/см ³				

Методика расчета параметров, характеризующих упругие свойства горных пород

Расчетные формулы для определения модуля продольной упругости (модуля Юнга) согласно (1), (2), (3) имеют следующий вид:

В неограниченной среде

$$E = \nu_p^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, \quad (11)$$

В образце, имеющем форму стержня

$$E = \nu_{pCm}^2 \rho, \quad (12)$$

В образце, имеющем форму тонкой пластины

$$E = 0,56v_{pnp}^2\rho \quad (13)$$

где E - модуль упругости, Па;

v_p - скорость прохождения упругих волн, м/с;

ρ - плотность, г/см³;

ν - коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона для большинства упругих горных пород составляет 0,22-0,28. Для упрощения в расчетах по (II) его можно принять равным 0,25 или использовать данные из справочной литературы. При выводе формул (12) и (13) коэффициент Пуассона принят равным 0,25.

Лабораторная работа №3. Определение энергоемкости процесса распиловки горных пород алмазным диском

Распиловка является начальной операцией в обработке каменного сырья. Для распиловки горных пород используют несколько типов алмазных пил и станков, конструкция которых зависит от размеров камней и конкретной цели распиловки.

Процесс распиловки можно контролировать по показаниям электроприборов, которые устанавливаются в системе электропривода для измерения силы тока, напряжения и потребляемой мощности.

Оценка процесса распиловки возможна по удельным затратам электроэнергии на единицу площади распиливания, которая зависит от ФМС горных пород, параметров режущего инструмента и технологических параметров распиливания,

Задачей исследования является определение энергоемкости процесса распиливания горных пород с различными ФМС на камнерезном станке.

Технические средства для определения энергоёмкости процесса распиловки

В качестве распиловочного механизма используется серийный камнерезный станок ПТ-44, оснащенный алмазным отрезным диском

Техническая характеристика камнерезного полуавтомата ПТ-44

Наибольшая высота обрабатываемой заготовки, мм	150
Наибольшая длина обрабатываемой заготовки, мм	160
Частота вращения шпинделя, об/мин	1500
Инструмент: круг отрезной, 2726-0272 ГОСТ 10110-78	1000
диаметр, мм	450
толщина, мм	2,4
Скорость подачи (продольное перемещение салазок), мм/мин	
при модуле червячной передачи $m = 1$	5,4-31,5
$m = 2$	10,8-63
Питающая эл. сеть:	
род тока	Переменный
частота тока, Гц	50
напряжение, В	220, 380
Электродвигатель	
тип	4А80В (АИР90В)
мощность, кВт	1,5 (2,2)
частота вращения, об/мин	1500
Габариты, мм,	не более 1240 890 940
Масса, кг,	не более 350

Принцип работы камнерезного полуавтомата ПТ-44

Привод станка осуществляется от электродвигателя 1 (рис. 5) Вращение от двигателя передается через клиноременную передачу на шпиндель 2, на котором закреплен алмазный круг 10. Вращение шпинделя двухскоростное, т.к. шкив шпинделя имеет два ручья с разными диаметрами.

При распиловке заготовок продольная подача заготовки 11 производится механически от двигателя 1

через клиноременную передачу, червячную передачу 7, передачу "винт-гайка", гайка 8 которой является разъемной. При разомкнутом положении гайки механическая подача на заготовку не происходит. Заготовка при распиловке надежно закрепляется в зажимном устройстве 9, которое имеет возможность продольного перемещения по направляющим 4. Скорость продольной подачи во время распиловки регулируется бесступенчатым вариатором 6. При переводе рычага влево подача замедляется, вправо - ускоряется

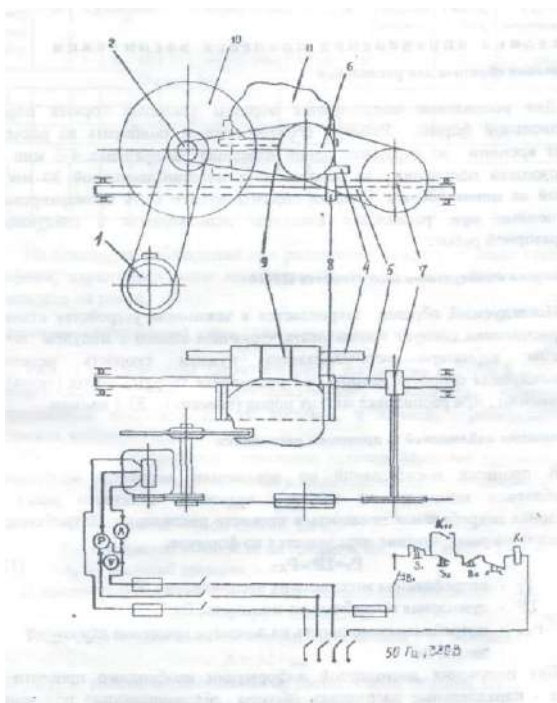


Рис. 5. Электромеханическая схема ПТ-44

Приборы для контроля процесса распиловки

Для контроля процесса распиловки камнерезный полуавтомат ПТ-44 имеет электрический щит, оборудованный вольтметром с ценой деления 20В в

диапазоне 500В, амперметром с ценой деления 0,5А в диапазоне ЮЛ и ваттметром с ценой деления 0,5 кВт в диапазоне 1,4 кВт.

Для проведения исследований необходимо иметь секундомер.

Методика определения процесса распиловки

Подготовка образцов для распиловки

Для распиловки используются образцы скальных горных пород произвольной формы. Размеры образца следует подбирать из расчета затрат времени на отрезание одной пластины в пределах 4-6 мин. и возможности получения из образца двух пластин толщиной 30 мм и длиной не менее 100 мм. Каждый образец должен быть промаркирован. Полученные при распиловке пластины используются в следующей лабораторной работе.

Подготовка камнерезного полуавтомата ПТ-44

Исследуемый образец закрепляется в зажимном устройстве станка. Для распиловки следует использовать червячное колесо с модулем $m=1$, Рычагом вариатора устанавливается нужная скорость резания. Рекомендуемая скорость резания при распиловке твердых пород (яшма) - 23,4 мм/мин., при распиловке мягких пород (змеевик) – 33,4 мм/мин.

Организация наблюдений за процессом распиловки

В процессе исследований по показаниям ваттметра измеряется потребляемая мощность на холостое вращение алмазного диска и суммарная потребляемая мощность в процессе распиловки. Потребляемая мощность на распиливание определяется по формуле:

$$P_p = \sum P - P_{xx} \quad (1)$$

где P_p - потребляемая мощность на распиливание, Вт;

$\sum P$ - суммарная потребляемая мощность, Вт;

P_{xx} - потребляемая мощность на холостое вращение алмазного диска, Вт.

Для получения достоверной информации необходимо провести 3 опыта - параллельные распиловки образца, обеспечивающие получение двух пластин.

Каждый опыт начинается с регистрации потребляемой суммарной мощности в момент начала распиловки. Затем суммарная потребляемая мощность регистрируется с помощью секундомера через каждые 30с до окончания распиловки.

Результаты наблюдений и обработки заносятся в таблицу.

Таблица

Регистрация результатов наблюдения и расчетов

Номер парал. набл.	P_{xx}	Суммарная потребляемая мощность $\sum P$, Вт										Площадь распила, S, м ²	Работа, А, Вт·с	Удельная энергоемкость, W, Вт·с/м ²			
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270						
Образец №1																	
1																	
2																	
3																	
Образец №2																	
1																	
2																	
3																	

На основании наблюдений при распиловке каждого образца строятся графики, характеризующие изменение P_p во времени. Форма графика приведена на рис. 6.

Определение произведенной работы для распиливания образца

Работа распиливания характеризуется площадью фигуры 5 (рис. 6), ограниченной кривой, характеризующей изменение суммарной потребляемой мощности $\sum P$ во времени, и линией, ограничивающей мощность холостого вращения P_{xx} .

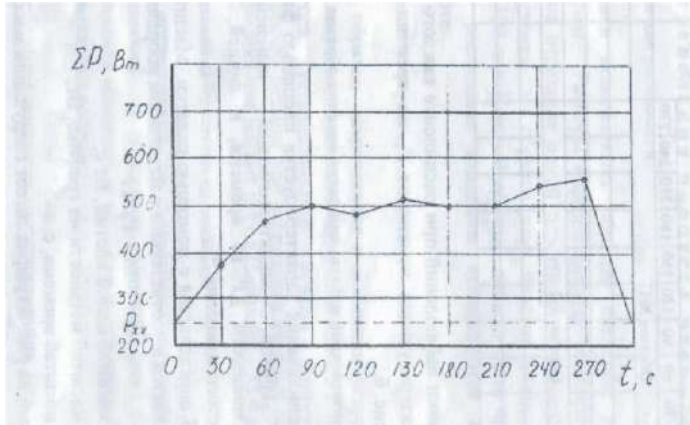


Рис. 6. График изменения потребляемой мощности во времени при распиловке ящмы технической.

Площадь 3 определяется с помощью палетки. Масштаб одной клетки палетки определяется в соответствии с масштабом координат графика

$$M = P_p t_n, \quad (2)$$

где M - масштаб одной клетки, Вт·с;

P_p - масштаб мощности на графике, Вт;

t_n - масштаб времени, с. Приведенный на рис. 6 график имеет следующий масштаб:

$$M = 100 \cdot 30 = 3000, \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Тогда работа распиливания образца определяется из условия:

$$A = Mm, \quad (3)$$

где A - работа, затрачиваемая на распиливание образца, Вт·с;

M - масштаб одной клетки, 3000 Вт·с;

m - количество расчетных клеток палетки в пределах площади, ограниченной кривой изменения РР во времени, шт.

Для определения количества расчетных клеток под кривой методом палетки подсчитывается количество полных клеток n_1 и количество неполных клеток n_2 . Затем приближенно определяется общее количество расчетных клеток из условия:

$$M=(n_1+n_2)/2 \quad (4)$$

Определение площади распила

Площадь поверхности распила образца горной породы определяется так же по палетке. В качестве палетки может быть использован лист миллиметровки или разлинованный в клетку тетрадный лист. На палетку накладывается распиленный образец горной породы, и фиксируется площадь распила. Масштаб палетки принимается равным

$$M= 1 \text{ см}^2 =0,0001 \text{ м}^2$$

Площадь распила рассчитывается из условия:

$$S=Mm, \quad (5)$$

где S - площадь распила, м²;

M - масштаб палетки, м²;

m - количество расчетных клеток палетки, шт.

Определение удельной энергоемкости процесса распиливания

Удельная энергоемкость распиливания на единицу площади горной породы рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{A}{S} \quad (6)$$

где W - удельная энергоемкость распиливания, Вт·с/м²;
 A - работа, Вт·с,
 S - площадь распила, м².

Методика статистической обработки результатов наблюдений

Обобщающими результатами наблюдений, характеризующих энергоемкость процесса распиловки, являются удельные затраты мощности на единицу площади распиловки $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$, которые получены при проведении параллельных опытов при распиловке образца определенной горной породы.

Энергоемкость процесса распиловки образца горной породы характеризуется удельными затратами мощности, которые определяются как среднее арифметическое значение удельных затрат мощности при проведении параллельных опытов по формуле:

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \quad (7)$$

Дисперсия удельных затрат мощности параллельных опытов, характеризуются степень разброса вокруг среднего значения, рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2 \quad (8)$$

Среднее квадратическое отклонение результата каждого опыта как абсолютный показатель изменчивости удельных затрат мощности определяется из выражения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} \quad (9)$$

Отдельным показателем изменчивости удельных затрат мощности параллельных опытов является коэффициент вариации, который рассчитывается по формуле:

$$K_{вар} = \frac{S}{W} 100\% \quad (10)$$

Лабораторная работа № 4. Исследование акустического спектра резания горной породы алмазным диском

Отбор и подготовка образцов

Для исследований необходимо использовать образцы горных пород с известными параметрами динамической прочности, абразивности и модуля продольной упругости. Образец должен иметь форму пластины толщиной 30 мм. Рекомендуется использовать пластины, полученные при выполнении лабораторной работы № 3 данного раздела. Каждый образец должен иметь свою маркировку.

Технические средства для регистрации акустического спектра

Для исследования акустического спектра резания горных пород алмазным диском используется анализатор спектра АС-1.

Акустический спектр регистрируется анализатором спектра АС-1 в пределах звуковых колебаний 16 Гц-20 кГц при распиловке образца горной породы на камнерезном станке ПТ-44, оснащенном алмазным отрезным диском АС-50 315/250 50 М. Для контроля процесса резания станок оснащен ваттметром, вольтметром и амперметром.

Техническая характеристика анализатора спектра АС-1

Прибор состоит из измерительного блока и двух микрофонов МД 52 Измерительный блок предназначен для

- усиления сигналов, поступающих от микрофонов;
- выделения из шумового спектра основных гармонических составляющих;
- измерения частоты звуковых колебаний в трех диапазонах (I—20-200Гц, II - 200-2000 Гц, III - 2-16 кГц);
- измерения уровня звукового давления акустического спектра ре, с помощью микроамперметра.

Расположение приборов и регуляторов на лицевой панели измерительного блока показано на рис. 7, Функциональная схема АС-1 представлена на рис. 8. На схеме показаны:

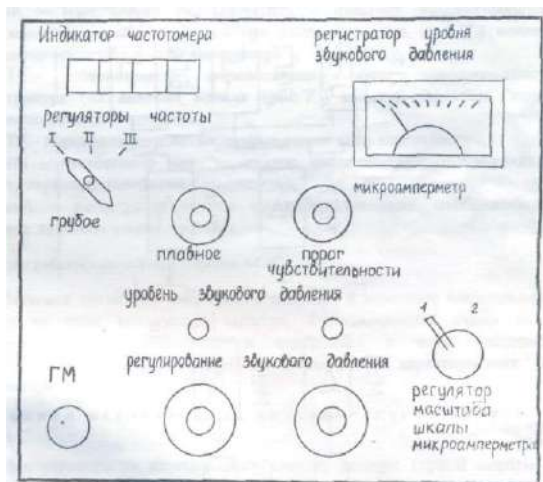


Рис. 7. Схема лицевой панели АС-1

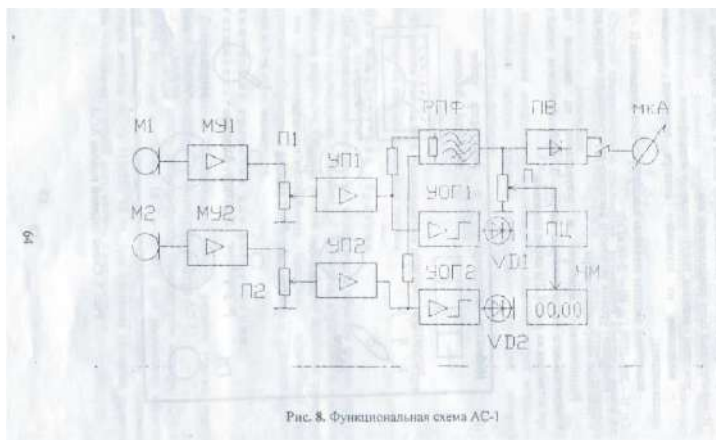


Рис. 8 . Функциональная схема АС-1

МУ1, МУ2 -микрофонные усилители 1 и 2 каналов;

П1, П2 - потенциометры установки уровня сигналов с микрофонных усилителей (ручки потенциометров П1 и П2 выведены на лицевую панель (рис. 7) и обозначены "регулирование звукового давления 1 канал и 2 канал"),

УП1, УП2 - предварительные усилители;

УОГ1, УОГ2 - усилители-ограничители шумового сигнала с выходом на светоиды VD1, VD2 (на лицевой панели (рис. 7) светоиды обозначены "уровень звукового давления");

РПФ - режекторный полосовой фильтр с высокой добротностью, (перестройка частоты фильтра осуществляется ручками (рис. 7) "регуляторы частоты грубое, плавное", расположенными на лицевой панели);

ПВ - прецизионный выпрямитель выделяет положительную полуволну первой гармоники шумового сигнала;

SA - масштабный переключатель - изменяет чувствительность микроамперметра мкА в 2 раза (на лицевой панели (рис. 7) показан "регулятор масштаба шкалы амперметра");

П - потенциометр, определяющий порог чувствительности частотомера (на лицевой панели (рис. 7) имеется указатель "порог чувствительности");

ПУ - пороговое устройство, открывающее вход частотомера;

ЧМ - частотомер или "индикатор частотомера", отображающий частоту звуковых колебаний в килогерцах;

мкА - регистратор уровня звукового давления, отображающий звуковое давление в микроамперах.

Принцип работы анализатора спектра АС-1

Звуковой сигнал от микрофонов подается с помощью специального кабеля на вход анализатора спектра. Функциональная схема АС-1 усиливает сигнал, фильтрует и отображает в виде частотной характеристики на частотомере и амплитудной характеристики на амперметре.

Методика исследования акустического спектра на АС-1

Для регистрации акустического спектра резания горной породы с помощью АС-1 необходимо выполнить следующие операции.

1. Установить микрофоны в непосредственной близости от режущего инструмента, обеспечив условия предотвращения попадания влаги на микрофоны

2. Подключить микрофоны к гнезду ГМ прибора.

3. Подключить прибор к сети 220 В.

4. Установить ручки управления прибора в положение, соответствующее готовности прибора к работе. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

4.1. Ручки потенциометров "регулирование звукового давления" (П1 и П2) установить в крайнее левое положение (повернуть против часовой стрелки до упора);

4.2. Переключатель "регуляторы частоты грубое, плавное" установить в крайнее левое положение;

4.3. Ручку "порог чувствительности" установить в крайнее левое положение, при этом индикатор частотометра должен показывать 00.00;

4.4. Переключатель ЗА "регулятор масштаба шкалы микроамперметра" установить в крайнее левое положение, при этом стрелочный индикатор мкА должен быть на нуле.

5. Включить камнерезный станок, установить режим подачи с помощью вариатора в зависимости от физико-механических свойств распиливаемого образца и обеспечить работу станка в установившемся режиме резания горной породы.

6. Медленно поворачивать ручки потенциометров П1 и П2 "регулирование звукового давления" по часовой стрелке до включения светоидов УВ1 и УО2. После включения светоидов повернуть ручки П1 и П2 против часовой стрелки, стараясь уловить положение регуляторов уровня сигнала, соответствующее моменту затухания светоидов.

7. Произвести измерения параметров акустического спектра, выполняя последовательно следующие операции.

7.1. Поворачивая ручку "регуляторы частоты плавное" по часовой стрелке установить по микроамперметру на положение ручки, соответствующее максимальному уровню сигнала в выбранном частотном диапазоне. Точнее можно найти положение ручки, поворачивая ее по или против часовой стрелки.

7.2. Повернуть ручку "порог чувствительности" до включения частотометра в режим счета частоты. Рекомендуется поворачивать ручку не плавно, а дискретно, изменяя угол поворота в связи с некоторым запаздыванием включения счетного устройства.

7.3. Показания частотометра и стрелочного индикатора занести в таблицу. При необходимости взять еще 1-2 отсчета на этом же частотном диапазоне, стремясь отыскать локальный максимум.

7.4. Повернуть ручку "порог чувствительности" против часовой стрелки до сброса показаний индикатора частотометра (до установки 00.00).

7.5. Повернуть ручку "регуляторы частоты плавное" в крайнее левое положение и перейти на следующий частотный диапазон, переключив переключатель «регуляторы частоты грубое» по часовой стрелке в следующее положение.

7.6. Повторить измерения на вновь избранном диапазоне частоты, выполнив пункты 7.1-7.3 Результаты измерений занести в таблицу.

7.7. Выполнив пункты 7.4. и 7.5. и перейти на третий диапазон частот, установив переключатель "регуляторы частоты грубое" в положение III (крайнее правое).

7.8. Повторить измерения на III диапазоне частот, выполнив пункты 7.1. - 7.3. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

Результаты измерений исследования акустического спектра резания горной породы алмазным диском

Диапазон	I			II			III		
Уровень звукового давления, мкА									
Частота звуковых колебаний, кГц									

Примечания.

1. После выполнения пункта 7.3. положение ручки "регулирование звукового давления" нельзя изменять до окончания работы, в противном случае достоверность характера спектрограммы будет нарушена.

2. В некоторых случаях на одном или двух диапазонах частот могут отсутствовать ярко выраженные основные максимумы, в этом случае рекомендуется ограничиться регистрацией локальных максимумов, стараясь как можно точнее устанавливать порог чувствительности

порогового устройства частотомера ручкой "порог чувствительности".

3. Если при измерении локальных максимумов показания стрелочного измерительного прибора весьма малы и отсчет взять затруднительно, можно перевести переключатель SA "регулятор масштаба шкалы микроамперметра" в крайнее правое положение. В этом случае в таблицу следует заносить численное значение, равное $1/2$ от показания прибора.

Методика обработки результатов наблюдения

Графическое построение измеренных спектров производится на полулогарифмической бумаге для того, чтобы весь диапазон измеряемых частот умещался в размерах одного листа формата А4 и при этом масштаб был бы читаемым. Построение спектрограммы (рис. 9), характеризующей процесс резания, производится по следующей методике.

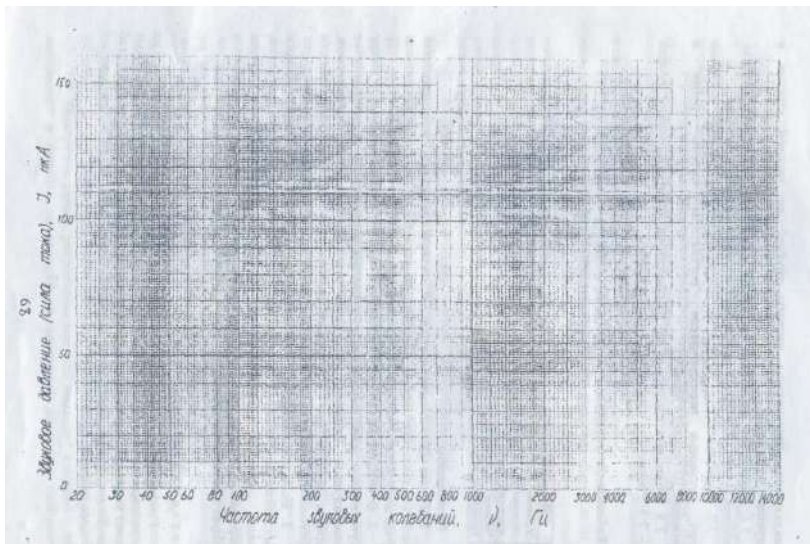


Рис. 9. Спектрограмма звуковых колебаний процесса резания.

1. На логарифмической шкале абсцисс, соответствующей трем диапазонам АС-1, откладываются частоты в герцах, на линейной шкале ординат – уровни звукового давления акустического спектра резания в микроамперах.
2. На спектрограмме находится уровень звукового давления, соответствующий зарегистрированному максимуму длины полуволны акустического спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: Учебник для вузов. – 4-е изд. Перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. 208 с.
2. Ямщиков В. С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982.
3. Ржевский В. В., Новик г. Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов – 5 изд. Перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. 359 с.
4. Инструкция по применению прибора ПСХ-4 для определения удельной поверхности измельченных материалов. Издание Госкомитета по промышленности строительных материалов при Госстрое СССР. – М.: 1964. 14 с.



**ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
Кафедра технологии и техники разведки МПИ**

Усов Г.А.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ БУРОВЫМ
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Учебно-методическое пособие "Разрушение горных пород при проведении геологразведочных работ" по самостоятельной работе для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД	4
1.1. Общая характеристика механических способов разрушения горных пород при бурении скважин.....	4
1.2. Формирование зоны предразрушения при механическом разрушении горных пород.....	
1.3. Экономическая оценка эффективности разрушения горных пород при бурении.....	
1.4. Разрушение горных пород буровым инструментом с резцами из твердого сплава.....	
1.4.1. Твердые сплавы и их свойства.....	
1.4.2. Основные типы бурового инструмента, вооруженного твердосплавными резцами.....	
1.4.3. Разрушение горных пород буровым инструментом с резцами из композиционных алмазосодержащих и поликристаллических алмазов.....	
1.4.4. Буровые инструменты с резцами из твердых материалов с поликристаллическими алмазами.....	
1.5. Разрушение горных пород алмазным буровым инструментом.....	
1.5.1. Общие сведения об алмазном буровом инструменте.....	
1.5.2. Разработки алмазных инструментов компаний Atlas Copco и Voart Longyear.....	
1.5.3. Динамические нагрузки на алмазы в процессе разрушения горных пород.....	
1.6. Разрушение горных пород шарошечными долотами.....	
1.6.1. Конструкции и вооружение шарошечных долот.....	
1.6.2. Системы очистки забоя и интенсификация процесса разрушения при бурении шарошечными долотами.....	
1.7. Разрушение горных пород при вращательно-ударном, ударно-вращательном и ударном способах бурения.....	
1.7.1. Разрушение горных пород при вращательно-ударном способе бурения.....	
1.7.2. Разрушение горных пород алмазным инструментом в режиме вращательно-ударного бурения.....	
1.7.3. Разрушение горных пород шарошечными долотами в режиме вращательно-ударного бурения.....	
1.7.4. Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения.....	
1.7.5. Разрушение горных пород при ударном способе бурения.....	
1.8. Взрывное разрушение.....	
1.8.1. Понятие о взрыве.....	
1.8.2. Механизм разрушения пород взрывом.....	
2. БУРОВОЙ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ.....	
2.1. Классификация породоразрушающих инструментов	
2.2. Конструкции породоразрушающих инструментов.....	
2.2.1. Лопастные породоразрушающие инструменты.....	
2.2.2. Шарошечные породоразрушающие инструменты.....	
2.2.3. Вооружение шарошечных породоразрушающих инструментов.....	

2.2.4. Системы очистки забоя и элементов вооружения шарошечных породоразрушающих инструментов.....	
2.2.5. Опоры шарошек шарошечных породоразрушающих инструментов.....	
2.2.6. Система герметизации маслonaполненных опор шарошечных породоразрушающих инструментов.....	
2.2.7. Типы и основные размеры шарошечных долот по ГОСТ 20692–75.....	
2.2.8. Лицензионные шарошечные долота производства ОАО «Волгабурмаш» ...	
2.2.9. Одношарошечные долота.....	
2.2.10. Система кодирования износа шарошечных долот, принятая в России.....	
2.2.11. Кодирование износа шарошечных породоразрушающих инструментов по кодам IADC.....	
2.3. Алмазные долота, долота ИСМ и PDC.....	
2.3.1 Алмазные долота.....	
2.3.2. Кодирование износа алмазных (классических) долот.....	
2.3.3. Долота ИСМ.....	
2.3.4. Долота PDC.....	
2.3.5. Кодирование износа долот PDC.....	
2.4. Бурильные головки.....	
2.4.1. Шарошечные и лопастные бурильные головки по ГОСТ 21210–75.....	
2.4.2. Алмазные бурильные головки и бурильные головки ИСМ и PDC.....	
2.5. Фрезерный инструмент.....	
2.5.1. Фрезеры забойные и торцевые.....	
2.5.2. Фрезеры забойно-кольцевые.....	
2.5.3. Фрезеры кольцевые.....	
2.5.4. Фрезеры пилотные.....	
2.5.5. Фрезеры колонные конусные (райберы).....	
2.5.6. Фрезеры-ловители магнитные.....	
2.6. Элементы буровой колонны.....	
2.6.1. Калибраторы.....	
2.6.2. Калибраторы-расширители.....	
2.6.3. Переводники.....	
Литература.....	

РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1. Общая характеристика механических способов разрушения горных пород при бурении скважин

Вращательное бурение резовым твердосплавным инструментом (лопастными долотами, твердосплавными коронками).

Данный способ и инструменты предназначены для бурения мягких и средних по твердости горных пород как при роторном (с вращением бурильной колонны) бурении, так и бурении забойными двигателями – турбо-, электробурами, винтовыми забойными двигателями.

Реализуются резание и скалывание под действием: P_{oc} – осевого усилия и F_p – усилия резания (рис. 1.1).

Параметры реза: α – угол приострения реза; γ_n – передний угол реза; γ_z – задний угол реза; β_p – угол резания.

Основные формы резов: I – с положительным передним углом; II – с отрицательным передним углом; III – самозатачивающийся резец.

Вращательное бурение буровым инструментом с резами из композиционных алмазосодержащих материалов и поликристаллических алмазов. Применяется для бурения мягких, горных пород средней твердости с пропластками твердых при роторном бурении и бурении турбо-, электробурами, винтовыми забойными двигателями.

Элементом вооружения являются вставки из композиционного материала славутич или алмазно-твердосплавные пластины *PDC* (*polycrystalline diamond cutters*) *Stratapax* (*General Electric*, США), *Sindit* (*De Beers*, ЮАР), алмазно-твердосплавные пластины – АТП (ИСМ и ВНИИалмаз).

Пластинами *PDC* оснащают резы бурового инструмента, предназначенные в основном для бурения мягких пород и пород средней твердости. Передний угол резов с *PDC* γ_n изменяется от -5 до -25° (рис.1.2).

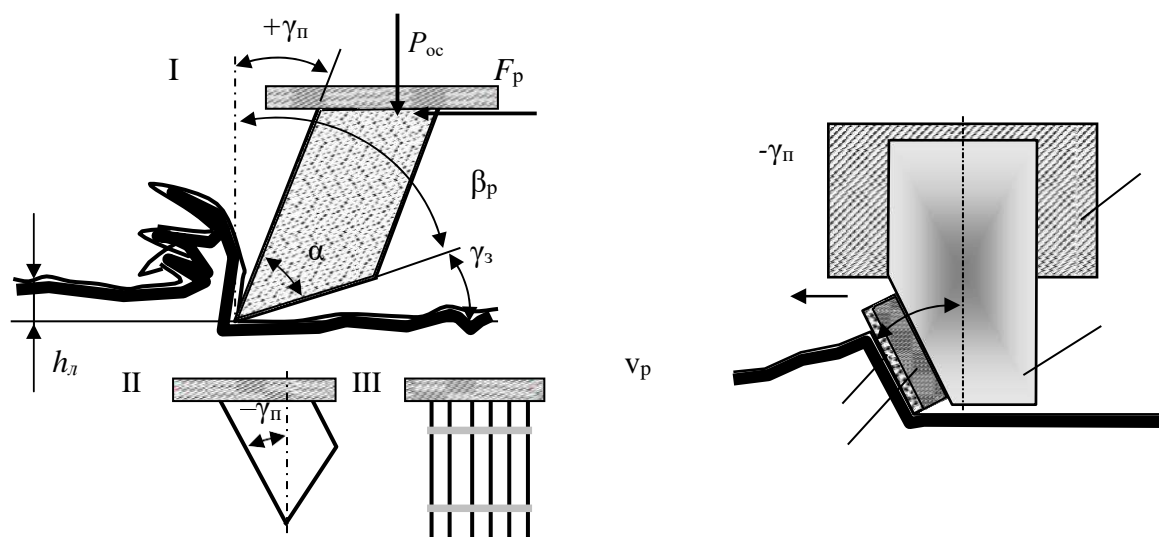


Рис. 1.1. Схема параметров вооружения твердосплавного инструмента

Рис. 1.2. Резец с пластиной PDC: 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – подложка из твердого сплава; 3 – твердосплавная опора; 4 – корпус коронки

При бурении пластично-хрупких пород разрушение осуществляется вдавливанием, резанием и сдвигом. При бурении хрупких пород (твердых) наблюдается раздавливание и скалывание породы алмазными резцами пластинки.

Вращательное бурение алмазным однослойным инструментом (алмазные долота, головки, коронки). Применяется для бурения горных пород средней твердости и твердых.

При бурении алмазным инструментом реализуются смятие, раздавливание, резание, скалывание породы.

Основная форма резцов:

- дробленый (необработанный) алмаз (по мере износа приобретает овальную форму);
- округлый – овалированный алмаз;
- округлый – полированный алмаз.

Размер резцов определяется зернистостью используемых алмазов. Зернистость алмазов изменяется в основном от 5–10 до 150–200 шт. на карат (1 карат = 0,2 г). Соответственно размер зерен от 3–2,5 мм до 0,8 и менее.

Овалированные и полированные алмазы реализуют в основном раздавливание, необработанные алмазы с острыми гранями резание-скалывание. Для повышения эффективности разрушения алмазы в коронках могут устанавливаться ориентированно наиболее твердыми гранями в направлении резания-скалывания.

При повышении размера алмаза процесс разрушения видоизменяется от резания к скалыванию, далее к раздавливанию и к упругому деформированию.

Более крупные и дробленые алмазы применяют для бурения менее твердых горных пород, более мелкие, овалированные и полированные, для бурения твердых и крепких горных пород.

Алмазный резец закреплен в твердосплавной матрице (WC+Co) и для эффективного разрушения может выступать из матрицы на высоту, в основном, не превышающую $\frac{1}{3}$ диаметра алмаза.

Алмазный инструмент характеризуется разновысотностью резцов ($h_1 \neq h_2 \neq h_3$ на рис. 1.3), которая максимальна на начальном этапе бурения – приработке инструмента.

Для повышения эффективности разрушения горных пород алмазный инструмент изготавливают с заданным выступанием алмазов из матрицы.

Для эффективного разрушения горной породы необходимы высокие значения частоты вращения инструмента (800–1 000 мин⁻¹).

Вращательное бурение алмазными импрегнированными коронками. Бурение твердых и очень твердых горных пород. При бурении реализуется истирание, микрорезание.

Для эффективного разрушения горной породы необходимы высокие значения частоты вращения инструмента (1 000 мин⁻¹ и более).

Для изготовления инструмента применяют природные и искусственные алмазы минимальных размеров. Размер зерна 0,9–0,5 мм (зернистость 150 и более шт./кар.).

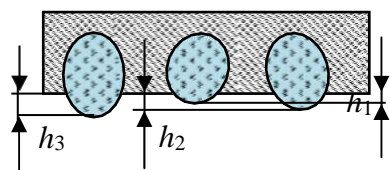


Рис. 1.3. Овалированные алмазы в матрице коронки.

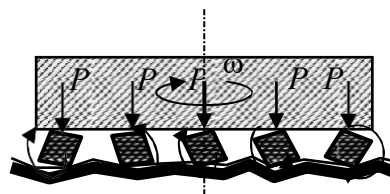


Рис.1.4. Схема работы дробовой коронки

Вращательное бурение дробовыми коронками (дробью). Бурение твердых и очень твердых горных пород (рис. 1.4). Реализуется смятие, раздавливание, скалывание. Дробовое бурение в значительном объеме применялось до периода широкого использования алмазного инструмента.

Вращательное бурение шарошечными долотами. Инструмент дробяще-скалывающего действия показан на рисунке 1.5.

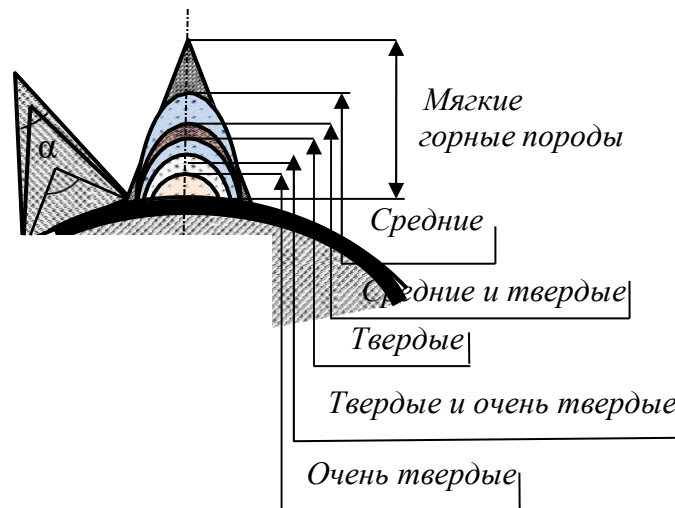


Рис.1.5. Геометрические размеры породоразрушающих элементов шарошечных долот для бурения различных по твердости горных пород

Способ предназначен для бурения горных пород как мягких, так и средней твердости, твердых и самых твердых. При бурении реализуются раздавливание, дробление, скалывание, резание породы при проскальзывании шарошек.

Этапы разрушающего действия:

- косоу удар – скалывание породы под действием усилия P_y ;
- раздавливание породы и углубление лунки под действием усилия P_z ;
- скалывание и подрезание породы при проскальзывании в направлении вращения шарошки.

По мере увеличения твердости горных пород от мягких до средних угол приострения α клиновидных зубьев увеличивается от 30–40 до 80–90°, а размер породоразрушающих зубьев и вставок уменьшается (рис. 1.5). Для бурения твердых и очень твердых пород используются овальные и шарообразные твердосплавные вставки.

Инструмент безударного раздавливающего действия. При бурении дисковые долота, вращаясь, перекатываются по забою и острыми ребрами шарошек раздавливают породу под действием осевого усилия и развиваемых в породе контактных напряжений.

Инструмент с зубчато-дисковыми шарошками. Реализует разрушение мягких и средней твердости горных пород резанием-скалыванием зубьями дисковых шарошек I , установленных в радиальном направлении относительно корпуса долота (рис. 1.6, 1.7). Вращение и перекатывание шарошек по забою происходит за счет зацепления зубьев с образовавшейся криволинейной поверхностью у стенки скважины.

Вид снизу

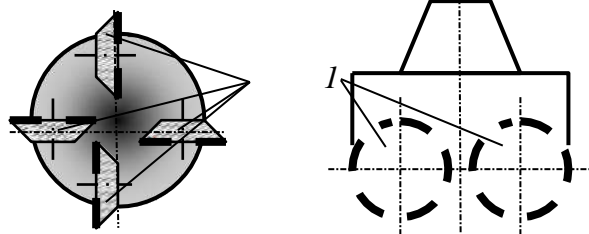


Рис. 1.6. Схема долота с зубчато-дисковыми шарошками

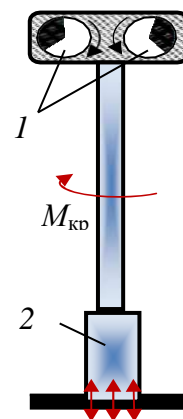


Рис. 1.7. Схема вибрационного бурения

Ударное бурение. Реализуется дробление и скалывание упругохрупких горных пород под действием удара.

Для бурения используются ударные способы разрушения горных пород под действием энергии сбрасываемого с определенной высоты бурового снаряда, например ударно-канатное бурение (способ применялся для бурения нефтяных скважин до 1900 г.) или забивной способ с помощью устройства ударного действия.

Комбинированное (с вращательным) механическое разрушение горных пород. Ударно-вращательный способ бурения. Реализуется разрушение за счет удара высокого уровня энергии, а вращение инструмента носит вспомогательный характер, определяя схему поражения забоя породоразрушающими вставками долота или коронки. Для бурения используются гидро-, пневмоударники и буровой инструмент с резцами в основном клиновидной и шарообразной формы. Способ успешно применяется для бурения горных пород самой различной твердости и при сооружении скважин различного назначения — взрывных, гидрогеологических, инженерно-геологических, геологоразведочных и др., диаметра и глубины.

Вращательно-ударный способ бурения. Способ применяется для бурения твердых горных пород алмазным инструментом при сооружении в основном геологоразведочных скважин.

При бурении реализуется разрушение породы за счет действия осевой силы и усилия резания. Ударное воздействие на породу с высокой частотой, но малой энергией дополняет породоразрушающее воздействие на породу основных факторов, характеризующих вращательное бурение — осевая нагрузка и частота вращения. Для бурения используются алмазный однослойный буровой инструмент или шарошечные долота и высокочастотные гидроударники.

Гидромеханический способ бурения. Реализуется при вращательном способе бурения скважин, при котором горные породы разрушаются под воздействием стационарных высоконапорных тонких струй промывочной жидкости (воды или бурового раствора) и механических породоразрушающих элементов (резец, шарошка).

Струями воды формируются щели в породе, а механическим инструментом производится скалывание ослабленных межщелевых блоков. При гидромеханическом разрушении осуществляется непрерывное динамическое и статическое воздействие на забой. Давление жидкости, необходимое для гидромеханического разрушения рыхлых пород, 20–50 МПа, мягких и средней твердости — 70–100, очень твердых — более 150 МПа. Рациональные окружные скорости перемещения насадок 10–40 см/с.

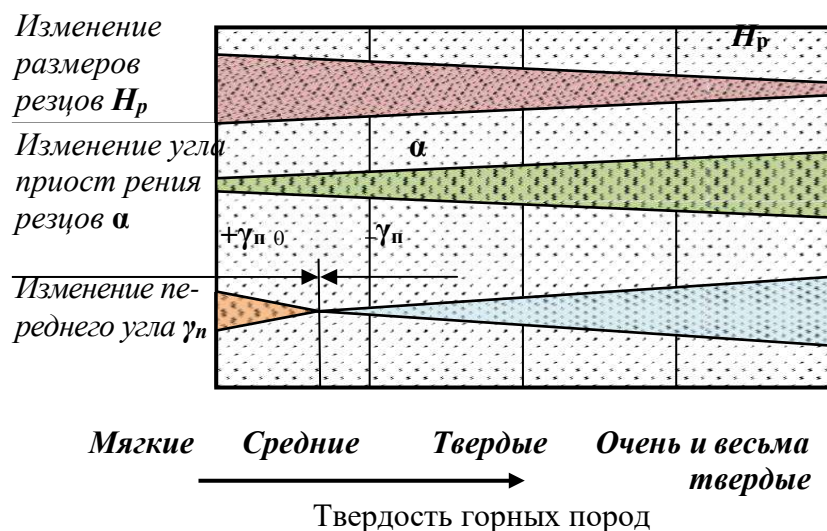
Термомеханический способ бурения. Вращательный способ бурения горных пород твердосплавным или алмазным буровым инструментом с одновременным нагреванием до высокой температуры торца инструмента и горной породы на забое.

Нагревание породы снижает ее твердость и упругость, повышает пластичность.

Вибрационное бурение. При вибрационном бурении используются приостренные наконечники (грунтоносы), которые соединяются через бурильные трубы с вибратором (рис. 1.7). Применяется для бурения преимущественно несвязных горных пород (пески). Углубление скважины происходит практически без разрушения горной породы за счет разуплотнения вследствие уменьшения сил трения между слабосвязанными частицами породы.

Компания *Sonic Samp Drill* разработала технику бурения на основе ударного бурения и высокочастотных вибраций для бурения самых прочных пород. Применение вибрационной установки колонкового бурения (рис. 1.7) позволяет в 1,5–2 раза увеличить производительность по сравнению с традиционными видами бурения. В зависимости от модели буровой установки колонкового бурения вибрационная мощность импульса составляет до 350 кН. В основе системы *Sonic* заключены два эксцентрика 1, которые приводятся в движение двумя высокоскоростными (12 000 мин⁻¹) гидромоторами. Гидромоторы генерируют высокочастотные (до 180 Гц) вибрации, которые непосредственно передаются на буровой башмак 2 и вызывают активное разупрочнение и разрушение горной породы.

На рис. 1.8 приведены схемы, поясняющие связь основных параметров резцов буровых инструментов, таких как размер, угол приострения и передний угол, с твердостью горных пород.



Схема, обозначающая параметры резцов H_p , α , γ_n .

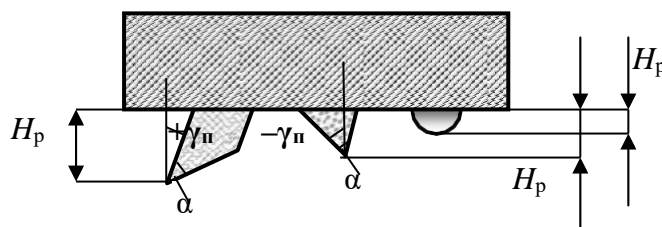


Рис. 1.8. Схемы, показывающие связь размеров резцов H , угла их приострения α и переднего угла γ_n с твердостью горных пород.

Как следует из схемы на рис. 1.8, с увеличением твердости горных пород размеры резцов H_p уменьшаются, угол приострения α возрастает, передний угол γ_n из положительного становится отрицательным, а его отрицательное значение увеличивается по мере повышения твердости горных пород.

Наиболее производительным из механических способов бурения скважин в твердых породах является процесс бурения забойными пневмоударниками в режиме ударно-вращательного бурения при высоком значении давления подаваемого воздуха (механическая скорость более 20 м/ч по самым твердым породам).

Вращательное и вращательно-ударное бурение алмазным инструментом, шарошечными долотами твердых пород значительно уступают по производительности пневмоударному бурению.

При соударении шаров с твердой горной породой со скоростью порядка нескольких десятков метров в секунду она разрушается. Продукты разрушения частично циркулируют с инжектируемой жидкостью, измельчаются и выносятся из скважины восходящим потоком промывочной жидкости.

При бурении скважин на нефть и газ в настоящее время основными инструментами остаются шарошечные долота, реализующие дробяще-скалывающее воздействие на горную породу и долота режуще- скалывающего действия с резцами типа *PDC*. Если для современных шарошечных долот проходка на долото может составлять 100–200 и даже несколько сотен метров при скорости бурения 10–20 м/ч, то долота с резцами *PDC* показывают выдающиеся результаты при разрушении мягких и горных пород средней твердости: проходка может достигать 1 000 и более метров, а механическая скорость 20–40 м/ч.

Например, в Эвенкии в июле 2012 г. успешно произведена отработка матричного *PDC* долота 215,9 мм серии *Tornado* производства компании *DDI*, США (рис. 1.9). Бурение осуществлялось ротором и винтовым гидродвигателем. Проходка на долото составила 1 150 м до первой реставрации при средней скорости бурения 20 м/ч, максимальная скорость достигала 40 м/ч.



Рис. 1.9. Долото PDC Tornado после проходки 1150 м.

1.2. Формирование зоны предразрушения при механическом разрушении горных пород

При механических способах бурения одновременно с отделением от массива продуктов разрушения горной породы в призабойном пространстве формируется особый слой породы, который ослаблен развитой системой микротрещин. Академик П. А. Ребиндер назвал этот слой породы зоной предразрушения [22].

Зона предразрушения горной породы имеет распространение по поверхности забоя, ствола скважины и керна. С точки зрения интенсификации процесса бурения и снижения энергоемкости разрушения горной породы наиболее продуктивна зона предразрушения забоя скважины.

Причинами появления зоны предразрушения являются напряжения и деформации горной породы, которые распространяются равномерно во все стороны от точек приложения разрушающих усилий со стороны породоразрушающих резцов и вставок бурового инструмента.

Таким образом, образование зоны предразрушения – закономерность процесса механического разрушения горных пород, проявляющаяся при всех механических

способах бурения.

Закономерности формирования зоны предразрушения исследовались с применением метода люминесцентной дефектоскопии. Зона предразрушения изучалась в призабойных участках пробуренных алмазным импрегнированным инструментом стволов скважин. Бурение осуществляли при различных осевых нагрузках и фиксировали углубление за один оборот инструмента на забое. После бурения производилась обработка призабойной зоны ствола люминесцентными жидкостями, обладающими высокой смачивающей и проникающей способностью. Полученные срезы призабойной зоны в дальнейшем исследовались на люминесцентном дефектоскопе. По свечению люминесцентной жидкости определяли область распространения трещин зоны предразрушения.

Результаты замеров глубины развития зон предразрушения, образовавшихся при бурении гранит-порфира, габбро и кварцито-песчаника, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты исследования зоны предразрушения

Порода	Показатели	Осевая нагрузка, даН				
		250	500	750	1 000	1 250
Гранит-порфир	Глубина зоны предразрушения h_3 , мм;	1,8	2,5	2,85	3,0	3,1
	Углубление за оборот h , мм;	0,024	0,039	0,051	0,056	
	h_3/h	75	64	56	53	
Габбро	Глубина зоны предразрушения h_3 , мм;	0,18	0,35	0,4	0,51	0,55
	Углубление за оборот h , мм;	0,0175	0,0335	0,039	0,055	0,0645
	h_3/h	10,2	10,4	10,2	9,2	8,5
Кварцито-песчаник	Глубина зоны предразрушения h_3 , мм;	1,2	1,65	1,87	2,1	2,1
	Углубление за оборот h , мм;	0,0075	0,0125	0,0185	0,0215	0,024
	h_3/h	160	132	101	97	87

Как следует из полученных данных, зона предразрушения по своей глубине значительно превышает величину проходки за один оборот инструмента на забое (рис. 1.10). Это соотношение особенно велико в хрупких горных породах, а минимально у более пластичного габбро. С ростом осевого усилия в диапазоне 250–750 даН величина зоны предразрушения возрастает, а при дальнейшем повышении осевого усилия глубина развития зоны предразрушения увеличивается незначительно.

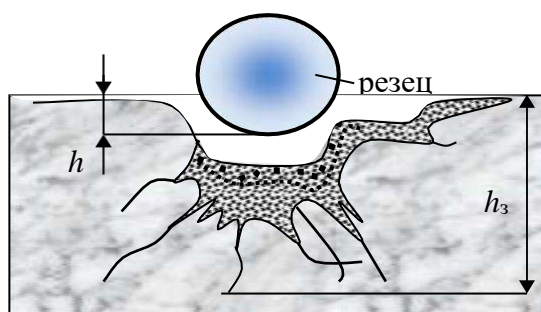


Рис. 1.10. Борозда разрушения и зона предразрушения, образовавшиеся при разрушении гранита резцом.

Исследование зоны предразрушения в тех же горных породах после бурения твердосплавными резцами показало, что наблюдаются выявленные при алмазном бурении закономерности, но глубина развития зоны предразрушения в сравнении с глубиной разрушения породы резцом значительно уменьшилась, особенно у габбро, что связано со значительным увеличением размеров резцов, снижением удельных контактных напряжений на породу и размеров ядра сжатия породы в сравнении с

глубиной внедрения резцов.

Таким образом, в результате экспериментов удалось установить:

- при взаимодействии бурового инструмента с породой помимо зоны разрушения формируется образованная системой микротрещин зона предразрушения;
- зона предразрушения образуется при всех рассмотренных видах взаимодействия инструмента с породой – резании, резании-скалывании, раздавливании и смятии;
- зона предразрушения способствует разрушению горной породы при дальнейших циклах нагружения;
- глубина развития зоны предразрушения при разных способах бурения и применяемых инструментах различна, но при этом сохраняются общие закономерности развития образующих зону предразрушения трещин;
- в пластичных горных породах и мягких минералах зона предразрушения не образуется.

Зона предразрушения в упруго-хрупком долерите и упругопластичном анизотропном спекшемся туфе изучалась визуально в процессе экспериментальных работ.

Из образцов забоев скважин, полученных после разбуривания блоков пород, были изготовлены шлифы для изучения в отраженном свете под микроскопом *Polam C-111*.

Для изготовления шлифов использованы штуфы забойных зон долерита и спекшегося туфа, полученные при бурении алмазным однослойным инструментом с водой и водным раствором 0,3 % сульфонола.

В процессе изучения шлифов под микроскопом сделаны фотографические снимки зон предразрушения горных пород.

С учетом вычисленных значений увеличения микроскопом и фотографическим аппаратом рассчитаны приближенные значения мощностей зон предразрушения горных пород.

На рис. 1.11 представлен фотографический снимок зоны предразрушения в образце долерита. На снимке показано, что зона предразрушения в твердой породе, в данном случае долерите, состоит из двух областей (границы областей на рис. 1.11 обозначены пунктирными линиями): чрезвычайно разрушенной и ослабленной трещинами. При этом мощность первой составляет 0,17 мм, а мощность второй 1,7 мм (см. рис. 1.11). Можно отметить, что форма зоны предразрушения практически повторяет форму забоя.

В спекшемся туфе, упругопластичной анизотропной породе зона предразрушения представлена также двумя областями (рис. 1.12): чрезвычайно разрушенной и пластических деформаций. Область чрезвычайно разрушенной (смятой, разрыхленной) породы расположена на глубине 0,12 мм от забоя породы. Область пластических деформаций охватывает призабойную область и область стенки скважины. Примерная мощность данной области – 0,42 мм.

Образец, фотографический снимок которого приведен на рис. 1.12, получен при бурении с осевым усилием – 600 даН, частотой вращения – 150 мин⁻¹ с применением эмульсионного промывочного агента.

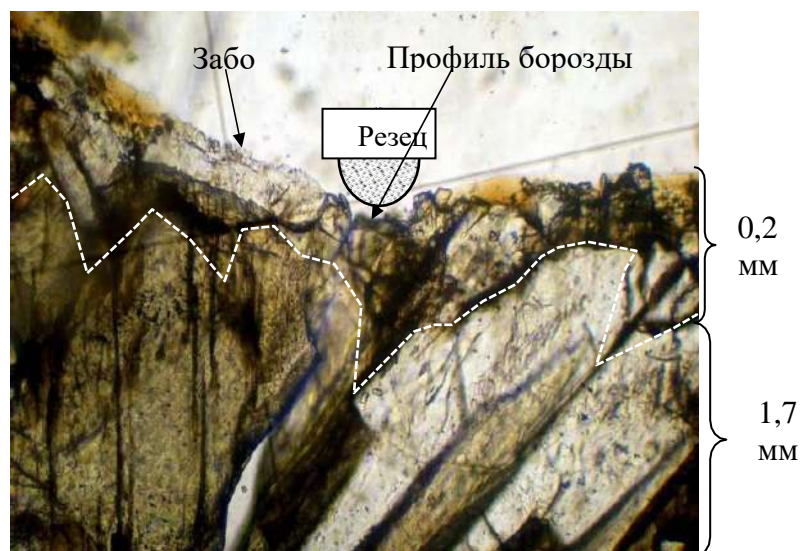


Рис. 1.11. Фотографический снимок зоны предразрушения в образце долерита с указанием областей, составляющих зону предразрушения: 0,2 мм – чрезвычайно разрушенной породы; 1,7 мм – ослабленной трещинами

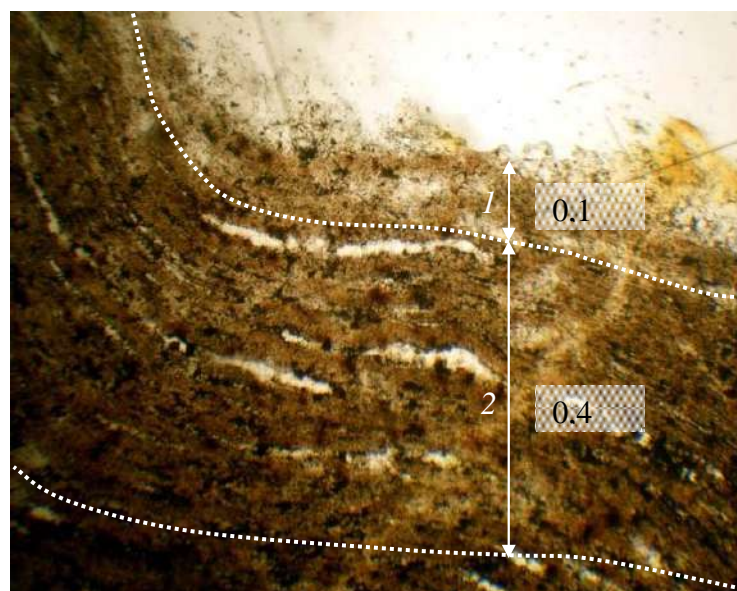


Рис. 1.12. Фотографический снимок зоны предразрушения в образце спекшегося туфа с указанием размеров областей, составляющих зону предразрушения: 1 – разрушенной породы; 2 – пластических деформаций.

По результатам проведенного исследования на данной стадии работ можно сделать следующие выводы:

- размеры зоны предразрушения увеличиваются при повышении осевого усилия и несколько снижаются с ростом частоты вращения бурового инструмента;
- зона предразрушения в упруго-хрупком долерите представлена чрезвычайно разбитой трещинами породы, при этом трещины развиваются, как правило, между минеральными зернами, разрушению также подвергаются более хрупкие кристаллы;
- в породах более пластичных (спекшийся туф) зона предразрушения развивается в виде «разрыхленной», смятой породы без образования явных трещин;
- трещины зоны предразрушения анизотропных пород развиваются преимущественно вдоль плоскостей слоистости, сланцеватости или флюидальности. Зона предразрушения горной породы при бурении является объектом

технологического воздействия с целью интенсификации процессов разрушения, например за счет адсорбционного понижения прочности.

Цель подобного воздействия – развитие зоны предразрушения, ослабление поверхностного слоя забоя скважины и снижение энергоемкости разрушения горных пород при бурении.

1.3. Экономическая оценка эффективности разрушения горных пород при бурении

Экономическая оценка эффективности бурения оценивается стоимостью метра пробуренной скважины. Зависимость для расчета стоимости метра имеет следующий вид:

$$C_{\text{м}} = C_{\text{ст}} \frac{1}{T} + \frac{T - T_{\text{б}}}{l} + \frac{\text{Ц}}{L}, \quad (1.1)$$

\square м
 \square ч
 \square м
 \square ч
 \square м
 \square м

где: $C_{\text{ст}}$ - стоимость станко-смены, руб.; T – длительность станко-смены, ч;

$T_{\text{б}}$ - время, затраченное непосредственно на углубление ствола скважины, ч;

Ц – стоимость бурового инструмента, руб.;

$v_{\text{м}}$ – механическая скорость бурения, м/ч;

$l_{\text{р}}$ – длина рейсовой проходки, м; L – проходка буровым инструментом (ресурс инструмента), м.

При бескерновом бурении длина рейсовой проходки равняется проходке буровым инструментом.

При колонковом бурении длина рейса ограничивается длиной керноприемной трубы, что при бурении снарядом со съёмным керноприемником требует прекращения углубки ствола, подъема и последующего спуска керноприемника, что несколько снижает время, затрачиваемое непосредственно на углубление ствола скважины. Бурение снарядом без съёмного керноприемника требует подъема всей бурильной колонны из скважины для извлечения керна, что еще более снижает долю времени $T_{\text{б}}$.

Из зависимости (1.1) следует, что стоимость метра бурения определяется такими параметрами, как механическая скорость бурения, стоимость бурового инструмента и его ресурс.

Анализ зависимости показывает, что на стоимость метра пробуренной скважины наиболее значительно влияет ресурс инструмента, а повышение механической скорости бурения будет оправдано при условии сохранения эффективного ресурса бурового инструмента.

На рис. 1.13 приведена кривая, равная стоимости 1 м проходки скважины, в координатах проходки на буровой инструмент и механической скорости бурения, по данным И. Ф. Вовчановского, для долот типа ИСМ. Из приведенных зависимостей следует, что одинаковую стоимость 1 м бурения скважины можно получить как путем увеличения механической скорости бурения, уменьшив при этом стойкость бурового инструмента, так и в результате повышения стойкости инструмента, но снижения механической скорости бурения. Выбор оптимального варианта сочетания стойкости бурового инструмента и механической скорости бурения следует производить с учетом глубины скважины.

При возрастающей глубине скважины более важной характеристикой будет большая стойкость инструмента, что позволит повысить время, затраченное на углубление скважины в балансе общих затрат времени на производство работ.

При бурении неглубоких скважин, когда спуско-подъемные операции занимают сравнительно малую долю в общем балансе производительного времени, можно допустить вариант форсированного бурения на высоких механических скоростях, но с несколько ограниченным ресурсом инструмента.

Поиск оптимальных условий производства буровых работ, параметров режима бурения, ориентированных на минимальную стоимость метра пробуренной скважины, является типичной задачей оптимизации.

При решении этой задачи опытным путем можно получить зависимости, отражающие влияние параметров режима бурения на ресурс бурового инструмента и значения механической скорости бурения при определенных постоянных значениях глубины скважины, горно-геологических условиях бурения и применяемых типах бурового инструмента. Полученные данные позволяют рассчитать стоимость метра проходки для каждого варианта сочетания параметров режима бурения и выбрать, таким образом, оптимальные параметры режима бурения для определенных условий производства работ.

На рис. 1.14 приведены подобные кривые, отражающие многосложную связь условий и параметров, определяющих себестоимость бурения шарошечными долотами большого диаметра. Как следует из графиков, по минимуму стоимость метра проходки следует выбрать из следующих параметров режима бурения: частота вращения долота 400 мин^{-1} , осевая нагрузка около 180 кН , так как повышение частоты вращения долота приводит к снижению проходки на долото и повышению стоимости метра бурения.

Оптимальные параметры режима бурения, выбор которых осуществляется по минимуму стоимости метра проходки, как правило, соответствуют наиболее эффективному процессу разрушения горных пород, характеризующимся минимальными затратами энергии на разрушение, высокими значениями механических скоростей бурения и эффективным ресурсом бурового инструмента.

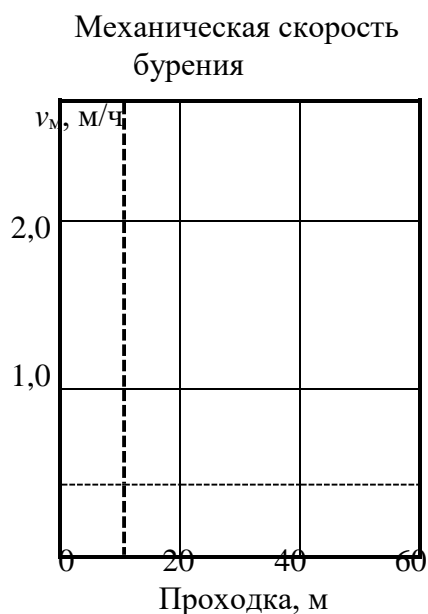


Рис. 1.13. Зависимость стоимости 1 м бурения от проходки и механической скорости бурения

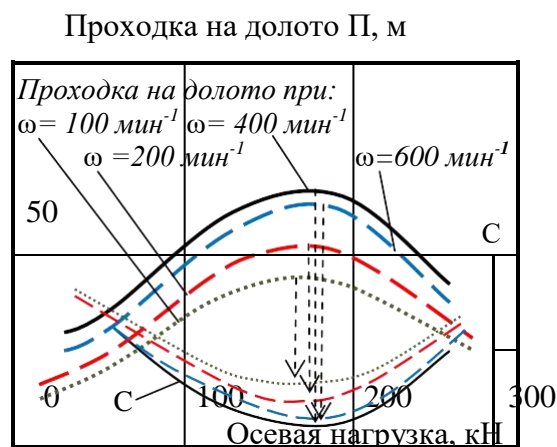


Рис. 1.14. Зависимости проходки на долото П и стоимости метра проходки на долото С от параметров режима бурения

Пример 1. При бурении на месторождении используются двухшарошечные долота типа ДДА-59 и трехшарошечные долота типа 3Ш-59К- ЦА. При равной стоимости – 3 000 рублей за долото, эти долота показывают различную механическую скорость – 12 и 9 метров в час и ресурс – 9 и 12 м соответственно. Стоимость станкосмены продолжительностью 8 ч – 32 000 руб. Время бурения в общем балансе затрат времени на производство работ – 50 %.

Рассчитаем стоимость метра бурения долотом ДДА-59:

$$C = \frac{32000 \cdot 1}{8 - 4} + \frac{3000}{9} = 252$$

Аналогично рассчитаем стоимость метра бурения трехшарошечными долотами. В этом случае стоимость метра бурения составит 2 010 руб.

Для повышения эффективности бурения долотами ДДА произведена их модернизация путем размещения двух гидромониторных насадок (работы выполнены Иркутским отделением ВИТР). Стоимость долот, получивших обозначение ДДА-С, повысилась до 3 500 руб. Испытания показали, что достигнут рост механической скорости на 20 % – (14 м/ч) и проходки на долото на 40 % – (12 м).

Стоимость метра бурения долотом ДДА-С составила 1 897 руб., что подтвердило эффективность модернизации долот в сравнении со стандартным инструментом.

Пример 2. При бурении на месторождении применяют снаряд со съёмным кернаприемником (КССК). Длина кернаприемника 4,5 м, что задает значение рейсовой проходки $l_p = 4,5$ м. Ресурс буровой коронки 50 м, её стоимость 5 000 руб. Механическая скорость бурения 4,5 м/ч. При стоимости станко-смены 32 000 руб., длительности смены 8 ч и затратах времени непосредственно на бурение 6 часов стоимость метра скважины будет равна:

$$C = \frac{32000 \cdot 1}{8 - 6} + \frac{5000}{4,5} = 2740 \text{ руб.}$$

Ограничение длины рейсовой проходки до 2,5 м в связи с заклиниванием и истиранием керна при бурении трещиноватых пород привело к повышению непроизводительных затрат и снижению времени, затрачиваемого на бурение до 5 ч, ресурса инструмента до 40 м и механической скорости бурения до 4 м/ч, что следующим образом отразилось на повышении стоимости метра:

$$C_M = \frac{32000 \cdot 1}{8 - 5} + \frac{5000}{2,5} = 5925 \text{ руб.}$$

Таким образом, влияние рейсовой проходки и ресурса бурового инструмента наиболее значительно при формировании затрат на бурение.

При бурении скважины буровым снарядом без съёмного кернаприемника произойдет рост затрат времени на проведение спуско-подъемных операций (СПО) и

снижение доли времени T_6 .

При бурении неглубоких скважин (до 200–250 м) при прочих равных условиях в сравнении с КССК или ССК это не приведет к значительному росту стоимости метра бурения, но может отразиться на качестве керна и, соответственно, на стоимости бурения, если, например, для повышения сохранности керна при бурении потребуется несколько ограничить длину рейсовой проходки.

При проходке более глубоких скважин (250–300 м) затраты на бурение снарядом со съемным керноприемником будут значительно ниже, даже при большей длине керноприемной части колонкового набора. Например, если время бурения T_6 будет равно 3 ч, при длине колонковой трубы 6 м, то при сохранении значений всех остальных данных, использованных в первом расчете, стоимость метра бурения

$$C_{\text{м}} = \frac{32\,000 \cdot 1}{8} + \frac{8-3}{6} + \frac{5\,000}{50} = 4\,300 \text{ руб.}$$

Если для повышения сохранности керна в колонковой трубе потребуется ограничить длину рейсовой проходки, это приведет к еще более значительному росту стоимости метра бурения. Например, если длина рейсовой проходки будет равна рейсу при бурении КССК – 4,5 м, то стоимость метра бурения составит

$$C_{\text{м}} = \frac{32\,000 \cdot 1}{8} + \frac{8-3}{4,5} + \frac{5\,000}{50} = 5\,000 \text{ руб.}$$

При последних расчетах не учтено, то обстоятельство, что при проведении СПО, особенно в наклонных и искривленных скважинах, снижается ресурс как бурового снаряда, так и дорогостоящего бурового инструмента вследствие изнашивания о стенки скважины при подъеме и спуске. Опыт буровых работ показывает, что изнашивание буровых коронок и долот, расширителей, калибраторов в процессе спуска-подъема может быть очень велик. Другой эффект от применения снарядов со съемным керноприемником состоит в том, что при спуско-подъемных операциях перепады давления промывочной жидкости, вызванные перемещением снаряда вызывают разрушение стенок скважины и их обваливание, соответственно сокращение операций СПО способствует сохранению ствола скважины без каких-либо дополнительных технологических операций. По этим причинам расчетная стоимость метра бурения снарядом без съемного керноприемника может быть еще выше. Соответственно, будут еще более значительны аргументы в пользу выбора для производства работ снарядов со съемным керноприемником, особенно если учесть, что в настоящее время отечественными и зарубежными производителями предлагаются буровые коронки, ресурс которых может составлять не десятки, а сотни метров.

1.4. Разрушение горных пород буровым инструментом с резами из твердого сплава

При вращательном бурении разрушение рыхлых, мягких и горных пород средней твердости, пластичных и упругопластичных успешно осуществляется резанием или резанием-скалыванием буровыми коронками или долотами, вооруженными твердосплавными резами.

При разрушении горных пород реализуются:

- резание, т. е. непрерывное отделение пластичной породы или стружки кромкой прижатого к забою резца;
- скалывание, т.е. периодическое отделение осколков породы от забоя прижатым к породе с достаточным осевым усилием резцом или путем приложения ударного импульса к резцу;
- резание-скалывание, т. е. отделение крупных частей породы скалыванием или отрывом передней гранью резца с последующим срезанием мелких выступов до нового акта скалывания.

1.4.1. Твердые сплавы и их свойства

Твердосплавный породоразрушающий инструмент армируют главным образом спеченными твердыми сплавами различной формы и размеров.

Наплавочные твердые сплавы используют для повышения износостойкости лопастных долот режущего типа, шарошечных долот для бурения мягких горных пород и средней твердости, специальных коронок для вращательного бурения и башмаков обсадных колонн. Преимуществом наплавочных материалов является возможность многократного восстановления бурового инструмента. Основным материалом для наплавки – релит, который характеризуется невысокой, в сравнении со спеченными твердыми сплавами, твердостью и износостойкостью.

Для армирования бурового инструмента используют в основном спеченные вольфрамокобальтовые твердые сплавы типа ВК, которые имеют большую твердость, сочетающуюся с высокой износостойкостью при нагреве до 1000°. Сплавы ВК почти не подвергаются заметной деформации, имеют большую прочность на сжатие, но в то же время обладают невысокой прочностью на изгиб и растяжение, небольшой ударной вязкостью.

Спеченные твердые сплавы состоят из карбида вольфрама WC и кобальта Co в различных процентных отношениях. Карбид вольфрама придает сплаву значительную твердость и износостойкость. Он не магнитен, имеет высокую теплопроводность и весьма хрупок.

Кобальт – ковкий и вязкий металл, в расплавленном состоянии он хорошо смачивает зерна карбида вольфрама и при затверждении прочно связывает их.

Спеченный сплав типа ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15, ВК20, ВК25 изготавливают из порошковой смеси карбида вольфрама и кобальта путем прессовки в специальных графитовых пресс-формах и спекания при температуре ниже температуры плавления карбидов.

Цифры в марке сплава соответствуют процентному содержанию кобальта, в зависимости от которого сплавы отличаются прежде всего прочностью на изгиб, плотностью и твердостью.

Прочность на изгиб у сплава ВК3 составляет 1 100 МПа (минимальная), у сплава ВК25 – 2 000 МПа (максимальная). При этом более твердым является сплав ВК6 – 90 МПа. Твердость сплава ВК25 – 82 МПа.

Твердость сплава возрастает с увеличением содержания карбида вольфрама и уменьшением размеров его зерен. По структуре сплавы разделяются на мелко-, средне- и крупнозернистые. Мелкозернистые сплавы с размером зерен 1 мкм имеют индекс «М», крупнозернистые с размером зерен до 3–5 мкм индекс «В», среднезернистые – зерно 1–2 мкм не имеют индекса.

При увеличении содержания кобальта и зернистости возрастает ударная вязкость сплава. Предел прочности резцов из твердых сплавов может быть существенно повышен упрочнением, например охлаждением в азоте или алмазным шлифованием. Алмазное шлифование удаляет с поверхности резцов дефектный слой, что существенно повышает предел прочности сплава на изгиб и ударную вязкость на 20–50 %, ударную дол-

говечность в 10 раз.

С учетом основных физико-механических свойств среднезернистые и крупнозернистые сплавы с малым содержанием кобальта применяют для армирования инструмента, работающего в условиях безударных нагрузок, т. е. бурового инструмента для вращательного бурения. Сплавы со средним и высоким содержанием кобальта используют для армирования инструмента, работающего в условиях ударных нагрузок, т. е. инструмента для ударно-вращательного бурения и шарошечных долот, предназначенных для бурения пород высокой твердости. Эти сплавы обладают наибольшей прочностью, но они менее износостойки.

Более высокие и сбалансированные характеристики имеют сплавы *DP* компании *Sandvik*. Они за счет слоистой структуры, при которой максимальной твердостью вставка обладает на поверхности и в центре, а средний слой характеризуется высокой вязкостью, сочетают высокую прочность, ударную вязкость и твердость поверхности.

Основной проблемой нанесения наплавочных твердых вольфрамкобальтовых сплавов является так называемая *температурная деградация*, которая заключается в значительном снижении твердости покрытия вследствие действия высоких температур.

Решение данной проблемы связано с применением тонких электродов, расплавляющихся при меньшей температуре и за меньший временной интервал, что в результате снижает температуру и время наплавления твердого сплава на поверхность бурового инструмента. В результате применения такой технологии уменьшается отрицательное влияние высокой температуры на качество и прочность твердого сплава.

Другим направлением повышения качества упрочнения поверхностей буровых инструментов твердыми сплавами является применение технологии порошковой металлургии. В этом случае достигается качество покрытия, соответствующее прочностным характеристикам твердосплавных вставок.

1.4.2. Основные типы бурового инструмента, вооруженного твердосплавными резцами

Твердосплавные коронки предназначены для колонкового вращательного бурения скважин в мягких и средней твердости горных породах подразделяются на три типа:

- для бурения мягких пород (ребристые, крупнорезцовые) – тип М;
- малоабразивных пород средней твердости (гладкостенные резцовые) – тип СМ;
- абразивных пород средней твердости (гладкостенные, микрорезцовые или самозатачивающиеся) – тип СА.

Эффективность работы коронки во многом зависит от угла заточки α переднего угла γ_p , угла поворота резцов, их числа и расположения резцов относительно друг друга.

Угол α выбирают в зависимости от характера проходимых пород: чем тверже порода, тем этот угол больше (см. рис. 1.15). Для пород средней твердости рациональным является прямой угол резания α , для мягких – 75–80°. Выход резцов за пределы наружного f_2 и внутреннего f_1 контура корпуса зависит от твердости пород: 0,75–1,0 мм – при бурении пород средней твердости и твердых и 3–6 мм для бурения мягких пород.

Размер резца (выступление резца над торцом коронки) также зависит от твердости горных пород и для горных пород средней твердости и твердых составляет 1,5–2,5 мм и 3–7 мм – мягких пород.

Разворот резцов относительно радиуса коронки на угол $\varphi_p = 10–15^\circ$ повышает их сопротивляемость сколу вследствие динамических нагрузок, характерных для бурения трещиноватых, твердых горных пород и пород с включением обломков – брекчий и конгломератов. При этом внутренние резцы размещают с поворотом внутрь коронки, а наружные в направлении внешнего диаметра (рис. 1.15, б).

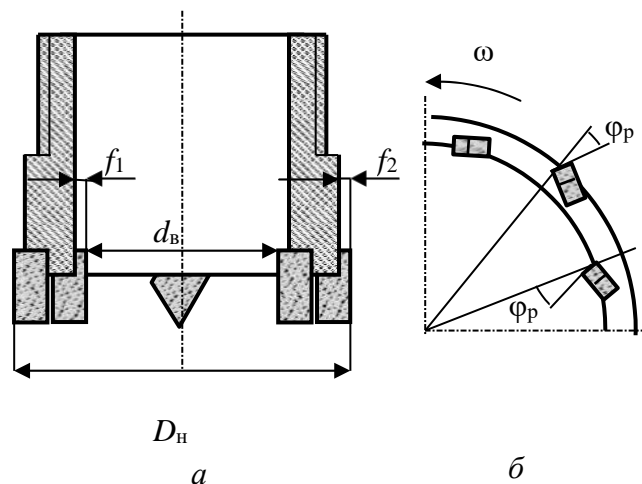


Рис. 1.15. Схема вооружения твердосплавной коронки: *a* – вид сбоку в разрезе; *б* – размещение резцов на торце коронки с поворотом на угол φ_p в фронтальной плоскости резания-скалывания

Для бурения твердых и абразивных пород средней твердости применяют резцы с небольшой площадью сечения, которые в процессе работы самозатачиваются.

Эффективно работают резцы в коронке, конструкция которой обеспечивает ступенчатую форму разрушения забоя, так как наличие дополнительных обнаженных поверхностей забоя способствует более эффективному разрушению породы. Как следует из опытных данных, механическая скорость бурения при ступенчатом забое может быть в 1,9 раза выше, чем при плоском.

Коронка с плоскими поверхностями (рис. 1.16, *a*) используется с буровыми снарядами типа *GEOBOR S* для бурения в рыхлых породах. При бурении такими коронками разрушенная порода гранями резцов направляется в стороны, что, в свою очередь, приводит к снижению заклинивания керна.

Коронки с восьмигранными вставками (рис. 1.16, *б*) имеют угол наклона режущих поверхностей 10° . Вставки выполнены из износостойкого сплава ВК. В процессе эксплуатации они могут многократно затачиваться.

Коронка *Corborit* (рис. 1.16, *в*) имеет чрезвычайно шершавую многогранную рабочую поверхность, полученную при спекании матрицы, состоящей из зерен карбида вольфрама и специального сплава, который, расплавляясь, связывает зерна карбида W. Матрица коронки разделена промывочными каналами. Размер зерен карбида вольфрама от 2 до 5 мм. Матрица коронки разделена промывочными каналами. Размер зерен карбида вольфрама от 2 до 5 мм. Коронка предназначена для бурения мягких, средней твердости и твердых горных пород.

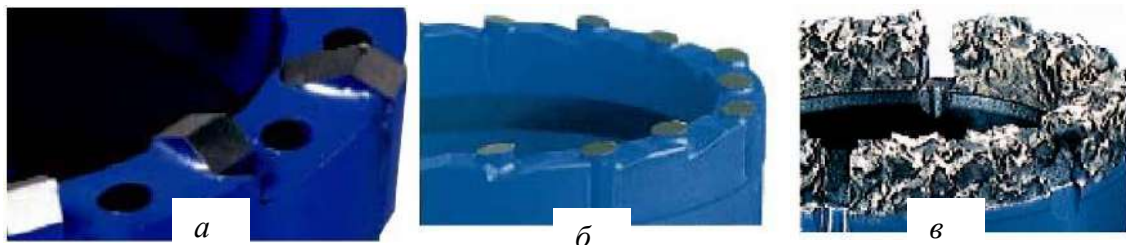


Рис. 1.16. Твердосплавные коронки компании *Atlas Copco*

В процессе бурения коронка с подобным вооружением обладает большим количеством режущих кромок, вступающих в контакт с породой, что позволяет снизить вибрирование в процессе резания-скалывания. Она может применяться для бурения горных пород средней твердости с пропластками твердых горных пород.

Лопастные долота предназначены для бурения в основном мягких и пластичных

горных пород. Лопастные долота подразделяются по количеству рабочих органов в виде лопастей: на одно-, двух-, трех-, четырех-, шести- и многолопастные.

Достоинствами лопастных долот является простота конструкции, отсутствие подшипниковых узлов, крайне уязвимых для абразива, сравнительно низкая стоимость долот при достаточно высоком ресурсе (в мягких породах сотни и тысячи метров).

Недостатки лопастных долот – это интенсивная потеря диаметра долота и износ режущих элементов, работающих при высокой температуре, а также необходимость приложения большого крутящего момента, что особенно сложно обеспечить при бурении забойными двигателями и большом диаметре долот.

Однолопастные долота подразделяются на долота типа Ц, Р и пикобуры.

Долота типа Ц предназначены для разбуривания цементных пробок после цементирования обсадных колонн.

Долота типа Р используют для расширения ствола скважины и его проработки.

Пикобуры для бурения неглубоких скважин в песчано-глинистых породах.

Двухлопастные долота – для бурения преимущественно пластичных и мягких горных пород при относительно небольшой мощности привода.

Долота этой разновидности изготавливаются обычно в малых размерах, диаметром от 93 до 165,1 мм.

Двухлопастные долота выпускают двух типов: М и МС.

Долото трехлопастной конструкции (рис. 1.17) наиболее широко используются при бурении и представлены в самом широком ассортименте.

Их применяют в скважинах различного назначения и с разными типами привода, как забойного, так и роторного (верхний привод). Трехлопастные долота могут выпускаться с обычными промывочными каналами (обычно тремя) и тремя каналами с гидромониторными насадками.

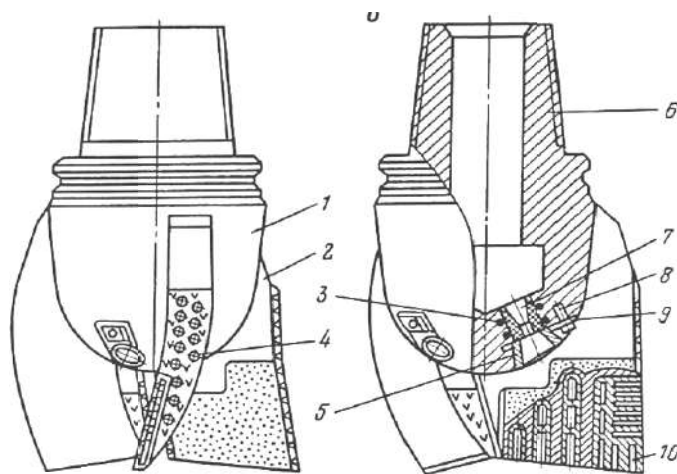


Рис. 1.17. Трехлопастное долото

Долото (рис. 1.17) имеет корпус 1, лопасти 2. Боковые поверхности лопастей 2 армируются твердосплавными штырями 3 и релитом, в проме

жутках между штырями. Сопло 7 гидромониторной насадки изготавливают из керамики и устанавливают, герметизируя уплотнительными резиновыми кольцами 4. Сопло 7 удерживается в гнезде шайбой 5, которая закрепляется стопорной шайбой 9 при помощи винта 8. Для соединения с колонной у долота выполняется ниппельная резьба 6. В лезвиях лопастей 2 имеются пазы 10, в которые укрепляются основные режущие элементы: твердосплавные пластины (долото типа М) или дробленые осколки (долото типа МС).

Долота типа М и МС в модификации с обычным промывочным каналом (пример обозначения ЗЛ-215,9 МС) выпускаются размером от 120,6 до 444,5 мм, а долота со струйной промывкой (пример обозначения ЗЛГ-244,5М) – диаметром от 190,5 до 444,5 мм.

1.4.3. Разрушение горных пород буровым инструментом с резами из композиционных алмазосодержащих и поликристаллических алмазов

Для создания бурового инструмента резового типа могут использоваться композиционные материалы, содержащие отдельные алмазные зерна в металлической и металлокерамической матрицах, к ним относится созданный в 1967 г. материал славутич.

Результаты испытаний показали, что с увеличением размеров алмазных зерен разрушающая нагрузка на них при бурении растет, а предел прочности резко снижается (рис. 1.18). Поэтому применение крупных алмазов, диаметр которых более 1,5 мм, может приводить к интенсивному разрушению резцов. Славутич представляет собой крупный алмазосодержащий резец, который обладает более высокой прочностью, чем крупный алмаз, так как состоит из мелких фракций алмаза, соединенных при спекании с порошковой шихтой твердосплавной основы.

Породоразрушающие вставки изготавливают формованием с последующим спеканием. На рис. 1.19, а показана отформованная композиция перед спеканием. Наружная оболочка вставки 1, окружающая алмазосодержащую композицию 2, не содержит алмазов. Спекание производится при температуре 1 400–1 460 °С.

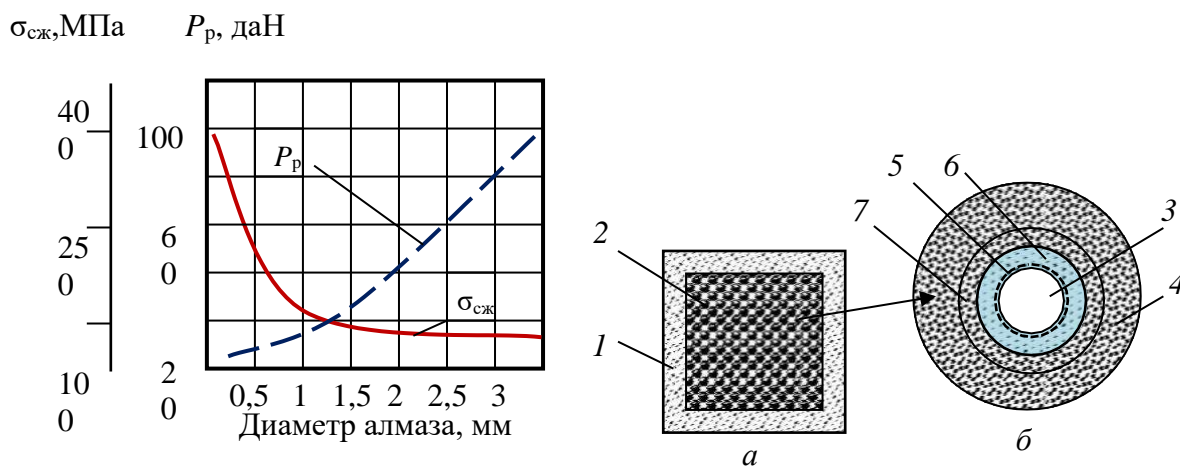


Рис. 1.18. Зависимости предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и разрушающей нагрузки P_p от размера алмазов

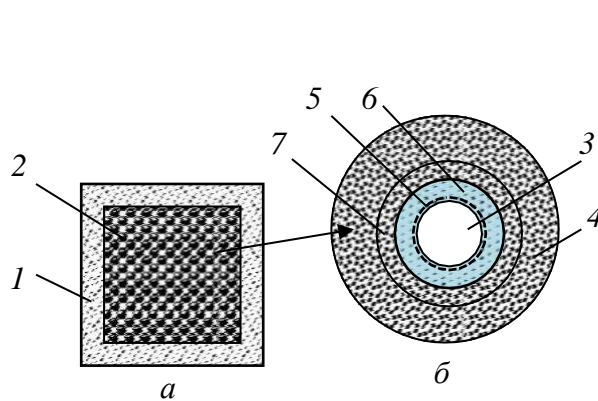


Рис. 1.19. Отформованная вставка славутича (а) и структура материала (б): 1 – твердосплавная оболочка; 2 – алмазосодержащая твердосплавная композиция; 3 – алмаз; 4 – твердый сплав; 5 – зона пластичного материала; 6 – зона контактного взаимодействия алмаза и твердого сплава; 7 – зона твердого сплава повышенной прочности

Выполненные исследования показали, что с увеличением температуры нагрева алмазы активно взаимодействуют с окружающими их металлами, образуя твердые растворы или карбиды. Поэтому при температуре спекания порошка твердого сплава 1, в котором равномерно распределены алмазы 3, образуется новая композиционная структура 2. Алмаз при спекании частично растворяется по контакту с порошком твердого сплава, что приводит к образованию зон контактного взаимодействия б, пластичного материала 5 и твердого сплава повышенной прочности 7 (рис. 1.19, б). Благодаря этому достигается прочное соединение алмаза с твердым сплавом и, таким образом, образуется новый сверхтвердый материал. Данные микроанализа позволили установить, что толщина зоны контактного взаимодействия составляет 4–5 мкм.

Внедрению славутича в промышленность способствовали его высокие эксплуатационные качества, в сравнении с крупными природными алмазами. Не уступая крупным природным алмазам в износостойкости, славутич значительно превосходит их по прочности. Стоимость славутича значительно ниже, чем стоимость крупных природных алмазов. При этом, если применение крупных алмазов для создания бурового инструмента имеет свои ограничения, ввиду их прочности (рис.1.18) и стоимости, то изделия из славутича могут быть изготовлены любых форм и размеров.

Для оснащения бурового инструмента изготавливаются вставки цилиндрической формы с плоским, сферическим и клиновидным рабочими торцами (рис. 1.20). С целью более рационального использования славутича породоразрушающие вставки выполняются с подложкой из твердого сплава. К корпусу бурового инструмента вставки славутича крепятся припаиванием специально подобранным припоем, включающим цинк, фосфор, железо и медь. Пайка осуществляется путем высокочастотного нагрева аппаратом СВЧ.

Для бурения скважин на нефть и газ выпускается различный буровой инструмент типа ИСМ. Это долота режущего (для мягких пород) и микрорежущего типа (для твердых пород), колонковые долота, калибраторы-стабилизаторы, долота для направленного бурения.

На рис. 1.21 показано долото ИСМ для бурения скважин большого диаметра, предназначенное для зарезания нового направления ствола скважины с искусственного (цементного) забоя при многоствольном бурении. На рис. 1.21 обозначено: 1 – корпус долота; 2 – вставки типа «славутич»; 3, 4, 5 – промывочные отверстия и каналы.

Для бурения геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые вставки из славутича могут использоваться в коронках для бурения твердых пород и средней твердости.

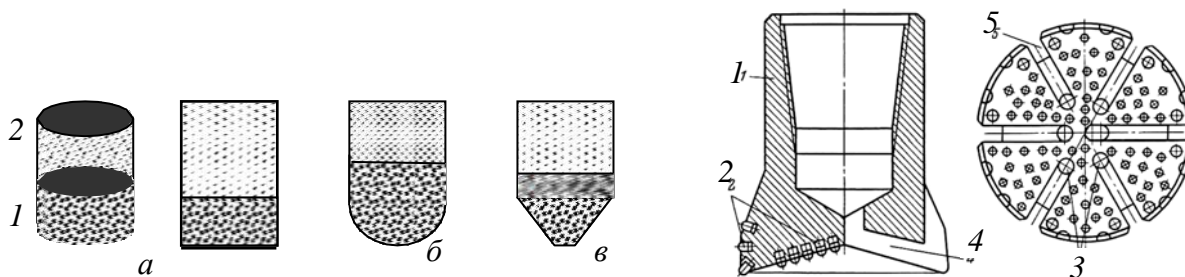


Рис. 1.20. Вставки из славутича:
a – цилиндрическая плоская,
б – сферическая и *в* – клиновидная;
 1 – слой славутича;
 2 – слой твердого сплава ВК.

Рис. 1.21. Долото ИСМ с резами из твердосплавноалмазного композита типа «Славутич».

Коронки типа БСС и БСИ оснащены вставками славутича в подрезном слое на торце коронки, а коронки БС как в торцевом, так и подрезном слое.

Коронки БС различных типов применяются для бурения горных пород средней твердости и твердых.

Кроме коронок с использованием славутича изготавливают также долота и расширители.

При бурении горных пород средней твердости и мягких резцы внедряются в горную породу на глубину, существенно превышающую величину выпуска алмазов из вставки, и единичным резцом следует считать вставку из материала славутич в целом.

Параметры режима бурения буровыми инструментами с резцами славутич выбирают аналогично методикам выбора параметров режима бурения резцовым инструментом при бурении мягких и средней твердости горных пород и определения параметров бурения твердых горных пород алмазным инструментом. Основными данными при выборе параметров режима бурения в данном случае будут физико-механические свойства горных пород и их состояние, а именно: твердость, трещиноватость, слоистость, абразивность и другие признаки, несколько ограничивающие значения частот вращения и осевых нагрузок на инструмент.

1.4.4. Буровые инструменты с резцами из твердых материалов с поликристаллическими алмазами

Другой вариант изготовления алмазосодержащих твердых материалов состоит в создании спеканием либо прессованием поликристаллических алмазов, которые отличаются от композиционных алмазосодержащих материалов типа славутич наличием жесткого каркаса из сросшихся алмазных зерен. К таким материалам, получившим название *PDC (poli- crystalline diamond cutters)*, относится созданный в 1976 г. компанией *General Electric* (США) материал *Stratapax*. Компания *De Beers* (ЮАР) выпускает его под названием *Sindet*.

Эти материалы, как показали исследования, не уступают по эксплуатационным качествам крупным природным алмазам и получили широкое распространение. С применением сверхтвердых материалов изготавливаются долота, коронки, расширители, которые успешно заменяют шарошечные долота, твердосплавные коронки, традиционный алмазный инструмент с резцами из природных алмазов, обеспечивая высокий ресурс бурового инструмента. Резцы с пластинами *Stratapax* способны бурить как мягкие породы с высокой механической скоростью, так и твердые с удовлетворительными механической скоростью и стойкостью бурового инструмента. Именно поэтому буровые инструменты, армированные пластинами *Stratapax*, наиболее эффективны при бурении в разрезах, представленных породами перемежающейся твердости и при наличии высокоабразивных горных пород. Таким образом, с появлением резцов с пластинами *Stratapax* удалось получить универсальный буровой инструмент, удовлетворяющий достаточно противоречивым требованиям процесса разрушения мягких пород резанием и твердых пород резанием-скалыванием и раздавливанием. В бурении используются твердосплавные пластины *Stratapax* толщиной 3,5 мм с поликристаллическим покрытием алмазов 0,5 мм. Алмазный слой состоит из спеченных между собой кристаллов размером 60–150 мкм. Твердость пластин, измеренная на приборе ПМТ-3, составляет 50–80 ГПа. Твердосплавная подложка пластины состоит из твердосплавной шихты, содержащей 95 % карбида вольфрама и 5 % кобальта. Формование пластин осуществляется либо спеканием, либо прессованием.

Пластина *Stratapax* получается при совместной обработке отдельных заготовок поликристаллических алмазов и твердого сплава при температуре 1 500°, давлении 5 ГПа и выдержке 5–10 мин. В результате алмазный слой синтезируется в виде однородной поликристаллической массы, образующей целое с твердосплавной подложкой и

обладающей очень высокой твердостью, износостойкостью и ударной прочностью.

Фирма *De Beers* выпускает материал *Sindit* в виде двухслойных пластин, состоящих из алмазного слоя толщиной 1–1,5 мм и твердосплавной подложки. Специалисты ВНИИАлмаз (Россия) разработали несколько марок поликристаллических алмазов на подложке. Материал АТП (алмазные твердосплавные пластины) применяется преимущественно для оснащения бурового инструмента.

Сравнение эксплуатационных свойств *PDC*, природных алмазов и твердого сплава с содержанием кобальта 6 % свидетельствует о том, что основные свойства поликристаллических алмазов сопоставимы с природными.

Существенное колебание твердости природных алмазов объясняется анизотропией их структуры, тогда как кристаллы искусственных поликристаллических алмазов изотропны, т. е. физико-механические свойства кристаллов одинаковы во всех направлениях. Это способствует повышению прочности и износостойкости синтетических алмазов. По сравнению с твердым сплавом прочность синтетических поликристаллических алмазов на сжатие выше на 70 %, а твердость на 250 %. Износостойкость пластин *Stratapax* выше, чем природных алмазов, и в 100–150 раз превышает износостойкость твердого сплава. Основные характеристики пластин типа *Stratapax*, природных алмазов и твердого сплава ВК6 приведены в табл.1.2.

Таблица 1.2

Сравнительные данные физико-механических и эксплуатационных свойств сверхтвердых материалов

Свойства материалов	Поликристаллический алмаз	Природный алмаз среднего размера	Твердый сплав ВК6
Модуль упругости, ГПа	841	964	630
Модуль жесткости, ГПа	345	400	250
Коэффициент Пуассона	0,32	0,2	0,2
Прочность на растяжение, ГПа	1,29	2,6	1,8
Прочность на сжатие, ГПа	7,61	8,68	4,5
Прочность на изгиб, ГПа	1,1	–	4,9
Твердость HRC, ГПа	50	30–80	20
Коэффициент относительной износостойкости	200–300	100–245	2

Резцы из поликристаллических алмазов состоят из слоя алмазов 1, твердосплавной подложки 2 и корпуса резца 3 (рис. 1.22). Для повышения прочности соединения алмазного слоя 1 с твердосплавной основой 2 последняя выполняется не плоской, а рифленой, с насечками, а для снижения скалывания края пластин, кромки выполняются скошенными.

При изготовлении резцов пластины *PDC* крепятся диффузионной сваркой при высоких температуре и давлении. Перед соединением поверхность пластинок покрывают тонким слоем никеля.

В буровом инструменте резцы с поликристаллическими пластинами устанавливают с отрицательным передним углом γ_n в пределах от -5° до -25° в зависимости от твердости горных пород. В инструментах, предназначенных для бурения более твердых горных пород, передний отрицательный угол задается большим, что позволяет снизить динамическую составляющую разрушения горной породы, возрастающую при резании-скалывании твердых горных пород.

В настоящее время долота со вставками *PDC* очень широко применяются при бурении скважин на нефтяных и газовых месторождениях всего мира, особенно при проходке вертикально-горизонтальных стволов по продуктивным горизонтам, бурении мягких и средней твердости горных пород с прослоями твердых.

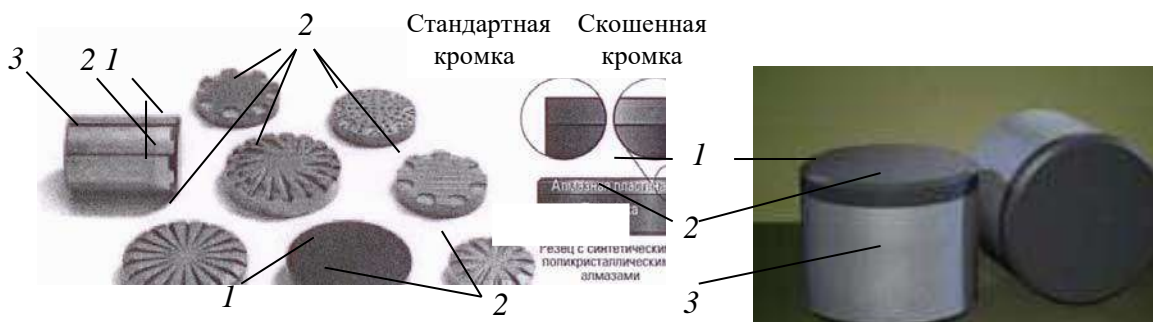


Рис. 1.22. Виды пластинок и резцов PDC и возможные формы:

1 – поликристаллические алмазы; 2 – подложка из твердого сплава; 3 – корпус резца

Примером наиболее современных среди созданных в настоящее время инструментов, являются долота компании *Tough-Drill™ Varel PDC*. Диаметр долот варьирует от 88,9 до 469,9 мм и они изготавливаются как в матричном исполнении, так и со стальным торцом (диаметр от 215,9 до 660,4 мм). Данные долота разработаны для бурения различных по твердости горных пород, в том числе и твердых. Они обеспечивают высокую скорость бурения и высокий ресурс в абразивных и твердых породах из-за высокоэффективных вставок PDC, улучшенной гидравлики очистки и охлаждения резцов долота. Улучшенные качества долот обеспечивают так же снижение износа, устраняется повторное перемалывание разрушенной породы, устраняются возможные зоны скопления шлама.

Для проектирования резцов и долот разработчиками используются современные компьютерные технологии инженерного проектирования на основе метода конечных элементов типа *Nastran, Patran, Ansys*.

Подразделение *Smith Bits* компании *SMITH* разработало интегрированную инженерно-аналитическую систему *IDEAS*, в которой рассматривается работа резца в динамической среде бурения с учетом влияния всех компонент буровой компоновки. Основной задачей *IDEAS* является производство оптимальных по эффективности конструкций долот и значительное сокращение времени цикла разработки инструмента.

Моделирование в системе *IDEAS* начинается с анализа показателей работы долота, геологических условий, условий бурения и износа долота. На основании этой информации разрабатываются и выполняются лабораторные испытания взаимодействия резцов с различными породами. По сравнению с другими системами проектирования долот, позволяющими оценить лишь взаимодействие резцов с породой, лабораторные данные из системы *IDEAS* представляют количественные параметры по фактическим усилиям на резцах и скоростям бурения. Информация используется для анализа конструкций долота с учетом литологических особенностей, аналогичных тем, для которых проектируется долото.

В результате получается буровое долото, обладающее динамической стабильностью при рабочих параметрах и условиях эксплуатации, для которых оно предназначено, что способствует увеличению срока службы и повышению скорости проходки. Оптимизированные параметры могут поддерживаться для обеспечения более быстрой и продолжительной работы долота при снижении нагрузки на компоновку и оборудование буровой установки.

Программа четырехмерного моделирования *i-Drill* как составная часть системы *IDEAS* при помощи метода конечных элементов и данных, полученных в ходе лабораторных исследований свойств горных пород с использованием сверхмощных вычислительных машин, позволяет прогнозировать поведение долота в скважине с учетом работы буровой компоновки.

Модель, построенная с помощью синхронизированного по времени моделирования с шестью степенями свободы, достаточно точно прогнозирует силы и вибрации, которые часто оказывают решающее воздействие на отклоняющее усилие на долоте, срок службы

забойных датчиков, целостность бурильной колонны и эффективность процесса бурения в целом.

Возможность выявления источника крутильных, осевых и поперечных колебаний позволяет специалистам по бурению и искривлению ствола скважины определить необходимые изменения в компоновке снаряда и оптимизировать режимы бурения. Программа *i-Drill* обеспечивает пометровую оценку прочности бурильной колонны, получаемую измерением момента на изгиб в двух осях. Направление отклоняющих усилий на долоте определяется силами, возникающими на долоте при взаимодействии с породой с учетом динамики всей бурильной колонны.

Компания *Smith Technologies* разработала программу моделирования гидравлики бурения и очистки ствола *Yield Point* с целью оптимизации выбора типа и свойств бурового раствора в соответствии с условиями бурения. После ввода исходных данных программа *Yield Point* выполняет графическое моделирование свойств бурового раствора, скорости движения промывочной жидкости, механической скорости проходки, а также площади сечения гидромониторных насадок, а затем позволяет оценить влияние соответствующих параметров на гидравлические характеристики долота и очистку ствола скважины.

База данных *Smith Bits (DRS)* содержит информацию о трех миллионах отработанных буровых долот практически со всех нефтяных и газовых месторождений мира. Помимо того что база данных используется для проектирования, она также позволяет системе оптимизации выбора буровых долот *DBOS* обеспечить правильный выбор долот для эффективного бурения конкретной породы.

Компанией *Varel* разработан собственный программный продукт под названием *SPOT™* для проектирования инструмента. Компьютерное моделирование позволяет оценивать качества долот, их ресурс и производительность в процессе компьютерного тестирования. Улучшенная система очистки забоя обеспечивается установкой направляющих насадок долота, ориентирующих поток жидкости в радиальном направлении горизонтально забоя вдоль линии расположения резцов (рис. 1.23). Горизонтальную струю жидкости создают насадки, установленные у центра долота, остальные насадки размещены ближе к периферии торца, направляя поток в направлении забоя. Такая комбинированная система размещения насадок на торце долота обеспечивает качественную очистку забоя и охлаждение резцов.



Рис. 1.23 . Долото компании *Varel* со вставками *PDC*

В компании *Smith bits* используют вычислительную гидродинамику (*CFD*) для моделирования взаимодействия бурового раствора с долотом и стволом скважины (рис. 1.24). Сложные алгоритмы дают возможность воспроизводить широкий диапазон забойных условий, а также позволяют осуществлять оценку влияния конфигурации лопастей и положения насадок на структуру потока с целью оптимизации работы долота и повышения эффективности бурения за счет максимально эффективного использования

имеющейся гидравлической энергии.

Одна из самых больших проблем применения долот *PDC* – это их недостаточно эффективное использование при бурении твердых пород. При бурении твердых пород возникают повреждения от ударного характера разрушения породы, перегрев и повышенный абразивный износ резцов, поэтому для проходки в твердых породах в основном используются шарошечные и алмазные долота.

Долота *Security DBS* серии *FM3000*™ компании *Varel* включают новый вариант износостойкого *PDC*. Эти долота успешно расширяют использование *PDC*-вооружения для бурения кристаллических пород, позволяют получить высокие результаты, как по скорости бурения, так и по ресурсу инструмента (рис. 1.25). Вооружение долота отличается тем, что часть резцов *PDC* выполнены эллипсовидными, а часть – круглыми. Эллипсовидные вставки располагаются на лопастях, занимая значительную часть размера лопасти, но на периферии лопасти резцы имеют круглую форму. Вставка в форме эллипса имеет более высокие значения контактных напряжений в породе по сравнению с круглым резцом и более значительное заглубление в породу. Удлиненная форма резца увеличивает ресурс вставки. В результате долота с эллипсовидными вставками *PDC* обеспечивают эффективное бурение более твердых горных пород при сравнительно более низких значениях осевого усилия.

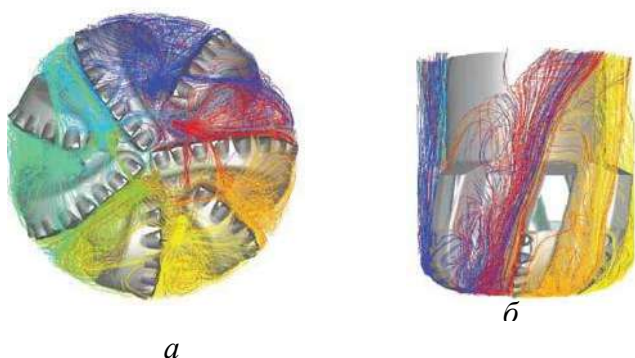


Рис. 1.24. Визуализация образа в системе анализа гидродинамики долот при компьютерном проектировании: *а* – вид с торца долота; *б* – вид сбоку

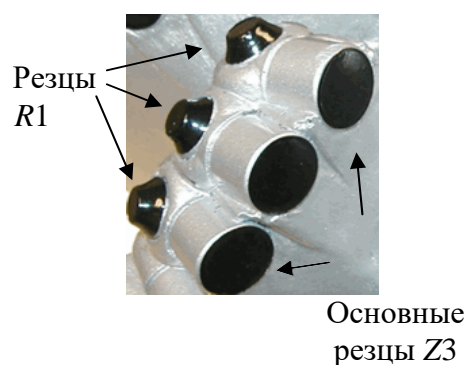


Рис.1.25. Вооружение долота *Security DBS* серии *FM3000*™

Долота *PDC* для бурения твердых пород разработаны с учетом динамики долота. Долота *FM3000* оснащены в качестве основного резца резцом типа *Z3*™. Резцы *Z3* опираются на вторичные *PDC* резцы *R1*, которые оптимизируют глубину резания основными резцами, ограничивая их чрезмерное заглубление в породу при переходе долота из более твердых пород к мягким породам, когда действующие осевые нагрузки оказываются чрезмерными.

Компания *Smiht Bits*, учитывая особенности износа пластин *PDC*, разработала долота с резцами *ONYX 360* и *ONYX II*, которые установлены в наиболее нагруженных частях торца долота с возможностью вращения в процессе бурения на 360° (рис. 1. 26). Бурение абразивного песчаника долотами *ONYX 360* показало рост ресурса долота на 57 %, а скорости бурения на 26 %.



Рис. 1.26. Резцы *ONYX 360*

Компанией Волгабурмаш (ВБМ) разработано и освоено производство долот *PDC* диаметром от 83 до 444,5 мм для бурения мягких, мягких с пропластками средних по твердости; средних и средних по твердости с пропластками твердых горных пород.

По области применения долота *PDC* компании ВБМ подразделяются на две линии:

FD – долота для бурения сплошным забоем вертикальных и наклонно-направленных скважин (рис. 1.27, *а*, *б*, *в*); *BD* – бицентричные долота для бурения с одновременным расширением ствола скважины (рис. 1.28).

Долота *PDC* обладают высокой износостойкостью, что по сравнению с трехшарошечными долотами обеспечивает кратное увеличение проходки при более высокой механической скорости бурения. Долота *PDC* компании ВБМ оснащены твердосплавными или комбинированными насадками, ориентированными так, чтобы максимально обеспечить баланс потоков бурового раствора для очистки долота и забоя.



Рис. 1.27. Долота *PDC* («Волгабурмаш») марки *FD* – конструктивные особенности – спиральная форма лопастей и установка зубков *PDC* на калибрующей части долота:
а – долота диаметром 214,3 мм – оснащены резцами обратной проработки; *б* – долото диаметром 215,9 мм – оснащены антивибрационной защитой долота



Рис. 1.28. Долото компании ВБМ марки *BD* для бурения с одновременным расширением ствола нефтяных и газовых вертикальных и наклонно-направленных скважин

Конструктивные особенности долот типа *FD* компании «Волгабурмаш» заключаются в следующих решениях (рис. 1.29):

- спиральная лопасть долота, что обеспечивает более высокую их прочность, большее число вставок на лопасти и позволяет обеспечивать более плавный режим работы долота и высокую управляемость при на правленном бурении (рис. 1.29, *а*);
- установка зубков *PDC* на калибрующей части лопастей, что обеспечивает более высокую износостойкость долот, сохранение диаметра скважины (рис. 1.29, *б*);
- антивибрационная защита долота обеспечивает плавный режим работы, повышение его ресурса (рис. 1.29, *в*);
- оснащение долот резцами обратной проработки обеспечивает при подъеме долота активную проработку и ствола скважины (рис. 1.29, *г*);
- устранение затяжек при сужении

- долото оснащается опорными вставками внутреннего конуса профиля долота, что снижает эффект «врезания» его в породу, дискретный рост крутящего момента и, как следствие, возникновение крутильных колебаний, повышается плавность хода при разрушении породы и управляемость при направленном бурении (рис. 1.29, д);

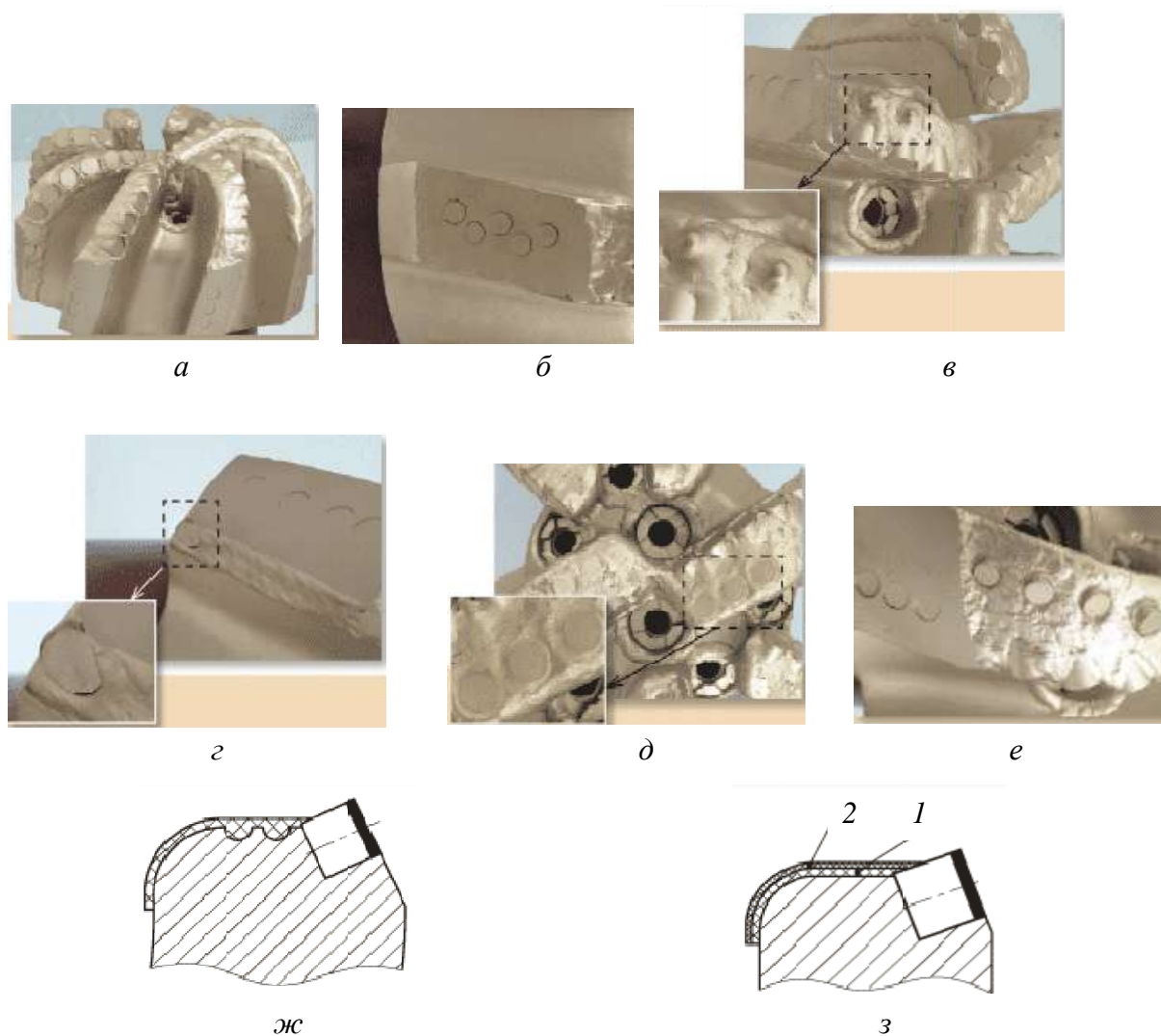


Рис. 1.29. Конструктивные особенности долот PDC конструкции компании «Волгабурмаш» (ВБМ)

- долото оснащается зубками предварительной деформации породы, которые устанавливаются позади основных резцов и ограничивают врезание этих резцов в породу, одновременно обеспечивают активное деформирование породы, ослабляют ее, что повышает плавность работы долота, его ресурс и управляемость при направленном бурении (рис. 1.98, е);

- усиленная наплавка на лопастях долота обеспечивает его высокий ресурс при бурении абразивных пород (рис. 1.29, ж);

- двухслойное покрытие корпуса долота дано на рис. 1.29, з, где 1 – защитное покрытие из плотной массы ультратвердых вольфрамовых карбидов; 2 – порошковое покрытие, имеющее гетерогенную смесь металлических порошков из пылеобразных матричных компонентов (карбидов вольфрама), выполненное методом газопламенного напыления с одновременным проплавлением, выполняет роль antivибрационного покрытия, обеспечивает сопротивление ударным нагрузкам (покрытие 1) и защищает долота от изнашивания и эрозии, в том числе и при высокой температуре (покрытие 2);

- упрочненный корпус долота за счет покрытия сплавом ВК;
- антисальниковое покрытие корпуса долота специальным сплавом снижает налипание породы на корпус и лопасти долота, что положительно сказывается на производительности бурения.

Для бурения мягких пород с целью снижения крутящего момента и улучшения их очистки на торцевой поверхности между основными резами выполняются концентрические проточки. Такие долота с резами *PDC* получили название *канавчатые*.

Долота с резами *PDC* применяют для бурения и с отбором керна (рис. 1.30).



Рис. 1.30. Колонковое долото с резами *PDC*

Показатели работы инструмента с пластинами *PDC* могут составлять в различных горногеологических условиях по механической скорости от 2,3 до 30 м/ч, а по стойкости от 200 до 1 000 м.

Таким образом, при бурении осадочных пород в сравнении с твердосплавным инструментом использование *PDC* позволяет повысить скорость бурения в 1,5–5 раз и стойкость в 5–15 раз. При использовании коронок, оснащенных пластинами *PDC*, при бурении песчаников получена скорость бурения 16 м/ч при стойкости 120–260 м против 3,6 м/ч и 30–60 м у твердосплавных коронок.

При бурении с отбором керна механическая скорость бурения увеличивается по сравнению с однослойными алмазными коронками в 4–5 раз, твердосплавными – до 10 раз.

Коронки с резами *PDC* способствуют повышению выхода керна. При бурении геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые коронки, армированные пластинами с поликристаллическими алмазами, особенно перспективны в сочетании со снарядами со съемным керноприемником.

Компания *Atlas Copco* выпускает режущие коронки, вооруженные поликристаллическими алмазными вставками *Diapax* и *Tripax*.

Элемент *Diapax* выполнен в виде пластины с нанесенным слоем алмазов толщиной 0,5 мм, а *Tripax* в виде треугольных или квадратных блоков-режцов.

Коронки с пластинами *Diapax* (рис. 1.31) предназначены для бурения мягких, вязких глинистых, мерзлых грунтов, горных пород средней твердости. В подобных горных породах коронки с пластинами *Diapax* имеют очень высокий ресурс (до 1 000 м) и производительность. Недостатком таких коронок является низкая стойкость к ударным нагрузкам, что делает их непригодными для бурения массива с прослоями твердых горных пород.

При бурении пластины *PDC* изнашиваются по внешней режущей кромке, контактирующей с породой. Получившие односторонний износ пластины *Diapax* могут извлекаться из коронки и вновь устанавливаться с поворотом на некоторый угол, что позволяет восстанавливать инструмент 3–4 раза до полного изнашивания режущих кромок пластин. Суммарный объем бурения пластинами *Diapax* с учетом восстановления инструмента может, таким образом, составлять более 1 000 м.

Режим бурения коронками с пластинами *Diapax* предусматривает частоту вращения 50–80 мин⁻¹ и осевую нагрузку 10–20 кН.

Пластины *PDC* для бурения нефтяных и газовых скважин обеспечивают ресурс долот более 1000 м до первой реставрации.

Коронки с режущими вставками *Tripax* компании *Atlas Copco* состоят из поликристаллических алмазных компонентов, имеющих треугольную или квадратную форму (рис. 1.32, *а*, *б*). Масса вставки *Tripax* составляет 0,3–1,0 карат. Треугольная или квадратная форма создают хорошую режущую кромку и достаточно высокую прочность реза. Коронки со вставками *Tripax* применяются для бурения горных пород средней твердости и твердых. Их ресурс составляет от 50 до 250 м. В породах невысокой прочности ресурс коронок может составить около 1 000 м.

Коронками *Tripax* рекомендуется бурить частотой вращения 200–300 мин⁻¹ и осевым усилием 10–20 кН.

Механизм работы коронок с пластинами *Diapax* и вставками *Tripax* при бурении мягких и пластичных горных пород аналогичен механизму работы твердосплавных резцов с отрицательными передними углами. Отличие может определяться формой резцов, которые чаще всего изготавливаются в виде круглых пластин.

Коронки со вставками *Tripax*, в случае бурения твердых горных пород, разрушают их отдельными алмазами. При этом механизм разрушения близок к процессу разрушения горных пород мелкими резцами алмазного бурового инструмента.

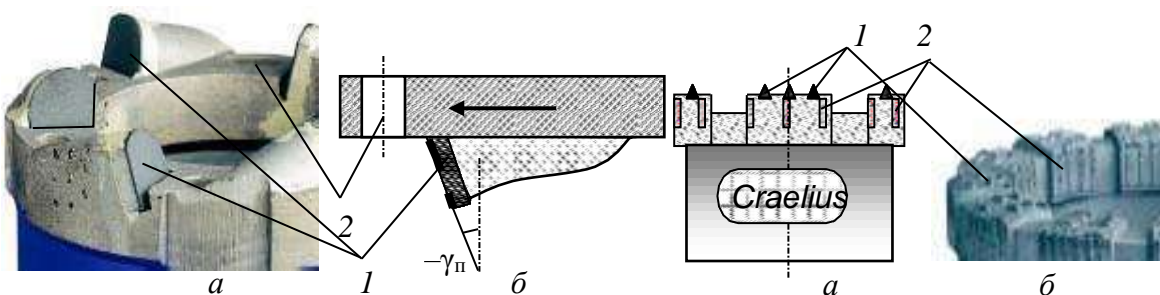


Рис. 1.31. Коронка с поликристаллическими вставками *Diapax* (*а*) и схема вставки (*б* – вид сбоку): 1 – вставка; 2 – отверстия для промывочной жидкости

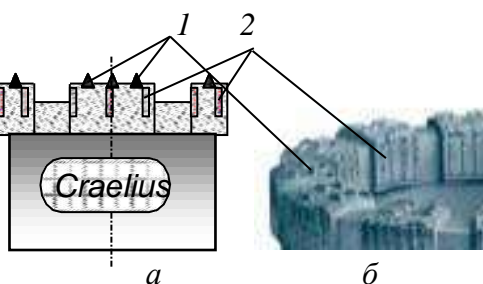


Рис. 1.32. Схема (*а*) и фото (*б*) коронок с элементами *Tripax*: 1 – вставки *Tripax*; 2 – подрезные вставки

Механизм работы резца, оснащенного *PDC* осуществляет разрушение пластичной породы путем резания с большим съемом породы. При этом механизм работы резцов *PDC* при бурении твердых горных пород отличается от механизма работы импрегнированного бурового инструмента, так как существенно зависит от формы и схемы расстановки резцов с пластинами *PDC* в коронке.

Например, исследования по оценке влияния угла поворота резцов *PDC* в фронтальной по отношению к торцу инструмента плоскости показали, что наиболее оптимальным углом поворота φ_p будет значение $5-10^\circ$. Причем поворот резцов, расположенных по наружной кромке торца, осуществляется в направлении наружного диаметра торца, а резцы, размещаемые по внутреннему периметру торца, поворачиваются внутрь торца коронки (рис. 1.33). При размещении резцов в инструменте с углом $\varphi_p = 0^\circ$ наблюдались заклинка керна и прижог пластин *PDC*. Это свидетельствует о накоплении разрушенной породы перед резцами и недостаточном их охлаждении, поскольку жидкость не попадает в зону контакта пластины *PDC* с горной породой. С целью удаления породы и более интенсивного охлаждения резцов коронки компании *Atlas Copco* (рис. 1.31) имеют фронтальные отверстия для подвода промывочного раствора непосредственно к резцам.

Установка резцов с углами поворота φ_p обеспечивает отвод разрушенной породы из забоя в направлении керна и стенки ствола скважины при бурении коронками и стенки скважины при бурении долотами.

С увеличением значений угла φ_p наблюдается повышение механической скорости бурения с одновременным снижением затрат мощности и вибрации инструмента (рис. 1.34).

При использовании бурового инструмента с резцами *PDC* особое значение имеет схема их размещения, которая существенно влияет на эффективность разрушения породы. Для повышения эффективности разрушения породы расстановка резцов должна максимально соответствовать условиям образования свободных поверхностей забоя скважины.

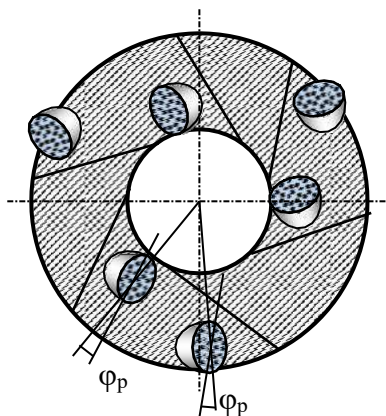


Рис. 1.33. Схема установки резцов с *PDC* на торце инструмента для обеспечения отрицательного угла резания со скважинно- и кerno-образующими боковыми поверхностями

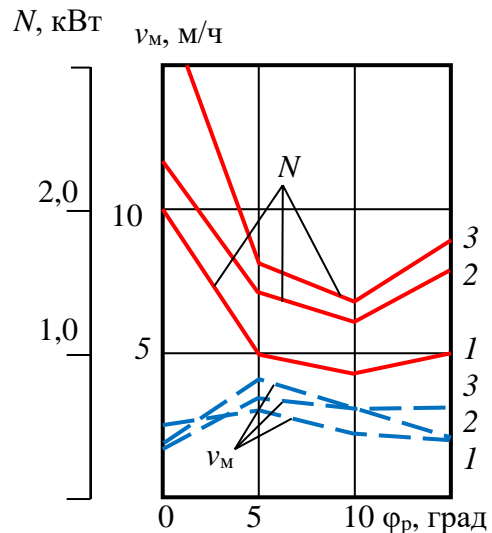


Рис. 1.34. Зависимость механической скорости бурения (v_m) и мощности на бурение (N) от величины угла φ_p : 1 – осевая нагрузка 500 даН; 2 – 750 даН; 3 – 1 000 даН

В работе приведены данные о стендовом бурении опытными долотами с тремя алмазными поликристаллическими пластинами *Stratapax*, установленными с передними углами -15 и -25° (угол φ_p), импрегнированной коронкой, вооруженной искусственными алмазами зернистостью 200–250 шт./карат и твердосплавной трехрезцовой коронкой, с передним отрицательным углом установки резцов -25° . Все коронки имели наружный диаметр 26 мм, внутренний – 14 мм.

В процессе эксперимента разбуривались три разновидности горных пород: гранит, известняк и доломит. Твердость гранита – $p_{ш} = 4,18$ ГПа, коэффициент пластичности $K_{п} = 1$; твердость известняка – 1,94 ГПа, $K_{п} = 1,8$; твердость доломита – 1 ГПа, $K_{п} = 4,3$.

Результаты бурения гранита тремя типами буровых инструментов приведены на графиках (рис. 1.35). Из полученных данных следует, что при более высоких и равных параметрах режима бурения механическая скорость бурения выше при бурении коронкой с *PDC* в сравнении с импрегнированной алмазной коронкой. Это объясняется тем, что контактные давления со стороны алмазов *PDC* существенно выше, чем со стороны алмазов импрегнированной коронки, так как последние равномерно распределены по всей поверхности матрицы, а у *PDC* расположены в пределах узких кромок боковых поверхностей пластин *PDC* (рис. 1.36).

В данном случае алмазы *PDC* работают в режиме эффективного объемного разрушения, при котором происходит скалывание, раздавливание и резание породы, тогда как алмазные резцы импрегнированной коронки могут работать при разрушении твердой породы в режиме поверхностного микроскалывания и истирания.

Подтверждением реализуемого механизма разрушения являются размеры борозд разрушения, оставленные на забое *PDC* и импрегнированной коронкой.

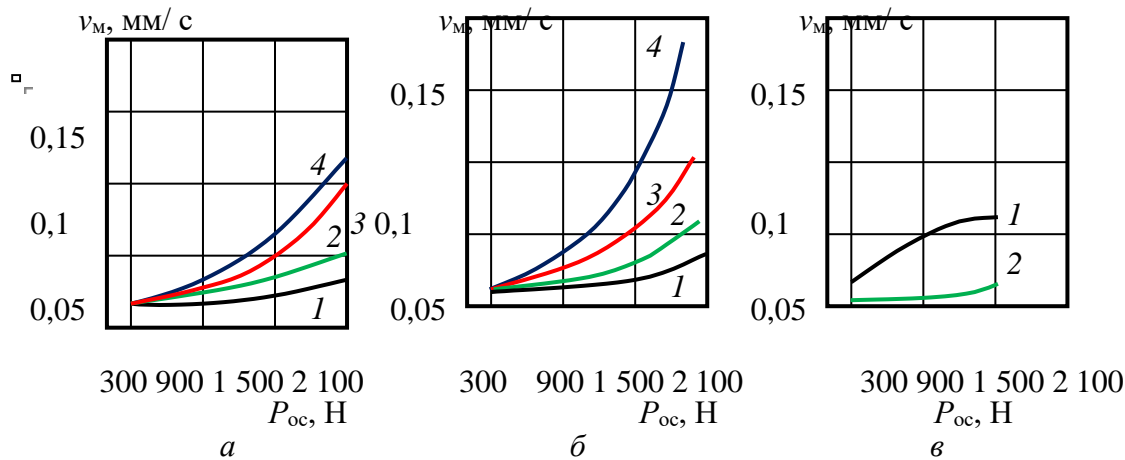


Рис. 1.35. Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения гранита импрегнированной коронкой (а), коронкой с *PDC* (б) и твердосплавной коронкой (в): 1 – частота вращения ω – 170 мин⁻¹; 2 – 425 мин⁻¹; 3 – 685 мин⁻¹; 4 – 960 мин⁻¹



Рис. 1.36. Схема работы алмазных резцов импрегнированной коронки (а) и резца *PDC* (б)

При бурении импрегнированной коронкой ширина борозд разрушения 0,08 мм, глубина 0,02 мм, шлам существенно более мелкий 5 мкм в сравнении со шламом, который образуется при бурении коронкой с пластинами *PDC*.

При бурении гранита твердосплавными коронками видимых борозд на забое не образовывалось, шлам получен очень мелкий (не более 2 мкм). Эти признаки указывают на режим усталостно-поверхностного разрушения, при котором активно изнашиваются резцы коронки.

Данные, полученные при бурении гранита, известняка и доломита коронками с *PDC*, приведены в виде графиков на рис. 1.37.

Результаты эксперимента показали, что механическая скорость бурения доломитов в 6–8, а известняков в 7–14 раз превышает механическую скорость бурения гранита. При бурении доломита и известняков получены очень крупные частицы шлама.

Представленные данные позволяют установить [31], что при бурении известняков и доломитов резцы с *PDC* глубоко внедряются в породу, снимая слой разрушенной породы много больше размера алмазных зерен. Следует отметить, что буримость доломита оказалась ниже, чем у известняков, несмотря на то, что твердость известняка несколько выше. Очевидно, более значительные затраты энергии на разрушение доломита определены их повышенной пластичностью. Так, например, оказалось, что глубина борозд разрушения в доломите (0,04 мм) меньше в 3 раза глубины борозд разрушения в известняке (0,12 мм) при равной их ширине.

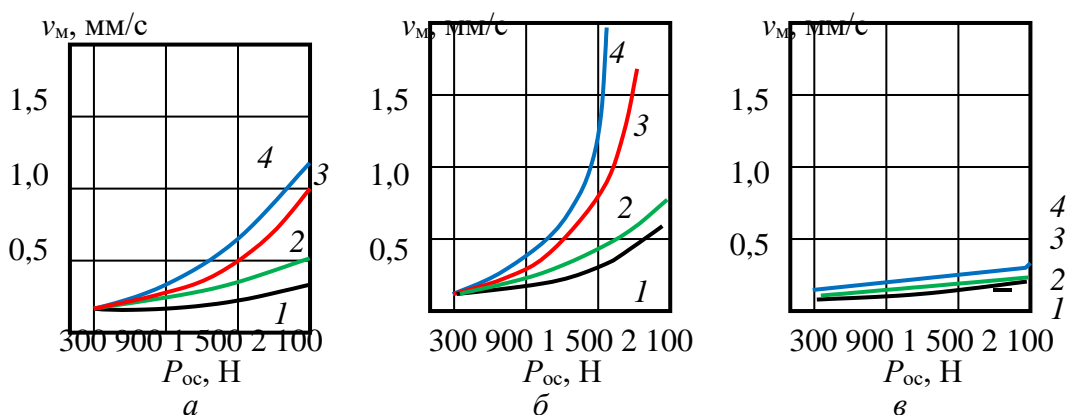


Рис. 1.37. Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения коронкой с *PDC* доломита (а), известняка (б) и гранита (в): 1 – частота вращения ω – 170 мин⁻¹; 2 – 425 мин⁻¹; 3 – 685 мин⁻¹; 4 – 960 мин⁻¹

Таким образом, при бурении упругохрупких и хрупких твердых горных пород разрушение обнаженными алмазами резцов с *PDC* идет, главным образом, путем раздавливания и скалывания.

При бурении пластичных и пластично-хрупких пород разрушение происходит всем объемом алмазосодержащей пластины вдавливанием, пластическим резанием и скалыванием породы.

1.5. Разрушение горных пород алмазным буровым инструментом

1.5.1. Общие сведения об алмазном буровом инструменте

Производительность и работоспособность алмазного бурового инструмента во многом зависят от крупности, схемы размещения алмазов в матрице инструмента, ориентации их в направлениях к плоскости забоя и резания-скалывания по твердому вектору.

В 1939 г. в США ученые Краус и Лоусон установили для кристаллов алмаза грани и направления максимальной твердости, что позволило впоследствии изготавливать алмазный инструмент для бурения с ориентированной установкой алмазов. Производство алмазных коронок с ориентированной установкой алмазов в направлении разрушения горной породы впервые осуществлено в США в 1949 г. Опытное бурение показало, что достигается значительное снижение стоимости алмазного бурения (в 1,6 раза) и повышение проходки на коронку (в 1,37 раза).

Алмаз по шкале твердости минералов Мооса занимает максимальную 10 позицию (по шкале твердости М. М. Хрушова, микротвердость алмаза около 100000 МПа), а его твердость в 1000 раз превышает микротвердость кварца (7 позиция) и в 150 раз микротвердость корунда (9 позиция). Разница в твердости между алмазом и корундом значительно больше, чем между корундом и тальком, имеющим наименьшую твердость.

Величина алмаза с 1914 г. измеряется в каратах (0,2 грамма). Кристаллы алмаза крупнее 1 карата встречаются редко. Обычно вес их 0,2–0,4 карата.

Карат – мера веса драгоценных камней. Принята на Ближнем Востоке в средние века как вес зерна рожкового дерева.

Цвет алмазов определяется составом примесей и может быть от прозрачного до черного. Примеси в алмазах, например, металлы, являются причиной разрушения алмазного резца при бурении, поскольку примеси, имеют более значительный коэффициент теплового расширения по сравнению с алмазом, что может приводить при нагревании алмаза в процессе работы к его растрескиванию.

Для изготовления алмазного бурового инструмента применяют природные и искусственные алмазы.

Природные алмазы отличаются прочностью и износостойкостью, цветом и формой кристаллов (рис. 1.38).

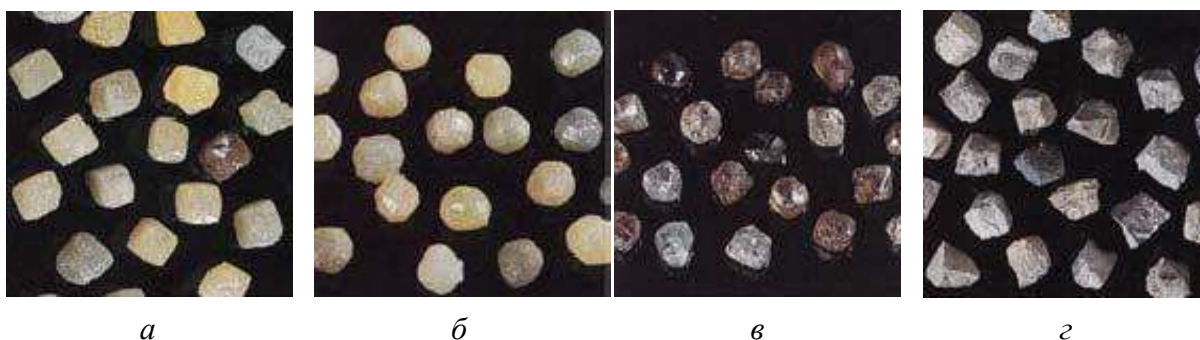


Рис. 1.38. Природные алмазы для изготовления алмазных долот: *а* – Конго кубической формы обладают средней износостойкостью и ударной прочностью; *б* – Конго сферические – стандартные монокристаллические алмазы сферической формы с шероховатой поверхностью обладают средней износостойкостью и хорошей ударной прочностью; *в* – Премиум двенадцатигранной формы обладают хорошей ударной прочностью и высокой износостойкостью; *г* – поликристаллические различной формы обладают высокой ударной прочностью и хорошей износостойкостью.

Широкое применение алмазный инструмент в практике бурения получил после открытия крупных месторождений в коренных горных породах – кимберлитах (от названия места – г. Кимберли, получила название алмазоносная площадь в ЮАР (Африка), которая открыта в 1871 г.).

В СССР первая кимберлитовая трубка «Зарница» открыта в 1954 г. в Якутии. С этих пор, после получения отечественного алмазного сырья, в стране начато производство алмазного инструмента и широкое развитие алмазного бурения взамен дробового.

Искусственные алмазы были получены в 1954 г. в США в лаборатории компании *General Electric* Г. Холлом и несколько позже одновременно в научно-исследовательских центрах Швеции, Японии, Бельгии и др. стран.

В СССР решением проблемы синтеза алмазов и организации их выпуска занимались Институт физики высоких давлений АН и Институт сверхтвердых материалов АН Украины, которыми промышленный выпуск алмазов осуществлен в 1960–1985 гг.

Буровой инструмент оснащается алмазами различной *зернистости*, измеряемой в количестве алмазов в карате (шт./кар.).

Основные размеры алмазов, применяемых в буровых инструментах, равны: 2–5 шт./кар. – диаметр зерна 3–4 мм; 10 шт./кар. – 2,5 мм; 15 шт./кар. – 2,0 мм; 20 шт./кар. – 1,8 мм; 50 шт./кар. – 1,3 мм; 90 шт./кар. – 1,1 мм; 150 шт./кар. – 0,9 мм.; 200–400 шт./кар. – 0,7–0,5 мм; менее 400 шт./кар. – менее 0,5 мм.



Рис. 1.39. Алмазные долота компании *Smith bits*.

В породах средней твердости наилучшие результаты показывают коронки, армированные алмазами зернистостью от 20 до 2 шт./кар., в твердых породах целесообразно использовать коронки с алмазами зернистостью от 200 – 20 шт./кар.) и в очень твердых породах – 600–150 шт./кар.

Для изготовления алмазных долот применяют алмазы зернистостью от 1 до 20 шт./кар. Конструкции алмазных долот показаны на рис. 1.39.

Долота, армированные природными алмазами, предлагаемые компанией *Smith Bits* (рис. 1.39), предназначены для бурения в различных породах – от средне-мягких до твердых. Долота отличаются профилями режущей структуры, системами промывки с зонами высокого и низкого давления жидкости или с радиальным потоком, а также имеют широкий выбор конфигурации алмазных вставок, что позволяет подобрать оптимальный тип долота для конкретных условий бурения.

При оснащении буровых инструментов, как правило, боковые – подрезные резцы изготавливают из более крупных алмазов, чем торцевые. Места перехода от торцевой к боковой части матрицы армируются также более крупными алмазами.

В связи с появлением таких сверхтвердых материалов, как *Stratapax*, крупные природные алмазы зернистостью 2–10 шт./кар. в буровом инструменте заменяются резцами *PDC*, потому что они отличаются большей прочностью и износостойкостью.

Величина выпуска алмазов из матрицы зависит от твердости буримых пород и размера алмазов. При бурении пород средней твердости она может быть до 30 % размера алмазов, твердых пород – до 20 %, а максимально твердых – до 10 %.

Различают коронки и долота без заданного выпуска алмазов, в которых он составляет 5–10 % размера алмаза, и с заданным выпуском алмазов, в котором выпуск резцов составляет 20–30 % их линейного размера.

Матрицы современного алмазного бурового инструмента изготавливают методом порошковой металлургии путём пропитки или горячего прессования. В первом случае матрица состоит из частиц тугоплавких металлов: карбида вольфрама, кобальта и пластичного связующего металла или сплава, например меди. Связующее вещество образует при спекании жидкую фазу, объединяющую при остывании все компоненты матрицы, в том числе и алмазы. Порошковые матрицы более износостойки, чем литые, и позволяют использовать очень мелкие алмазные зерна.

В каркас матриц, изготавливаемых методом пропитки, могут входить в различных соотношениях вольфрам, карбид вольфрама, кобальт, железо, никель. Пропитывающий состав делают обычно из меди, никеля, алюминия. Кроме того, в составе матрицы могут быть наполнители (до 30 %): зерна релита, гранулы твердого сплава типа ВК и др.

В матрицы, изготавливаемые способом горячего прессования, могут входить: бор, гидрид титана, медь, карбид вольфрама, кобальт, никель, олово, титан, железо, цезий, фосфор, цинк.

Матрицы отличаются твердостью – важнейшей характеристикой, определяющей во многом эффективность алмазного бурового инструмента. Твердость матрицы вычисляют по методу Роквелла. Она может быть: HRc 10–20 – очень мягкая; HRc 15–20 – мягкая; HRc 25–30 – средней твердости; HRc 30–35 – твердая; HRc 50–55 – очень твердая.

Твердые матрицы предназначены для бурения абразивных и менее твердых горных пород, мягкие для бурения более твердых и менее абразивных горных пород. Правильный выбор твердости матрицы задает темп её изнашивания и, соответственно, обнажение алмазных резцов при бурении, что в результате определяет эффективность бурового процесса. Чрезмерный темп изнашивания матрицы приводит к потере алмазных резцов, а замедленный износ – к изнашиванию самих алмазов – их заполированию (рис. 1.40, а, б).

Заполирование алмазов – образование на их поверхности площадок износа, ориентированных параллельно забою скважины и имеющих гладкую полированную поверхность.

В идеальном случае при бурении импрегнированным буровым инструментом износ матрицы и алмазов происходит с одинаковой скоростью.

Вооружение алмазного бурового инструмента во многом определяется насыщенностью матрицы алмазами – отношением объема алмазов к объему матрицы инструмента в процентах. Опыт бурения показывает, что этот показатель должен составлять в среднем 5–10 %. В ряде случаев ведущие фирмы выпускают инструмент с насыщенностью алмазами 15–25 %.

Насыщенность алмазами, ровно как и качество алмазов, определяют ресурс бурового инструмента, его стойкость.

Расход алмазов без рекуперации для организаций Министерства Геологии СССР обычно составлял 0,6–0,9 карат/м в зависимости от твердости горных пород и совершенства применяемой технологии бурения.

*Рекуперация (лат. *recupertion* – возвращение, получение обратно) – извлечение сохранившихся алмазов из отработанного алмазного инструмента с целью их повторного использования.*

По расположению алмазных резцов в матрице буровые инструменты подразделяются на однослойные и импрегнированные (рис. 1.41, а, б).

Для бурения применяют однослойные алмазные буровые инструменты с зернистостью резцов в основном от 10 до 150 шт./кар., в которых алмазы располагаются

на торце в один наружный слой, и импрегнированные алмазные коронки с более мелкими алмазами, которые располагаются в несколько слоев (5–9). Число слоев алмазов в импрегнированных буровых инструментах определяется зернистостью алмазов: чем более мелкие алмазы, тем больше число алмазных слоев имеет коронка.

В однослойных буровых инструментах алмазы могут располагаться по следующим основным схемам (рис. 1.42): *а* – в шахматном порядке; *б* – по радиальным направлениям; *в* – по косым радиусам; *г* – по концентрически окружностям.

Возможны, естественно, и иные схемы размещения алмазов, в том числе ориентированная их установка с учетом направлений максимальной твердости алмазного зерна. Критериями эффективного расположения алмазов в матрице являются равномерное распределение на торце и перекрытие движущимися резцами всего забоя буримой скважины тем количеством алмазов, которое необходимо разместить в коронке.

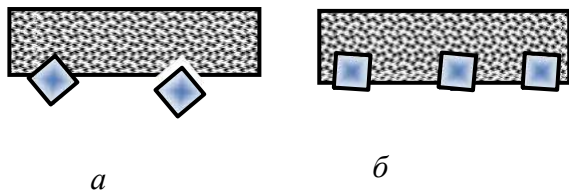


Рис. 1.40. Варианты аномального изнашивания матриц алмазных буровых инструментов:
а – интенсивный износ матрицы – потеря алмазных резцов; *б* – недостаточный износ матрицы – заполирование алмазных резцов

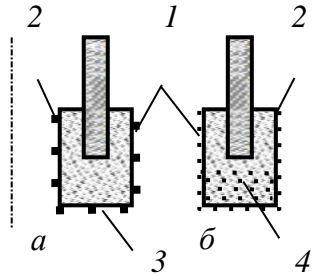


Рис. 1.41. Вооружение алмазных коронок и долот – однослойных (*а*) и импрегнированных (*б*):
1 – наружные подрезные резцы; *2* – внутренние подрезные резцы; *3* – торцевые резцы; *4* – слои алмазов

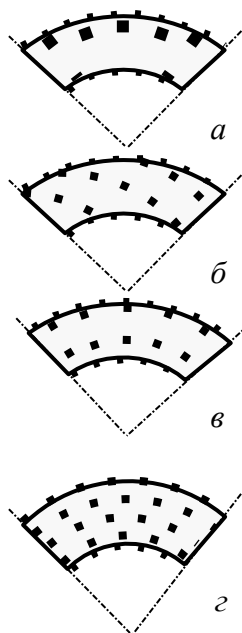


Рис. 1.42. Схема раскладки алмазов в коронках

Для повышения прочности соединения алмазов с матрицей применяют грануляцию алмазных зерен, которая состоит в покрытии алмаза металлом. Наиболее интересен вариант «металлизации» алмаза пористым хромом. В этом случае достигается не просто высокая адгезия зерна с матрицей, но и соединение за счет проникновения материала матрицы в поры оболочки из хрома.

Для бурения в основном применяют алмазы необработанные с острыми режущими гранями, овализованные и полированные.

Овализованные алмазы получают механической обработкой для придания им округлой формы.

Полирование овализованных алмазов производят для уменьшения силы их трения о породу при бурении. При овализации и последующем полировании алмазов удаляются их выступающие части, в результате образуется гладкая поверхность камней и округлая форма. Овализация и особенно полирование убирают с поверхности алмаза трещины и дефекты, что повышает прочность алмазного зерна.

Таким образом, алмазные резцы геометрически могут соответствовать форме многогранника (пирамида, пирамида с площадкой износа) или округлого резца, форма которого близка к шару.

Импрегнированные алмазные долота. Для бурения самых твердых и абразивных пород при реализации высоких значений частот вращения винтовыми забойными двигателями и турбобурами в настоящее время успешно используются импрегнированные алмазные долота с различной формой торцевой породоразрушающей части.

На рис. 1.43 показано долото *Kinetic* компании *Smith Bits* с удлиненной калибрующей поверхностью и развитой комбинированной системой импрегнированного алмазного вооружения.

В буровых долотах *Kinetic* компании *Smith Bits* используются комбинированные породоразрушающие элементы с алмазными резцами в виде импрегнированных лопастей 1, отдельных цилиндрических вставок *GHI 2* и резцов из поликристаллических алмазов типа *TSP 3* (рис. 1.44).



Рис. 1.43. Импрегнированные алмазные долота *Kinetic*

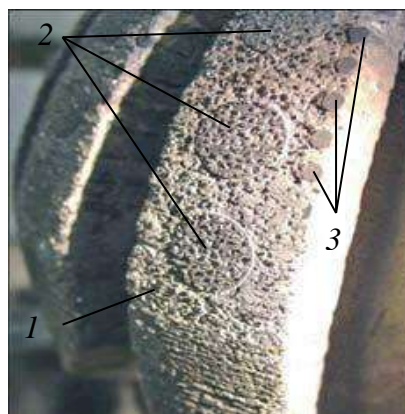


Рис. 1.44. Вооружение долота *Kinetic* с термостабильными поликристаллическими алмазными резцами (*TSP*) на режущей кромке лопастей: 1 – импрегнированная лопасть; 2 – вставки *GHI*; 3 – резцы *TSP*

Вставки *TSP* расположены на калибрующей поверхности с целью поддержания номинального диаметра скважины. При использовании в крайне абразивных породах они устанавливаются на периферийную часть профиля долота для увеличения прочности и износостойчивости на данном участке лопасти, испытывающей при бурении максимальные усилия и изнашивание. Конструкции буровых долот имеют увеличенные по высоте лопасти, что позволяет распределить больший объем алмазного материала и обеспечивает большую проходку, чем при использовании традиционных импрегнированных буровых долот. Буровые долота *Kinetic* также характеризуются индивидуальным подходом при конструировании для конкретного типа забойного двигателя, применяемого в данных условиях. Профиль долота подбирается в зависимости от того, используется ли оно с винтовым забойным двигателем или турбобуром. Долото *Kinetic* демонстрирует высокую производительность бурения в комплексе с турбобурами за счет высокой частоты вращения, реализуемой данными забойными двигателями. Увеличенная калибрующая поверхность в сочетании со стабильностью турбобура обеспечивает высокое качество ствола скважины, исключая его винтообразное искривление, характерное для долот с режцами *PDC*.

В долоте используется комбинация распределения центрального потока жидкости и точно размещенных промывочных отверстий для улучшения его охлаждения и обеспечения эффективной очистки. Конструкция бурового долота *Kinetic* позволяет производить эффективное бурение переслаивающихся пород при поддержании оптимальной механической скорости проходки, что исключает необходимость замены долота для бурения различных пород.

Долота *Kinetic* конструируют с использованием точно спроектированных горячепрессованных вставок *GHI* (рис. 1.45), алмазных режцов высшего качества, термостабильных поликристаллических алмазов (*TSP*) и матриц с импрегнированными алмазами. Компоненты *GHI* состоят из комбинации алмазных кристаллов и порошка карбидо-вольфрамовой матрицы, подобранной для обеспечения специальных свойств материалов, применяемых в конкретных условиях.

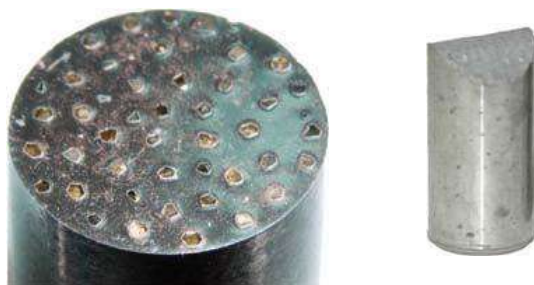


Рис. 1.45. Внешний вид горячепрессованных вставок (*GHI*).

Для вставок *GHI* применяется гранулирование, обеспечивающее более равномерное распределение алмазного материала. Получаемый равномерный состав обладает большей прочностью, сохраняет форму и имеет высокую скорость бурения в течение более длительного периода.

При бурении вставки постоянно самозатачиваются путем стирания связующего материала и открытия новых алмазных режцов. Благодаря тому, что вставки *GHI* выступают над поверхностью лопастей, они обеспечивают высокий уровень контактных давлений на горную породу и режим эффективного разрушения самых твердых горных пород. В то же время импрегнированные долота *Kinetic* используются для бурения пород самой различной твердости за счет комбинированной системы вооружения,

которая позволяет реализовать резание лопастями мягких горных пород и резание-скалывание горных пород средней твердости, а также микрорезание и истирание алмазными резами горных пород высокой твердости (рис. 1.46, *a*, *б*). Гибридные долота *Kinetic*, обозначаемые буквой *H*, имеют комбинированное вооружение из *PDC*-резцов, природных алмазов и термостабильных поликристаллических алмазов. Долота *Kinetic* могут модифицироваться за счет использования разных связующих материалов и различных по размеру кристаллов в соответствии со свойствами буримой породы и типом забойного двигателя для идеальной эксплуатации при высоких частотах вращения, возникающих при использовании турбобуров. Выступ вставок *GHI* из корпуса долота повышает объем потока жидкости перед долотом, что позволяет использовать его для разбуривания оснастки обсадной колонны, увеличить механическую скорость и применять их при бурении на регрессии, когда работа шарошечных долот и долот *PDC* приводит к снижению механической скорости и проходки на долото.

На рис. 1.47 представлено импрегнированное алмазное долото компании *UniDrill* (ОАО «Универсальное бурение», Россия). Данные долота имеют матричный корпус, в режущую структуру которых входят сегменты различной формы с импрегнированными в них мелкозернистыми искусственными алмазами.

Состав матрицы подбирается в зависимости от породы с таким расчетом, чтобы её износ происходил немного быстрее, чем износ алмазов. Долота предназначены для бурения с помощью ротора или забойных двигателей в твердых и сильно абразивных породах.

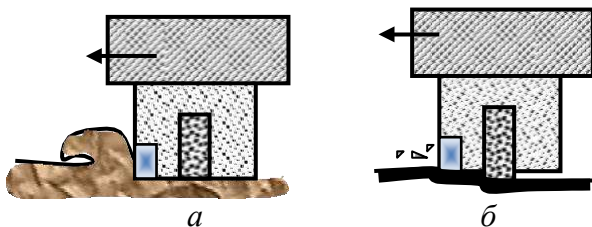


Рис. 1.46. Схемы, поясняющие принцип работы импрегнированных долот *Kinetic*: *a* – в мягких горных породах и породах средней твердости; *б* – в твердых горных породах



Рис. 1.47. Импрегнированное алмазное долото компании *UniDrill* типа *UI*

1.5.2. Разработки алмазных инструментов компаний Atlas Copco и Boart Longyear

В настоящее время значительный объем геологоразведочного бурения выполняется на оборудовании и инструментом таких ведущих мировых производителей, как компании *Atlas Copco* и *Boart Longyear*.

В соответствии с рекомендациями компании *Atlas Copco* выбор инструмента и технологии бурения производят на основании оценки абразивности, трещиноватости и твердости горных пород, которые сгруппированы и разбиты на пять категорий.

К первой группе относятся крупнозернистые, сильнотрещиноватые и сверхабразивные породы (сланец, аргиллит и известняк). Для их бурения рекомендуются импрегнированные коронки типа *Craelius* и *Hobic* с максимально твердыми матрицами.

Вторая группа пород характеризуется как трещиноватые и абразивные (песчаник, доломит, туф, кремнистый сланец). Для бурения этих пород рекомендуются коронки с менее твердыми матрицами.

Третья группа пород характеризуется как среднеабразивная (андезит, базальт, пегматит, диабаз, габбро, диорит). Коронки, рекомендуемые компанией, имеют еще менее твердые матрицы.

Четвертая группа пород – это крепкие слабоабразивные породы (гнейс, диорит, гранит, кварцит, порфир).

Пятая группа пород – очень крепкие и неабразивные породы (кварц, риолит, кремнистый известняк, таконит, лимонит, яшма). Для таких горных пород предлагается инструмент с наиболее мягкой матрицей.

Для изготовления импрегнированных коронок используют искусственные алмазы, однослойных коронок – природные алмазы зернистостью 30/50 или 20/25 шт./карат. Более крупные камни используются в коронках для бурения менее твердых, а более мелкие – более твердых горных пород. Алмазы в однослойных коронках применяются только группы *S*, в которую попадают обработанные и полированные алмазы повышенного качества.

Создаваемый буровой алмазный импрегнированный инструмент отличается не только формой торцевой части и промывочных каналов, но и высотой матриц. Например, коронки типа *Craelius* могут иметь матрицу высотой 6,5; 9,5; 12 и 16 мм. Коронки типа *Hobic* 6,5; 8; 10 мм. У коронок компании *Boart Longyear* типа *Alpha* высота матрицы может быть 9,5; 12 и даже более 25 мм.

Последняя из коронок имеет маркировку *Alpha Stage 3* (рис. 1.48). Её уникальность в наличии трех рабочих «этажей», располагаемых по вертикали, при этом каждый из них оснащен тремя промывочными каналами.

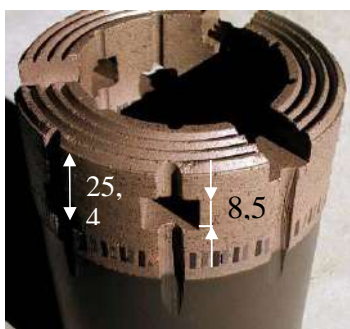


Рис. 1.48. Импрегнированная коронка компании *Boart Longyear* типа *Alpha Stage 3*

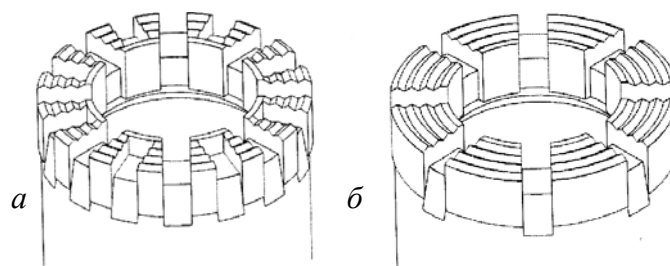


Рис. 1.49. Геометрия торца импрегнированных алмазных коронок *Alpha Bit* компании *Boart Longyear* типа *Express* с дополнительными каналами на торце (а) и стандартного типа (б)

На первом этапе работы коронки действуют все три «этажа» матрицы, пропуская жидкость. При этом нижние окна обеспечивают проход жидкости для удаления шлама с забоя скважины. По мере срабатывания матрицы площадь, а затем и число каналов уменьшаются, а на заключительном этапе, когда в работе находится только последний «этаж» матрицы, работают только три оставшиеся промывочные каналы.

Сравнительные испытания коронок типа *Alpha Stage3* и *Alpha Extended Crown* с высотой матрицы 12 мм показали, что интервал бурения первыми коронками в очень твердых породах составил 126–130 м, вторых 40–41 м. При бурении пород средней твердости соотношение длины проходки этими коронками составило соответственно 400–500/140–150 м.

Низкая (6,5, 8,0 мм) и стандартная (9,5 мм) высота матрицы используется для коронок, срок службы которых не влияет на количество операций спуска и подъема, а также если ожидается значительный износ коронки по диаметру. Для снарядов со съемным керноприемником обычно рекомендуются коронки с очень высокой матрицей (12 мм) и суперматрицей (16 и 25 мм).

Для импрегнированных коронок основным является W-профиль, эффективный за счет образования свободных поверхностей разрушения горной породы, что способствует ее разрушению.

Методика выбора коронок типа *Alpha* (рис. 1.49) компании *Boart Longyear* рассмотрена на рис. 1.50. Эти коронки выпускаются со значительным числом модификаций и оснащены алмазами в оболочке из хрома, что повышает прочность соединения их с матрицей и эксплуатационные показатели инструмента.

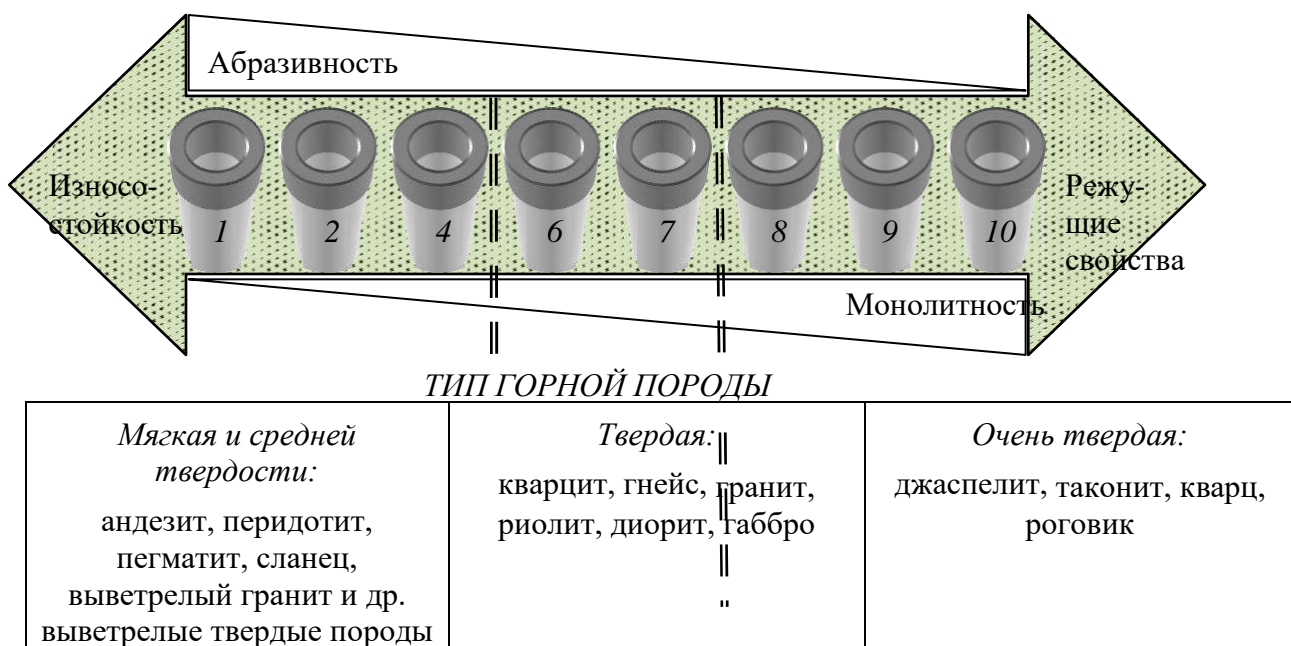


Рис. 1.50. Технологическая схема выбора алмазных импрегнированных коронок *Alpha Bit* компании *Boart Longyear*: 1) коронки с матрицами от 6 до 10 серии могут изготавливаться с дополнительными каналами на торце (*Express*) и увеличенной высотой матрицы (*Extended Crown*); 2) коронки могут изготавливаться с увеличенной шириной промывочных окон (*Super-Flush*) и дополнительными торцевыми промывочными отверстиями (*Face Discharge*); 3) для бурения твердых и одновременно абразивных, а также трещиноватых горных пород коронки стандартной серии 6,7 и 8 изготавливаются с более твердой и прочной матрицей в версии *Abrasive*; 4) для бурения очень твердых горных пород коронки стандартных серий 6, 7, 8, 9 и 10 изготавливаются в версии *Competent*.

Как следует из представленного (рис. 1.50) материала, методика выбора алмазной коронки компании *Boart Longyear* аналогична методике компании *Atlas Copco* и основывается на разделении горных пород по абразивности, монолитности (твердости) и трещиноватости.

При управлении процессом бурения для каждого типа коронки компаниями *Atlas Copco* и *Boart Longyear* рекомендуется рациональная частота вращения, выбор которой определяется по линейной скорости в пределах 2–5 м/с, и усилие подачи, которое должно обеспечить определенную скорость проходки. Критерием оптимального управления алмазным бурением является значение показателя *RPI* (число оборотов на сантиметр подачи).

Таблица 1.3.

Пример выбора параметров режима бурения в соответствии с управлением по методике рациональной *RPI*

Типоразмер коронки	Расход промывочной жидкости, л/мин	Частота вращения, мин ⁻¹	Скорость бурения см/мин при <i>RPI</i> , об/см		Осевая нагрузка, даН
			80	100	
<i>BQ</i> – 59,6 мм	23-30	1 700	22	17	900–2 300
		1 000	13	10	
		700	9	7	
<i>NQ</i> – 75,3 мм	30-38	1 350	17	14	1 400–2 700
		800	10	8	
<i>HQ</i> – 96,1 мм	38-45	1 000	13	10	1 800–3 600
		600	8	6	
<i>PQ</i> – 122,6 мм	68-87	800	10	8	2 300–4 500
		600	6	5	

В табл. 1.3. приведены рекомендуемые параметры режима бурения импрегнированными коронками компании *Boart Longyear*, выбираемые в соответствии с критерием *RPI*.

Например, при частоте вращения 1 200 мин⁻¹ и скорости проходки 6 дюймов (15 см) показатель *RPI* составит $1\ 200/15 = 80$. Управление процессом бурения осуществляют, ориентируясь на *RPI* = 80–100, но считаются допустимыми и более высокие скорости проходки, для которых *RPI* = 60–50. В данном случае критерием выбора параметров режима бурения и скорости углубления является износостойкость инструмента.

1.5.3. Динамические нагрузки на алмазы в процессе разрушения горных пород

Повышенная хрупкость алмаза делает его очень чувствительным к вибрации. При сильной вибрации ресурс алмазного бурового инструмента может снижаться в десятки раз по сравнению с инструментом, отработанным без наложения вибрации.

Вибрации бурового инструмента возникают из-за неравномерности разрушения горной породы и несовершенств самого инструмента, например вследствие неперпендикулярности торца, несовпадения осей корпуса, матрицы, резьбы и др.

Как правило, колебания инструмента происходят с частотой, кратной частоте вращения снаряда. Так, при частоте вращения колонны 200–800 мин⁻¹ алмазная коронка претерпевает от 3,3 до 13,3 колебаний в секунду [14]. Колебания инструмента приводят к динамическим нагрузкам на алмазы. Исследования динамических усилий, возникающих при разрушении горной породы единичным алмазом, показали [12], что процесс разрушения горной

породы резанием-скалыванием происходит скачкообразно. Амплитуда как осевого, так и тангенциального усилий разрушения непрерывно меняется. Причем каждому импульсу силы на осциллограмме (рис. 1.51) соответствует единичный акт разрушения горной породы. Запись единичных актов разрушения при больших скоростях позволяет утверждать, что по внешнему виду осциллограмма единичного акта разрушения во многом сходна с графиком разрушения упругохрупкой породы индентором.

При этом рассмотрение каждого отдельного импульса на осциллограмме (рис. 1.51) показывает, что нагрузка на алмазе возрастает от минимальных до максимальных значений в сотые и тысячные доли секунды. По существу, каждый импульс на осциллограмме соответствует микроудару алмаза по горной породе.

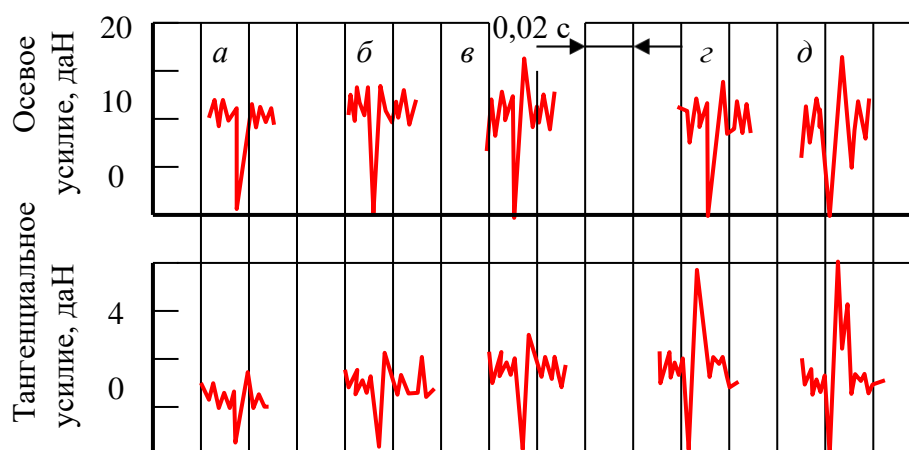


Рис. 1.51. Осциллограммы микроударов алмаза при пересечении трещины на различной глубине резания альбитофира (твердость 2 760 МПа, коэффициент пластичности 1,5), мм: а – 0,05; б – 0,75; в – 0,1; г – 0,13; д – 0,15.

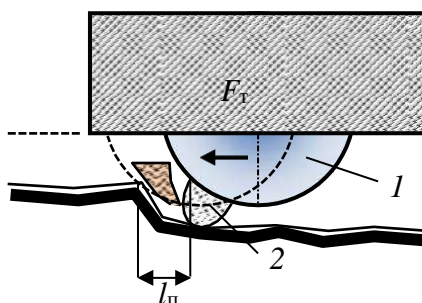


Рис. 1.52. Схема работы алмазного резца

Таким образом, в твердых упругохрупких и хрупких породах разрушение происходит циклически: микроудар – холостой ход – микроудар – холостой ход и т. д.

Динамический характер разрушения связан прежде всего с тем, что, производя скалывание породы передней гранью и создав относительно свободное пространство перед собой, алмаз определенный участок пути $l_{п}$ может пройти вхолостую, а затем, достигнув неразрушенной породы на пути своего движения, вновь столкнуться с породой, испытывая при этом динамические нагрузки (рис. 1.52).

В табл. 1.4. приведено соотношение динамических, тангенциальных и осевых усилий разрушения, а также импульс силы при разрушении хрупкого мигматита (твердость 3 000 МПа, коэффициент пластичности 1).

При проведении эксперимента наряду с микроударами при резании-скалывании монолитной породы фиксировался микроудар алмазного резца при пересечении открытой трещины.

Представленные данные показывают, что алмаз воспринимает в зависимости от частоты вращения инструмента от 300 до 700 микроударов в секунду, но с увеличением скорости перемещения резца количество микроударов на единицу пути уменьшается. Сила удара, воспринимаемого алмазом при пересечении трещины, зависит от твердости горных пород и глубины его внедрения в породу (рис. 1.52).

Таблица 1.4.

Зависимость изменения характеристик микроудара алмаза по горной породе от нагрузки и скорости резания.

Частота вращения, мин ⁻¹	Осевая нагрузка, даН			Тангенциальное усилие, даН			Импульс силы при пересечении трещины, даН		Продолжительность импульса, с
	min	max	Импульс силы, даН	min	max	Импульс силы, даН	Осевая сила, даН	Тангенциальное усилие, даН	
120	4,2	7,1	2,9	1,4	3,2	1,8	7,3	4,0	0,003
	4,9	7,9	3,0	2,0	4,0	2,0	6,25	4,25	0,003
	6,1	8,9	2,7	2,3	3,4	1,1	7,25	4,3	0,002
	6,9	12,2	5,3	2,1	4,5	2,4	9,5	5,4	0,004
	7,25	12,75	5,5	2,9	3,15	1,25	15,0	5,7	0,004
	8,5	11,2	2,7	2,5	3,5	1,0	9,5	5,0	0,004
375	4,5	7,0	2,5	1,5	3,1	1,6	7,25	4,7	0,002
	5,3	8,6	3,25	2,0	3,5	1,5	6,5	4,3	0,002
	5,5	8,0	2,5	2,1	3,1	1,0	5,6	3,25	0,0015
500	3,75	6,05	2,3	1,6	2,8	1,2	5,25	3,4	0,002
	5,5	7,0	1,5	1,6	3,0	1,4	5,75	3,8	0,002
	5,75	7,5	1,75	2,0	3,0	1,0	5,75	3,2	0,001
700	6,5	8,7	2,2	2,0	3,0	1,0	6,5	2,8	0,0016
	6,8	8,3	1,5	2,0	2,9	0,9	7,0	3,0	0,0016
	7,0	9,3	2,3	2,1	3,1	1,0	7,6	4,4	0,001

При ширине трещины, равной или несколько превышающей размер внедрившейся части алмаза, в момент пересечения трещины нагрузка на алмаз падает до нуля, а затем резко возрастает. С увеличением глубины внедрения алмаза в породу (повышение осевой нагрузки на резец) меняется амплитуда колебаний усилий до 1,5–2 раз. Отсюда следует, что максимальные динамические нагрузки на алмазный резец возникают при разрушении более твердого габбро, а при разрушении перидотита не наблюдается значительных колебаний осевого и тангенциального усилий.

Наличие трещины приводит к значительным перегрузкам на резец, которые особенно заметны на фоне незначительных динамических колебаний осевого и тангенциального усилий при разрушении перидотита.

Горная порода является диссипативной системой, что приводит к поглощению энергии ударного столкновения алмаза с ней. Влияние *диссипативных* свойств породы можно учесть через коэффициент внутреннего трения горной породы, который равен $\text{tg } \varphi_{\text{п}}$.

Диссипация (от лат. *dissipatio* – рассеяние) – явление рассеивания механической энергии при движении, деформировании с переходом кинетической энергии в тепловую.

Бурение в трещиноватых горных породах имеет ряд особенностей. Значительное влияние на процесс бурения в трещиноватых горных породах оказывает оптимальное сочетание режимных параметров, в первую очередь осевой нагрузки на буровой инструмент и частоты вращения.

Экспериментальными исследованиями и данными практики установлено, что осевая нагрузка на буровую коронку и частота вращения снаряда должны снижаться по мере увеличения степени трещиноватости пород до 50 % от значений, принятых для монолитных пород. Это связано с тем, что при появлении трещиноватости горных пород изменяется механизм их разрушения.

Трещины способствуют развитию деформаций в породе, возрастает объем разрушенной породы при подходе резца к трещине, увеличивается и размер разрушенных частиц породы (рис. 1.53). При подходе резца к трещине наблюдается расширение и углубление борозды разрушения в 1,5–2 раза.

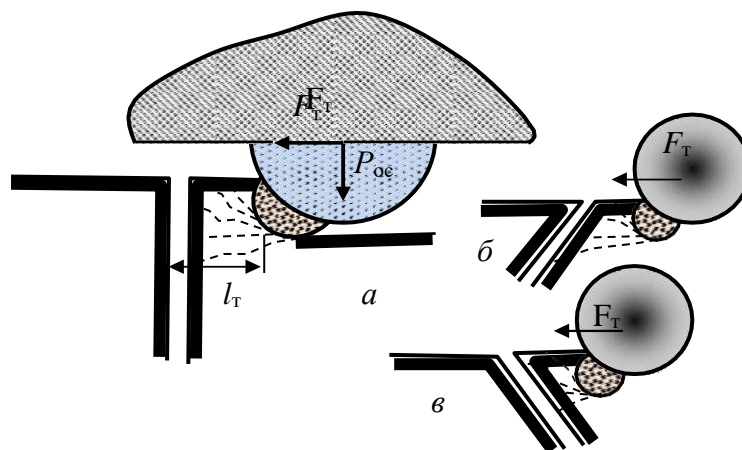


Рис. 1.53. Схемы, поясняющие процесс разрушения породы резцом перед трещиной

Таким образом, наличие трещин способствует разрушению горной породы. Степень понижения прочности забоя скважины определяется размером трещины, их количеством на единице площади забоя и ориентацией по отношению к забою скважины.

В то же время работа резца, пересекающего трещину, как уже отмечено выше, носит чрезвычайно динамический характер, так как скол породы при подходе к трещине обеспечивает резцу «пробег» на интервале l_T без какого-либо сопротивления до противоположного борта трещины (рис. 1.53, а), а при встрече резца с бортом трещины происходит удар, в результате которого может произойти слом резца.

Особенно чувствительны к подобным ударным нагрузкам буровые инструменты резцового типа – твердосплавные коронки, лопастные долота и алмазные буровые коронки.

Импульсный характер процесса бурения трещиноватых горных пород приводит к тому, что тангенциальное усилие на резце в момент пересечения им открытой трещины резко изменяется.

Наиболее значительные ударные нагрузки на резцы инструмента будут в случаях, при которых плоскость трещины или перпендикулярна направлению движения резца (рис. 1.53, а), или, если плоскость трещины наклонена по направлению движения резца (рис. 1.53, б). В случае если плоскость трещины ориентирована в направлении перемещения резца, динамический характер работы резца будет несколько снижен (рис. 1.53, в), поскольку он пересекает трещину по касательной.

С увеличением трещиноватости горных пород за счет снижения прочности забоя и увеличения количества ударов и энергии каждого удара начинает расти механическая скорость бурения, но одновременно с этим увеличивается и сила ударов по резцам, что может приводить к интенсивному износу алмазных коронок, сколам и выкрашиванию алмазных резцов. Снижение динамической нагрузки на резцы буровых коронок следует осуществлять прежде всего за счет уменьшения частоты их вращения. Снижение частот вращения, особенно при алмазном бурении, следует определять исходя из допустимой

энергии удара алмазов при пересечении ими трещин с учетом количества или размеров самих трещин.

1.6. Разрушение горных пород шарошечными долотами

1.6.1. Конструкции и вооружение шарошечных долот

Одним из наиболее распространенных буровых инструментов, предназначенных для бурения горных пород различной твердости – от мягких до самых твердых, без отбора керна и с отбором керна, являются шарошечные долота.

Шарошечное долото создано в конце XIX – начале XX в. Долото с коническими шарошками запатентовано Говардом Хьюзом (США) в 1909 г.

Шарошечное долото (рис. 1.54) состоит из корпуса с резьбой 1, лап 2 и шарошек 3, размещаемых на осях – цапфах 4. Шарошки 3 имеют вооружение в виде армированных зубьев 5. При вращении корпуса долота 1 с лапами 2 шарошки 3 вращаются вокруг цапф 4. Поэтому между шарошками 3 и цапфами 4 размещают шариковые или роликовые подшипники 6, а в долотах малого размера применяют подшипники скольжения. Очистной агент подается к забою по каналу 7. Отверстие 8 предназначено для доставки в канал между шарошкой 3 и цапфой 4 шариков подшипника 6, которые, выполняя функцию подшипника, служат также в качестве фиксаторов шарошки 3 на цапфе 4. После сборки долота канал 8 закрывают.

Уникальность этого инструмента состоит в сочетании ударного, раздавливающего и скалывающего действий, реализуемых одновременно, что позволяет успешно бурить как мягкие и пластичные, так и твердые и хрупкие горные породы.

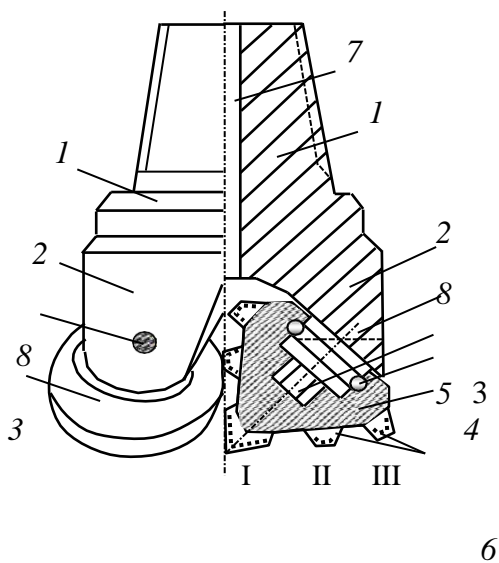


Рис. 1.54. Схема трехшарошечного долота с центральным промывочным каналом, зубчатым вооружением и опорой качения на подшипниках

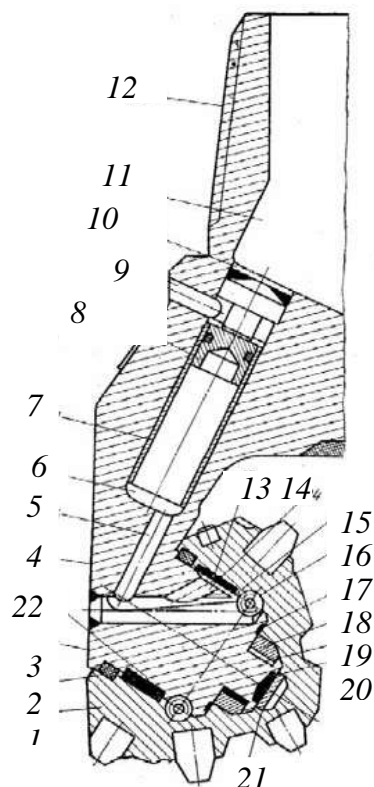


Рис. 1.55. Долото с герметизированной маслонаполненной опорой

При вращении долота шарошки перекатываются по забою, опираясь (каждая из них) на породу то одним, то двумя зубьями. Таким образом, одновременно в контакте с породой находятся несколько зубьев шарошки, а остальные остаются как бы в резерве. Если сопоставить вооружение шарошечного долота с инструментом режущего типа, например лопастным долотом, можно убедиться, что запас вооружения у шарошечного долота увеличивается в десятки раз, хотя удельное давление на забой при равной осевой нагрузке при этом остается прежним.

Зубья шарошечного долота находятся в контакте с горной породой весьма короткое время, а выйдя из контакта, интенсивно охлаждаются промывочной жидкостью. Это позволяет резко увеличить удельную мощность, реализуемую зубьями, по сравнению с режущими режуще-скалывающего инструмента, без опасности развития катастрофического изнашивания вооружения.

Ресурс шарошечных долот определяется довольно часто не стойкостью вооружения, а износостойкостью опор вращения шарошек. Для повышения ресурса шарошечных долот большого размера применяют герметизирующие подшипниковые узлы уплотнения, а также долота с маслonaполненными под давлением опорами.

На рис. 1.55 приведена схема долота с герметизированной маслonaполненной опорой серии *L* французской фирмы *Creusot-Loire*.

Долото имеет герметизированную опору благодаря наличию манжеты 2, перекрывающей зазор между шарошкой 1 и цапфой 3. В состав герметизированной системы, заполненной смазкой, входят просверленные в лапе 4 смазочный соединительный канал 5 и лубрикатор 6. В лубрикаторе 6 установлены гидроцилиндр 7 с поршнем 8, которые образуют компенсатор, обеспечивающий автономную подачу смазки из лубрикатора 6 и гидроцилиндра 7 через канал 5 к элементам опоры в процессе бурения под действием нисходящего потока промывочной жидкости. Для выравнивания давлений, действующих с одной стороны на манжету 2, а с другой – на поршень 8, просверлен отводной канал 9, сбрасывающий часть жидкости, поступающей в верхнюю часть 10 лубрикатора над поршнем из внутренней полости 11 резьбовой головки 12 долота. К фрикционным поверхностям 13 и 22 большого подшипника смазка подводится от соединенного канала 5 через канал 14, а к шариковому замковому подшипнику 16 через канал 15. Под шариковым подшипником 16 предусмотрен дополнительный торцевой подшипник 17 скольжения. Малый фрикционный узел со стороны шарошки выполнен вставной фрикционной втулкой 18, а со стороны цапфы 3 – поверхностью 19, армированной защитным покрытием таким же образом, как и в зоне большого подшипника, по нижнему нагруженному сегменту. Защитным покрытием армируется и концевой торец 20 цапфы, контактирующий с подпятником 21, запрессованным в шарошку.

Защита подшипниковых опор шарошечного долота является одной из важнейших задач при его работе в условиях высокой температуры и давления, воздействия коррозионных пластовых флюидов и промывочной жидкости.

Примером современного решения по созданию герметизированных опор шарошечных долот является двойное сальниковое уплотнение долот *Gemini R*, производимых компанией *Smith bits* (рис. 1.56).

Система двойного сальникового уплотнения *Gemini R* является наиболее долговечной и надежной среди подобных. Она состоит из первичного уплотнительного кольца для защиты подшипников и вторичного, обеспечивающего защиту первичного сальникового уплотнения. Первичное уплотнение новой конструкции усилено по динамическим поверхностям особым износостойким эластомером и новым энергоемким материалом, обладающим постоянным давлением в зоне соприкосновения. Первичное кольцо пулевидной формы имеет широкий поперечный профиль и обеспечивает максимальную защиту подшипника.

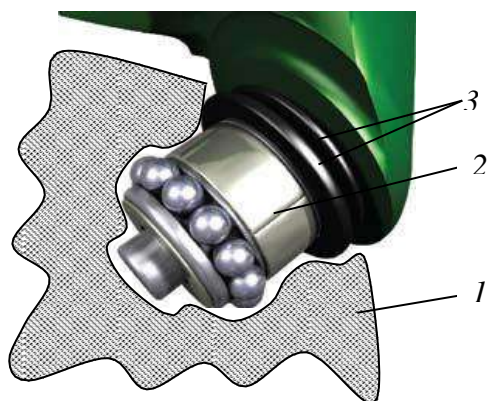


Рис. 1.56. Долото с двойным сальниковым уплотнением опоры качения:
1 – шарошка; 2 – цапфа; 3 – сдвоенные сальники.

Вторичное уплотнительное кольцо также изготавливается из нескольких специально разработанных материалов и предназначено для защиты подшипникового уплотнительного кольца от абразивного воздействия твердых частиц, присутствующих в скважинных флюидах. Специально разработанный термостойкий материал *Kevlar* расположен на торцевой поверхности уплотнения в зоне контакта герметичного кольца и цапфы. Он обеспечивает повышенный уровень износостойкости, а также защиту от абразивного воздействия скважинных жидкостей.

Эластомерная матрица обеспечивает упругость и превосходные уплотняющие свойства. Хотя уплотнительные кольца функционируют независимо друг от друга, в паре они создают превосходную герметизацию подшипникового узла и надежную работу в условиях высокой частоты вращения инструмента, больших нагрузок на долото, при проходе участков со значительным искривлением ствола, повышенном содержании твердой фазы в буровом растворе и высоком забойном давлении. Долота могут иметь 1, 2, 3, 4 и более шарошек. Основными являются трехшарошечные долота (рис. 1.57).

По назначению шарошечные долота разделяются на следующие основные виды:

- для бескернового вращательного бурения;
- бурения с отбором керна (колонковые долота);
- бурения с продувкой;
- специального назначения.

Для производства буровых работ выпускаются бескерновые шарошечные долота следующих типов: М (для мягких пород), МЗ (для мягких абразивных), МС (для мягких пород с пропластками пород средней твердости), МСЗ (для мягких абразивных пород с пропластками пород средней твердости), С (для горных пород средней твердости), СЗ (для абразивных пород средней твердости), СТ (для горных пород средней твердости с пропластками твердых пород), Т (для твердых пород), ТЗ (для твердых абразивных пород), ТК (для твердых горных пород с пропластками крепких пород), ТКЗ (для абразивных твердых пород с пропластками крепких пород), К (для крепких пород), ОК (для очень крепких горных пород).

Все перечисленные долота подразделяются на две группы, которые отличаются как по характеру взаимодействия и разрушения горной породы на забое, так и конструктивному исполнению рабочих породоразрушающих органов – шарошек долота.



Рис. 1.57. Трехшарошечные долота: *а* – для бурения мягких горных пород с фрезерованными на шарошках зубьями; *б, в* – для бурения средних по твердости и твердых горных пород с твердосплавными по- родоразрушающими вставками; *1* – траектории движения венцов шарошек долота; *2* – сопло для выхода промывочной жидкости с боковым расположением; *3* – шарошки; *4* – лапы долота; *5* – резьба.

Первая группа – долота с зубчатыми шарошками, производящие раздавливающее-дробящее-скалывающее воздействие (долота типа М, МЗ, МС, МЗС, СЗ). Раздавливание, дробление и скалывание породы реализуется при качении шарошки по забою, а вследствие проскальзывания (поступательного движения шарошки без вращения на оси) осуществляется дополнительное резание-скалывание породы.

Как следует из характеристики процесса разрушения горной породы шарошечным долотом, статические формы разрушения (раздавливание) сочетаются с динамическими (скалывание), в том числе с ударными (дробление), что и делает шарошечные долота универсальными инструментами для бурения самых различных по твердости горных пород.

Разрушение горных пород шарошечными долотами может производиться при различных соотношениях режуще-скалывающего и дробящего воздействия. Чтобы создать долота, производящие на горную породу только ударные – дробящие нагрузки, необходимо придать шарошкам такую геометрическую форму, при которой последние осуществляли бы чистое качение. Этим условиям соответствует одноконусная шарошка с образующими, пересекающимися на оси долота. Любое отклонение от указанной геометрии приводит к проскальзыванию шарошек при вращении долота на забое.

Проскальзывание шарошек является важным показателем конструкции долота, который оценивается коэффициентом проскальзывания ($K_{пр}$) – отношением длины траектории проскальзывания зубца за один оборот долота на забое к длине концентрической окружности на забое скважины, по которой перемещается зубец при вращении долота. Проскальзывание достигается за счет формы шарошек и углового или продольного смещения осей вращения шарошек от оси долота. Например, для долот с

конусными шарошками $K_{пр} = 0$, для двух-, трех- конусных шарошек $K_{пр} = 0,05-0,1$, для бочкообразных $K_{пр} = 0,1-0,15$, для долот со смещением осей шарошек от оси долота коэффициент проскальзывания может достигать 0,3. Значит, в последнем случае почти треть пути по забою зубцы шарошек осуществляют поступательное перемещение как зубцы твердосплавных коронок и долот и только две трети пути по забою перекатываются, совершая дробяще-скалывающее и раздавливающее воздействие на горную породу.

Вооружение шарошек долот первой группы выполняется зубчатым. Зубцы фрезеруются непосредственно на шарошке и армируются наплавляемым твердым сплавом.

Долота, предназначенные для бурения абразивных пород, имеют вооружение в виде запрессованных в шарошки твердосплавных вставок с клиновидной формой рабочей поверхности.

Вторая группа – долота с увеличенным дробящим воздействием на породу и минимальным проскальзыванием шарошек (СТ, Т, ТЗ, ТКЗ, К, ОК). Именно поэтому у долот этого типа в основном одноконусные шарошки, установленные в долоте без смещения осей вращения. При этом шарошки долот типа СТ и Т выполняются зубчатыми, ТК, К, ОК армируются твердосплавными вставками со сферическими торцами, а шарошки долот типа ТЗ и ТКЗ имеют комбинированное вооружение – зубья чередуются с твердосплавными вставками.

Шарошечные долота могут оснащаться гидромониторными насадками, повышающими скорость истечения струй промывочной жидкости из центрального канала долота, для улучшения очистки забоя и шарошек от продуктов разрушения.

Как уже отмечено, породоразрушающими элементами шарошек могут быть зубья или твердосплавные вставки с клиновидной, шарообразной и др. формами рабочих поверхностей.

Зубья и вставки на шарошках долота располагают венцами. Венцы и зубья со вставками в них располагают таким образом, чтобы за один полный оборот долота вся поверхность забоя была покрыта зонами разрушения.

Зубья шарошек могут иметь различную геометрическую форму. Наиболее типичной является клиновидная с площадкой притупления на вершине зуба (рис. 1.58). Зубья шарошек характеризуются определенными параметрами: α – углом приострения зуба; a – шириной площадки притупления; b – длиной зуба; H – высотой зуба; S – шагом расстановки зубьев.

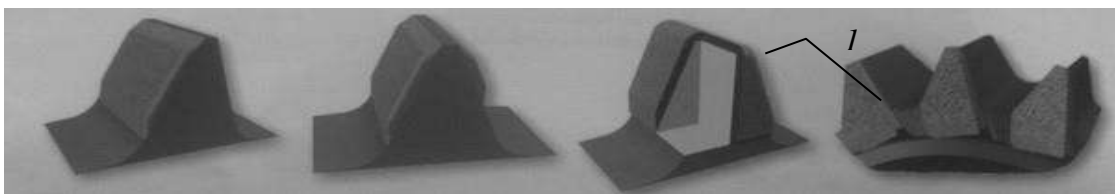


Рис. 1.58. Формы фрезерованных зубьев шарошечных долот:
1 – наплавляемый твердый сплав

Элементы вооружения (зубья или вставные зубки-вставки) располагаются на шарошках таким образом, чтобы предотвратить образование «рейки» на забое и обеспечить полное перекрытие. Имеется вариант исполнения вооружения по самоочищающейся схеме, когда зубья соседних шарошек входят в бесконтактное зацепление, подобно двум шестерням в механической передаче, но без взаимодействия (рис. 1.59). Подобная схема выполняется с целью очистки шарошек и особенно пространства между зубьями от налипающей горной породы.

Долота оснащаются твердосплавными вставками, например разработанными компанией *Hughes Tool Company* (рис. 1.60). Каждая вставка имеет цилиндрическое основание со скошенной у нижнего торца фаской. Рабочая головка вставки может иметь

различную форму в зависимости от назначения вставки. Так, вставка с круглой (овоидальной) головкой (рис. 1.60, *а*) предназначена для скалывания и дробления породы, поэтому она применяется для оснащения долот при бурении очень твердых горных пород (ОК).

Зубок со сводчатой формой (рис. 1.60, *б*) используется в долотах, предназначенных для бурения твердых (Т) и крепких (К) горных пород. Высота головки несколько больше, чем у предыдущей вставки, поэтому при перекачивании шарошки зубок внедряется в породу на большую глубину, а это возможно в породах менее твердых, чем разрушаемые вставкой с круглой головкой. Воздействие на породу со стороны шарошки в этом случае так же дробяще-скалывающее.

Вставка со свдчато-черпаковидной головкой (рис. 1.60, *в*) характеризуется еще большей высотой. Кроме дробления-скалывания она благодаря черпаковидной выемке производит и механическое извлечение разрушенной породы из лунок забоя. Предназначена такая вставка для бурения горных пород средней (С) твердости.

Коническая рабочая головка вставки (рис. 1.60, *г*) способствует дробящему воздействию на породу, но она производит также и небольшое скребуще-режущее воздействие, а поэтому применяется для оснащения долот, предназначенных для бурения горных пород средней (С) твердости. Зубиловидная головка вставки (рис. 1.60, *д*) характеризуется пересечением граней под углом 90°. Она предназначена для разрушения горных пород средней (С) твердости дроблением и скалыванием.

Долотовидная вставка (рис. 1.60, *е*) с затуплением вершины предназначен для разрушения горных пород средней (С) твердости и мягких (М) и характеризуется наряду с дроблением-скалыванием также и скребущим действием.

Клиновидно-коническая вставка (рис. 1.60, *ж*) характеризуется весьма значительным закруглением вершины и может применяться для бурения горных пород средней твердости (С) и мягких (М).

Вставка с черпаковидной головкой и со смещением вершины (рис. 1.60, *з*) предназначена для разрушения преимущественно мягких (М) и рыхлых горных пород. Зубок обеспечивает фрезерующе-скребущее воздействие на породу и извлечение из лунок забоя разрушенных осколков породы, предотвращая их многократное перемалывание. Высота этого зубка максимальна.

Черпако-долотчатая вставка (рис. 1.60, *и*) обладает теми же свойствами, что и предыдущий, но характеризуется большим притуплением его вершины и меньшей высотой, что допускает возможность его применения для разрушения более плотных пород, т. е. средней (С) твердости.

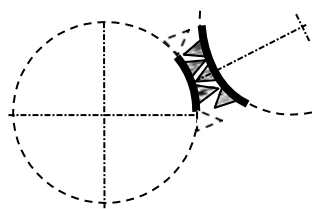


Рис. 1.59. Исполнение вооружения шарошек по самоочищающей схеме

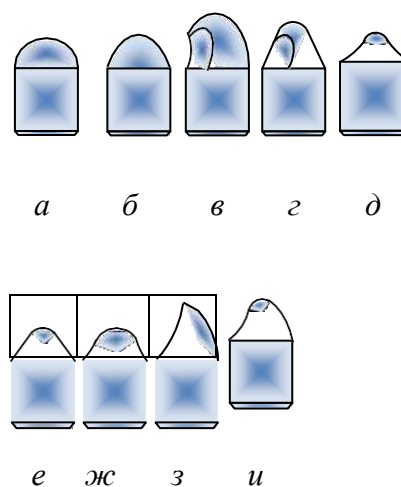


Рис. 1.60. Разновидности вставок, применяющихся в долотах

У долот фирмы *Hughes Tool Company* также выполняется усиление калибрующего вооружения твердосплавными вставками, преимущественно овоидальной формы, устанавливаемыми через один-два фрезерованных зуба. При этом вершина фрезерованного зуба срезается и в образуемой площадке ближе к тыльной стороне высверливается гнездо под вставку. Такое усиление называют «Heel Pac», т. е. упрочнение пяты – тыльной части шарошки (рис. 1.61).

Для повышения эффективности разрушения горных пород применяют долота с венцами, зубья которых имеют различную длину торцевых площадок. Такие долота получили название долот с волнообразными венцами. Ресурс этого долота и скорость бурения увеличены за счет скола зубьями более крупных частиц породы: более острые зубья *1* проникают в породу на большую глубину, а более широкие зубья *2* скалывают боковые поверхности лунок, образовавшихся от ударов острых зубьев *1* (рис. 1.62). Обязательным условием при конструировании шарошечных долот является создание достаточно долговечной опоры шарошек. С этой целью трущиеся детали долот выполняются из высококачественных сталей и подвергаются специальной термообработке. Особенно сложной представляется задача создания долговечных опор качения шарошек у долот диаметром 76, 59 и 46 мм в связи с резким снижением прочностных характеристик всех деталей и трудностью использования шариковых затворов шарошек, вызванными малыми размерами цапф, лап и низкой прочностью шариков приемлемых размеров.

В связи с этим для бурения скважин диаметром 76–46 мм в Среднеазиатском НИИ геологии и минерального сырья предложена оригинальная и эффективная конструктивная схема малогабаритного долота, получившего маркировку ДДА (долото двухшарошечное асимметричное). Долота ДДА-46, 59, 76 и 93 предназначены для бурения твердых и очень твердых горных пород.

Долото ДДА (рис. 1.63) состоит из корпуса с резьбой *1* из двух секций, соединенных сварными швами *2*. На цапфах *3* корпуса смонтированы шарошки *4* полусферической формы, армированные цилиндрическими зубками *5* из твердого сплава ВК8. Опора долот (цапфа *3*, шарошка *4*) представлена подшипником скольжения, что позволяет выполнить её конструктивно более прочной, так как не требуется размещение на опоре шариков и роликов подшипниковых узлов. Шарошки долота *4* закрепляются на лапах распорным V-образным пальцем *6* с упорными буртами, который своими концами вставляется в отверстия пустотелых цапф *3*, создавая, таким образом, дополнительную опору.



a



б

Рис. 1.61. Варианты усиления тыльной части шарошек долот: *a* – калибрующие вставки и один ряд вставок для защиты; *б* – два ряда вставок для защиты

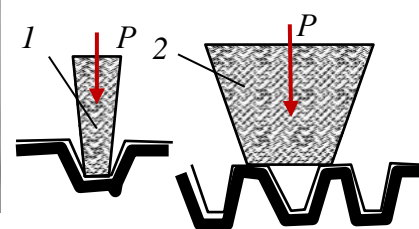


Рис. 1.62. Схема поражения забоя шарошечным долотом с зубьями в венце различной ширины

В этом случае шарошки 4 размещены в долоте не консольно, как это принято по основной схеме, а в пределах замкнутого контура «цапфа 1 – V-образный палец-лапа 2», что существенно повышает прочность долота и практически исключает отделение шарошек от корпуса при бурении. Угол наклона цапф 6 к оси долота 65° . Детали долота изготавливаются из легированной стали и подвергаются термообработке, цементации, закалке и отпуску.

Исследования, выполненные при создании конструкции долота ДДА, показали, что проскальзывание является одним из основных факторов, интенсифицирующих процесс разрушения при бурении не только мягких и пластичных пород, но и твердых горных пород.

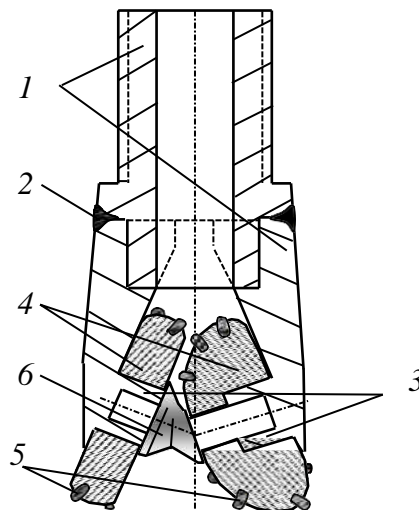


Рис. 1.63. Шарошечное долото ДДА

При бурении долотами типа ДДА достигается более высокая механическая скорость бурения при относительно равном ресурсе в сравнении с другими долотами, например трех- или двухшарошечными долотами типа К, конструкции СКБ Министерства геологии, которые выполнены по классической схеме.

1.6.2. Системы очистки забоя и интенсификация процесса разрушения при бурении шарошечными долотами

Поскольку при шарошечном бурении образуется большое количество продуктов разрушения (шлама), осколков и достаточно крупных обломков, эффективное разрушение горных пород шарошечными долотами возможно только при совершенной системе очистки забоя, под которой подразумевается система, обеспечивающая немедленное и полное удаление продуктов разрушения, образующихся в результате взаимодействия зубьев долота с породой из зоны породоразрушающего действия инструмента. Обломки породы, отделенные от забоя одним зубом, должны быть удалены до взаимодействия с породой следующего зуба таким образом, чтобы все породоразрушающие элементы долота постоянно контактировали только с породой забоя, не производя повторного измельчения разрушенной породы. В таком случае при определенном количестве затраченной на разрушение породы механической энергии скорость проходки будет максимальной. В другом случае часть энергии будет расходоваться бесполезно на разрушение уже образовавшихся, но не удаленных с забоя обломков породы.

Одной из причин уменьшения скорости бурения может быть зашламование долота, особенно при бурении пластичных пород. В шарошечных долотах шламом забивается пространство между зубьями и даже шарошками, а в алмазных инструментах – между

алмазными резцами и в каналах на торце.

Немедленное удаление шлама из призабойной зоны может быть достигнуто при обеспечении эффективной циркуляции промывочного раствора.

К факторам, определяющим эффективность циркуляции, относятся:

- расход жидкости;
 - скорость истечения струи из промывочного канала или гидромониторного сопла;
 - геометрия системы промывки долота: число и форма насадок (или отверстий), их расположение и расстояние до забоя;
 - характеристики промывочной жидкости: плотность, содержание твердой фазы, фильтрационная способность, вязкость, смачивающая способность и др.;
 - свойства разбурываемых горных пород: прочность, проницаемость, пластовое давление.

Процесс промывки забоя можно условно разделить на три этапа:

- удаление обломков породы с поверхности забоя;
- вынос шлама из зоны действия зубьев долота в кольцевое пространство между буровым снарядом и стенкой скважины;
- транспортирование шлама по кольцевому пространству к устью скважины.

Достижение максимальных скоростей бурения возможно лишь при оптимизации всего процесса и параметров промывки, характеристик промывочной жидкости.

Определяющим для эффективной работы долота является этап быстрого удаления обломков после отделения их зубьями долота от массива породы. Эта задача решается применением той или иной системы промывки долот. В наиболее традиционных и часто применяемых для бурения трехшарошечных долотах используются три основные системы промывки: центральная, периферийная, комбинированная.

При центральной промывке буровой раствор поступает в призабойную зону через внутренний канал долота. Поток раствора омывает шарошки, очищая их от шлама, а затем достигает забоя, подхватывает шлам и через зазоры между лапами долота и стенкой скважины поступает в затрубное пространство. Часто вместо одного центрального канала создают три промывочных отверстия – одно для каждой шарошки долота. Скорость струй промывочной жидкости изменяется от 20–40 м/с.

При периферийной схеме промывки буровой раствор поступает в призабойную зону через отверстия между шарошками, причем струи направляются непосредственно на забой скважины. Здесь струи растекаются параллельно плоскости забоя, очищают поверхность забоя и зубья шарошек, после чего жидкость через зазор между долотом и стенкой скважины поступает в затрубное пространство. Обычно в промывочных отверстиях запрессованы сменные гидромониторные насадки (керамические или карбида вольфрама). Скорость струй раствора составляет 70–150 м/с. Комбинированная система промывки применяется в долотах большого диаметра. В данном случае сочетаются две первые схемы.

Примером комбинированной схемы промывки может быть гидродинамическая система долот компании *Smith bits*.

Для оценки потока жидкости в системе промывки *Turphoon* компании *Smith bits* применяется усовершенствованная расчетная модель гидродинамики жидкости (*CFD*), которая обеспечивает оптимизацию потока для более эффективной очистки шарошек, выноса бурового шлама, а также во избежание его повторного перемалывания. В системе промывки *Turphoon* используются как векторные (направленные) удлиненные насадки *VE* для очистки внешней части вооружения, так и насадки для очистки внутренней части вооружения *J3* (рис. 1.64).

Векторные удлиненные насадки для очистки внешней части вооружения *VE* точно направляют поток жидкости к передней кромке шарошек, в то время как насадки *J3* для очистки внутренней части вооружения распределяют потоки в пространство между шарошками. Совместное действие этих шести точно направленных насадок формирует режим потока, который улучшает путь прохождения и скорость бурового раствора. Это позволяет оптимизировать очистку резцов и вынос бурового шлама с забоя, что приводит к максимальному увеличению механической скорости бурения. В настоящее время система промывки *Typhoon* предлагается для долот с наружным диаметром 406 мм и более.

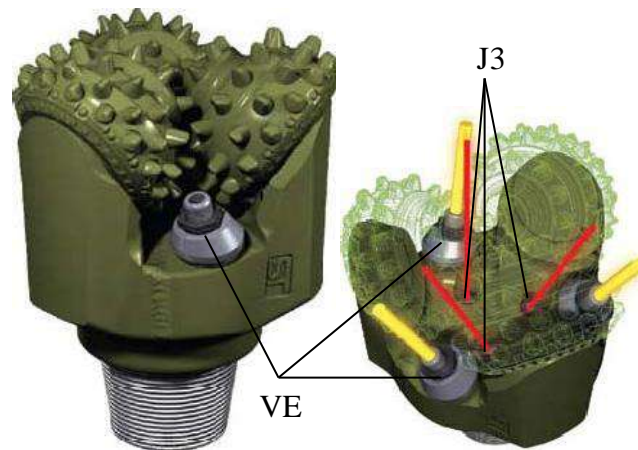


Рис. 1.64. Долота *Shamal Typhoon* компании *Smith bits* с тремя векторными насадками (*VE*) для очистки внешней части вооружения и тремя насадками для очистки внутренней части вооружения (*J3*).

Параметры, определяющие качество промывки забоя (средняя скорость струй, мощность, сила удара и динамическое давление струй, скорость параллельных забоем потоков), имеют максимальное значение при небольшом расстоянии между насадкой и забоем.

Поэтому один из путей улучшения характеристик долот с периферийной системой промывки состоит в приближении насадок к забою скважины на расстояние, которое меньше длины ядра струи (в котором скорость струи постоянна). Это расстояние будет равно $(4-6) d_0$, где d_0 – диаметр насадки в точке истечения раствора. Чаще всего расстояние размещения насадок составляет $(10-20) d_0$. Для размещения насадок используют специальные удлинители.

В долотах фирмы *Smit tul* расстояние от насадки до забоя составляет 38 мм – $(2,5-4) d_0$.

Другой способ повышения эффективности шарошечных долот заключается в применении асимметричной схемы промывки.

Например, известно применение долота (Бухарестский институт нефти и газа), в котором часть жидкости проходит через канал в одной из лап долота, через её цапфу и конус шарошки. Струя жидкости выходит почти параллельно плоскости забоя и при вращении долота смывает шлам из центральной зоны к периферии, откуда его легче удалять в затрубное пространство.

Во Франции разработано и испытано долото с двумя насадками (рис. 1.65), расположенными между шарошками, и одной, направленной вверх. Последняя, создает эжекционный эффект и ускоряет удаление шлама с забоя.

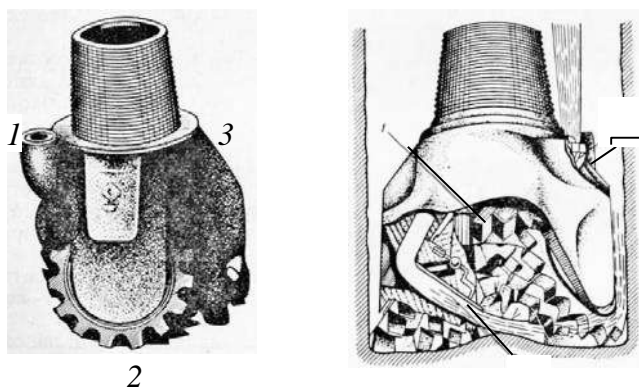


Рис. 1.65. Долота с гидродинамической насадкой, ориентированной вверх.

Эжектор (франц. *egoutteur* – выбрасывать) – *струйный насос*, в котором жидкость перемещается (циркулирует), увлекаемая потоком (струей) жидкости или газа.

Известно также применение долота с комбинированной асимметричной системой промывки: одна обычная периферийная насадка, один канал истечения струи через лапу и еще один промывочный канал, направленный вверх.

Результаты бурения долотами с асимметричной промывкой показали рост скорости проходки и ресурса вооружения и опор долота.

В малогабаритных долотах диаметром 112–46 мм традиционно применяется центральная система промывки забоя.

Гидромониторная струя жидкости, выходящая из сопла долота, распространяется в ограниченном пространстве. Расчет такой струи производится на основе теории затопленных струй.

Анализ показывает, что если струя жидкости к забою будет направлена по касательной, то её породоразрушающее действие может усилиться. В данном случае наибольший эффект может быть достигнут, если струя будет направлена по касательной непосредственно в зону работы зубца шарошечного долота.

Конструкция долот позволяет использовать удлиненные насадки и направлять струю под углом 15–25° к забою в приконтактную зону зубьев шарошки с породой. В приконтактной зоне зуба долота с забоем порода деформирована зубьями, имеет выступы, которые образуются при внедрении в забой, и может быть легко разрушена струей жидкости.

При бурении более прочных пород – твердых и очень твердых, динамическое давление струи должно обеспечить сдвиг и отрыв от поверхности забоя частицы разрушенной породы.

При внедрении зуба шарошечного долота в породу на забое образуются магистральные трещины, направленные от ядра сжатия к поверхности забоя. Скалывание породы по направлениям развития магистральных трещин приводит к образованию лунок выкола. Препятствием этому является угнетающее давление, которое связано с действием гидростатического давления столба жидкости, пластового давления и динамического потока струй жидкости из промывочных каналов долота.

Для эффективного отделения (отслаивания) от забоя отколотых зубьями кусочков породы необходимо направить поток жидкости в зону разрушения по направлению именно в образующуюся трещину отрыва (рис. 1.66).

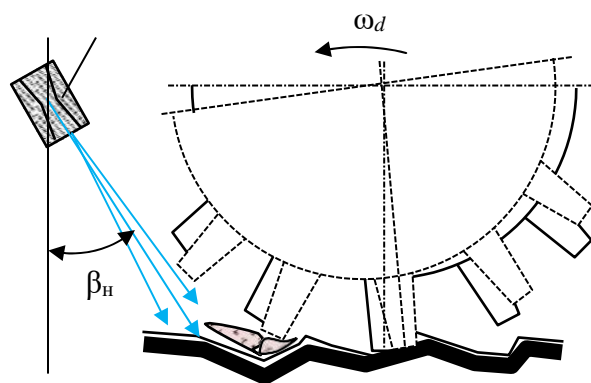


Рис. 1.66. Схема для определения рационального направления струи промывочного раствора из насадки .1

Представленная на рис. 1.66 модель интенсификации процесса разрушения твердой горной породы позволила повысить механическую скорость бурения на 30 %, а ресурс долот увеличить на 20 %.

1.7. Разрушение горных пород при вращательно-ударном, ударно-вращательном и ударном способах бурения

1.7.1. Разрушение горных пород при вращательно-ударном способе бурения

Эффективность вращательного бурения твердых горных пород алмазным и шарошечным буровым инструментом может быть существенно повышена за счет наложения высокочастотных ударных импульсов.

Вращательно-ударный способ бурения – это метод разрушения пород вследствие воздействия осевой нагрузки, крутящего момента, характерных для вращательного бурения, и динамической нагрузки, прилагаемой к буровому инструменту в режиме высокочастотных ударных импульсов малой и средней энергии.

Вследствие приложения высокочастотных ударных импульсов в горной породе развиваются дополнительные напряжения и формируются трещины. Особенно значительным становится эффект от ударных импульсов при бурении чрезвычайно твердых, хрупких и малоабразивных горных пород, поскольку применяемые осевые нагрузки на инструмент при вращательном бурении скважин диаметром 46, 59, 76 мм могут быть недостаточны для создания необходимых для объемного разрушения горных пород напряжений. При этом более вероятен недостаток разрушающих напряжений при алмазном бурении твердых и очень твердых горных пород коронками с увеличенной шириной матричного кольца (коронки для бурения снарядами со съемным керноприемником – ССК) и бурении долотами, поскольку в данных случаях особенно проблематично создание достаточных для разрушения контактных напряжений из-за увеличенной площади торца буровых инструментов. Повышение же осевой нагрузки до определенных пределов при вращательном бурении твердых горных пород сдерживается ограниченной прочностью бурильных колонн (особенно колонн ССК), их деформируемостью и, соответственно, вибрацией при бурении, ограничением мощности привода буровых станков при бурении на близких к предельным, по мощности привода, глубинах, наличием кривизны ствола скважины и др. В этих случаях дополнительным силовым фактором, способным интенсифицировать процесс разрушения горной породы, является ударный импульс малой и средней мощности, передаваемый буровой компоновке и буровому инструменту с высокой частотой.

Немаловажным обстоятельством, определяющим повышение эффективности бурения при наложении высокочастотной вибрации на буровую компоновку, является снижение коэффициента трения между колонной и стенкой скважины, что приводит к значительному улучшению условий работы деформированной бурильной колонны.

Так, например, вибрационный, с наложением крутильных колебаний, вид движения бурильной колонны и бурового инструмента преобразуется в более равномерный, максимально соответствующий оптимальным условиям передачи к буровому инструменту осевой нагрузки и крутящего момента.

Рост показателей вращательно-ударного бурения связан со снижением подклинок керна в колонковом снаряде, что также является следствием продольного вибрирования бурового снаряда.

1.7.2. Разрушение горных пород алмазным инструментом в режиме вращательно-ударного бурения

Анализ условий работы алмазных резцов показывает, что стойкость алмазов при вращении обусловлена прежде всего изгибающими напряжениями, а не напряжениями на раздавливание. Таким образом, имеющийся значительный резерв прочностных свойств резцов на сжатие при вращательном бурении не реализуется, поскольку повышение осевого усилия приводит к скалыванию резцов, испытывающих значительные поперечные нагрузки, сопровождающиеся ударами, характерными для процесса скалывания твердых и хрупких горных пород. Реализовать резерв прочности резцов в осевом направлении возможно за счет импульсного приложения нагрузки в направлении перпендикулярном плоскости забоя. В этом случае, в результате кратковременности действия ударного импульса силы трения на границе резец – горная порода не успевают развиться и тангенциальная составляющая разрушения породы, несмотря на передачу дополнительной энергии, увеличивается незначительно. При этом важным обстоятельством является вибрирование инструмента и ударный характер нагрузок, что приводит к снижению коэффициента трения и способствует скалыванию и отделению кусочков породы от забоя.

Таким образом, прилагая нагрузку в виде кратковременных импульсов, направленных перпендикулярно к плоскости забоя, можно передавать для разрушения горной породы большую энергию и интенсифицировать процесс вращательного бурения. При этом более полно будет использован потенциал прочности породоразрушающих резцов бурового инструмента.

На рис. 1.67, в приведена схема работы алмазного резца при вращательном бурении. Из данной схемы следует, что приложение ударного импульса интенсифицирует разрушение породы за счет повышения осевой силовой составляющей, что приводит к росту глубины внедрения резца и дополнительному развитию трещин предразрушения забоя. При этом тангенциальное усилие возрастает в меньшей степени в сравнении с вращательным бурением, что незначительно увеличивает износ и сохраняет работоспособность резцов.

При приложении к алмазной коронке ударных импульсов алмазы внедряются в породу, а избыточный запас энергии удара воспринимает матрица коронки. Повышение контактных напряжений и увеличение глубины внедрения алмазов в породу приводит к увеличению объема слоя породы, разрушаемого за один оборот. В результате отмечается образование крупных частиц шлама, происходит интенсивный абразивный износ матрицы и более активное, в сравнении с вращательным бурением, обнажение алмазов. Таким образом, в меньшей степени проявляются условия, приводящие к заполированию алмазов.

Практика гидроударно-алмазного бурения подтверждает чрезвычайно редкие случаи заполирования алмазов [31], что позволяет рекомендовать вращательно-ударное бурение алмазным инструментом горных пород, склонных вызывать заполирование алмазов.

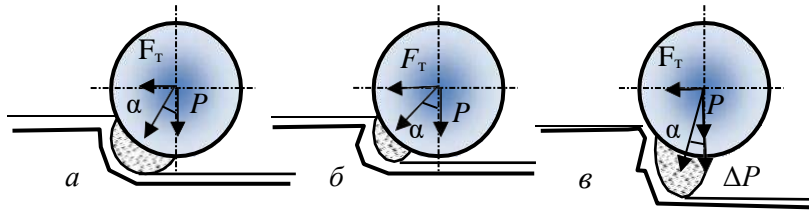


Рис. 1.67. Схемы для анализа процесса разрушения породы алмазным резцом при изменении усилия F_T в процессе вращательного бурения (а, б) и приложения ударного импульса ΔP (в).

На рис. 1.68 представлены результаты исследования влияния ударных импульсов на показатели бурения алмазными коронками диаметром 59 мм.

Как следует из графиков, зависимости изменения механической скорости бурения и проходки на коронку имеют оптимальное значение при 15–20 Дж. С увеличением твердости горных пород оптимальные значения величины энергии удара смещаются в сторону меньших значений энергии.

Осмотр алмазных коронок показал, что с увеличением твердости пород и энергии удара интенсивность износа алмазов увеличивается, что и приводит к снижению проходки на коронку.

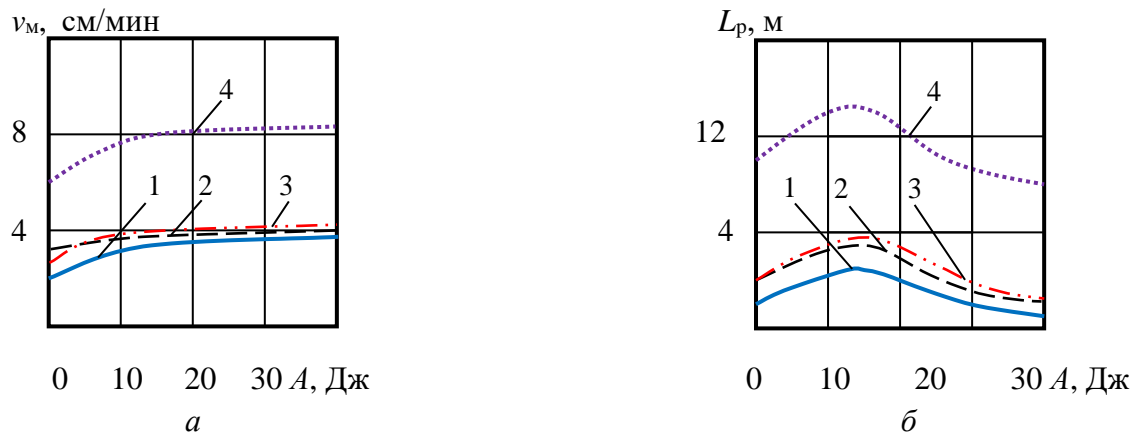


Рис. 1.68. Зависимости показателей бурения алмазной коронкой 01А3 от энергии удара A : а – механической скорости; б – проходки на коронку по породам: 1 – кварцит; 2 – гранит; 3 – лабрадорит; 4 – песчаник.

Рациональной для алмазных коронок диаметром 59 мм оказалась энергия удара 15 Дж, для коронок диаметром 76 мм – 20 Дж.

Оптимальная частота ударных импульсов $n_{уд}$, передаваемых породе, при вращательно-ударном бурении должна быть равна частоте циклов разрушения породы резцами.

Частота циклов разрушения породы за один оборот инструмента на забое $n_{ц}$ определится из соотношения длины периметра забоя радиусом R и интервала скола породы передней гранью резца $l_{ц}$ [12]:

$$n_{ц} = \frac{2\pi R}{l_{ц}}$$

Оптимальная частота ударных импульсов при принятом условии равенства частоте циклов разрушения породы резцами будет определяться из зависимости

$$n_{\text{уд}} = \frac{\omega n_{\text{ц}}}{n_{\text{р}}} = \frac{2\pi R \text{tg } \gamma_{\text{ск}}}{h_{\text{л}} n_{\text{р}}} \omega, \quad (1.2.)$$

где $h_{\text{л}}$ – глубина борозды разрушения резцом, м; $n_{\text{р}}$ – число активно работающих резцов в линии резания на торце коронки; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания породы резцом, град.

Из формулы 1.2. следует, что оптимальная частота ударов по забою пропорциональна частоте вращения инструмента, а значит, при повышении частоты вращения бурового инструмента частота ударных импульсов должна повышаться в равной степени. Действительно, опыт вращательно-ударного бурения свидетельствует, что с увеличением частоты вращения инструмента при постоянной частоте ударов эффективность наложения ударных импульсов снижается: рост механической скорости бурения при частоте вращения 300 мин^{-1} составил 1,5–2,0 раза, а при частоте вращения $1\ 000 \text{ мин}^{-1}$ – только 1,1–1,3 раза.

Рациональная частота вращения бурового инструмента с учетом абсолютного значения механической скорости бурения и ресурса инструмента, возможно, заключена между приведенными значениями частот вращения 300 и $1\ 000 \text{ мин}^{-1}$.

При известной частоте ударов $n_{\text{уд}}$, реализуемой гидроударником, которая может варьировать в пределах $2\ 500$ – $3\ 500$ ударов в минуту, важно определить рациональную частоту вращения бурового инструмента. С учетом зависимости для расчета числа активно работающих резцов $n_{\text{р}}$ из зависимости 1.2. получим

$$\omega = \frac{n_{\text{уд}} N_0 h}{2\pi R \text{tg } \gamma_{\text{ск}}} \quad (1.3.)$$

где N_0 – число резцов в линии резания на торце коронки (средняя линия торца матрицы на расстоянии от центра торца, равном R); h – глубина внедрения резца в породу.

Из приведенной зависимости следует, что для эффективной реализации вращательно-ударного алмазного бурения на высоких частотах вращения бурового инструмента следует применять забойные ударные машины, реализующие максимально возможные частоты ударов. Резерв повышения эффективности определяется также повышением глубины внедрения резцов в породу. Поэтому лучшие результаты бурения могут быть получены при использовании алмазного инструмента с заданным увеличенным выпуском резцов. Более высокой оптимальная частота вращения будет при бурении импрегнированными коронками, так как существенно возрастает число работающих резцов.

Результаты алмазного вращательно-ударного бурения в ПГО «Севзапгеология» (данные И. С. Афанасьева и др.) свидетельствуют, что лучшие результаты по механической скорости бурения получены при частотах вращения 300–780 мин⁻¹, при этом интенсивность роста механической скорости бурения импрегнированными коронками оказалась выше, чем при бурении однослойными. В то же время эффект применения высокочастотных гидроударников ГВ-6 и Г-59В снижается при использовании однослойных коронок с более крупными алмазами.

Осевая нагрузка при вращательно-ударном бурении играет не меньшую роль, чем частота вращения, и должна подбираться наряду с частотой вращения. Для месторождений Северо-Запада по результатам буровых работ определено, что при частоте вращения инструмента 430 мин⁻¹ оптимальными для однослойных коронок будут осевые нагрузки 1 200–1 600 даН, а для импрегнированных – 1 100–1 800 даН.

При алмазном вращательно-ударном бурении на забой необходимо подавать пониженное количество промывочной жидкости, соответствующее требованиям бурения алмазным инструментом. В то же время для работы гидроударника требуется значительное количество промывочной жидкости, существенно превышающее нужное количество по условию эффективного разрушения породы алмазным инструментом.

Для уменьшения количества поступающей на забой промывочной жидкости в корпусе кернорвателя сверлят отверстия или применяют специальные делители потока промывочной жидкости.

Максимальный эффект от применения вращательно-ударного бурения в различных производственных организациях получен при бурении твердых, хрупких и малоабразивных горных пород, при разрушении которых алмазными коронками имеет место заполирование алмазов: механическая скорость возрастает на 30–40 %, углубление за рейс увеличивается на 15–25 %, ресурс коронок повышается на 35–50 %, выход керна возрастает с 70 до 80–90 %, снижается интенсивность естественного искривления скважин.

1.7.3. Разрушение горных пород шарошечными долотами в режиме вращательно-ударного бурения

Интенсификация процесса разрушения горных пород наложением ударных импульсов возможна и при бурении шарошечными долотами. Особенно оправдано применение ударных забойных машин при бурении достаточно твердых горных пород, для разрушения которых требуется значительная осевая нагрузка на долота.

Опыт применения (по данным А. Т. Киселева и В. Г. Кардыша) гидроударных забойных машин показал, что вследствие роста удельных контактных напряжений в породе при бурении горных пород VII–XII категорий по буримости при осевой нагрузке 15–20 кН и частоте вращения 280–430 мин⁻¹ средний ресурс двухшарошечных долот диаметром 76 мм возрос вследствие применения высокочастотных гидроударников с 11 до 19 м, а скорость бурения увеличилась с 3,4 до 4,8 м/ч.

При этом достигнут более значительный рост показателей при бурении трехшарошечными долотами в сравнении с двухшарошечными, что подтверждает вывод о влиянии на эффективность разрушения породы прежде всего контактного напряжения, которое существенно возрастает при наложении ударного импульса. У трехшарошечных долот, как известно, площадь контакта вставок с породой забоя несколько выше, чем у двухшарошечных, а значит, роль дополнительной ударной нагрузки оказалась более значительной.

Применение гидроударников при бурении шарошечными долотами позволяет бурить на пониженных осевых нагрузках, но с более высокой механической скоростью, что в результате и сказывается на ресурсе долот.

При бурении шарошечными долотами в режиме вращательно- ударного бурения отмечено, что с повышением частоты вращения бурового инструмента эффективность разрушения породы снижается, т. е. остается справедливой закономерность, отмеченная ранее для вращательно- ударного бурения алмазным инструментом.

В зависимости от диаметра долот рекомендуются для использования гидроударники с различной энергией удара: для бурения долотами диаметром 59 мм подходят высокочастотные ударные машины с энергией удара 15 Дж, для долот диаметром 76 мм гидроударники со средней частотой удара и энергией удара 60–80 Дж, а при бурении долотами диаметром 93 мм целесообразно использование гидроударников с высокой энергией и малой частотой ударного импульса.

Таким образом, для бурения долотами больших размеров более подходит ударно-вращательный способ бурения, при котором преобладает ударное разрушение горной породы над режимом вращательного бурения.

1.7.4. Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения

Ударно-вращательный способ бурения – способ разрушения горных пород ударными нагрузками, под действием которых происходит скалывание и дробление породы, а осевая нагрузка на инструмент и вращение бурового инструмента исполняют вспомогательную роль, обеспечивая процесс ударного разрушения породы.

Он применяется при бурении скважин погружными пневмоударниками и шпуров в твердых горных породах перфораторами.

Ударно-вращательный способ характеризуется высокими значениями энергии удара (не менее 40 Дж), малыми значениями частоты вращения бурового инструмента (10–60 мин⁻¹) и осевой нагрузки (300–600 даН на инструмент диаметром 59–105 мм).

Вращение инструмента в сочетании с частотой ударов обеспечивает определенную схему поражения забоя (расстояние между ударами вставок о породу), которая может быть эффективной только при определенном соотношении частот удара и вращения.

Привод вращения бурового инструмента при реализации ударно- вращательного бурения может быть:

- от бурового станка, т. е. за счет вращения всей бурильной колонны;
- поворотного механизма, обеспечивающего поворот долота во взаимодействии с циклом ударных нагрузок;
- возможно вращение колонны забойным гидродвигателем.

Осевая нагрузка при этом способе бурения носит вспомогательный характер и должна обеспечивать не внедрение резцов инструмента в породу, как это происходит при вращательном способе бурения, а постоянный контакт долота или коронки с забоем.

Результаты экспериментов, приведенные в, показывают, что при малых значениях энергии удара статическая осевая нагрузка способствует снижению энергоемкости разрушения, однако дальнейшее повышение энергии удара приводит к преобладающему влиянию на процесс разрушения динамической силы и влияние статической нагрузки становится несущественным (рис. 1.69).

Очевидно, что при ударно-вращательном бурении значительный недостаток осевого усилия приведет к отскакиванию долота от забоя и эффект передачи ударного импульса будет снижен.

Чрезмерная осевая нагрузка приводит к тому, что породоразрушающие вставки будут находиться в постоянно заглубленном в породу положении, а это не позволит реализовать задаваемую вращением инструмента эффективную схему поражения забоя между ударами. В то же время высокая осевая нагрузка и задавливание резцов в породу при наложении мощного ударного импульса приводят к разрушению породоразрушающих вставок.

При ударно-вращательном бурении крайне важна схема поражения забоя породоразрушающими вставками бурового инструмента.

В представлении результаты оценки влияния схемы нанесения ударов по забою клиновидными (острым и притупленным, рис. 1.70, *а, б*) инденторами. Эти исследования важны при обосновании параметров технологии ударно-вращательного бурения, в частности частоты вращения инструмента.

При рассмотрении трех схем поражения забоя (рис. 1.70, *а, б, в*) установлено, что минимальная энергоемкость разрушения достигается при реализации второй схемы поражения забоя острым индентором.

Результаты исследований приведены в табл. 5. Анализ данных показывает, что энергоемкость разрушения снижается при нанесении ударов по подготовленному и предварительно ослабленному забою. В этих условиях будут достаточно эффективны острые инденторы.

При радиальном равномерном размещении резцов на торце коронки или долота вторая схема поражения забоя (рис. 1.70) может рассматриваться как основная при обосновании параметров режима бурения.

Таблица 1.4.

Энергоемкость разрушения породы при различных схемах поражения забоя

Форма торца индентора	Энергоемкость разрушения, Дж/см ³		
	Схема поражения забоя на рис. 1.70, <i>а</i>	Схема поражения забоя на рис. 1.70, <i>б</i>	Схема поражения забоя на рис. 1.70, <i>в</i>
Притупленный клин	2 000	260	370
Острый клин	400	160	280

Обязательным условием осуществления рациональной схемы нанесения ударов является смещение (отставание) ударов от предыдущих на определенное расстояние. Это, прежде всего, связано с тем, что вследствие вращения инструмента удар по забою наносится не под прямым углом, а с некоторым отклонением (косой удар). Именно поэтому для рационального использования энергии удара следует обеспечивать некоторое смещение центра удара, а расстояние K от следа первого удара может составлять 0,6–0,75.

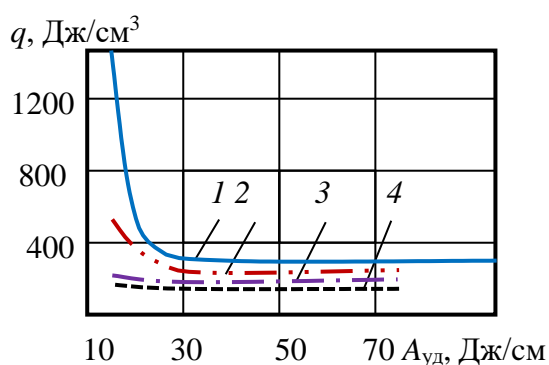


Рис. 1.69. Зависимости энергоемкости разрушения q притупленным клином от энергии удара $A_{уд}$ при различных значениях статической нагрузки: 1 – 0,1 кН/см; 2 – 1 кН/см; 3 – 3,3 кН/см; 4 – 6,7 кН/см

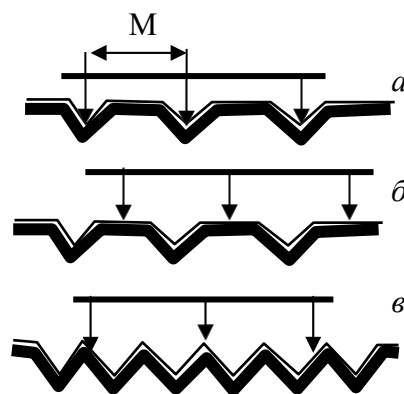


Рис. 1.70. Схемы нанесения ударов в плоскости забоя ($M = 16$ мм): *а* – лунки не взаимодействуют друг с другом; *б* – повторные удары наносятся между лунками; *в* – удары по нарушенному забою

На рис. 1.71. дана зависимость механической скорости бурения при пневмоударном бурении долотами, вооруженными лезвиями с радиальным расположением от частоты вращения. Из графиков следует, что в диапазоне частот вращения 0–100 мин⁻¹ отмечается 2–3 экстремальных значения. Представленные графики подтверждают наличие рациональной схемы поражения забоя, которая определяется частотой вращения инструмента. Минимальная скорость бурения (точки 2, 2^I) получена при совпадении лунок разрушения с повторным нанесением ударов. Максимальная скорость бурения (точки 1, 1^I, 3, 3^I) получена при нанесении ударов по выступам, расположенным между лунками разрушения.

В случае если породоразрушающие вставки располагаются на торце инструмента не по радиальной схеме, зависимость механической скорости бурения от частоты вращения будет иной, отличной от представленной на рис. 1.72. Поперечное расположение лезвий на торце, а также применение сферических породоразрушающих вставок приводит к тому, что зависимость механической скорости бурения от частоты вращения инструмента получила форму параболы с одним максимумом (рис. 1.73).

При этом характерно, что для менее твердых пород максимум частоты вращения, при котором достигнута наиболее высокая механическая скорость бурения, смещен в сторону больших значений (~ 50 мин⁻¹), а при бурении твердых и крепких пород максимальная скорость бурения получена при малых значениях частоты вращения (~ 30 мин⁻¹). На рис. 1.73 эта закономерность отмечена восходящей стрелкой через вершины максимальных значений графиков скорости бурения.

Зависимость скорости ударно-вращательного бурения от осевой нагрузки определяется тем, что с ее увеличением в начале рейса механическая скорость бурения возрастает, но в течение рейса снижается и тем интенсивнее, чем она выше (рис. 1.74). Эти данные показывают, что чрезмерные осевые нагрузки при ударно-вращательном бурении приводят к более интенсивному разрушению породоразрушающих вставок.

Зависимость скорости бурения от давления сжатого воздуха показывает практически прямопропорциональный рост скорости бурения при повышении давления.

При этом повышение давления сжатого воздуха, например, при бурении бесклапанными пневмоударниками высокого давления фирмы *Atlas Copco* типа *Cop* до значений 2–2,5 МПа приводит к значительному росту механической скорости, предельные значения которой не установлены.

Более высокая скорость бурения достигается в более твердых гранитах в сравнении с существенно менее твердым известняком.

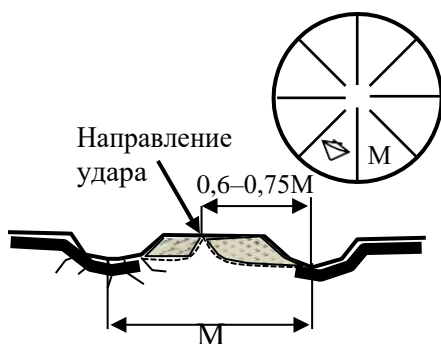


Рис. 1.71. Схема поражения забоя при ударно-вращательном бурении.

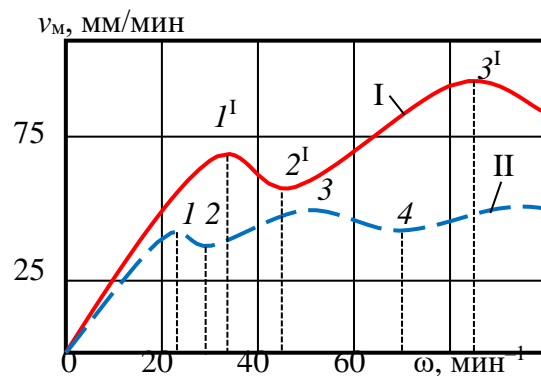


Рис. 1.72. Зависимость механической скорости бурения от частоты вращения: I – известняк VII категории по буримости; II – кварцит X категории по буримости

Пневмоударники типа *Cop 32*, *Cop 42*, *Cop 52*, *Cop 62* предназначены для бурения скважин диаметром 85–165 мм, в том числе по технологиям *OD*, *ODEX* и *DEPS*.

OD, *ODEX*, *DEPS* – системы ударно-вращательного бурения по валунно-галечникам с одновременным креплением ствола скважины обсадной колонной компании *Atlas Copco*: *OD* (*over drilling*) – погружной пневмоударник инициирует удары как по вращаемой обсадной колонне с породоразрушающим башмаком, так и внутренней бурильной колонне;

ODEX (*over drilling excentrics*) – усовершенствованная система *OD*, в которой происходит бурение расширенного ствола скважины специальным эксцентричным долотом и одновременное его крепление обсадной колонной;

DEPS – удары по обсадной и бурильной колонне наносятся двумя различными пневмоударниками, что удваивает ударную мощность системы и позволяет бурить более глубокие скважины.

Забойные ударные машины *Cop 32* работают при давлении воздуха 0,6–1,2 МПа с частотой 1 300–1 650 ударов в минуту и предназначены для бурения скважин диаметром 85–100 мм. Пневмоударники *Cop 42* работают при давлении 0,6–2,5 МПа с частотой ударов 1300–2100 ударов в минуту и предназначены для бурения скважин диаметром 105–125 мм.

В настоящее время ударно-вращательное бурение пневмоударниками высокого давления является наиболее производительным из всех существующих механических способов бурения.

Этот способ бурения становится все более популярным при выполнении геологоразведочных работ, что объясняется его более низкой стоимостью. В то же время шламовая проба не может по качеству быть сопоставима с керном, но в настоящее время техника бурения и техническое оснащение методов оценки пробы достаточно усовершенствованы и соответствуют требованиям геологической службы.

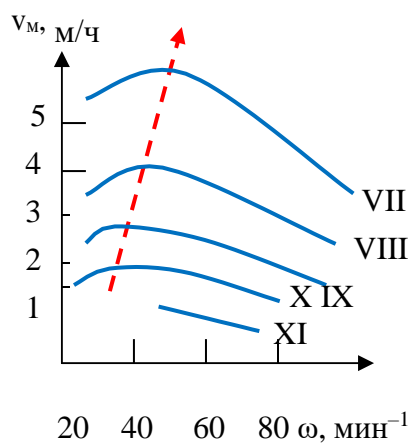


Рис. 1.73. Зависимость скорости бурения от частоты вращения снаряда в породах различной категории по буримости долотами с поперечно-радиальным расположением вставок на торце.

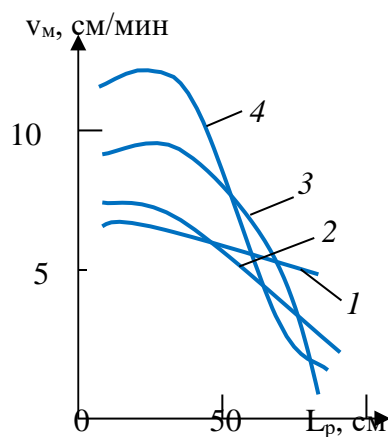


Рис. 1.74. Зависимость скорости бурения от длины рейса при частоте вращения снаряда 40 мин⁻¹ и различных осевых нагрузках: 1, 2, 3, 4 – осевая нагрузка 5, 10, 15 и 20 кН соответственно.

На сегодняшний день в таких странах, как США, ЮАР, Австралия, в силу сложившихся тенденций значительная часть скважин бурится с опробованием, которое основывается на комбинированном варианте: до рудной зоны бурение ведется с обратной циркуляцией очистного агента с отбором шламовой пробы, а по рудной зоне производится отбор керна.

Таким образом, ударно-вращательное бурение получает все большее распространение при проведении геологоразведочных работ, появляются новые мощные забойные машины и инструменты, совершенствуется технология бурения и методика опробования по шламу.

С повышением глубины скважины вследствие увеличения сопротивлений и давления воздуха скорость бурения снижается. Например, при повышении глубины скважины от 100 до 200 м скорость бурения снизилась на 35 %. Поэтому с глубиной снижается производительность бурения пневмоударниками, наблюдается намокание шлама и образование сальников, осложнены условия опробования вследствие влияния подземных вод.

При этом важно подчеркнуть, что эффективность пневмоударного бурения в слабообводненных породах снижается, если используется низкое давление воздуха в пределах 0,3–0,5 МПа. При бурении пневмоударниками высокого давления подобные проблемы могут возникнуть только при значительной (более 500 м) глубине скважин в связи со снижением давления подаваемого воздуха вследствие роста аэродинамических сопротивлений с глубиной скважины, что ведет к ухудшению выноса шлама, образованию сальников и осложнениям при подъеме инструмента.

Одним из средств борьбы с осложнениями в этих условиях является применение воздуха с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В то же время известно, что применение смеси воздуха и ПАВ дает снижение механической скорости бурения вследствие падения ударной мощности забойной машины. Например, при расходе ПАВ в пределах 5–6 л/мин с изменением концентрации в растворе от 0,5 до 4 % скорость бурения понижается незначительно (в пределах 10 %), а при повышении концентрации ПАВ до 5 % и более ведет к снижению механической скорости на 25–35 %.

Других особенностей бурения с ПАВ, которые бы могли повлиять на выбор параметров режима бурения, в практике не отмечено.

1.7.5. Разрушение горных пород при ударном способе бурения

Ударный способ разрушения горных пород относится к наиболее древним. В настоящее время он реализуется при проведении геологоразведочных работ как ударно-канатный и ударно-забивной. Ударно-канатный способ бурения чаще всего применяют при разведочных работах на россыпных месторождениях, а ударно-забивной – при бурении всухую рыхлых и мягких пород с целью получения качественной пробы.

Различают также ударно-штанговое бурение, которое вместе с ударно-канатным относится к ударно-поворотному способу бурения.

Породоразрушающие инструменты, применяемые при ударно-канатном бурении имеют клиновидную форму рабочей торцевой поверхности (рис. 1.75, а, б, в). Основными элементами таких долот являются лезвие 1, щеки 2, корпус 3 и резьбовая головка 4 для присоединения к буровому снаряду.

Лезвие долота имеет следующие параметры:

- угол приострения α ;
- длину, которая определяет диаметр скважины;
- форму, которая может быть плоской (рис. 1.75, а), вогнутой (рис. 1.75.б) или дугообразной (рис. 1.75, в).

У долот может быть различным и количество лезвий: у плоских долот одно лезвие,

крестовых – два пересекающихся лезвия, двутавровых – одно основное и два дополнительных по краям и др.

Усилия, разрушающие породу при ударном бурении, носят динамический характер, а разрушение происходит за счет дробления, смятия и скалывания породы.

При внедрении лезвия долота в твердую хрупкую породу под его торцом она дробится, а разрушенная вытесняется из под торца долота. Разрушение породы определяется влиянием ряда факторов, таких как сила удара P_d , количество ударов m , наносимых по забою, величина угла поворота долота после каждого удара.

Внедрение бурового инструмента в породу сопровождается образованием четырех зон разрушения (рис. 1.76) [26]. Величина и соотношение этих зон зависят от свойств породы, определяющих ее способность разрушаться под действием ударного импульса, формы лезвий долота и их числа, величины ударного импульса и др.

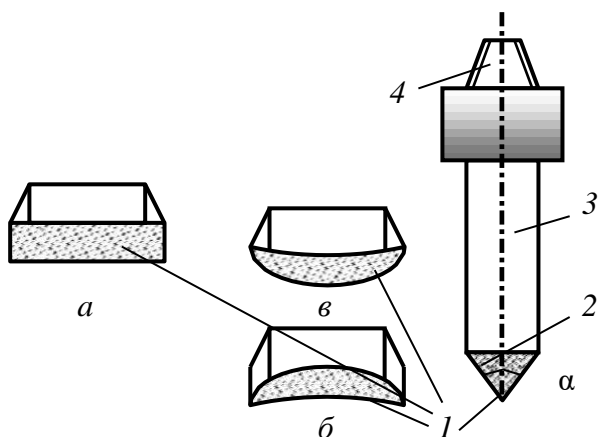


Рис. 1.75. Долото для ударного бурения:
a – плоское; *б* – вогнутое; *в* – дугообразное

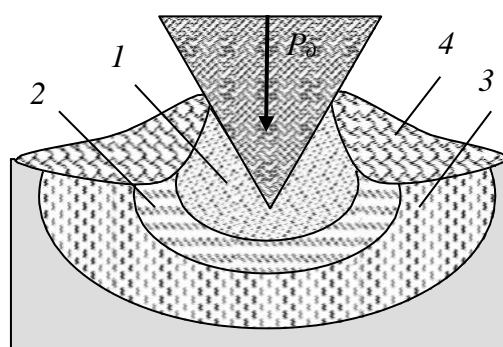


Рис. 1.76. Схема внедрения бурового инструмента в породу:
1 – зона дробления; *2* – зона разрушения;
3 – зона трещинообразования; *4* – зона скола.

1.8. Взрывное разрушение

1.8.1. Понятие о взрыве

Взрывные работы широко применяют в геологоразведочном деле и при добыче полезных ископаемых. Взрывным способом создают котлованы, дамбы, плотины, дороги и другие сооружения, при которых применяют взрывы на сброс или выброс. Особое место занимают взрывные работы при проведении горноразведочных работ.

В геологоразведке взрывные работы применяют при сейсморазведке для возбуждения упругих волн, по скорости распространения которых определяют свойства горных пород, выделяют геологические структуры и наличие залежей углеводородов и других полезных ископаемых.

Взрывным способом ликвидируют аварии при бурении скважин, повышают дебит газа и нефти за счет увеличения трещиноватости пластов. Взрывные работы используют при тушении пожаров.

При проведении горноразведочных горных выработок взрыванием обеспечивается формирование канав и разрушение породы (отбойка) в забое горной выработки.

Технология разрушения горных пород взрывом существенно усовершенствовалась при появлении короткозамедленного взрывания.

Взрывные работы характеризуются высокой производительностью и экономичностью, поэтому они нашли широкое применение при проведении горно-разведочных выработок, особенно для разрушения твердых горных пород.

Впервые задача физической сущности взрыва была исследована М. В. Ломоносовым, в работе «О природе и рождении селитры» в 1748 г. Им дано определение взрыва как очень быстрого выделения значительного количества энергии и большого объема газов.

В современной интерпретации взрыв – процесс сверхзвукового физического или химического превращения взрывчатого вещества за счет прохождения по нему детонационной волны, сопровождающейся переходом потенциальной энергии этого вещества или продуктов его превращения в кинетическую.

Взрывчатым веществом называют смеси и химические соединения, способные под влиянием внешнего воздействия (нагрева, удара, трения) взрываться, т. е. чрезвычайно быстро превращаться в другие соединения с образованием большого количества тепла и газов.

Таким образом, взрыв, взрывчатое превращение – это быстро протекающая в веществе химическая реакция, сопровождающаяся образованием большого количества газов и значительным выделением тепла, в результате чего газы нагреваются до высокой температуры, а в месте нахождения взрывчатого вещества развивается высокое давление. Взрывчатое вещество применяют в зарядах, под которыми понимают определенную массу вещества, подготовленную к взрыву.

Скорость взрывчатого разложения внутри заряда взрывчатого вещества может быть разной и в значительной степени определяет разрушительное действие взрыва на окружающую среду.

По характеру воздействия на горную породу взрывчатые вещества делятся на две группы:

- бризантные;
- метательные (пороха).

Среди бризантных взрывчатых веществ в особую группу выделяют обладающие высокой чувствительностью инициирующие вещества, которые применяют в качестве средств инициирования (детонаторы).

Промышленные взрывчатые вещества предназначаются для дробления, разрушения и перемещения горных пород.

Существуют три формы химических превращений взрывчатых веществ:

- медленное химическое превращение;
- горение;
- детонация.

Медленное химическое превращение протекает при низких температурах по всему объему вещества.

При горении передача тепла от слоя к слою происходит в результате теплопроводности. Скорость горения может быть от долей сантиметра до десятков метров в секунду.

Взрыв, распространяющийся с постоянной и высокой скоростью, называют детонацией. При детонации энергия по заряду взрывчатого вещества распространяется со скоростью 2–8 тысяч в секунду.

Быстрое химическое и физическое превращение вещества, сопровождается мгновенным переходом потенциальной энергии в тепловую, резким повышением давления на окружающую среду и звуковым эффектом. По своей природе взрывы делятся на:

- физические, которые приводят только к физическим преобразованиям веществ, например беспламенное взрывание с помощью сжатого воздуха;

- химические, при которых наблюдаются быстрые химические реакции с выделением тепла;
- ядерные, в основе которых реакции деления ядер вещества с образованием новых элементов.

При взрывных работах на горных предприятиях применяют химические взрывы.

Физическая сущность детонации. Ударная волна характеризуется резким скачкообразным изменением параметров вещества – давления, плотности, температуры и скорости. Поэтому детонационная волна от ударной отличается тем, что за фронтом ударной волны идет зона химической реакции, где выделяется энергия взрывчатого превращения, часть которой расходуется на поддержание устойчивого распространения детонации.

Промежуточным между горением и детонацией является взрывное горение, которое от основных форм отличается непостоянством скорости. Формы взрывчатого превращения в зависимости от условий могут переходить одна в другую (горение в детонацию и наоборот). Порохам присуще сравнительно медленное разложение в форме горения, поэтому они оказывают на внешнюю среду преимущественно метательное действие.

Ударная волна, проходящая по взрывчатому веществу, сжимает и разогревает его, вызывая химическую реакцию. Реакция сопровождается выделением большого количества тепла, которое трансформируется в энергию сжатых газов и передается в головную ударную волну, компенсируя потери ее энергии на сжатие вещества (рис. 1.77).

При этом начинается химическая реакция и давление достигает максимального значения p_{\max} при объеме V_{\min} . Реакция развивается с выделением тепла и расширением продуктов взрыва, давление при этом падает, а объем увеличивается. Заканчивается реакция в точке N на ударной диабате продуктов взрыва, называемой точкой Чепмена–Жуге, с параметрами $p_{\text{ж}}$ и $V_{\text{ж}}$. При этом прямая 2 соединяет параметры состояния исходного вещества с параметрами всплеска в состоянии максимального сжатия и завершения реакции.

Вещество в детонационной волне последовательно проходит все состояния по прямой ANM . Участок AN соответствует зоне сжатия в ударной волне, участок NM – зоне химических реакций.

По гидродинамической теории детонации взрывчатое вещество характеризуется ударной адиабатой 1, а конечные продукты – адиабатой 3. Продолжительность химической реакции в детонационной волне составляет 10^{-6} – 10^{-7} с.

Скорость детонации $\Omega_{\text{д}}$, скорость движения продуктов взрыва $\Omega_{\text{п}}$ и скорость звука в продуктах взрыва C связаны соотношением $\Omega_{\text{д}} = \Omega_{\text{п}} + C$.

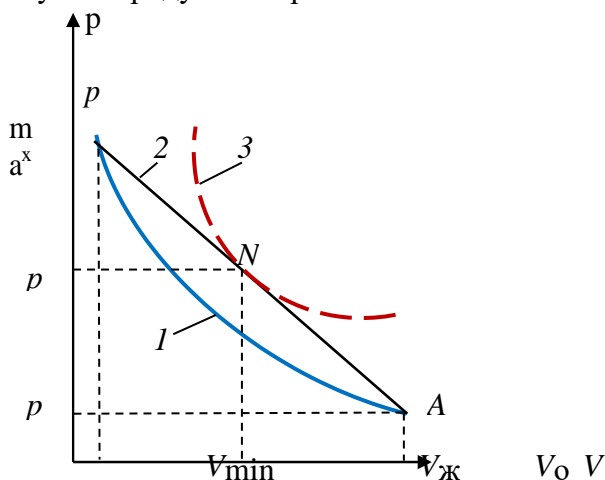


Рис. 1.77. Изменение состояния взрывчатого вещества в детонационной волне

1.8.2. Механизм разрушения пород взрывом

В результате взрывного разрушения за счет высокой скорости приложения нагрузки и деформирования среды образуется множество трещин в отличие от статического разрушения, для которого характерно образование единичных трещин.

В безграничной среде, где влияние свободной поверхности мало, взрывное разрушение протекает двустадийно.

Первичное разрушение происходит на динамическом фронте дробления – поверхности, где достигается предельное упругое состояние среды и образуются макротрещины по двум механизмам: сколом – при достижении предельных сдвиговых напряжений (в ближней к центру взрыва зоне, где напряжения сжимающие), отрывом – при достижении прочности на отрыв (в дальней зоне, где действуют растягивающие напряжения). Преобладающая масса среды на фронте дробления разрушается отрывом, так как прочность на сдвиг в хрупких средах и горных породах значительно превосходит прочность на отрыв. В результате образуется зона радиальных трещин.

Вторичное разрушение протекает при последующем сдвиговом деформировании нарушенной среды. Оно преобладает около взрывной полости, где деформации имеют наибольшее значение, являются основной причиной переизмельчения среды и бесполезных тепловых потерь энергии, обусловленных внутренним трением в разрушенной среде. Трещины при вторичном взрывном разрушении ориентированы беспорядочно. Это так называемая зона дробления. Влияние вторичного дробления растёт с деформацией, поэтому его наибольший вклад будет в случае сильного взрыва (ядерного), когда степень деформирования существенно возрастает по сравнению с химическим взрывчатым веществом.

Размер зоны дробления R существенно зависит от интенсивности взрывного источника. Если начальное давление продуктов взрыва близко к прочности на сжатие, зона дробления может вообще отсутствовать. В этом случае преобладает разрушение отрывом, а зона радиальных трещин начинается от взрывной полости.

При взрыве вблизи свободной поверхности массива описанный механизм разрушения дополняется отколом – разрушением путем отрыва под действием растягивающих радиальных напряжений, возникающих при отражении взрывной волны от свободной поверхности (рис. 1.78). При отколе трещины ориентированы в основном параллельно свободной поверхности. Максимальная глубина зоны откольного разрушения не превышает половины длины фазы сжимающих напряжений взрывной волны.

Качество взрывного разрушения характеризуется распределением кусков по размеру. При взрыве в однородной среде (без начальной трещиноватости) установлена чёткая корреляция между механизмом разрушения и гранулометрическим составом разрушенной среды. Первичное разрушение приводит к образованию в горной массе примерно равного количества кусков различного размера, при вторичном разрушении большая часть кусков имеет приблизительно одинаковый размер.

В реальных горных породах всегда существуют дефекты (неоднородности) различного масштаба – от естественной трещиноватости массива до дислокаций в зернах минералов, которые приводят к зарождению трещин и определяют гранулометрический состав разрушенной взрывом горной породы. Преимущественное влияние тех или иных неоднородностей зависит от величины действующих напряжений и проявляется дифференцированно в зависимости от расстояния от центра взрыва и интенсивности взрывного источника. Около взрывной полости, где действуют максимальные напряжения, разрушению могут подвергаться даже самые прочные минералы, входящие в горную породу. Наибольшее влияние на формирование гранулометрического состава оказывают макро- и микротрещиноватость и слоистость.

Например, при слабом взрыве в породе с чётко выраженной блочной структурой

гранулометрический состав определяется в основном начальной системой трещин. На взрывное разрушение, т. е. на создание новых поверхностей в массиве, расходуется около 1 % от всей энергии взрыва.

Если взрыв производят в слоистых породах в направлении, перпендикулярно слоям, то сдвиг породы происходит вдоль слоев, а отрыв перпендикулярном к слоям. Так как предел прочности на сдвиг будет минимален в направлении вдоль слоев, то минимальная энергоёмкость разрушения будет тогда, когда сдвиг происходит вдоль слоистости.

Управление разрушающим действием взрыва состоит в возможном регулировании среднего размера куска и набора фракций. С этой целью применяют короткозамедленное и буферное взрывание.

Для разрушения горных пород взрывом в практике геологоразведочных работ используют шпуровые, скважинные, котловые, камерные и накладные заряды.

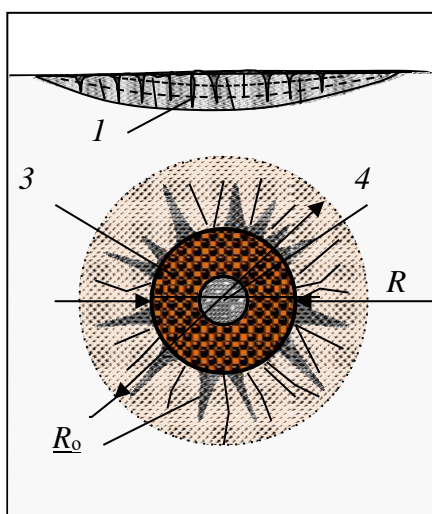


Рис. 1.78. Схема зон взрывного разрушения: 1 – откольного; 2 – радиальных трещин; 3 – дробления; 4 – полость.

Шпуровые заряды выполняют размещением взрывчатого вещества в шпуре (рис. 1.79.). Длина заряда может составлять до 2–3 м при диаметре 32 или 40 мм. Шпур заполняется на $\frac{2}{3}$ – $\frac{3}{4}$ длины взрывчатым веществом – патронированным или россыпным 1, а оставшая часть забойкой 2 (специальной пробкой или породой). Иницирование взрыва осуществляют при помощи средств взрывания – электродетонаторов 3, соединяемых в схему электропроводом 4.

Для взрывания одиночных зарядов или группы из нескольких зарядов могут применяться огнепроводные шнуры, капсуля-детонаторы и детонирующие шнуры.

В большинстве случаев донные части шпуров после взрывания остаются неразрушенными. Эти части носят название «стаканов», а отношение полезной длины шпура к его полной длине называется коэффициентом использования шпура (КИШ). Величина этого коэффициента составляет 0,8–0,9.

Для повышения коэффициента полезного действия взрыва (КИШ) следует использовать наиболее плотную забойку шпура, а также иницировать взрыв в направлении от дна шпура (обратная схема иницирования), рис. 1.79.

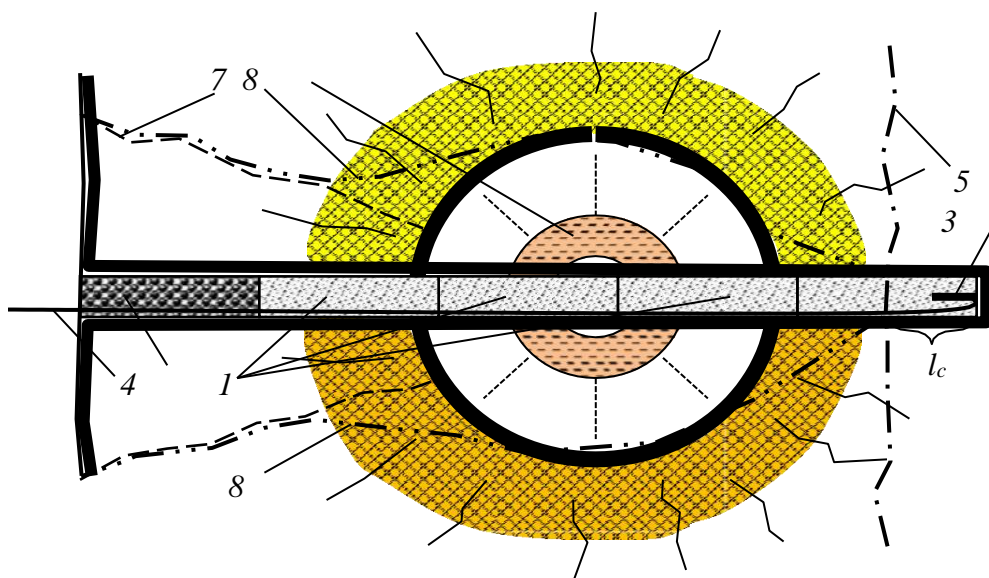


Рис. 1.79. Схема шпурового заряда и его действия при отбойке породы в забое горной выработки: 1 – патроны взрывчатого вещества; 2 – забойка шпура; 3 – электродетонатор; 4 – провод для соединения электродетонаторов; 5 – линия отрыва породы при взрыве группы шпуров в забое выработки; 6 – центр взрыва с расходящимися от центра зонами раздробленной и разбитой трещинами породы; 7 – линия отрыва породы; 8 – линия разрушенной породы в случае взрывания одного заряда; l_c – длина «стакана».

Действие взрыва приводит к дроблению и распространению трещин в породе в направлении от центра взрыва 6. Направление действия взрыва определяется наличием свободной поверхности, к которой распространяются трещины отрыва 7. При взрыве одного заряда образуется достаточно узкая полость, контур которой примерно соответствует линии 8. Взрыв всех шпуров, входящих в систему отбойки породы, приводит к отделению породы по линии 5.

Шпуровые заряды позволяют производить сравнительно равномерное дробление породы и применяются в самых разнообразных горно-геологических условиях.

Метод скважинных зарядов заключается в том, что во взрываемой породе бурят скважину (глубина более 5 м и диаметр более 75 мм), в которую помещают удлиненные заряды. Этот метод применяют при выполнении взрывных работ на карьерах, когда глубина шпуров недостаточна для размещения нужного количества взрывчатого вещества или если требуется получить большое количество равномерно раздробленной породы. При зарядании скважины для повышения эффективности взрыва более мощные взрывчатые вещества, если применяют взрывчатку различных сортов, рекомендуется помещать в нижней части скважины.

Метод котловых зарядов состоит в том, что шпур или скважину над забоем путем многократного взрывания в них небольших зарядов взрывчатых веществ расширяют до образования камеры, близкой по форме к шару. В эту камеру (котел) после очистки ее от разрушенной породы помещают расчетный заряд взрывчатого вещества для основного взрывания. Операции по получению котлов называют простреливанием шпуров или скважин, а шпур или скважину с котлом в призабойной части – котловым шпуром или котловой скважиной.

Метод котловых зарядов применяется тогда, когда расчетный заряд при заданных глубине шпура или скважины не может поместиться в шпуре или скважине и в тех случаях, если линия сопротивления породы (расстояние от центра заряда до поверхности)

настолько велика, что заряд взрывчатого вещества не в состоянии его преодолеть без концентрации заданного объема взрывчатки.

Метод камерных зарядов заключается в том, что отбойка породы производится путем взрывания сосредоточенных зарядов большой величины (до нескольких десятков и даже сотен тонн), которые помещают в специальные горные выработки, называемые зарядными камерами или просто камерами.

Накладные заряды применяют для разрушения крупных обломков, глыб, больших камней путем наложения взрывчатого вещества непосредственно на объект.

Кроме перечисленных методов взрывания различают еще взрывание на выброс, сброс и др.

Наиболее часто при проведении горноразведочных выработок для разрушения породы применяют шпуровые заряды. Принятые схемы расположения шпуров в забое должны обеспечить отрыв породы в забое выработки в соответствии с ее проектным контуром, а также равномерное дробление породы.

Эффективность буровзрывных работ зависит от количества и схемы расположения шпуров в забое. По назначению шпуры делятся на врубовые, вспомогательные, оконтуривающие.

Врубовые шпуры предназначены для предварительного образования вруба (углубления) с целью создания дополнительных плоскостей обнажения в массиве породы в пределах контура выработки. Врубовые шпуры взрываются первыми, создавая поверхность обнажения, в направлении которой отбивают породу вспомогательные, а затем и оконтуривающие шпуры. Вспомогательные шпуры служат для расширения выемки, образованной при взрывании врубовых шпуров. Применяются вспомогательные шпуры при проходке выработок большого поперечного сечения.

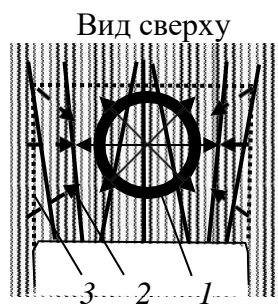


Рис. 1.80. Схема расположения шпуров с центральным клиновым врубом (шпуры 1–6): 1 – очаг взрыва врубовых шпуров; 2 – направление отбойки породы при взрыве оконтуривающих шпуров; 3 – контур отбитой, в результате взрывания шпуров, породы.

Оконтуривающие шпуры служат клиновым врубом, форма которого и расположение заданы с учетом условий залегания горных пород и отбойки породы до пределов проектного контура сечения выработки. Поэтому располагаются они по периметру выработки и взрываются с задержкой последними.

Схема расположения шпуров с центральным клиновым врубом (рис. 1.80) применяется при вертикальной слоистости горных пород, когда слои совпадают с направлением продвижения горной выработки или в случае разрушения равномернозернистой породы. Для образования клинового вруба бурят четное количество врубовых шпуров, которые располагают в двух вертикальных плоскостях, направленных под углом к центру выработки.

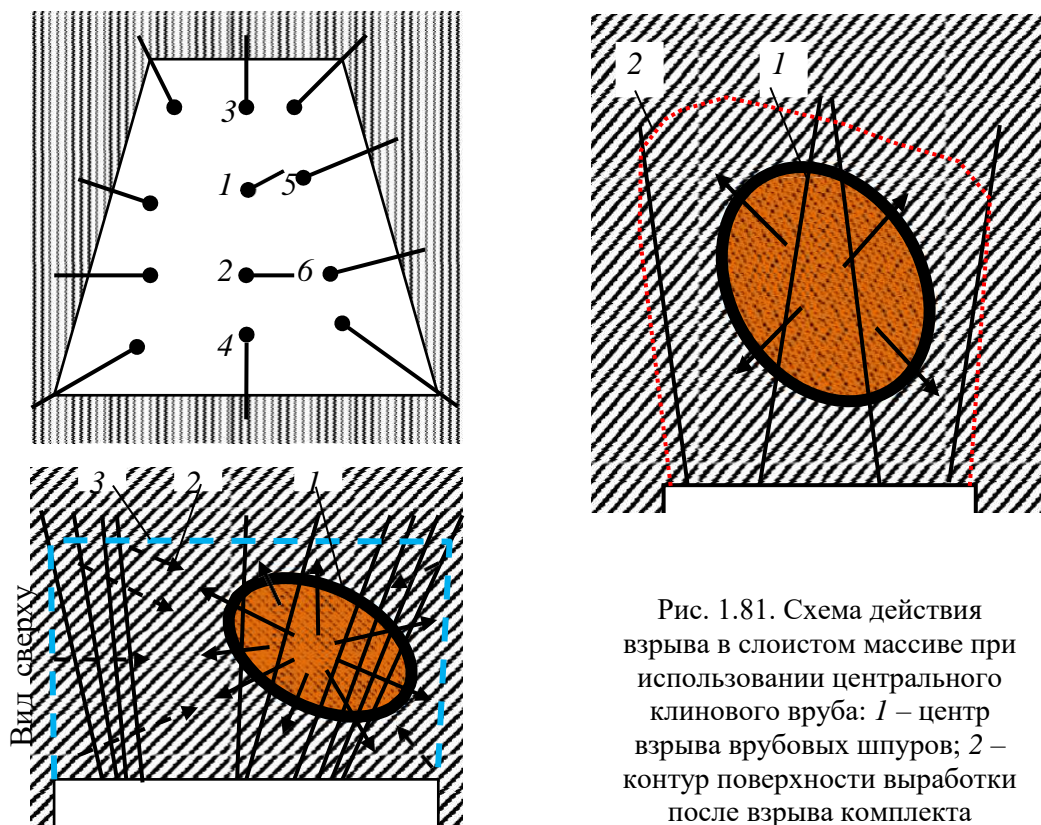


Рис. 1.81. Схема действия взрыва в слоистом массиве при использовании центрального клинового вруба: 1 – центр взрыва врубовых шпуров; 2 – контур поверхности выработки после взрыва комплекта шпуров.

При взрывании шпуров первыми приводят в действие врубовые шпуры, взрыв которых создает полость в центральной части массива породы 1 (рис. 1.81). Вслед за врубовыми шпурами с замедлением 0,1–0,2 сек. производят взрывание вспомогательных и оконтуривающих шпуров. При взрыве оконтуривающих шпуров порода отбивается в направлении центра взрыва врубовых шпуров 2. В результате взрывания всего комплекта шпуров образуется новая поверхность горной выработки 3.

В ряде случаев после взрывания врубовых шпуров и замедления взрывают вспомогательные шпуры и только после очередного микрозамедления – оконтуривающие. Последняя схема применяется в случае проходки горных выработок большого сечения.

В случае если при вертикальном расположении слоев горной породы они пересекают выработку под углом со стороны правой стенки, вруб направляется в сторону правой же стенки выработки, т. е. в направлении слоев горных пород. Данная схема расположения вруба позволяет направить энергию взрыва в массив породы с наибольшей прочностью, поскольку порода в этом случае более деформируема, активнее разрушается вкрест слоистости и менее податлива в направлении слоев.

Отмеченная закономерность предопределена анизотропией механических свойств слоистых горных пород, в которых деформации и разрушающие напряжения развиваются неравномерно, а преимущественно в направлении минимальной прочности.

При смещении врубовых шпуров от оси выработки вправо центр взрыва врубовых шпуров 1 смещается от оси выработки также вправо, а взрывание оконтуривающих шпуров с замедлением позволит добиться более равномерного и полного разрушения массива породы перед выработкой и создания новой поверхности выработки в соответствии с проектным контуром 3.

При симметричном же расположении шпуров горная порода со стороны, совпадающей с направлением слоев, будет разрушаться не в полной мере, а с противоположной стороны более интенсивно. В результате не будет сохранено прямолинейное проектное направление горной выработки и нарушена форма ее поперечного сечения.

2. БУРОВОЙ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

2.1. Буровые коронки твердосплавные

Буровые коронки являются важнейшей частью бурового оборудования. По характеру рабочей поверхности они делятся на 2 типа: твердосплавные и алмазные. Они используются для вращательного бурения скважин сравнительно небольшого диаметра, например:

- геологоразведочных;
- взрывных;
- шпуров и т.д.

Коронки твердосплавные внешне представляют собой короткий цилиндр с твердосплавными пластинами с одной стороны и резьбой – с другой. Сама коронка изготавливается из стали, а пластины – специального высокопрочного сплава. Каждая коронка рассчитана на бурение породы определенной категории. Очистка забоя в большинстве случаев осуществляется с помощью промывочной жидкости.



Рис. 2.1. Коронка твердосплавная КТ-2 Ø 112.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 108 мм.



Рис.2.2. Коронка твердосплавная КТ-2 Ø 132.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 127 мм.



Рис.2.3. Коронка твердосплавная КТ-2 Ø 151.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 146 мм.



Рис. 2.4. Коронка твердосплавная КТ-2 Ø 172.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 168 мм.



Рис. 2.5. Коронка твердосплавная КТ-2 Ø 76.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 73 мм.



Рис.2.6. Коронка твердосплавная КТ-2 Ø 93.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 89 мм.



Рис. 2.7. Коронка твердосплавная М-5 Ø 112.

Применяется при бурении мягких пород до IV категории. Глины, слабосцементированные песчаники, гипсы, ангидриды, глинистые сланцы с прослоями валунно-галечных отложений. Диаметр колонковой трубы 89мм.



Рис.2.8. Коронка твердосплавная СА-4 Ø 112.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 108мм.



Рис.2.9. Коронка твердосплавная СА-4 Ø 132.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 127 мм.



Рис. 2.10. Коронка твердосплавная СА-4 Ø 151.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 146 мм.



Рис. 2.11. Коронка твердосплавная СА-4 Ø 76.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 73 мм.



Рис. 2.12. Коронка твердосплавная СА-4 Ø 93.

Применяется при бурении абразивных, монокристаллических, слабо трещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириды, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 89 мм.



Рис. 2.13. Коронка твердосплавная СА-6 Ø 112.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Диаметр колонковой трубы 108 мм.



Рис. 2.14. Коронка твердосплавная СА-6 Ø 132.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириды, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 127 мм.



Рис. 2.15. Коронка твердосплавная СА-6 Ø 151.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириды, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 146 мм.



Рис.2. 16. Коронка твердосплавная СА-6 Ø 59.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириды, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 57 мм.



Рис. 2.17. Коронка твердосплавная СА-6 Ø 76.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириды, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 73 мм.



Рис.2. 18. Коронка твердосплавная СА-6 Ø 93.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириды, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 89 мм.



Рис.2. 19. Коронка твердосплавная CM-5 Ø 112.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 108 мм.



Рис. 2.20. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 132.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 127 мм.



Рис.2. 21. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 59.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 57 мм.



Рис. 2.22. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 93.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 89 мм.



Рис. 2.23. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 76.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 73 мм.



Рис. 2.24. Коронка твердосплавная СМ-6 Ø 151.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, серпентиниты, перидотиты. Диаметр колонковой трубы 146 мм.



Рис.2. 25. Резец РП-3 У 33.00.00.000.

Зуб бара предназначен для усиления твердосплавного вооружения при обсаживании скважины.

2.2. Коронки алмазные импрегнированные

Импрегированные алмазные коронки предназначены для бурения пород V111-X11 категорий и характеризуются равномерным распределением по всему объему матриц относительно мелких природных или синтетических алмазов. Подобное строение импрегнированной коронки обеспечивает ее эффективность при бурении по твердым породам.



Рис.2.26. Алмазная коронка 02ИЗ, 02И4.

Категория буримости пород V111- X11, малоабразивные, очень крепкие, плотные монолитные, тонкозернистые, скрытокристаллические, абразивные, мелко- и скрытозернистые. Диаметр бурения 36, 46, 59, 76, 93 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис.2.27. Импригнированная буровая коронка 08ИЗ.

Категория буримости пород 1Х-Х1, мало- и среднеабразивные, очень крепкие, плотные монолитные, тонкозернистые, скрытокристаллические, абразивные, мелко- и скрыто-зернистые. Диаметр бурения 46 мм. Бурение бескерновое многозабойное.



Рис. 2. 28. Импригнированная буровая коронка БИТ.

Категория буримости пород V11-Х, монолитные и среднетрещиноватые. Диаметр бурения 59, 76, 93, 112, 132 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.29. Импригнированная буровая коронка К-01-3.

Категория буримости пород Х-Х1, монолитные, слабо-трещиноватые, мало-абразивные и абразивные. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.



Рис. 2.30. Импригнированная буровая коронка К- 08.

Категория буримости пород V111-X, плотные, средне-трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.



Рис. 2.31. Импригнированная буровая коронка К-09И2Г.

Категория буримости пород 1X-X1, плотные, средне-трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.



Рис. 2.32. Импригнированная буровая коронка 17ИЗ.

Категория буримости пород V11-X1, монолитные, плотные, среднетрещиноватые, мало- и среднеабразивные. Диаметр бурения 76 мм. Бурение с отбором керна с комплексом КССК-76.



Рис. 2.33. Импригнированная буровая коронка БИТ ССК 59.

Категория буримости пород V11-X, монолитные и среднетрещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.



Рис. 2.34. Импригнированная буровая коронка 21М3.

Категория буримости пород 1Х-Х1, твердые. Диаметр бурения 46, 59,76, 93, 112, 136, 172, 222 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.35. Импригнированная буровая коронка 23ИЗ.

Категория буримости пород V111-1Х, средне-твердые, твердые, слабо-абразивные и частично трещиноватые. Диаметр бурения 59,6; 75,3; 95,6; 122 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК.



Рис. 2.36. Импригнированная буровая коронка 27ИЗ.

Категория буримости пород V111-1Х, средне-твердые, твердые, слабо-абразивные и частично трещиноватые. Диаметр бурения 59,6; 76 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК.



Рис. 2.37. Импригнированная буровая коронка 28ИЗ.

Категория буримости пород V111-1Х, средне-твердые, слабо-абразивные и частично трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59, 76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.38. Импригнированная буровая коронка 28И4.

Категория буримости пород 1Х-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 46, 59, 76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.39. Импригнированная буровая коронка 26И.

Категория буримости пород V11-Х11, абразивные и трещиноватые. Диаметр бурения 75,3/60,2; 91,8/76; 95,6/76; 117,5/100; 143,5/123,8 мм. Для забуривания или при установке обсадных труб.



Рис. 2. 40. Импригнированная буровая коронка 28И.

Категория буримости пород 1Х-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 46/31; 59/42; 76/58; 93/73; 112/92; 151/132 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.41. Импригнированная буровая коронка 29И.

Категория буримости пород 1X-X11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/85 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК.



Рис. 2.42. Импригнированная буровая коронка 30И.

Категория буримости пород 1X-X1, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 75,3 мм. Бурение сплошным забоем с комплексом ССК.



Рис. 2.43. Импригнированная буровая коронка 32И.

Категория буримости пород 1X-X11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 75,3/47; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.44. Импригнированная буровая коронка 33И.

Категория буримости пород 1X-X11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 46/31,7 66,8/50,4; 76/57; 76/57,5; 76/61,7; 56/45,2 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.45. Импригнированная буровая коронка 36И.

Категория буримости пород 1Х-Х11, средней твердости до твердых, слабо абразивные, частично трещиноватые. Диаметр бурения 46/31,7 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.46. Импригнированная буровая коронка 37И.

Категория буримости пород 1Х-Х11, для крепких и очень крепких пород незначительно разрушенных. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.47. Импригнированная буровая коронка 38И.

Категория буримости пород Х-Х1, для сложных горно-геологических условий, сильно раздробленные или трещиноватые породы. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122 / 85 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.48. Импригнированная буровая коронка 34И КЛМ.

Категория буримости пород V11-Х1, для монолитных, слаботрещиноватых и трещиноватых пород. Диаметр бурения 75,3/40 мм. Бурение с обратной промывкой, гидротранспортом керна с комплексом ССК-НК.



Рис. 2.49. Импригнированная буровая коронка 23И.

Категория буримости порд 1X-X11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95.6/63.5; 122/85 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.50. Импригнированная буровая коронка 27И.

Категория буримости порд V11-X11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 46,5/30,3; 56,5/39; 59.6/42; 75.3/56 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.51. Импригнированная буровая коронка K04 КП.

Категория буримости порд 1X-X11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 76/48 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.52. Импригнированная буровая коронка K04.

Категория буримости порд 1X-X11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 59/35,4; 76 /48 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.53. Импригнированная буровая коронка К-01-3.

Категория буримости порд V111-X1, монокристаллы, слабо трещиноватые и трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

2.3. Коронки алмазные однослойные

Алмазы в однослойных коронках располагаются в верхнем слое матрицы. Используются крупные природные и синтетические алмазы, которые обеспечивают высокую скорость проходки и высокую эффективность буровых работ. Алмазы в однослойных коронках располагают по определенной схеме, которая меняется в зависимости от размеров используемых алмазов, что в значительной мере определяет ресурс коронки и скорость бурения.



Рис. 2.54. Однослойная буровая коронка 01A3, 01A4.

Категория буримости порд V11-1X, малоабразивные, монокристаллы, трещиноватые. Диаметр бурения 36, 46, 59, 76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.55. Однослойная буровая коронка 08A3.

Категория буримости порд V11-1X, мало и средне абразивные. Диаметр бурения 46 мм. Бурение бескерновое многозабойное.



Рис. 2.56. Однослойная буровая коронка 09А3.

Категория буримости пород V11-1X, мало и средне абразивные. Диаметр бурения 59 мм. Бурение бескерновое многозабойное.



Рис. 2.57. Однослойная буровая коронка K16.

Категория буримости пород V1- V111, перемежающиеся. Диаметр бурения 76 мм. Бурение с отбором керна комплексом КССК-76.



Рис. 2.58 Однослойная буровая коронка K01.

Категория буримости пород V11- 1X, плотные слабо и средне трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК-59.



Рис. 2.59. Однослойная буровая коронка K01-1.

Категория буримости пород V11- 1X, плотные. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК-59.



Рис. 2.60. Однослойная буровая коронка K01-2.

Категория буримости пород V11- 1X, средне трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК-59.



Рис. 2.61. Однослойная буровая коронка 01КС.

Категория буримости пород V-1X, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,76, 93, 112, 132, 151, 245/225 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.62. Однослойная буровая коронка 02КС.

Категория буримости пород V-1X, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,76, 93, 112, 132, 151 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.63. Однослойная буровая коронка 01А3СВ.

Категория буримости пород V111, монолитные и слабо трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59,76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.64. Однослойная буровая коронка 01A4CB.

Категория буримости порд V111, монокристаллические и слабо трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59,76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.



Рис. 2.65. Однослойная буровая коронка 07KC.

Категория буримости порд V-1X, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/83 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.66. Однослойная буровая коронка 07KC2.

Категория буримости порд V-V111, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/83 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.67. Однослойная буровая коронка 07KC-0.

Категория буримости порд V-V111, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/83 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.68. Однослойная буровая коронка К-06.

Категория буримости пород V11-1X, плотные, слабо и средне трещиноватые. Диаметр бурения 75,3; 95,6 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.69. Однослойная буровая коронка 07КС-2-0.

Категория буримости пород V11-1X, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.70. Однослойная буровая коронка 23А.

Категория буримости пород V111-X, малоабразивные, абразивные, плотные, монолитные, мелко и среднезернистые, трещиноватые. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.71. Однослойная буровая коронка 29А.

Категория буримости пород V111-1X, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.



Рис. 2.72. Однослойная буровая коронка 31А.

Категория буримости пород V111-X, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 93, 112 мм. Бурение сплошным зубом.



Рис. 2.73 Однослойная буровая коронка ГБА.

Категория буримости пород V1-V111, абразивные горные породы. Диаметр бурения 215,9/100 мм. Бурение с отбором керна.



Рис. 2.74. Однослойная буровая коронка Б-1.

Категория буримости пород V1-1X, резко перемежающиеся горные породы. Диаметр бурения 117,5/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

2.4. Алмазные расширители

Алмазные расширители предназначены для поддержания заданного диаметра скважины. В буровом снаряде расширитель устанавливается между коронкой и колонковой трубой. Расширители заменяются, когда их диаметр становится меньше диаметра новой коронки. Поэтому только самая последняя часть калибруется при установке новой коронки. Алмазный расширитель помогает стабилизировать колонковую трубу. Выпускаются расширители для всех типов колонковых труб и коронок. В расширителях для армирования секторов применяются специально отобранные природные или синтетические алмазы.



Рис. 2.75. Алмазный расширитель РСА.

Категория буримости пород 1X- X, мало и средне абразивные. Диаметр бурения 46,4; 59,4; 76,4; 93,4 мм.



Рис. 2.76. Алмазный расширитель РСА-1.

Категория буримости пород V11 - X, плотные, слабо и средне трещиноватые. Диаметр бурения 59,4 мм.



Рис. 2.77. Алмазный расширитель РЦК.

Категория буримости пород V1 - X, плотные, малообразивные и средне трещиноватые. Диаметр бурения 76,4 мм.



Рис. 2.78. Алмазный расширитель РСА 23П.

Категория буримости пород V11–X11, твердые, очень твердые, средне абразивные и трещиноватые. Диаметр бурения 60; 75,7; 96 мм.



Рис. 2.79. Алмазный расширитель РСА 27П.

Категория буримости пород V11–X1, плотные и слабо трещиноватые. Диаметр бурения 60 мм.



Рис. 2.80. Алмазный расширитель РСН.

Категория буримости пород V11–X11, твердые, очень твердые, среднеабразивные и трещиноватые, плотные. Диаметр бурения 46,4; 59,4; 76,4; 93,4 мм.



Рис. 2.81. Алмазный расширитель РАС.

Категория буримости пород V11–X, плотные, малоабразивные и средне трещиноватые. Диаметр бурения 112,4; 136,7; 172,7 мм.



Рис. 2.82. Алмазный расширитель РСА 33.

Категория буримости пород V111–X1, монолитные, слаботрещиноватые и трещиноватые. Диаметр бурения 76,4 мм.



Рис. 2.83. Переходник центратор ПЦ.

Переходник центратор ПЦ служит для центрирования верхнего конца колонковой трубы в скважине с целью снижения искривления скважины и вибрации снаряда, а также для снижения износа колонковой трубы. Служит для соединения бурильных труб с колонковой трубой или шламовой трубой. Диаметр бурения 59,6; 75,3; 96; 122,6 мм.



Рис. 2.84. Башмаки обсадных труб.

Башмаки обсадных труб применяются для забуривания или при установке обсадных труб в скважины. Изготавливаются стандартных и иных размеров.

2.5. Лопастные породоразрушающие инструменты

Лопастные породоразрушающие инструменты состоят из корпуса и лопастей (рис. 2.85.). В верхней части корпуса нарезается присоединительная резьба, а в нижней части просверливаются сквозные промывочные отверстия для подачи промывочной жидкости на забой. Боковые калибрующие и другие рабочие поверхности лопастей обычно покрывают релитом, чугуном или армируют порошкообразным карбидом вольфрама.

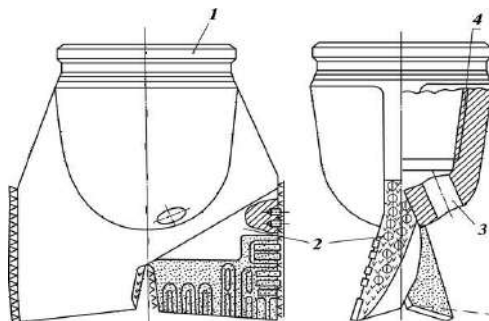


Рис. 2.85. Двухлопастное долото:
1 – корпус; 2 – лопасти; 3 – промывочные отверстия;
4 – присоединительная резьба.

Лопастные долота выпускаются следующих пяти разновидностей:
2Л – двухлопастные;
3Л – трехлопастные (рис. 2.86.);
ЗИР – трехлопастные истирающе-режущие;
БИР – шестилопастные истирающе-режущие;
П – пикообразные (однолопастные).

Лопастные породоразрушающие инструменты в соответствии с их назначением производятся четырех типов: М, МС, МСЗ и С.
Породоразрушающие инструменты разновидностей 2Л и 3Л выпускаются двух типов: М и МС.

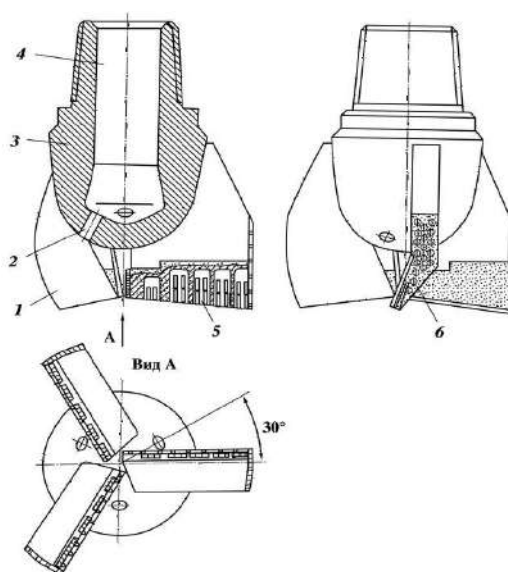


Рис. 2.86. Трехлопастное долото:
1 – лопасть; 2 – промывочное отверстие; 3 – корпус; 4 – присоединительная резьба;
5 – твердосплавные пластины; 6 – армирование торца лопасти.

Конструктивно породоразрушающие инструменты типа М отличаются от долот типа МС армированием передней поверхности зерновым релитом в пазах, прорезанных по определенной схеме с учетом характера износа лопастей и усилением с наружи чугуном. В породоразрушающих инструментах типа МС вместо релита в тех же пазах устанавливаются и припаиваются твердосплавные победитовые пластины прямоугольной формы. Породоразрушающие инструменты разновидности ЗИР относятся к типу МСЗ, а разновидности БИР – к типу С. Пикообразные породоразрушающие инструменты изготавливают двух типов: ПЦ – для разбуривания цементных пробок и металлических деталей низа обсадных колонн (рис. 3); ПР – для расширения ствола скважины.

Согласно ОСТ 26-02-1282-75 все лопастные породоразрушающие инструменты должны изготавливаться только с ниппельной присоединительной резьбой, выполненной соответствии с ГОСТ 20692-75, диаметром от 94,4 до 469,9 мм. По способу соединения корпуса с лопастями выделяются цельнокованные породоразрушающие инструменты и инструменты сварные, т.е. с приварными к корпусу лопастями. По конструкции промывочного устройства выделяются породоразрушающие инструменты с обычной и гидромониторной промывкой.

Примеры условной записи лопастных породоразрушающих инструментов (долот):
 2Л-76М: 2Л – двухлопастное; 76 – номинальный диаметр, мм; М – для мягких пород;
 3Л-161М: 3Л – трехлопастное; 161 – номинальный диаметр, мм; М – для мягких пород.

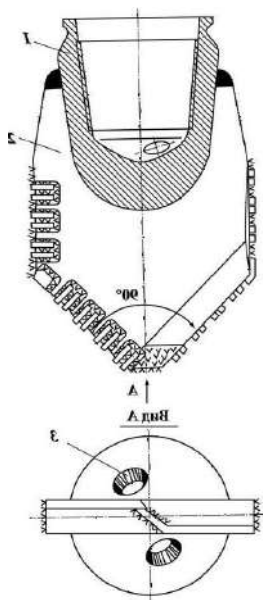


Рис.2.87. Пикообразное долото для разбуривания цементных стаканов в обсадной колонне:
 1 – корпус; 2 – лопасть; 3 – промывочные отверстия.

2.6. Шарошечные породоразрушающие инструменты

Впервые породоразрушающий шарошечный инструмент был изобретен и изготовлен в США предпринимателем Юзом в 1909 г.

Шарошечные породоразрушающие инструменты относятся к группе инструментов дробяще-скалывающего действия, за исключением одношарошечных. В настоящее время шарошечные породоразрушающие инструменты производят в двух-, трех- и многошарошечном исполнении. Свое название они получили по конструктивному элементу – зубчатому катку – шарошке, на которой кольцевыми рядами (венцами) располагаются элементы вооружения (зубцы), разрушающие горную породу.

Породоразрушающие инструменты в двух- и трехшарошечном исполнении

составляют группу инструментов, разрушающих породу сплошным забоем. Их называют буровыми шарошечными долотами.

Шарошечное долото (рис.2.88.) состоит из секций, сваренных между собой. Верхняя часть сваренных между собой секций образует корпус. На верхнем конце корпуса нарезается присоединительная резьба. Число секций равно числу шарошек. В шарошечных долотах выделяют:

- вооружение долота – совокупность всех зубцов на всех шарошках;
- опору долота – совокупность подшипников всех шарошек;
- систему промывки долота
- совокупность всех промывочных узлов долота.

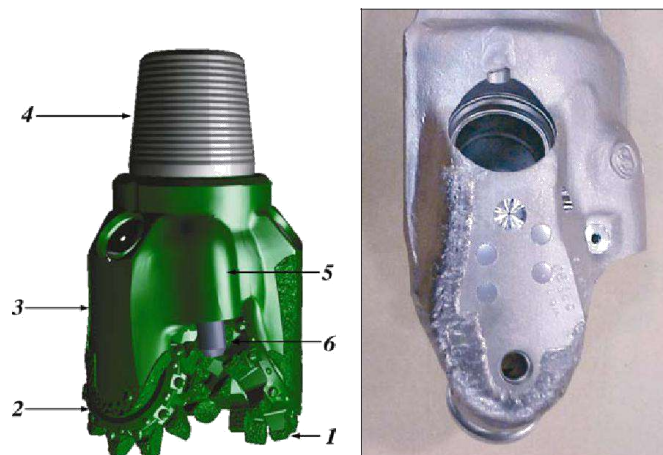


Рис.2.88. Общий вид трехшарошечного долота:
1 – шарошка; 2 – козырек лапы; 3 – лапа; 4 – присоединительная резьба;
5 – насадочный прилив; 6 – насадка.

Рис.2.89. Общий вид лапы.

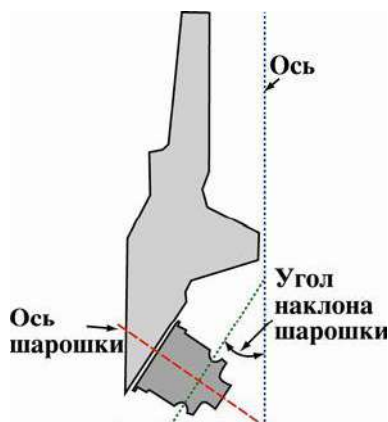


Рис.2.90. Основные элементы лапы

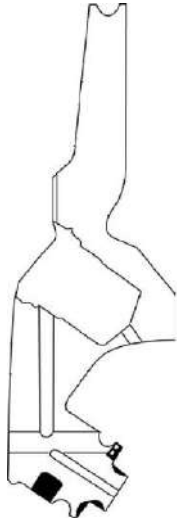


Рис. 2.91. Схема лапы с внутренними каналами.



Рис. 2.92. Общий вид цапфы.



Рис. 2.93. Общий вид шарошки с фрезерованным вооружением.

Собранная секция состоит из лапы (рис.2.89, 2.90, 2.91) заканчивающейся цапфой (рис.2.92.). На цапфе на подшипниках смонтирована свободно вращающаяся шарошка (рис.2.93.). Взаимная ориентация секций в долоте осуществляется с помощью двухгранного угла, фрезеруемого на каждой лапе, и сборочных штифтов.

Вооружение шарошечных породоразрушающих инструментов

Вооружение предназначено для разрушения горной породы. Шарошки, как правило, имеют коническую форму и могут быть одно- (рис.2.94, 2.95) и многоконусными. Тело одноконусной шарошки (рис 2.94) ограничено двумя коническими поверхностями. Конус 1 называется основным, а конус 2 – обратным.

Тело двухконусной шарошки (рис.2.96) ограничено тремя коническими поверхностями, а трехконусной – четырьмя. Конусы, расположенные между основным и обратным конусами, называются дополнительными. Вершины дополнительных конусов направлены к оси долота и их боковые поверхности взаимодействуют с забоем. Дополнительные конусы принято нумеровать, начиная от основного конуса в сторону обратного.

Шарошка характеризуется следующими геометрическими параметрами: диаметр $d_{ш}$, углы основного 2α и дополнительного $2\alpha_i$ конусов, высота $H_{ш}$.

Угол при вершине основного конуса определяет объем шарошки.

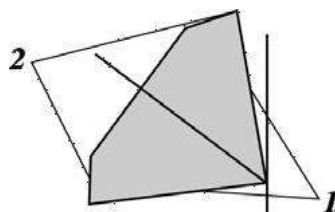


Рис.2.94. Тело одноконусной шарошки.

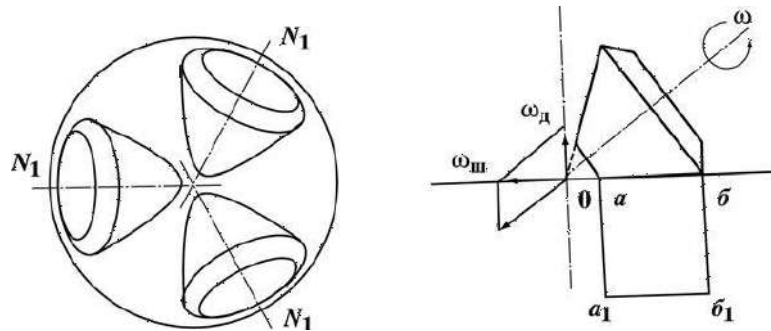


Рис. 2.95. Кинематика одноконусной шарошки:
 ω_d - угловая скорость вращения долота; $\omega_{ш}$ - угловая скорость шарошки;
 $a, a_1, б, б_1$ - проекция образующей корпуса шарошки на забой.

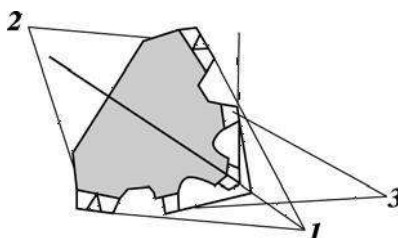


Рис. 2.96. Тело двухконусной шарошки:
 1 – основной конус; 2 – обратный конус;
 3 – дополнительный конус.

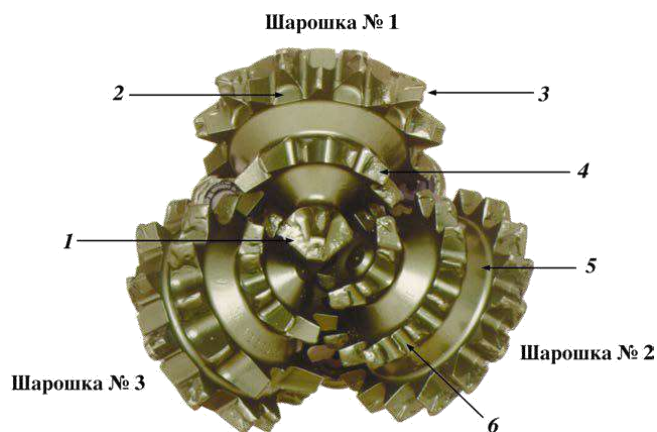


Рис.2.97. Основные элементы шарошек долота с твердосплавным вооружением:
 1 – внутренние венцы; 2 – пирамидальный резец внутреннего венца; 3 – зазор между
резцами; 4 – резцы калибрующего венца; 5 – межвенцовая канавка

Шарошки принято нумеровать в зависимости от того, какое место занимает первый венец по отношению к оси долота (рис.2.98, 2.99). Шарошке, у которой первый венец расположен в зоне оси долота и разрушает центральную часть забоя, присваивается

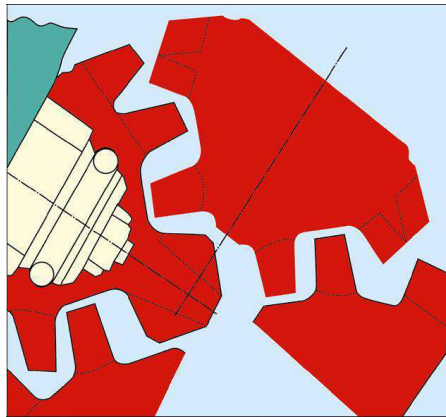


Рис.2.98. Смещение осей шарошек.

первый номер. Шарошка, первый венец которой разрушает кольцо, прилегающее к центральной части забоя, является второй.

Расположение шарошек относительно оси долота определяется следующими параметрами:

- углом наклона оси шарошки к оси долота β ;
- выносом вершины шарошки за ось долота, f ;
- величиной смещения осей шарошек в плане k .

Угол наклона оси шарошки к оси долота для современных серийных шарошечных долот лежит в пределах $51^{\circ} 57' 30''$ и определяется типом долота.

Величина выноса вершины шарошки за ось долота определяется типоразмером долота и лежит в пределах 0–12 мм.

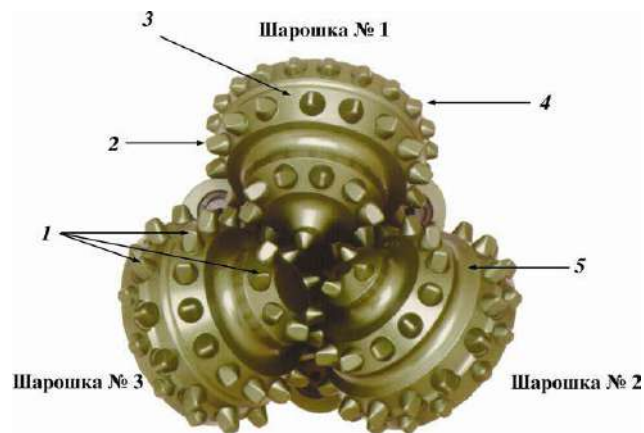


Рис. 2.99. Основные элементы шарошек долота с фрезерованным вооружением:
 1 – центральная точка; 2 – уменьшенный зубец; 3 – зубцы калибрующего венца;
 4 – защитное покрытие; 5 – межвенцовая канавка; 6 – зазор между зубцами.

В плане оси шарошек расположены относительно друг друга под углом 120° , а по отношению к оси долота возможны два варианта расположения:

- долота с несмещенными осями шарошек, оси которых пересекаются в одной точке на оси долота;
- долота со смещенными осями шарошек (рис.2.100).

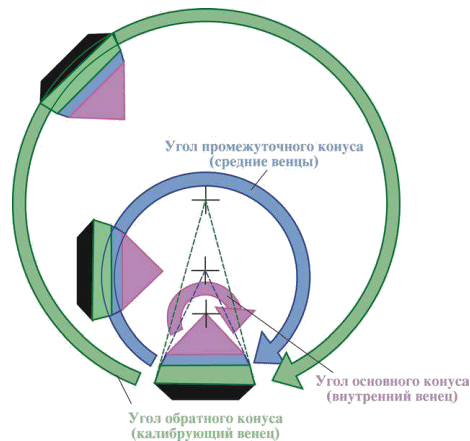


Рис.2.100. Схема смещения осей шарошки.

Оси смещаются в сторону вращения долота, и при этом смещение считается положительным. Величина смещения лежит в пределах 4–10 мм и определяется типоразмером долота. Долота считаются с несмещенными осями шарошек, если они имеют смещение, не превышающее 1,5 мм. Такое смещение называют технологическим. Оно гарантирует отсутствие отрицательного смещения шарошек, которое могло появиться в результате неблагоприятного сочетания допусков на размеры лап и неточностей сборки и сварки секций в корпус.

По расположению шарошек относительно друг друга следует различать два вида долот:

- долота с самоочищающимися шарошками, у которых центральные венцы каждой из шарошек входят в межвенцовое пространство соседних шарошек;
- долота с не самоочищающимися шарошками, у которых контуры соседних шарошек не пересекаются.

На венцах шарошек фрезеруются или крепятся элементы вооружения (зубцы), предназначенные для разрушения горной породы.

Совокупность всех зубцов на всех шарошках называют вооружением долота. Вооружение долот бывает трех видов:

- фрезерованное, армированное твердым сплавом;
- твердосплавное зубковое (штыревое);
- комбинированное (по спецзаказу) (рис.2.101).



Рис.2.101. Комбинированное вооружение.

В современных шарошечных долотах используются фрезерованные зубки разных форм для обеспечения лучшей породоразрушающей способности и долговечности (рис. 2.102).

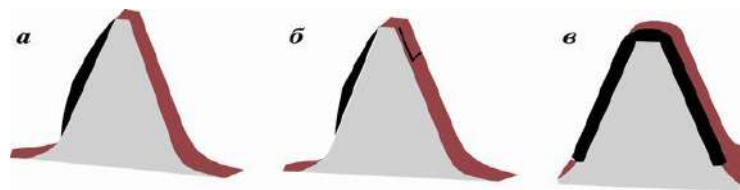


Рис.2.102. Типовые формы фрезерованных зубцов шарошечных долот производства ОАО «Волгабурмаш»:

а – тип 1, наплавляется только набегающая грань; б – тип 2, наплавляются набегающая грань и начало сбегающей грани; в – тип 3, наплавляются полностью все четыре грани и площадка притупления

Для обеспечения долговечности фрезерованного вооружения шарошки изготавливаются из малоуглеродистых легированных сталей (например, марок 17НЗМА, 18ХНЗМА, 20ХНЗА) с последующей их химико-термической обработкой. Химико-термическая обработка позволяет получить высокую твердость поверхностного цементированного слоя глубиной 0,6–2,4 мм в зависимости от диаметра долота (с увеличением диаметра глубина цементации возрастает), необходимую прочность и ударную выносливость сердцевины.

Боковые и торцовые грани зубцов, а также калибрующие поверхности обратных конусов шарошек направляются (армируются) твердым зерновым сплавом – релитом, представляющим измельченный литой карбид вольфрама.

Кроме того, в некоторых конструкциях долот в обратные конуса шарошек запрессовываются цилиндрические твердосплавные (сплав типа ВК11ВК) вставки с последующей наплавкой. Для улучшения охлаждения наплавленных поверхностей обратных конусов на них выполняются канавки.

В долотах некоторых типов в качестве элементов вооружения на центральных и периферийных венцах используются твердосплавные зубки, изготовленные из вольфрамокобальтового сплава типа ВК11ВК. Зубок имеет форму цилиндра, один торец которого плоский, а другой является рабочей головкой зубка, непосредственно воздействующий на горную породу (рис.2.103).

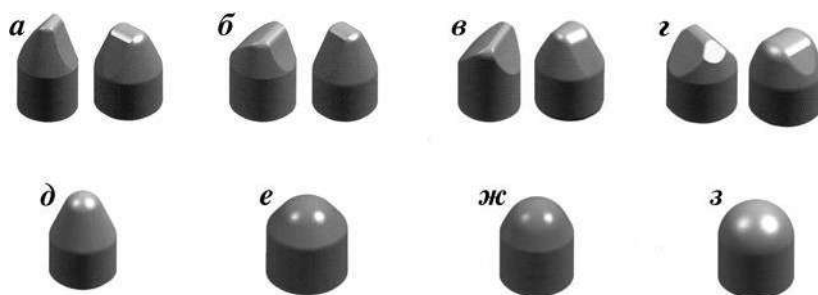


Рис. 2.103. Формы твердосплавных зубцов шарошечных долот производства ОАО «Волгабурмаш»:

а – для очень мягких пород; б – для мягких пород; в – для мягких пород, перемежающихся со средними; г – для средних пород; д – для средних пород, перемежающихся с твердыми; е – для твердых пород; ж – для твердых пород, перемежающихся с крепкими; з – для крепких пород

Важным геометрическим параметром вооружения шарошечного долота является коэффициент перекрытия забоя, который рассчитывается по формулам:
(для долот с фрезерованными зубцами)

$$\eta = \sum l_{ij} / R_d, \quad (2.1)$$

где η – коэффициент перекрытия забоя; l_{ij} – сумма длин зубцов по одному с каждого венца всех шарошек (i – номер шарошки, j – номер венца); R_d – радиус долота;
(для долот с твердосплавными зубками)

$$\eta = \sum d_{ij} / R_d, \quad (2.2)$$

где d_{ij} – сумма диаметров зубков по одному с каждого венца всех шарошек (i – номер шарошки, j – номер венца).

Системы очистки забоя и элементов вооружения шарошечных породоразрушающих инструментов

Система очистки забоя предназначена для формирования потоков промывочной жидкости или продувочного агента и направления его в нужную часть забоя. Она включает в себя внутреннюю полость долота 1, подводящий канал 2 (один или несколько), выходное отверстие 3 (одно или несколько) (рис.2.104).

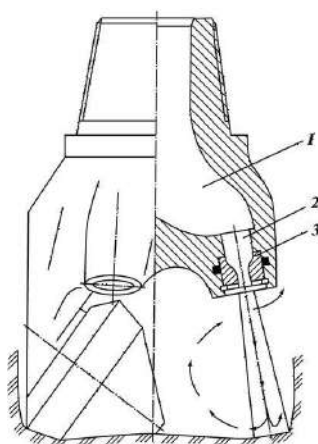


Рис. 2.104. Схема системы промывки шарошечных долот

В зависимости от направления струи промывочного агента долота подразделяются на долота:

- с центральной промывкой или продувкой (рис.2.105);
- с боковой гидромониторной промывкой или продувкой.

У первых долот струя направлена в центральную часть забоя на шарошки. Выходное отверстие выполнено в центре долота и имеет в большинстве случаев круглое сечение.

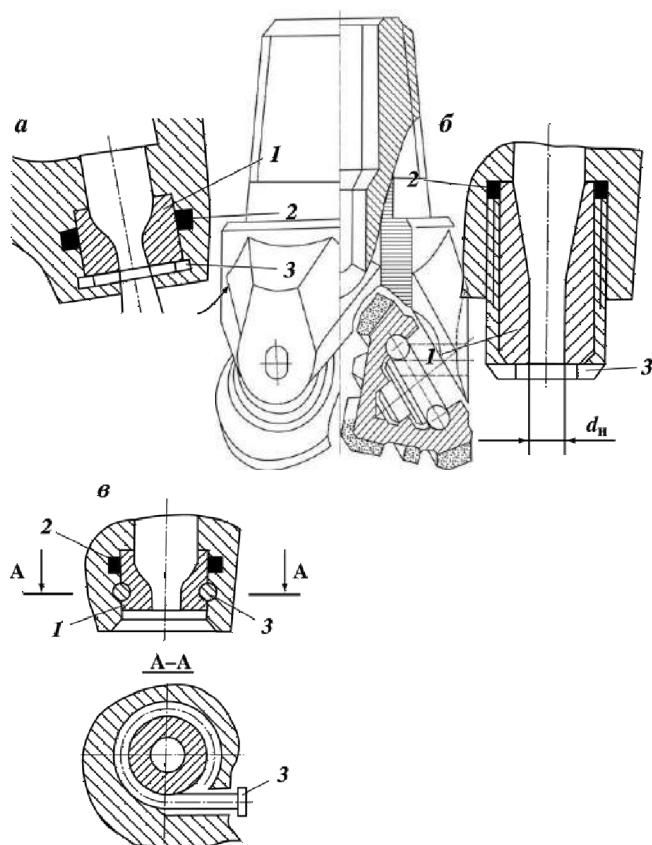


Рис.2.105. Схема долота с центральной системой промывки

У вторых долот выходные отверстия направляют струи жидкости между шарошками на периферийную часть забоя под некоторым углом к оси долота. Это обеспечивает направление струи одновременно к стенке скважины и в сторону, противоположную направлению вращения долота.

Струи непосредственно воздействуют на породу, интенсифицируя очистку забоя от шлама. Долота с такой системой промывки принято называть гидромониторными.

Для предотвращения размыва выходных отверстий в гидро-мониторных долотах устанавливаются гидромониторные насадки. Эти системы образуют гидромониторные узлы (ГМУ).

Рис. 2.106. Схемы ГМУ шарошечных долот:

а – крепление пружинным кольцом; б – крепление резьбовой втулкой; в – крепление гвоздем

Каждый ГМУ (рис.2.106.) включает три обязательных элемента: насадку 1, уплотнение 2, удерживающий замок 3. Насадка является сменной и изготавливается из твердого материала, способного противостоять эрозионному изнашиванию. Уплотнение 2 предназначено для герметизации зазора между насадкой 1 и корпусом. Переток промывочной жидкости по этому зазору приводит к интенсивному размыву отверстия в корпусе и выпадению из него насадки. Замок 3 предназначен для удержания насадки 1 в корпусе долота.

Герметизация зазора между насадкой 1 и корпусом во всех трех рассмотренных конструкциях осуществляется тороидальным резиновым кольцом 2.

Основной эксплуатационный параметр ГМУ – выходной диаметр d_n насадки.

Гидравлическая система современных долот позволяет выбирать схему промывки забоя и вооружения долота, обеспечивающую наилучший эффект их очистки в зависимости от свойств породы и условий бурения. Это достигается применением различных схем промывки центральной, периферийной или асимметричной.

Под асимметричной схемой промывки понимают работу двух или даже одной периферийной насадки вместо трех. В большом числе случаев весьма эффективны комбинированные схемы, когда одновременно работают центральная и периферийные насадки.

Для бурения скважин с продувкой забоя сжатым газом выпускаются долота с продувкой. Отличительной особенностью этих долот является наличие центрального продувочного канала уменьшенного сечения в корпусе долота и каналов в каждой лапе, которые подводят часть нагнетаемого газа в полости опор шарошек для их охлаждения и очистки от возможного попадания в них мелких выбуренных частиц породы и пыли (рис.2.107).

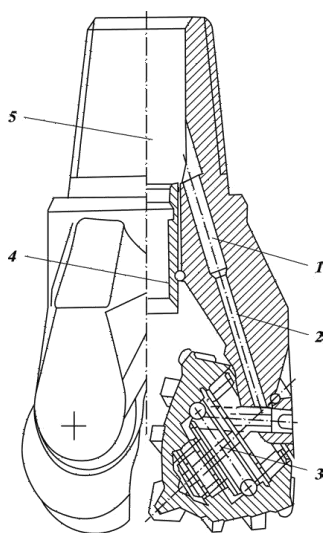


Рис.2.107. Схема ГМУ для продувки сжатым газом:

- 1, 2 – продувочные каналы в лапе долота; 3 – замковый подшипник;
4 – центральный промывочный узел; 5 – внутренняя полость в корпусе долота

2.7. Типы и основные размеры шарошечных долот по ГОСТ 20692—2003

ДОЛОТА ШАРОШЕЧНЫЕ

Технические условия

Roller bits. Specifications

Дата введения 2004—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на шарошечные долота для сплошного бурения скважин.

Требования, изложенные в разделах 3—5 (кроме 5.2), разделах 6—8, являются обязательными. Обязательные требования, обеспечивающие безопасность работы с шарошечными долотами, изложены в 4.4—4.6.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

- ГОСТ 9.032—74 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения
- ГОСТ 15.309—98 Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения
- ГОСТ 164—90 Штангенрейсмасы. Технические условия
- ГОСТ 577—68 Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия
- ГОСТ 3242—79 Соединения сварные. Методы контроля качества
- ГОСТ 7918—75 Замки для геолого-разведочных бурильных труб диаметром 50 мм. Технические условия
- ГОСТ 14192—96 Маркировка грузов
- ГОСТ 15150—69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды
- ГОСТ 28487—90 Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль. Размеры. Допуски*

3 Классификация и основные размеры

3.1 Долота следует изготавливать следующих видов:

- I — одношарошечные;
- II — двухшарошечные;
- III — трехшарошечные.

* На территории Российской Федерации действует ГОСТ Р 50864—96 Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль, размеры, технические требования.

3.2 Долота следует изготавливать следующих типов:

М — со стальными зубьями для бурения мягких пород;

МЗ — с твердосплавными зубками для бурения мягких абразивных пород;

МС — со стальными зубьями для бурения мягких пород с пропластками средней твердости;

МСЗ — с твердосплавными зубками для бурения мягких абразивных пород с пропластками средней твердости;

С — со стальными зубьями для бурения пород средней твердости;

СЗ — с твердосплавными зубками для бурения абразивных пород средней твердости;

СТ — со стальными зубьями для бурения пород средней твердости с пропластками твердых;

Т — со стальными зубьями для бурения твердых пород;

ТЗ — с твердосплавными зубками для бурения твердых абразивных пород;

ТК — со стальными зубьями и твердосплавными зубками для бурения твердых пород с пропластками крепких;

ТКЗ — с твердосплавными зубками для бурения твердых абразивных пород с пропластками крепких;

К — с твердосплавными зубками для бурения крепких пород;

ОК — с твердосплавными зубками для бурения очень крепких пород.

3.3 По расположению и конструкции промывочных и продувочных узлов (каналов) долота следует изготавливать с:

центральной промывкой — Ц;

боковой гидромониторной промывкой — Г;

комбинированной промывкой — ЦГ;

центральной продувкой — П;

боковой продувкой — ПГ.

3.4 Опоры шарошек следует изготавливать на:

подшипниках с телами качения и одним или более упорных подшипниках скольжения, или без упорных подшипников скольжения — В;

подшипниках с телами качения и одним или более упорных подшипниках скольжения и герметизацией опоры — ВУ;

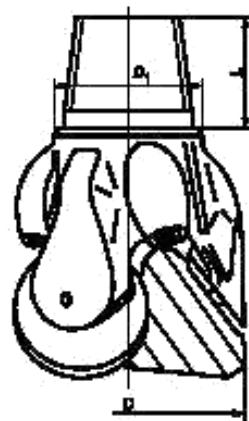
одном радиальном и одним или более упорных подшипниках скольжения (остальные подшипники с телами качения) — Н;

одном радиальном и одним или более упорных подшипниках скольжения (остальные подшипники с телами качения) и герметизацией опоры — НУ;

двух или более радиальных подшипниках скольжения с одним или более упорным подшипником скольжения — А;

двух или более радиальных подшипниках скольжения с одним или более упорным подшипником скольжения и герметизацией опоры — АУ.

3.5 Основные размеры долот и обозначения присоединительной резьбы должны соответствовать указанным на рисунке 1 и в таблице 1.



Примечание — Рисунок не определяет конструкцию долота

Рисунок 1

Таблица 1

Размеры в миллиметрах

Диаметр долота D		Диаметр упорного уступа D_1 $\pm 0,4$	Длина напилья L $- 4,8$	Обозначение присоединительной резьбы
Номинал.	Пред. откл.			
76,0	+ 0,6	57,0	50	3-42
93,0	+ 0,8	65,0; 77,4; 78,18	76; (60)	3-50
95,3		77,4; 78,18; 83,0		3-63,5; 3-66
98,4			92,47	3-76
114,3		92,47; 105,17		3-76; 3-88
117,5			83,0; 105,17	3-63,5; 3-88
120,6				
127,0				
130,2				
132,0				
139,7				
146,0		136,13	3-117	
151,0				
161,0				
165,1				
171,4				
187,3				
190,5		142,1; 187,72	3-121; 3-152	
200,0				
212,7				
215,9				
222,3				
238,1				
241,3	+ 1,6	187,72; 196,0; 203*; 215,9	127,0; (80); 133,35	3-152; 3-171; 3-177
244,5				
250,8				
269,9				
295,3				
304,8				
311,1	+ 2,4	196,0; 215,9; 243,28; 243,8	127,0; 133,35; 136,53; 137,0	3-171; 3-177; 3-201
320,0				
349,2				
508,0				

* Для корпусных долот с муфтовой присоединительной резьбой.

Примечания

- 1 Размеры в скобках указаны для долот с укороченной резьбой.
- 2 По заказу потребителя допускается изготовление долот с размерами, отличными от указанных.
- 3 Долота с опорами А и В следует изготавливать: с $D = 76^{+0,6}_{-0,3}$ мм, с D от $93^{+1,0}_{-0,3}$ мм до $320,0^{+1,0}_{-0,3}$ мм, с D от $(349,2 \pm 1,5)$ мм до $(393,7 \pm 1,5)$ мм; с $D \geq 444,5$ мм $\pm 2,0$ мм.

Пример условного обозначения трехшарошечного долота диаметром 215,9 мм для бурения абразивных пород средней твердости (СЗ), с боковой гидромониторной промывкой (Г), на двух или более радиальных подшипниках скольжения с одним или более упорным подшипником скольжения и герметизацией опоры (АУ):

Долото шарошечное III 215,9 СЗ-ГАУ ГОСТ 20692—2003

4 Технические требования

4.1 Долота следует изготавливать в соответствии с требованиями настоящего стандарта, по рабочим чертежам, утвержденным в установленном порядке.

4.2 Точность изготовления долот должна соответствовать значениям, указанным в таблице 2.

Таблица 2

Размеры в миллиметрах

Наименование параметра	Тип долота	Норма точности для долот диаметрами, не более							
		от 76,0 до 98,4 включ.	св. 98,4 до 171,4 включ.	св. 171,4 до 250,8 включ.	св. 250,8 до 311,1 включ.	св. 311,1 до 349,2 включ.	св. 349,2 до 393,7 включ.	св. 393,7 до 490,0 включ.	св. 490,0
Разновысотность шарошек относительно упорного уступа	М, МС, С, МЗ, МСЗ, СЗ	1,1	1,5	1,6		2,2	2,4	2,6	3,3
	СТ, Т, ТЗ, ТКЗ	0,9	1,3	1,6		2,0	2,4	2,6	3,3
	ОК, К	0,7	1,0	1,2		1,5	1,7	2,6	—
Радиальное биение шарошек относительно оси резьбы	М	1,0	1,1	1,4	2,0	2,3	2,8	3,0	3,8
	МС, С, МЗ, МСЗ, СЗ	1,0	1,1	1,4	1,6	2,0	2,5	3,0	3,8
	СТ, Т, ТЗ, ТКЗ	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,3	3,0	3,0
	ОК, К	0,6	0,8	1,2	1,4	1,5	1,8	3,0	—

4.3 Долота следует изготавливать с правой конической замковой резьбой.

Резьбы 3-42 и 3-63,5 — по техническому документу, утвержденному в установленном порядке.

Резьба 3-50 — по ГОСТ 7918.

Остальные резьбы (кроме величины натяга) — по ГОСТ 28487.

Соответствие обозначений присоединительной резьбы по настоящему стандарту и спецификации 7 Американского нефтяного института (API Spec 7) приведено в приложении А.

4.4 Натяг конической замковой резьбы должен быть:

10,35^{+0,4} мм — для ниппельной резьбы 3-42;

10,00^{+0,4} мм — для ниппельной резьбы 3-50;

16,00^{+0,4} мм — для ниппельной резьбы 3-63,5;

15,875^{+0,25}_{-0,80} мм — для ниппельных резьб 3-88, 3-117, 3-121, 3-152, 3-171, 3-177, 3-201;

0^{+0,35}_{-0,25} мм — для муфтовых резьб 3-88, 3-117, 3-121, 3-152, 3-171, 3-177, 3-201.

4.5 Система промывки гидромониторных долот диаметрами 190,5 мм и более должна быть герметична при давлении жидкости 7,85 МПа; диаметрами менее 190,5 мм — при давлении жидкости 5 МПа.

4.6 Насадки в гидромониторных долотах с боковой промывкой диаметрами 190,5 мм и более должны удерживаться при давлении жидкости 7,85 МПа; диаметрами менее 190,5 мм — при давлении жидкости 5 МПа. Насадки должны быть сменными.

4.7 В сварных швах на поверхностях упорного уступа ниппеля и на расстоянии 25 мм над упорным уступом ниппеля не допускаются дефекты сварки, на остальной резьбовой части ниппеля

допускаются единичные поры и раковины диаметром не более 1 мм в количестве не более 3 шт. на каждом шве. На резьбовой части корпусных долот допускаются единичные поры и раковины диаметром не более 2 мм в количестве до 5 шт.

4.8 Требования к материалам, химико-термической обработке, комплектующим, краскам, смазкам должны соответствовать нормативной и технической документации, утвержденной в установленном порядке.

4.9 Поверхность долот, кроме присоединительной резьбы, упорного уступа ниппеля (упорного торца муфты), торца ниппеля и заходной фаски должна быть покрыта ровным слоем краски. После высыхания краска должна прочно удерживаться на долоте. Класс покрытия VII — по ГОСТ 9.032.

4.10 Поры, вздутия, мелкие пузыри и выступания коррозии через краску, а также попадание краски на присоединительную резьбу, упорный уступ, клапаны, в отверстия крышек смазочных резервуаров, промывочные каналы гидромониторных долот не допускаются.

4.11 Присоединительная резьба должна быть покрыта антикоррозионной смазкой.

4.12 Опоры шарошек должны быть заполнены смазкой. Заполнение смазкой долот с опорой НУ следует проводить до появления смазки из-под манжеты. Долота с опорами АУ и ВУ перед заполнением смазкой вакуумируют.

4.13 Шарошки долот с опорами АУ, НУ, ВУ должны проворачиваться на опорах от руки со значительным усилием. Шарошки долот с опорами Н, В, А должны свободно и плавно проворачиваться на опорах от усилий руки.

Зацепление зубьев или зубков одной шарошки за зубья или зубки, а также за корпус другой шарошки не допускается.

4.14 Пружинное кольцо компенсационного узла долота должно заходить по всему периметру в канавку и не иметь повреждений, а крышка не должна проворачиваться от руки.

4.15 Требования надежности

4.15.1 Срок сохраняемости долот — не менее 18 мес со дня изготовления.

4.16 Комплектность

4.16.1 В комплект поставки входят: долото с установленными насадками и (или) клапанами, а также паспорт долота.

По согласованию с потребителем допускается поставка долот без насадок.

4.17 Маркировка

4.17.1 Маркировка долот должна быть четкой и сохраняться на протяжении срока службы долота.

4.17.2 На торце ниппеля (пояске муфты) маркируются:

- товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение долота (допускается обозначение стандарта не маркировать);
- обозначение присоединительной резьбы (по требованию потребителя);
- порядковый номер долота по системе нумерации предприятия-изготовителя;
- дата изготовления (месяц, год);
- клеймо технического контроля.

Примечание — Допускается маркирование товарного знака предприятия-изготовителя на других поверхностях долота.

4.18 Упаковка

4.18.1 Поверхность присоединительной резьбы, включая упорный уступ ниппеля (упорный торец муфты), торец ниппеля и заходную фаску, должна быть полностью покрыта ровным слоем консервационной смазки по технической документации, утвержденной в установленном порядке.

4.18.2 Долота упаковывают в соответствии с технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

По согласованию с потребителем допускается не упаковывать долота, при этом должна быть обеспечена защита присоединительной резьбы.

Каждое долото должно сопровождаться паспортом, содержащим:

- наименование продукции;
- наименование страны-изготовителя;
- наименование предприятия-изготовителя;
- область применения продукции;
- основные технические характеристики;
- изображение знака соответствия для сертифицированной продукции;
- юридический адрес предприятия-изготовителя (продавца);
- массу нетто;

2.8. Лицензионные шарошечные долота производства ОАО «Волгабурмаш»

В 1997 г. ОАО «Волгабурмаш» сертифицировало свою продукцию, выпускаемую по лицензии американской фирмы «Dresser», в Международной организации по стандартам (International Standards Organization – ISO) и Американском нефтяном институте (American Petroleum Institute – API) с получением сертификатов соответствия ISO 96-371 и API 7-0268. После этого выпускаемые ОАО «Волгабурмаш» долота классифицированы по международной системе IADC (I – International, A – Association, (of), D – Drilling, C – Contractors).

Система IADC базируется на четырехсимвольном коде, отражающем конструкцию долота и тип горной породы, для бурения которой оно предназначено.

Первые три символа кода – цифровые, а четвертый – буквенный.

Последовательность цифровых символов определяет: серию вооружения (породы) – тип вооружения (породы) – конструкцию опоры/калибрующих поверхностей.

Четвертый буквенный символ – дополнительные характеристики.

Первая цифра кода (1–8) – восемь серий вооружения, соответствующих восьми категориям разбуриваемых пород.

Серии 1–3 соответствуют долотам с фрезерованным вооружением.

Серии 4–8 соответствуют долотам с твердосплавным зубковым (штыревым) вооружением.

Вторая цифра кода характеризует тип вооружения (породу) внутри серии.

Каждая серия разделена на четыре типа пород по твердости. Чем больше цифра – тем выше твердость породы, для бурения которой предназначено долото.

Третья цифра характеризует конструкцию опоры и наличие (или отсутствие) дополнительной защиты калибрующих поверхностей (венцов шарошек) от износа по диаметру:

- 1 – открытая опора качения;
- 2 – открытая опора качения для бурения с продувкой воздухом;
- 3 – открытая опора качения + твердосплавные вставки на калибрующих поверхностях шарошек (обратных конусах шарошек);
- 4 – герметизированная опора качения;
- 5 – герметизированная опора качения + твердосплавные вставки на калибрующих поверхностях шарошек (обратных конусах шарошек);
- 6 – герметизированная опора на подшипниках скольжения;
- 7 – герметизированная опора на подшипниках скольжения + твердосплавные вставки на калибрующих поверхностях шарошек (обратных конусах шарошек);
- 8, 9 – резервные, для использования в будущем.

Некоторые зарубежные фирмы уже используют эти резервные обозначения. Так, например на фирме «Smith International, Inc.»:

8 – долота для бурения горизонтальных и наклонных скважин (L, XP);

9 – долота для геотермального бурения (G) и бурения забойными двигателями (M).

Четвертый буквенный символ кода – дополнительные характеристики – содержит 16 английских букв и используется для обозначения специальных конструкций вооружения, опор, систем промывки и защиты корпусов долот от износа, но он является необязательным для производителей долот:

A – для бурения с продувкой воздухом;

B – для высокооборотного бурения (> 450 об/мин); C – центральная насадка;

D – специальная конструкция вооружения, уменьшающая самопроизвольное искривление ствола скважины;



Рис. 2.108. Условные обозначения лицензионных долот производства ОАО «Волгабурмаш».

- Е – удлиненные насадки;
- Г – усиленная защита козырьков лап от износа;
- Н – долота для наклонного и горизонтального бурения;
- Ж – гидромониторное долото для набора зенитного угла (кривизны);
- Л – калибрующие накладки на спинках лап, усиленные твердосплавными штырями;
- М – долота для бурения винтовыми забойными двигателями;
- С – стандартные долота с фрезерованным вооружением;
- Т – двухшарошечные долота;
- W – усовершенствованное вооружение, запатентованное производителем;
- Х – твердосплавные зубки клиновидной формы;
- У – твердосплавные зубки конической формы;
- З – другие формы зубков.

После сертификации продукции ОАО «Волгабурмаш» изменило обозначение и кодирование шарошечных долот, выпускаемых по лицензии американской фирмы «Dresser», в своих каталогах (рис. 32).

Продуктовые линии (серии долот по типам опор) лицензионных долот в соответствии с ГОСТ 20692–75 нормируют эксплуатационные частоты их вращения:

- (V) (> 450 об/мин);
- (VU) (> 450 об/мин);
- (N) (250–450 об/мин);
- (NU) (250–450 об/мин);
- (AU) (< 90 об/мин).

В табл. 9. показаны примеры обозначения шифров лицензионных шарошечных долот производства ОАО «Волгабурмаш» после сертификации.

Примеры обозначения долота по продуктовым линиям

Твердосплавное вооружение	
76,0 A-C74ZR306	76,0 – диаметр долота, мм; А – продуктовая линия; С – центральная промывка; 74 – крепкие породы по IADC; Z – сферический зубок (отличный от клиновидного и конического); R306 – порядковый номер конструкции завода - изготовителя
215,9 V-NL63YR276	215,9 – диаметр долота, мм; V – продуктовая линия; N – удлиненные насадки; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; 63 – твердые абразивные породы по IADC; Y – конический зубок; R276 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
311,1 N-43XR102M	311,1 – диаметр долота, мм; N – продуктовая линия; 43 – очень мягкие абразивные породы по IADC; X – клиновидный зубок; R102M – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 VU-LS43ZR206	215,9 – диаметр долота, мм; VU – продуктовая линия; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; S – армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 43 – очень мягкие абразивные породы по IADC; Z – ковшеобразный зубок (отличный от клиновидного и конического); R206 – порядковый номер конструкции завода - изготовителя
215,9 NU-62XR05	215,9 – диаметр долота, мм; NU – продуктовая линия; 62 – твердые абразивные породы по IADC; X – клиновидный зубок; R05 – порядковый номер конструкции завода - изготовителя
165,1 AU-L51XR111	165,1 – диаметр долота, мм; AU – продуктовая линия; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; 51 – мягкие абразивные породы по IADC; X – клиновидный зубок; R111 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
124,0 AUPLS54XR413	124,0 – диаметр долота, мм; AUP – продуктовая линия; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; S – армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 54 – средние абразивные породы по IADC; X – клиновидный зубок; R413 – порядковый номер конструкции завода - изготовителя
311,1 AULLS83Y R29	311,1 – диаметр долота, мм; AUL – продуктовая линия; L – наплавка козырька набегающей грани лапы; S – армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 83 – очень крепкие породы по IADC; Y – конический зубок; R299 -порядковый номер конструкции завода-изготовителя
Фрезерованное вооружение	
93,0 A-C31R307	93,0 – диаметр долота, мм; А – продуктовая линия; С – центральная промывка; 31 – твердые породы по IADC; R306 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
444,5 V-K11TGR130	444,5 – диаметр долота, мм; V – продуктовая линия; К – комбинированная (боковая и центральная) промывка; 11 – мягкие породы по IADC; Т – усиленная объемная наплавка зубьев; G – дополнительное армирование твердосплавными зубками

	обратного конуса шарошки; R130 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 N-N21R163	215,9 – диаметр долота, мм; N – продуктовая линия; N – удлиненные насадки; 21 – средние породы по IADC; R163 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 VU-LS21R190	215,9 – диаметр долота, мм; VU – продуктовая линия; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; S – армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 21 – средние породы по IADC; R190 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 NU-LS11TGR183	215,9 – диаметр долота, мм; NU – продуктовая линия; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; S – армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 11 – мягкие породы по IADC; T – усиленная объемная наплавка зубьев; G – дополнительное армирование твердосплавными зубками обратного конуса шарошки; R183 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
200,0 AU-11TR133	200,0 – диаметр долота, мм; AU – продуктовая линия; 11 – мягкие породы по IADC; T – усиленная объемная наплавка зубьев; R133 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 AULLS13TGR415	215,9 – диаметр долота, мм; AUL – продуктовая линия; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; S – армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 13 – мягкие средние породы по IADC; T – усиленная объемная наплавка зубьев; G – дополнительное армирование твердосплавными зубками обратного конуса шарошки; R415 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя

2.9. Одношарошечные долота

Конструкционная схема одношарошечного долота показана на рис.2.109, а его общий вид приведен на рис. 2.110, 2.111. Сферическая шарошка оснащена твердосплавными штырями. Центр сферы располагается в точке пересечения осей. Ось шарошки наклонена под углом 30° к оси долота. Промывка осуществляется через отверстие в корпусе долота. Опора долота гораздо больше, чем в трехшарошечных долотах, и состоит из цапфы и трех подшипников: скольжения, шарикового и шарикового замкового.

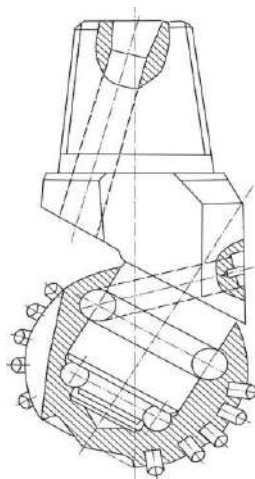


Рис.2.109. Схема одношарошечного долота

Одношарошечные долота выпускают диаметрами 138-216 мм. Они предназначены для низкооборотного бурения в породах средней твердости. Поскольку часть зубцов при бурении находится в постоянном контакте с породой, серийное одношарошечное долото относится к долотам режуще-скалывающего действия.

2.10. Система кодирования износа шарошечных долот, принятая в России

Система кодирования износа шарошечных долот, применяемая в России, разработана ВНИИБТ, бывшим главным научно-исследовательским институтом буровой техники в СССР. Система оценивает износ шарошечных долот по четырем направлениям: износу вооружения, износу опор, износу диаметра и аварийный износ.

Износ вооружения (хотя бы одного венца):

V1 – уменьшение высоты зубцов на 1/4;

V2 – уменьшение высоты зубцов на 1/2 (2/4);

V3 – уменьшение высоты зубцов на 3/4;

V4 – уменьшение высоты зубцов на 4/4 (полностью).

При наличии скола фрезерованных зубцов, скола и выпадения твердосплавных зубцов добавляется индекс С. Общее количество (в %) сколотых фрезерованных зубцов и выпавших твердосплавных зубцов записывается в скобках. Например: С(20).

При закруглении зубцов периферийных венцов добавляется индекс Р. Например: С(20)Р.



Рис.2.110. Общий вид одношарошечного долота с герметизированной маслonaполненной опорой



Рис.2.111. Общий вид одношарошечного долота с открытой опорой

Износ опоры (хотя бы одной шарошки):

П1 – износ небольшой: «качка» торца шарошки относительно оси цапфы невелика (например, до 2 мм для долота диаметром 190–214 мм; до 4 мм для долот диаметром 243–295 мм); тела качения не обнажены;

П2 – износ средний: «качка» торца шарошки большая (например, до 5 мм для долот диаметром 190–214 мм, до 8 мм для долот диаметром 243–295 мм); тела качения не обнажены;

П3 – износ большой: «качка» торца шарошки значительная (например, 5 мм для долот диаметром 190–214 мм; больше 8 мм для долот диаметром 243–295 мм); значительный износ или разрушение части тел качения; имеется опасность их выпадения; «заедание» шарошки при вращении от руки;

П4 – отказ (разрушение) опор: разрушение и поворот роликов; разрушение шариков, козырьков лап и тыльной части шарошек с выпадением тел качения; трещины и «лыски» на шарошках.

В случае повреждения узла герметизации маслonaполненной опоры (выход из строя уплотнения или его выпадение) добавляется индекс У, количество поврежденных узлов указывается в скобках. Например: У(2).

В случае заклинивания, шарошек добавляется индекс К, количество заклиненных шарошек указывается в скобках. Например: К(2).

В случае повреждения гидромониторного узла (разрыв гнезда, выпадение насадок) добавляется индекс Г, количество поврежденных узлов указывается в скобках. Например: Г(3).

Износ по диаметру. Уменьшение диаметра долота обозначается индексом Д и выражается в мм. Например: Дб.

Аварийный износ:

Ав – «оставление» вершин шарошек на забое;

Аш – «оставление» шарошек на забое;

Ас – «оставление» секций на забое;

Ац – «оставление» цапфы с шарошкой на забое.

Количество «оставленных» на забое лап, шарошек и их вершин указывается римскими цифрами в скобках. Например:

Ав(І); Аш(І, ІІ); Ас(І); Ац(ІІІ).

Примеры применения кода для оценки износа долот

1. Вооружение «сработано» на 10 %, опоры имеют средний износ, «заклинены» две шарошки, диаметр долота сохранился: В1П2К(2)Д0.

2. Вооружение изношено на 3/4, 50 % зубцов имеют сколы, калибрующие кромки зубцов периферийных венцов закруглены, опоры имеют большой износ, «качка» торца шарошки 10 мм, диаметр долота уменьшился на 7 мм: В3С(50)РПЗД7.

3. Вооружение «сработано» полностью, опора разрушена, часть тел качения выпала, первая шарошка «оставлена» на забое: В4П4Аш(І).

4. В скважине оставлены все шарошки: Аш(ІІІ).

Примеры записи износа долот с помощью кода в буровом журнале и суточном рапорте:

269,9 С-ГНУ № 8639 – В2С(30)РПЗД6Г(2)У3;

190,5 С-ГВ № 1642 – В1П1К(І)Ав(І)Д0;

215,9 С-ГВ № 2894 – В4П4Ас(ІІ);

244,5 Т-ЦВ № 6785 – В2П3Ац(І);

244,5 С-ГН № 9735 – В1П2К(2)Д3Г(1).

В современной России работают зарубежные фирмы, а наши буровые предприятия используют импортные буровые долота, чаще с инженерным сопровождением. В связи с этим возникла потребность в оценке износа по системе IADC, применяемой за рубежом.

Кодирование износа шарошечных породоразрушающих инструментов по кодам IADC

25 лет назад Международная ассоциация буровых подрядчиков (IADC) ввела стандартизованную систему описания износа породоразрушающих инструментов всех видов, в том числе и шарошечных долот.

За рубежом износ долот кодируют по трем параметрам: износ вооружения, износ опор, износ диаметра. Кроме того, в примечаниях приводятся повреждения других видов, причины подъема долота и прочие сведения (рис.2.112, 2.113.).

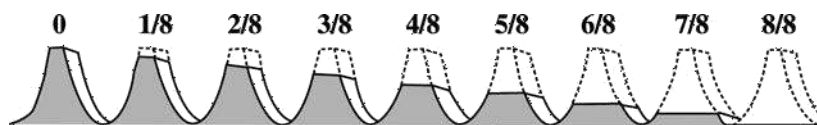


Рис.2.112. Структурная схема кодирования износа долот по IADC

Вооружение				Опора	Диаметр	Примечание	
Вооружение				Опора	Диаметр	Примечание	
Внутренние венцы	Наружные венцы	Характер износа	Местонахождение	Подшипник, уплотнение	Диаметр	Второстепенный износ	Причина подъема
(1)	(0)	(D)	(L)	(B)	(G)	(O)	(R)

Рис. 2.113. Схема оценки износа вооружения долот с фрезерованным вооружением

1. Износ вооружения:

- (1) – износ внутренних венцов;
- (0) – износ наружных венцов;
- (D) – характер износа;
- (L) – местонахождение.

Пример определения кода износа твердосплавного (штыревого) вооружения: $(\text{Пу} \cdot 8) + (\text{Пи} \cdot \text{Ки}) = \text{Кд}$, где Пу – количество сломанных и/или утерянных зубков, в долях; 8 – оценка их износа (8/8); Пи – количество изношенных (вследствие истирания) зубков в долях; Ки – оценка их износа, в восьмых долях высоты зубка; Кд – код износа.

Например, у долота отсутствует половина зубков вследствие слома или утери, тогда остальные зубки имеют 50%-ный износ по высоте (4/8) вследствие истирания, код износа такого долота равен шести (6), т.е. $(0,5 \cdot 8) + (0,5 \cdot 4) = 6$.

- D – характер износа;
- BC – слом шарошки;
- CR – кернение долота;
- LN – потеря насадки;
- RO – кольцевой износ;
- BF – отлом алмаза, пластины;
- CT – скол зубков;
- LT – потеря зубков (резцов);
- SD – повреждение козырька;
- BT – скол зубков (резцов);
- ER – эрозия;
- OC – эксцентричный износ;
- SS – самозатачивание зубков;
- BU – образование сальника;
- FC – затупление вершины зубка;

PB – механическое повреждение при спуско-подъемных операциях (СПО);
 TR – трекинг;
 CC – трещина в шарошке;
 HC – трещины перегрева;
 PN – закупорка насадки;
 WO – промыв инструмента;
 CD – истирание заклиненной шарошки
 JD – металл на забое; (промывочного канала);
 WT – износ зубков (резцов);
 CI – взаимозацепление шарошек;
 LC – потеря шарошки;
 RG – износ по диаметру;
 NO – отсутствие износа.
 L – место нахождения износа:
 N – носовой венец (центральный);
 M – средние венцы;
 G – наружный венец;
 A – все венцы. Шарошка №: 1; 2; 3.

2. Износ опоры (B) – износ подшипников или уплотнений.

Открытая опора:

0 – ресурс опоры не использован;

8 – ресурс использован полностью (шарошка заклинена или утеряна).

Герметизированная опора:

E – работоспособная опора (уплотнение);

F – отказ уплотнений (разрушены, утеряны);

N – невозможность определения состояния опоры (уплотнения).

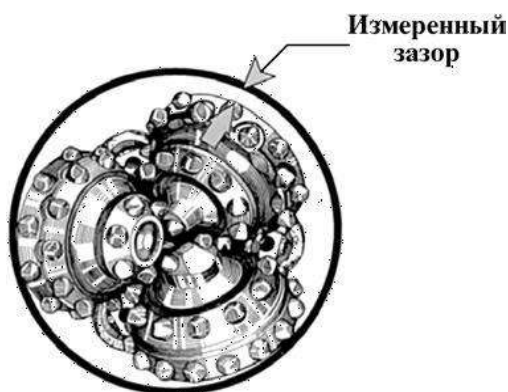


Рис. 2.114. Схема измерения износа по диаметру

3. Износ долота по диаметру:

G – уменьшение диаметра долота, в долях дюйма (1/16 (1,5875 мм)).

При оценке износа по диаметру применяют специальный шаблон (измерительный инструмент) и правило 2/3.

Износ по диаметру равен зазору, измеренному при помощи шаблона (рис.2.114) и умноженному на 2/3 (0,75).

4. Примечание:

O – второстепенный износ; описываются любые другие виды износа долота в дополнение к ранее приведенным в колонке D;

R – причина подъема долота;

ВНА – смена компоновки низа бурильной колонны (КНБК);

RIG – ремонт бурового оборудования;
HR – подъем по времени;
DST – пластовые испытания;
CM – обработка бурового раствора;
TD – проектный забой (колонна);
LIH – потеря инструмента на забое;
DTF – отказ инструмента;
CP – отбор керна;
TQ – рост момента;
LOG – геофизическое исследование скважин (ГИС);
FM – смена геологической обстановки;
PP – изменение давления на стояке;
TW – отворот инструмента (трубы);
DP – разбуривание цементного стакана;
HP – авария;
PR – падение механической скорости проходки;
WC – погодные условия;
DSF – повреждение бурильной колонны.

Приведем практические примеры описания износа шарошечных долот по кодам IADC.

Пример 1. Долото выглядит изношенным в процессе бурения пород тверже предела, на который это долото было рассчитано (рис.2.115). На этот факт указывают сильный износ зубков внутреннего ряда, а также подъем по причине падения механической скорости, вызванной сломом зубков при бурении слишком твердых для данного долота пород. Слишком высокая осевая нагрузка на долото также может привести к подобному внешнему виду долота после подъема. Правильным подбор долота был в случае, если долбление продолжалось не слишком долго, и при этом отсутствуют второстепенные характеристики износа, состояние уплотнения рабочее, и долото не изношено по диаметру. Однако если долбление продолжалось по времени меньше ожидаемого, подбор долота был ошибочным. Долото могло быть слишком «мягким» для пород данного типа, либо осевая нагрузка превышала допустимые значения. Далее приведена оценка его износа по коду IADC: 7.1.BT.M.E.I.WT.PR.



Рис.2.115. Общий вид отработанного долота, описанного в примере

Пример 2. Долото выглядит изношенным в процессе бурения пород тверже предела, на который это долото было рассчитано (рис.2.116). На этот факт указывают сильный износ зубков внутреннего ряда, а также подъем по причине падения механической скорости, вызванной сломом зубков при бурении слишком твердых для данного долота пород. Слишком высокая осевая нагрузка на долото также может привести к подобному

внешнему виду долота после подъема. Правильным подбор долота был в случае, если долбление продолжалось не слишком долго, и при этом отсутствуют второстепенные характеристики износа, состояние уплотнения рабочее, и долото не изношено по диаметру. Однако если долбление продолжалось по времени меньше ожидаемого, подбор долота был ошибочным. Долото могло быть слишком «мягким» для пород данного типа, либо осевая нагрузка превышала допустимые значения. Далее приведена оценка его износа по коду IADC: 5.8.WT.A.3.2.FC.HRS.



Рис.2.116. Общий вид отработанного долота, описанного в примере 2.

2.11. Алмазные долота, долота ИСМ и PDC

Главной особенностью алмазных (классических) долот является наличие в них алмазных режущих элементов (натуральных или искусственных алмазов). В буровых долотах обычно используют наименее ценную разновидность натуральных алмазов – борт, баллас и карбонадо. В производстве долот используют только карбонадо (бразильские технические алмазы) или черные алмазы.

Перед использованием в буровых долотах природные алмазы обычно окатывают путем трения алмаза об алмаз. В результате такой обработки получают более прочные овалитованные алмазы, подверженные раскалыванию в меньшей мере, чем остроугольные. Искусственные (синтетические) алмазы по прочности близки к естественным алмазам. Технические показатели алмазных долот во многом зависят от качества и размеров алмазов. Качество алмазов определяют группой и категорией. К высшим группе и категории относятся крупные алмазы диаметром 2–3 мм (от 3 до 12 зерен на карат) и мелкие (до 1000 зерен на карат). Карат равен 0,2 г.

Стальной корпус с присоединительной резьбой по всей поверхности контакта спаян с матрицей. Матрицы изготавливают из композиционного материала, называемого шихтой, состоящей из кобальта и зерен карбида вольфрама, являющегося основным износостойким компонентом. Промывочные отверстия в матрице выходят на торцовую часть долота и переходят в промывочные каналы. Последние делят поверхность матрицы на секторы. На рабочей и калибрующей поверхностях секторов матрицы по определенной схеме размещены и закреплены алмазы. Алмазы закрепляют в процессе изготовления матрицы методами порошковой металлургии. После изготовления долота вылет алмазов над рабочей поверхностью матрицы должен составлять 0,10–0,25 их диаметра.

По форме и направлению пазов, промывочных каналов, рабочих органов и всей рабочей части выделяют алмазные долота двух типов, производимых в России: долота спиральные (ДС) (см. рис. 2.117. а) и радиальные (ДР) (см. рис. 2.117., б).

По размещению алмазов в матрице различают долота с поверхностной вставкой алмазов (однослойные) (рис. 2.118.) и импрегнированные (рис. 2.119.).

Долота с поверхностной вставкой алмазов получают при однослойной укладке относительно крупных алмазов в специальную огнеупорную форму, а импрегнированные

– равномерным перемешиванием мелких и невысокого качества алмазов в поверхностном слое толщиной от 6 до 10 мм.

Диаметры алмазных долот несколько (примерно на 2 мм) меньше диаметров шарошечных долот.

По профилю рабочих поверхностей алмазные долота подразделяются на:

- долота с системой мелких торовидных выступов (ДР, ДИ) (см. рис. 2.117, д);
- долота с системой крупных торовидных выступов (ДК, ДИ, ДУ) (см. рис. 2.117., г);
- долота с гладким профилем рабочих поверхностей (ДР, ДО, ДЛС) (см. рис. 2.117.,

в).

По способу армирования изготавливаются алмазные долота трех модификаций:

- однослойные долота (ДЛ, ДР);
- импрегнированные долота (ДИ, ДКСИ);
- комбинированные долота с однослойным и импрегнированным армированием (ДУ,

ДУС). Долота с поверхностной вставкой алмазов получают при однослойной укладке относительно крупных алмазов в специальную огнеупорную форму, а импрегнированные – равномерным перемешиванием мелких и невысокого качества алмазов в поверхностном слое толщиной от 6 до 10 мм.

Диаметры алмазных долот несколько (примерно на 2 мм) меньше диаметров шарошечных долот.

По профилю рабочих поверхностей алмазные долота подразделяются на:

- долота с системой мелких торовидных выступов (ДР, ДИ) (см. рис. 2.117, д);
- долота с системой крупных торовидных выступов (ДК, ДИ, ДУ) (см. рис. 2.117, г);
- долота с гладким профилем рабочих поверхностей (ДР, ДО, ДЛС) (см. рис. 2.117.,

в).

По способу армирования изготавливаются алмазные долота трех модификаций:

- однослойные долота (ДЛ, ДР);
- импрегнированные долота (ДИ, ДКСИ);
- комбинированные долота с однослойным и импрегнированным армированием (ДУ,

ДУС).

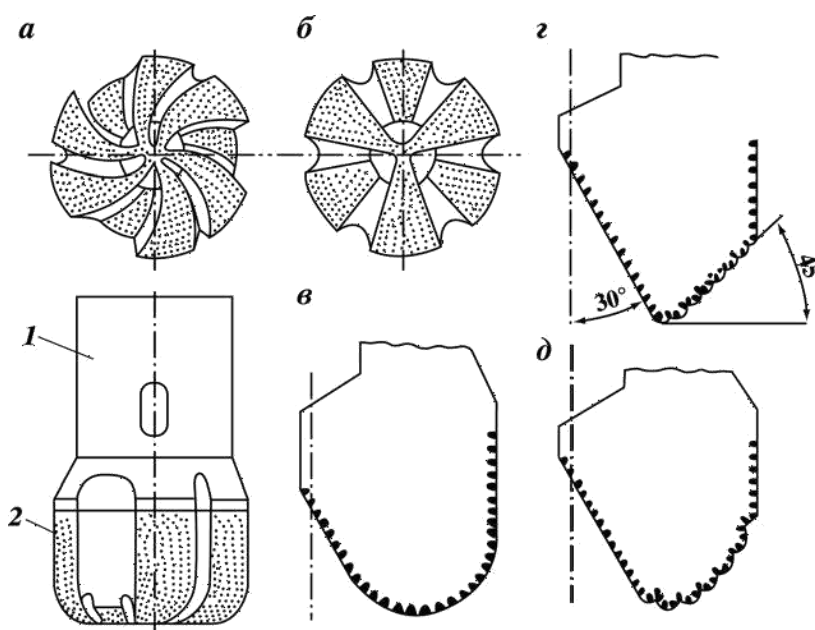


Рис. 2.117. Алмазные долота выпускаемые в России.



Рис. 2.118. Общий вид однослойного алмазного долота, оснащенного крупными натуральными алмазами



Рис. 2.119. Общий вид импрегнированного алмазного долота

Примеры условной записи (шифра) алмазных долот:

ДК-212М6:

Д – обозначение алмазного долота;

К – долото со ступенчатым профилем;

212 – номинальный диаметр, мм;

М – для мягких пород (выполняется однослойным);

6 – номер модели;

ДИ-188С6:

Д – обозначение алмазного долота;

И – импрегнированное долото;

188 – номинальный диаметр долота, мм;

С – для средних пород;

6 – номер модели;

ДР-159СТ1:

Д – обозначение алмазного долота;

Р – радиальное долото;

159 – номинальный диаметр, мм;

СТ – для среднетвердых пород (выполняются только однослойными);

1 – номер модели;

ДКС-138С:

Д – обозначение алмазного долота;

К – долото со ступенчатым профилем;

С – долото с синтетическими алмазами;

138 – номинальный диаметр, мм;

С – для средних пород;

ДЛС-267С1:

Д – обозначение алмазного долота;

Л – однослойное радиальное лопастное;

267 – номинальный диаметр, мм;

С – для средних пород;

1 – номер модели.

2.12. Кодирование износа алмазных (классических) долот

Кодирование износа проводится по системе, принятой в России (ВНИИБТ). Виды износа алмазных долот записывают буквой и цифрами, обозначающими расположение и размер выработки.

Буквами обозначают вид и форму износа:

О – обнажение алмазов;

Ц – выработка в центральной части долота;

Т – кольцевая выработка на торцевой рабочей поверхности;

П – выработка периферийной рабочей поверхности;

d – износ кернообразующего отведения бурильной головки;

D – износ по диаметру.

Результаты общего состояния долота записывают словами:

«в работе» или «отработано».

«В работе» – это значит, что долото после очередного рейса осталось работоспособным и может быть использовано повторно.

«Отработано» – долото непригодно для дальнейшего использования из-за:

– выработки в центральной части долота;

– кольцевой выработки в центральной, торцевой или периферийной частях долота;

– износа долота по диаметру более чем на 3 мм;

– выпадения алмазов в результате эрозионного износа матрицы долота;

– других видов износа.

Примеры записи видов износа алмазных долот:

Ц40 · 20 – выработка в центральной части долота диаметром 40 мм и глубиной 20 мм;

Т140 · 150 · 5 – кольцевая выработка на торцевой поверхности долота между диаметрами 140 и 150 мм глубиной 5 мм;

П208 · 35 – выработка периферийной части долота от края долота до диаметра 208 мм глубиной 35 мм;

О 1/2.Д212.d82 – обнажение зерен алмазов торцевой поверхности на 0,5 размера зерна, износ долота по диаметру до 212 мм, увеличение диаметра кернообразующего отверстия до 82 мм.

Примеры записи износа алмазных долот в буровом журнале: отработано, Д212Т140 · 150 · 5 – долото непригодно к дальнейшему использованию, долото по диаметру сработано до 212 мм (номинальный диаметр был 214,3 мм), на торцевой поверхности образовалась кольцевая выработка между диаметрами 140 и 150 мм глубиной 5 мм; в работе, Д214,3Т140 · 150 · 2Т70 · 80 · 1 – долото пригодно к дальнейшему использованию, диаметр долота не изменен, имеет две торцевые выработки: первую между диаметрами 140 и 150 мм глубиной 2 мм; вторую между диаметрами 70 и 80 мм глубиной 1 мм.

2.13. Долота ИСМ

Конструкция долота ИСМ, разработанного Украинским научно-исследовательским институтом сверхтвердых материалов, приведена на рис. 2.120, 2.121, 2.122.



Рис.2.120. Общий вид долота ИСМ радиального типа.



Рис.2.121. Общий вид долота ИСМ торцового типа.



Рис.2.122. Общий вид долота ИСМ секторного типа.

Стальной корпус с присоединительной замковой резьбой на торцевой профильной рабочей поверхности и калибрующей поверхности имеет вставки из сверхтвердого материала «Славутич», обладающего высокой износостойкостью. Вылет вставок над рабочей поверхностью корпуса составляет 3–5 мм. На калибрующей поверхности вставки утоплены, т.е. их вылет равен 0. Для оснащения долот применяют цилиндрические вставки диаметром 8–12 мм с плоскими, полусферическими и клиновыми рабочими торцами.

Рабочие элементы крепятся к стальному корпусу методом пайки.

На обратном конусе вставки размещены по спирали, на его поверхности проточена спиральная канавка для дополнительной циркуляции бурового раствора, выноса шлама и охлаждения вставок.

Буровой раствор из промывочных отверстий поступает в основные и дополнительные промывочные каналы. Основные промывочные каналы делят всю рабочую и калибрующую поверхность долота на секторы.

Долота ИСМ могут быть как с обычной промывкой (отверстия без насадок), так и гидромониторными (с насадками). При этом насадки изготавливаются из твердого сплава согласно ТУ 88 УССР ИСМ-472–75 и ГОСТ 3882–74. Их форма обычно такая же, как и форма насадок для шарошечных долот.

Долота ИСМ с обычной промывкой используют, как правило, при турбинном бурении, а гидромониторные – при роторном способе бурения.

Форма рабочей поверхности вставок марки «Славутич» и количество вставок

определяются физико-механическими свойствами горных пород.

Долота ИСМ выпускаются трех разновидностей: режущие, торцовые и истирающие.

Режущие долота ИСМ предназначены для бурения в мягких и средних пластичных породах. Количество вставок минимально возможное, обеспечивающее не более чем полутора кратное перекрытие забоя. Это позволяет при относительно небольших нагрузках на долото создавать значительные удельные нагрузки. Общее содержание вставок марки «Славутич» в долоте режущей разновидности в 6–10 раз меньше, чем в истирающем ИСМ. Оно возрастает от центра к периферии долота.

Форма рабочей части лопасти может быть либо выпуклой, либо выпукло-вогнутой.

Торцовые долота ИСМ предназначены для забуривания нового ствола при бурении направленных скважин, а также для ликвидации аварий. Кроме того, они применяются в среднемягких горных породах.

Истирающие долота ИСМ предназначены для бурения мягких и средних малоабразивных пород. Они могут быть либо радиальными, либо секторными. Первая конструкция применяется для турбинного бурения, вторая – для роторного и турбинного.

Секторные долота имеют комбинированное вооружение. Их наружный ступенчатый корпус оснащен вставками с клиновидной рабочей головкой, а внутренний – вставками с круглой рабочей головкой. Такое вооружение применяется в долотах, предназначенных для бурения пород перемежающейся твердости.

Примеры условной записи долот ИСМ:

ИСМ-188-РГ-10:

ИСМ – вид долота;
188 – номинальный диаметр, мм;
Р – режущее;
Г – гидромониторное;
10 – номер модели;

ИСМ-292-А-МС:

ИСМ – вид долота;
292 – номинальный диаметр, мм;
А – для аварийных работ;
МС – мягкие и средние породы.

ИСМ-267-МС-2:

ИСМ – вид долота;
267 – номинальный диаметр, мм;
МС – мягкие и средние породы;
2 – номер модели.

2.14. Долота PDC

Общий вид долота PDC (P – polycrystalline, D – diamond, C – cutter) представлен на рис. 2.123.. Долото состоит из корпуса с присоединительной замковой резьбой и рабочей части долота – матрицы с лопастями, оснащенными резцами. В матрице между лопастями в промывочных каналах смонтированы гидромониторные промывочные узлы.

Резцы долот PDC двухкомпонентные. Тело резца состоит из прессованного карбида вольфрама. Рабочая кромка резца упрочнена поликристаллическими синтетическими алмазами толщиной 0,5–0,7 мм.

Упрочнение резцов поликристаллическими алмазами повышает износостойкость резцов, а наличие карбидовольфрамового тела (подкладки) увеличивает пластичность резцов в целом (рис.2.124.).

Размеры резцов и их формы показаны на рис.2.125, 2.126.

Резцы вручную впаиваются в гнезда лопастей специальным припоем, как показано на

рис. 2.127., 2.128.

После оснащения лопастей резцами проводят балансировку долота на специальном стенде, добиваясь минимального дисбаланса сил, действующих на долото при разрушении горной породы. При балансировке минимизируются вибрации долота, что приводит к увеличению скорости бурения, срока службы долота и достижению высокого экономического эффекта. Долота PDC изготавливают двух видов: долота с цельным стальным корпусом и матричные, с твердосплавной матрицей, припаянной к стальному корпусу.



Рис. 2.123. Общий вид долота PDC.

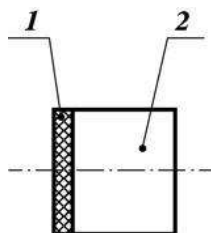


Рис. 2.124. Схема резца долота PDC:
1 – алмазный слой; 2 – твердосплавная основа.

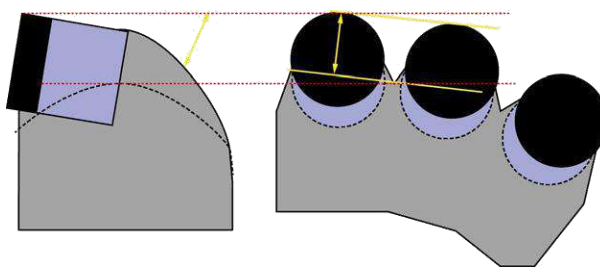


Рис. 2.125. Формы резцов долот PDC.

В долотах PDC первого вида цельковый корпус изготавливается резанием на специальных станках, там же высверливаются гнезда под резцы, в которые их впаивают по специальной технологии. При работе таких долот вместе с резцами изнашивается корпус долота, который не подлежит реставрации.

В матричных долотах корпус с присоединительной резьбой изготавливается из стали резанием, а импрегнированная матрица – методом порошковой металлургии, т.е. в водородной печи шихта (смесь порошкообразного карбида вольфрама и кобальта) спекается при температуре 1300 °С.

В форму под матрицу (опоку) по шаблону в места, предназначенные под резцы,

вставляют графитовые стержни. После спекания матрицы стержни извлекают, а на их место впаивают резцы. Готовую матрицу по всей плоскости припаивают к стальному корпусу. После этого долото балансируется. При работе таких долот импрегнированная матрица не изнашивается.

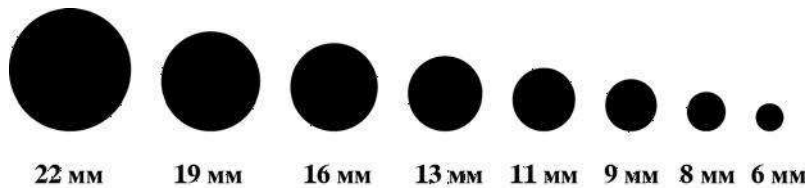


Рис. 2.126. Диаметры резцов долот PDC.

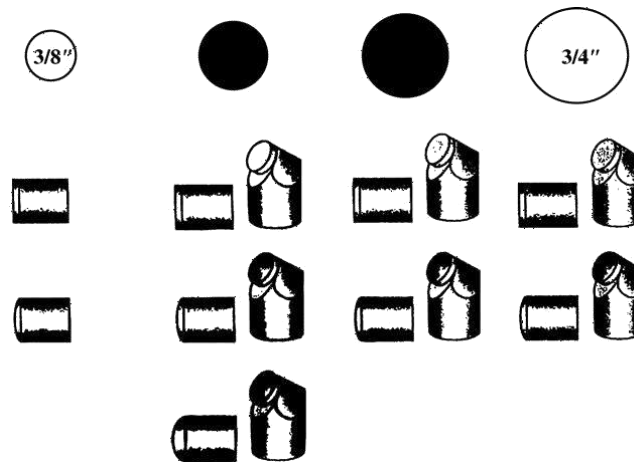


Рис. 2.127. Положение резца в лопасти долота PDC.



Рис. 2.128. Общий вид готового к работе долота PDC.

Изнашиваются в основном резцы. Поэтому такие долота подлежат реставрации. При реставрации изношенные резцы выпаивают, а на их место впаивают новые. За счет реставрации существенно снижается стоимость таких долот.

Особую группу долот PDC составляют бицентричные долота (рис. 2.129, 2.130).

Особенность работы бицентричных долот заключается в том, что при бурении они образуют новый ствол большего диаметра, чем проходной ствол.

Схемы спуска и бурения бицентричными буровыми долотами показаны на рис. 2.131, 2.132, 2.133, 2.134.



Рис. 2.129. Общий вид бицентричного долота



Рис. 2.130. Элементы бицентричного долота

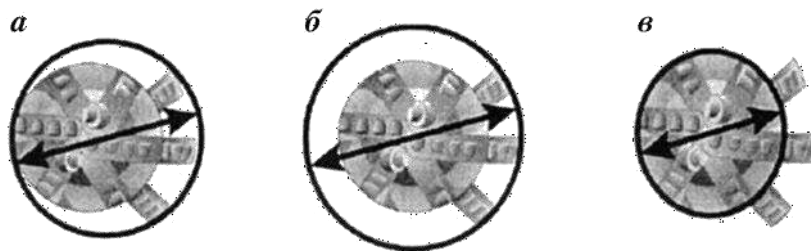


Рис.2.131. Схемы формирования диаметра скважины бицентричным долотом: а – проходной диаметр; б – разбурываемый диаметр; в – диаметр «пилота»



Рис. 2.132. Схема спуска бицентричного долота в скважину

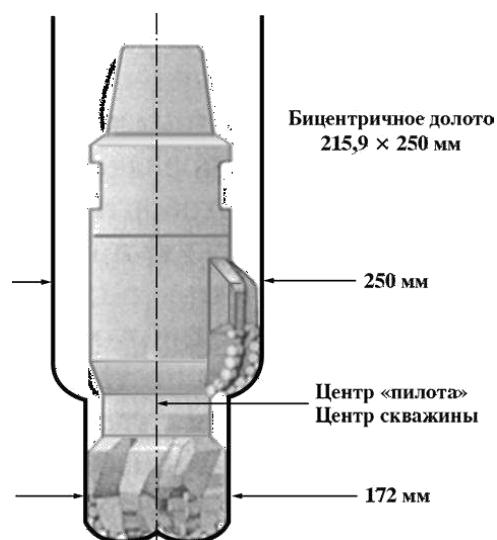


Рис.2.133. Схема бурения скважины бицентричным долотом

Бицентричные долота используют при бурении вторых стволов, при необходимости намывки гравийных фильтров в зоне продуктивного пласта.

В последние годы буровые долота PDC получили широкое применение во всем мире, в том числе и в России за счет их высокой стойкости (тысячи метров на долото) и высоких механических скоростей бурения. На сегодня в России имеется шесть производителей породоразрушающих инструментов PDC: ООО «Азимут», ООО НПП «Буринтех», ОАО НПП «Бурсервис», ОАО «Волга-бурмаш», ЗАО «Проммашсервис», СП ЗАО «Удол», что указывает на повышенный спрос данного инструмента.

Основными мировыми производителями породоразрушающих инструментов PDC являются фирмы США и Китая. Они же являются изготовителями шарошечных и алмазных (классических) породоразрушающих инструментов.

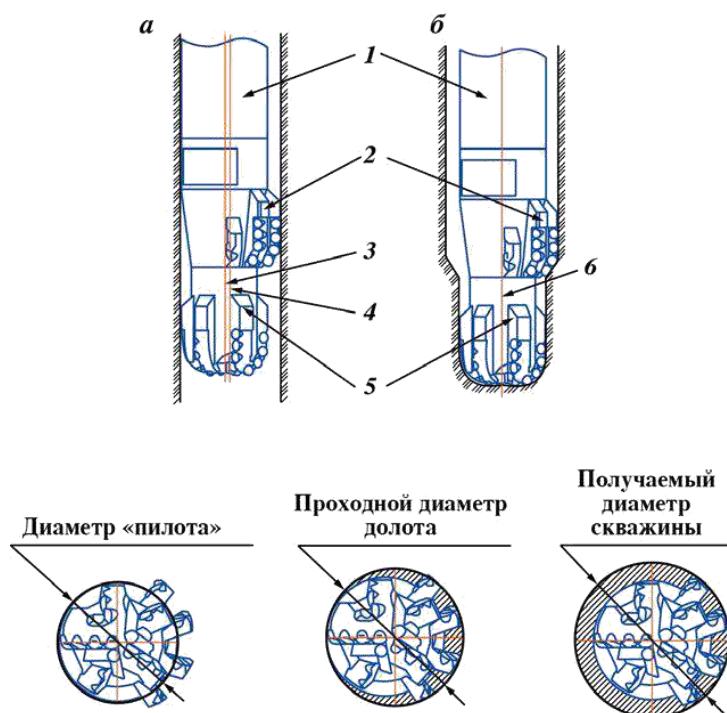


Рис. 2.134. Схема работы бицентричного долота:

а – при спуско-подъемных операциях; б – при бурении; 1 – гидравлический забойный двигатель; 2 – расширитель; 3 – ось «пилота»; 4 – ось скважины; 5 – «пилот»; 6 – оси «пилота» и скважины (совпадают)

Буровые долота PDC классифицируют по системе IADC (табл.2.2).

Пример условной записи долота PDC S121:

S – стальной корпус;

1 – для мягких пород;

2 – диаметр резцов 19 мм;

1 – короткий профиль.

Таблица 2.2.

Классификация долот PDC по коду IADC

Тип корпуса	Тип горных пород		Диаметр резцов, мм		Тип профиля долота
			2	19	
M – матричный корпус	1	Очень мягкие	2	19	1 – короткий «рыбий хвост» 2 – короткий профиль 3 – средний профиль 4 – длинный профиль
			3	13	
			4	8	
	2	Мягкие	2	19	
			3	13	
			4	8	
S – стальной корпус	3	Мягкие средние	2	19	
			3	13	
	4	Средние	2	19	
			3	13	
		4	8		

В связи с широким применением буровых долот PDC в России приведем некоторые общие рекомендации по их эксплуатации:

по осевой нагрузке:

0,25–1,0 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 1,1 тс) при бурении в мягких породах;

0,5–1,1 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 1,4 тс) при бурении в породах средней твердости;

0,7–1,8 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 2,0 тс) при бурении в твердых породах;

0,9–1,8 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 2,0 тс) при бурении в крепких породах.

по частоте вращения:

100–180 об/мин в неабразивных породах; 60–80 об/мин в абразивных породах;

по гидравлической мощности, подводимой к долоту, на 1 дюйм² площади забоя скважины:

2–7 л/с на 1 дюйм² площади забоя при использовании бурового раствора на водной основе;

1–5 л/с на 1 дюйм² площади забоя при использовании бурового раствора на нефтяной основе.

В табл. 6 приведены рекомендуемые подачи бурового раствора для буровых долот различных диаметров.

Диаметр долота RDC, дюйм (мм)	Подача насоса, л/мин	Удельный расход на 1" диаметр долота, л/мин
17 1/2 (444,5)	3 000–4 000	170–230
12 1/4 (331,1)	2 300–2 800	190–230
8 1/2 (215,9)	1 200–1 500	140–180
6 (152,4)	600–800	100–135

2.15. Кодирование износа долот PDC

Очень важно ввести аналогичную систему описания износа и для долот с неподвижными резами, т.е. всех не шарошечных (безопорных).

В 1987 г. такая система была разработана подкомитетом по буровым долотам Международной ассоциации буровых подрядчиков. В 1991 г. система была отредактирована. Систему описания износа можно применять для не шарошечных долот всех типов, включая долота с природными поликристаллическими (PDC) и термостойкими поликристаллическими (TSP) алмазами, а также импрегнированные бурильные головки и долота безопорные, не оснащенные алмазным вооружением (ИСМ).

Система описания износа едина для буровых долот и бурильных головок всех конструкций. Таблица описания износа долот стандарта IADC включает коды для обозначения износа шарошечных долот и долот с неподвижными резами. Параметры износа вносятся в соответствующие восемь колонок.

Табл. 2.4. аналогична схеме кодирования износа шарошечных долот по системе IADC: колонки 1–4 – код износа вооружения («Вооружение»); колонка 5 (В) – код износа опоры («Подшипник, уплотнение»), так как в безопорных долотах (долотах с неподвижными резами) нет опор, в этой колонке всегда ставится знак «Х»; колонка 6 (G) – износ долота по диаметру («Диаметр»); колонки 7 и 8 – второстепенный износ (или вторичные характеристики износа) и причина подъема («Второстепенный износ» и «Причина подъема»).

Таблица 2.4.

Кодирование износа безопорных долот по IADC

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				В	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16"	Второстепенный износ	Причина подъема
2	6			X			

Степень износа внутренних и внешних рядов вооружения долота с поверхностно-вставленными алмазами определяется при помощи линейной шкалы от 0 до 8, аналогично шарошечным долотам. Цифры увеличиваются с ростом степени износа: 0 означает отсутствие износа, 8 – полный износ, 4 – 50%-ный износ.

Износ реза долота PDC определяется по линейной шкале от 1 до 8 от края до края алмазной пластины, независимо от формы, размера, типа или вылета реза.

Степень износа резцов схематично показана на рис. 2.135. Для определения степени износа записывают среднюю величину износа каждого сектора.

Как показано (см. рис. 2.135), 2/3 радиуса представлено внутренними рядами. Пять

резцов имеют степень износа «2».

Проведем расчет путем определения средней степени износа для каждого резца в группе из пяти:

$$(4 + 3 + 2 + 1 + 0) / 5 = 2.$$

Для сектора «Внешние ряды» степень износа рассчитывается аналогично:

$$(5 + 6 + 7) / 3 = 6.$$

Таким образом, степень износа внешних рядов – «6».

Цифры вносят в таблицу описания износа долот стандарта IADC (табл. 2.5).

В колонках 3 и 7 указывают характеристики износа, т.е. наиболее заметные изменения физического состояния применяемого долота по сравнению с новым, используя двухбуквенные коды (табл. 2.5) На рис. 2.136, 2.137. показаны характеристики износа.

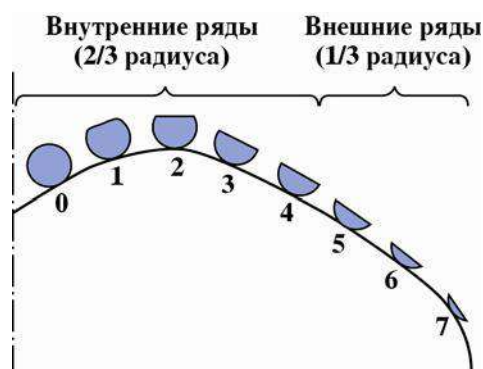


Рис. 2.135. Схема износа вооружения (внутренние и наружные венцы) (для бурильной головки осевая линия будет проходить по внутреннему диаметру).

Таблица 2.5.

Кодирование износа безопорных долот по IADC

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16"	Второстепенный износ	Причина подъема
		WT		X		RO	
Примечания: 1. В колонке «Местонахождение» укажите номер (а) шарошки (шарошек). 2. При отсутствии износа поставьте Л/О в колонке «Описание износа». 3. При отсутствии второстепенного износа поставьте Л/О в колонке «Второстепенный износ»							

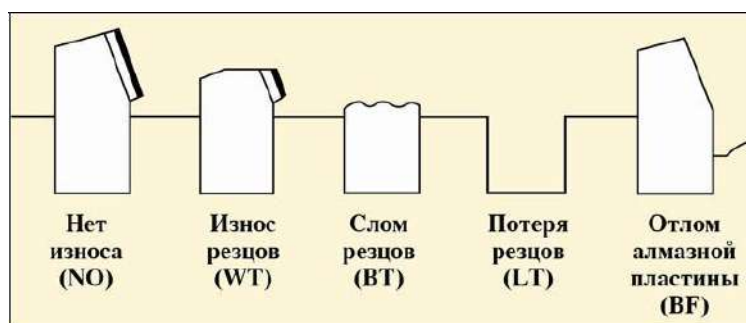


Рис. 2.136 Формы износа твердосплавных резцов, запрессованных в тело полости долота.

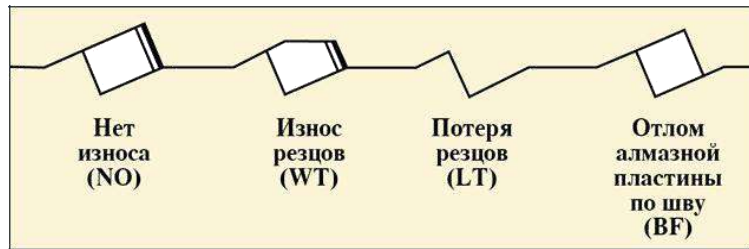


Рис. 2.137. Формы износа твердосплавных резцов

Кодовые обозначения типов второстепенного износа:

- *BC – слом шарошки;
 - CR – кернение долота;
 - LN – потеря насадки;
 - RO – кольцевой износ;
 - BF – отлом алмазной пластины по шву;
 - CT – скол зубков (резцов);
 - LT – потеря зубков (резцов);
 - SD – повреждение козырька;
 - BT – скол зубков (резцов);
 - ER – эрозия;
 - OC – эксцентричный износ;
 - SS – самозатачивание резцов;
 - BU – образование сальника;
 - FC – затупление верхушек резцов;
 - PВ – механическое повреждение при СПО;
 - TR – трекинг;
 - *CC – трещина в шарошке;
 - HC – трещины перегрева;
 - PN – закупорка насадки;
 - WO – промыв инструмента;
 - *CD – истирание заклиненной шарошки (промывочного канала);
 - JD – металл на забое;
 - WT – износ зубков (резцов);
 - CI – взаимозацепление шарошек;
 - *LC – потеря шарошки;
 - RG – износ по диаметру;
 - NO – отсутствие износа;
 - RR – подлежит повторному спуску;
 - NR – не подлежит повторному спуску.
- Примеры описания износа долот PDC показаны на рис. 2.138, 2.139, 2.140.



Рис. 2.138. Износ резцов (WT)



Рис. 2.139. Скол резцов (BT)



Рис. 2.140 Кернение долота (CR)

В колонке «Местонахождение» указывается местоположение износа вооружения, описанного в колонке 3.

На рис. 2.141. показаны четыре существующих профиля долота с неподвижными резцами и коды для описания местоположения износа. Один (или больше) из этих кодов используют при указании местоположения характеристики износа.

В колонке G указывают износ диаметра долота по калибру. Буква I означает сохранение диаметра. Уменьшение наружного диаметра измеряется в 1/16".

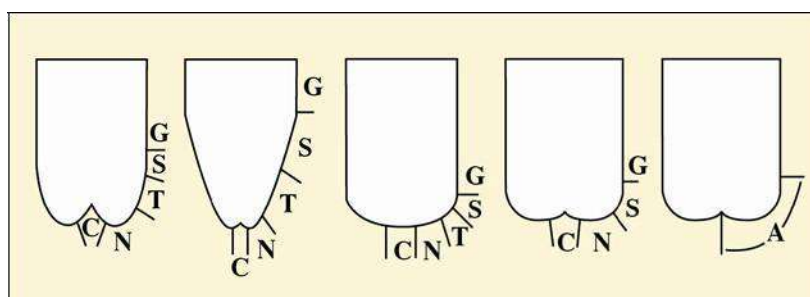


Рис. 2.141. Профили долот с неподвижными резцами:

C – конусный сектор; N – торцевой сектор; T – крыло; S – плечевой сектор; G – наружный диаметр; A – все участки

Приведем обозначения износа долот с фиксированными резцами:

I – сохранение диаметра;

1/16 – износ по диаметру до 1/16";

2/16 – износ по диаметру от 1/16" до 1/8";

3/16 – износ по диаметру от 1/8" до 3/16";

4/16 – износ по диаметру от 3/16" до 1/4".

Кодовые обозначения причин подъема долота:

- ВНА – смена КНБК;
- DMF – отказ забойного двигателя;
- DSF – повреждение бурильной колонны;
- DST – испытания пластов;
- DTF – отказ инструмента;
- LOG – ГИС (каротаж, инклинометр);
- RIG – ремонт бурового оборудования;
- CM – обработка бурового раствора;
- CP – отбор керна;
- DP – разбуривание цементного стакана;
- FM – смена геологической обстановки;
- HP – авария;
- HR – подъем по времени;
- PP – изменение давления на стояке;
- PR – падение скорости проходки;
- TD – проектный забой (колонна);
- TQ – рост крутящего момента;
- TW – отворот инструмента (трубы);
- WC – погодные условия;
- WO – промыв бурильной колонны.

Приведем практические примеры описания износа долот с фиксированными резцами.

Пример 1. Долото R437GN применялось для горизонтального бурения глинистых сланцев. КНБК включала забойный двигатель 6 3/4" Mach 1 с фиксированным углом перекоса. Во время первого долбления было пробурено 118 м за 8,5 ч. Долото поднято с глубины 1433 м. Механическая скорость бурения составляла 13,9 м/ч. При обследовании долота после подъема не было обнаружено признаков износа (рис.2.142.).



Рис.2.142. Общий вид долота после подъема. Спецификация долота: тип R437GN; размер 8,5"; общая площадь потока 0,6

Результаты обследования внесены в табл. 2.4.

Таблица 2.4.

Кодовое описание износа долота R437GN (пример 1)

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				В	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16"	Второстепенный износ	Причина подъема
0	0	NO	A	X	I	NO	TD

Пример 2. Долото R437GN применялось при бурении интервала от хрупких до вязких глин и песчаника в горизонтальной скважине. Было пробурено 387 м за 29,5 ч со средней механической скоростью 13,1 м/ч.

КНБК включала забойный двигатель 6 3/4" Mach 1 с изменяемым углом перекоса. Долото поднято с глубины 1820 м по причине низкой механической скорости бурения. После поднятия долота выяснилось, что снижение механической скорости бурения произошло по причине кернения долота и потери всех четырех насадок, а на оставшихся резцах не было обнаружено значительных признаков износа (рис.2.143.).



Рис.2. 143. Общий вид долота. Спецификация долота: тип R437GN; размер 8,5";
общая площадь потока 0,6

Результаты обследования внесены в табл. 10.

Пример 3. В районе Северного моря долото R435SG применялось на протяжении четырех СПО. Всего было пробурено 977 м за 166,3 ч в основном в соленых и агидритных породах (цехштейн). В трех из четырех спусков КНБК включала забойный двигатель Mach 1 DTU (210–320 об/мин). При обследовании после двух первых спусков не было выявлено существенного износа вооружения.

Таблица 2.5.

Кодовое описание износа долота R437GN (пример 2)

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16"	Второстепенный износ	Причина подъема
6	2	CR	C	X	T	LN	PR
Примечание. Хотя произошла потеря всех четырех насадок, в колонке «Описание износа» указано «Кернение долота» (CR), так как главной причиной потери насадок является кернение. Потеря насадок (LN) отмечена в колонке «Второстепенный износ».							

В колонке «Причина подъема» в обоих случаях было указано «Отказ инструмента» (DTF).

После третьего спуска (пробурено 389 м за 89,5 ч) долото было поднято по причине смены КНБК. При этом наблюдался равномерный износ ± 20 % внутренних и внешних рядов вооружения.

При обследовании долота после четвертого спуска было выявлено 50 % износа внутренних рядов и 60 % износа внешних рядов вооружения. Также наблюдались сильная эрозия и потеря резцов в секторе крыла (рис. 2.144).

Результаты обследования внесены в табл.2.6. Содержащуюся в описании износа

информацию можно использовать для нескольких целей. С ее помощью изготовители долот могут проанализировать прочность конструкции и область применения своей продукции.

Буровики могут усовершенствовать программы бурения. Систему оценки можно компьютеризировать и создать всемирную базу данных с целью повышения эффективности подбора долот для конкретных условий применения.



Рис. 2.144. Общий вид долота после четвертого спуска. Спецификация долота: тип R435SG; размер 12,25"; общая площадь потока 0,65– 1,60.

Таблица 2.6.

Кодовое описание отработанного долота R435SG (пример 3)

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16"	Второстепенный износ	Причина подьема
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
<i>Спуск 1</i>							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
<i>Спуск 2</i>							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
<i>Спуск 3</i>							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
<i>Спуск 4</i>							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF

Основной причиной введения единой системы оценки является необходимость стандартизации сведений о долоте, независимо от места и конкретных условий его применения.

2.16. Шарошечные и лопастные бурильные головки гост 21210–75

Породоразрушающий инструмент для бурения скважин кольцевым забоем называют бурильными головками.

Бурильные головки предназначены для бурения скважин с отбором керна. Они могут использоваться со стационарными либо съемными керноприемниками.

Бурильные головки могут быть шарошечными, лопастными, фрезерными, алмазными (классическими) ИСМ или PDC.

Шарошечные бурильные головки (рис. 2.145) выполняются с одной, тремя, четырьмя, пятью, шестью, восемью и более рабочими органами. Шарошки в бурильной головке могут быть:

- коническими;
- одно-, двух-, или трехконусными;
- в виде усеченного конуса;
- цилиндрическими;
- цилиндроконическими;
- сферическими;
- чечевицеобразными.

Число и конструкция подшипников в опоре каждой шарошки также могут быть различными в зависимости, главным образом, от формы исполнения, габаритных размеров шарошки и бурильной головки.

Лопастные бурильные головки предназначены для отбора керна в мягких породах роторным способом в комплекте с несъемным керноприемником (табл.2.7).

Промывочный узел состоит обычно из нескольких каналов, просверленных в лапах или корпусе бурильной головки. Выходные промывочные отверстия во избежание размыва керна располагаются между шарошками подальше от центра.

Важными параметрами конструкции бурильной головки являются высота и коэффициент керноприема.

Высотой керноприема принято называть расстояние от зоны образования керна до кернорвателя, а коэффициентом керноприема – отношение к этому расстоянию диаметра керна.



Рис.2.145. Общий вид шарошечных бурильных головок:
а – ТКЗ; б – СЗ; в – МСЗ; г – СТ

Таблица 2.7.

Типы, область применения бурильных головок и исполнение их рабочей части по ГОСТ 21210–75

Тип	Область применения	Исполнение рабочей части
М	Бурение мягких устойчивых пород	Лопастные со вставными твердосплавными зубцами, с наплавкой твердого сплава и без наплавки
МСЗ	Бурение мягких пород с пропластками пород средней твердости	Шарошки со вставными твердосплавными зубками
СЗ	Бурение пород средней твердости	
СТ	Бурение пород средней твердости с пропластками пород твердых	Шарошки со вставными твердосплавными зубками или фрезерованными зубцами с наплавкой или без наплавки твердым сплавом
ТЗ	Бурение твердых пород	Шарошки со вставными твердосплавными зубками
ТКЗ	Бурение твердых абразивных пород с пропластками пород крепких	

Пример условного обозначения бурильной головки для керноприемных устройств без съемного керноприемника (К) с наружным диаметром $D = 139,7$ мм, внутренним диаметром $d = 52$ мм для бурения мягких пород:

К 139,7/52 М ГОСТ 21210–75.

Пример условного обозначения бурильной головки для керноприемных устройств со съемным керноприемником (КС) с наружным диаметром $D = 187,3$ мм, внутренним диаметром $d = 40$ мм для бурения пород средней твердости:

КС 187,3/40 СЗ ГОСТ 21210–75.

2.17. Алмазные бурильные головки и бурильные головки ИСМ и PDC

Промышленностью выпускаются алмазные (классические) бурильные головки, оснащенные как природными, так и синтетическими алмазами (рис. 2.146, 2.147).

Бурильные головки первого класса изготавливаются трех разновидностей: однослойные радиальные, однослойные ступенчатые и импрегнированные.

Однослойные радиальные бурильные головки выпускаются серийно одного типа СТ двух модификаций в четырех моделях:

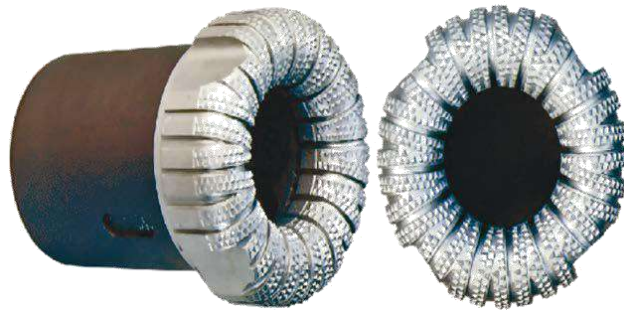


Рис.2.146. Общий вид импрегнированной алмазной бурильной головки

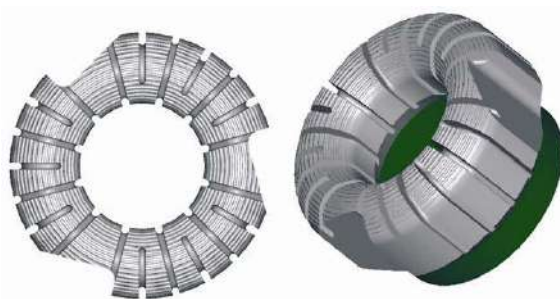


Рис. 2.148. Общий вид однослойной алмазной бурильной головки

КР 159/67 СТ2;

КР 188/80 СТ2;

КР 212/80 СТ2;

КР 188/40 СТ1.

В записи бурильных головок приняты следующие обозначения:

К – бурильная головка;

Р – радиальная разновидность;

159/67 – номинальный наружный диаметр бурильной головки/диаметр керноприемного отверстия, мм;

СТ – тип бурильной головки;

2 – порядковый номер модификации.

Однослойные ступенчатые бурильные головки выпускаются двух типов М и С:

тип М – одной модификации 2 в одной модели:

КТ 188/40 М2;

типа С – двух модификаций 3 и 5 в двух моделях:

КТ 138/52 С3;

КТ 138/45 С5.

Импрегнированные бурильные головки выпускаются только типа С модификации 3 в двух моделях:

КИ 188/80 С3;

КИ 212/80 С3.

В бурильных головках обеих моделей с твердосплавной матрицей перемешаны алмазы ХХХIV группы.

Бурильные головки второго класса с синтетическими алмазами изготавливаются двух разновидностей: однослойные и импрегнированные ступенчатые.

Они выпускаются только одного типа С и одной модификации 3.

Однослойные ступенчатые бурильные головки изготавливались в двух моделях:

КТС 188/80 С3; КТС 212/80 С3.

Импрегнированные – в трех моделях:

КТСИ 138/52 С3; КТСИ 188/8 С3;

КТСИ 212/80 С3.

Алмазные бурильные головки производятся в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 39.026–76.

Бурильные головки для колонковых снарядов со съёмным керноприемником изготавливаются с ниппельной наружной присоединительной резьбой, а бурильные головки для колонковых снарядов с несъёмным керноприемником – с муфтовой внутренней резьбой.

ОСТ 39.026–76 также предусмотрено выполнение бурильных головок для колонковых снарядов со съёмным керноприемником следующих семи размеров, мм:

185,7/40;

188,9/40;

211,1/60;

214,3/60;

242,1/60;

267,5/60;

292,9/60.

Бурильные головки размерами 185,7/40 и 188,9/40 выпускаются с ниппелем 3-147, размером 211,1/60 и 214,3/60 – с ниппелем 3-161, а остальные – с ниппелем 3-171. Бурильные головки для керноприемных снарядов с несъёмным керноприемником производятся следующих размеров, мм:

130,4/60;

211,1/80;

138,1/60;

214,3/80;

141,3/52;

220,7/80;

147,6/52;

242,1/100;

157,1/67;

267,5/100;

163,5/67;

292,9/100;

169,8/67;

308,7/100;

185,7/80;

317,6/100;

188,9/80;

346,8/100.

195,3/80;

Бурильные головки ИСМ, вооруженные вставками со сверхтвёрдым материалом «Славутич», выпускаются в настоящее время одной и той же разновидности (рис. 72) и одного типа МС.

Эти бурильные головки армируются вставками с материалом «Славутич» по

наружной рабочей поверхности шести лопастевидных рабочих органов, составляющих единое целое с продолговатым полым корпусом, а также по внутренней центральной части, обеспечивающей образование керна.

Изготовление таких бурильных головок проводится в соответствии с ТУ 88 УССР ИСМ 472–76. Этими техническими условиями предусматривается изготовление бурильных головок под общим шифром ИСМ трех типов: М, МС и С.

Общий вид бурильных головок ИСМ и PDC представлен на рис. 2.149, 2.150. Бурильные головки, как и буровые долота, имеют стальной корпус с присоединительной резьбой и рабочие органы в виде лопастей, оснащенные резцами из поликристаллических синтетических алмазов.

Бурильные головки могут быть цельнометаллические стальные и матричного типа, аналогично буровым долотам. Технология изготовления бурильных головок PDC аналогична технологии изготовления буровых долот.

Бурильные головки PDC применяют для бурения с отбором керна в породах от мягких до средней твердости.



Рис.2.149. Общий вид бурильных головок ИСМ



Рис.2.150. Общий вид бурильной головки PDC



**ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

**Кафедра технологии и техники разведки месторождений полезных
ископаемых**

Усов Г.А.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
БУРОВЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

Методическое пособие по самостоятельной работе
дисциплина "Бурение скважин"
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ПРИГОТОВЛЕНИЕ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ.....	4
2. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ.....	10
3. СПОСОБЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРГАЦИИ ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ.....	14
4. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ И ЭМУЛЬСИОННЫХ РАСТВОРОВ.....	17
5. ПЕРЕМЕШИВАТЕЛИ.....	21
5.1. Гидравлические перемешиватели.....	21
5.2. Механические перемешиватели.....	23
5.3. Перемешиватели, выпускаемые зарубежными фирмами.....	24
6. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БУРОВЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ РАЗРАБОТАННЫЕ НА КАФЕДРЕ “ТТР МПИ”.....	26
6.1. Малогабаритная многосекционная роторная мельница «ММР-2».....	26
6.2. Барабанный измельчитель.....	28
6.3. Струйная вихревая мельница.....	29
6.4. Гидродинамическая роторная мельница ГРМ-2.....	31
6.5. Многоступенчатая струйно-вихревая мельница “СВМ - 3”.....	32
6.6. Многоступенчатая микромолотковая мельница для приготовления механоактивированных буровых растворов.....	34
6.7. Лопастной механоактиватор “ЛМА-2М”.....	37
6.8. Малогабаритная щеточная мельница ММЩ-2М для приготовления буровых промывочных жидкостей.....	39
6.9. Вихревой гидродинамический излучатель “ГДИ”.....	41
6.10. Центробежная мельница мокрого помола “МЦ-Т”.....	43
6.11. Малогабаритная щеточная мельница «МЩ-1».....	45
6.12. Передвижная установка для приготовления буровых промывочных жидкостей.....	46
6.13. Экспресс технология производства импортозамещающих буровых реагентов с использованием эффекта механоактивации крахмалосодержащего сырья.....	50
6.14. Универсальный буровой реагент “РБЦ-4” на основе механоактивированного древесного волокна с повышенным содержанием смол.....	52
6.15. Буровой реагент для освоения шельфовых нефтегазовых месторождений «Peat-MA».....	64
7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ.....	69
7.1. Меры безопасности при работе с промывочными жидкостями.....	69
7.2. Производственная санитария.....	72
7.3. Меры пожарной безопасности.....	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	75

ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям со все возрастающими объемами и глубинами бурения увеличение скорости проходки скважины возможно лишь при быстром и качественном приготовлении буровых промывочных жидкостей. Производительность приготовления и качество применяемых очистных агентов оказывает влияние практически на все показатели в бурении, например, скорость проходки скважин может быть увеличена до 20-30% и выше. При этом общая доля затрат на приготовление буровых промывочных жидкостей составляет от 5 до 14% стоимости сооружения скважин. К промывочным жидкостям предъявляются требования с учетом комплекса геологических, технологических и организационных факторов, возникающих в процессе бурения. Это обуславливает необходимость применения разнотипных машин для приготовления буровых очистных агентов по принципу действия, энергозатрат, производительности, металлоемкости, габаритов и т.д.

Для приготовления промывочных жидкостей из сухих порошкообразных материалов требуется лишь тщательное перемешивание частиц твердой и жидкой фазы и создание условий для полного смачивания твердых частиц. Для приготовления промывочных жидкостей из комовых материалов или влажных порошков необходимо предварительное дробление кусков или слипшихся комков. Процессы дробления исходных твердых материалов и перемешивание их с жидкостью, в частности с водой, осуществляются в механических или гидравлических мешалках.

Машиностроительные заводы по заявкам предприятий бурения продолжают выпускать оборудование для приготовления и утяжеления промывочных жидкостей из комовых материалов. В настоящее время можно найти описание некоторых видов такого оборудования, применяемого различными объединениями, хотя известно, что наиболее прогрессивным, наиболее экономичным является оборудование для приготовления промывочных жидкостей из сухих порошкообразных материалов, что подтверждается зарубежной практикой.

Глинистые растворы готовят в специальных устройствах — глиномешалках механическим или гидравлическим способами. Глиномешалки соответственно подразделяются на механические и гидравлические. Механические глиномешалки по характеру действия делятся — прерывного (циклового) и непрерывного; по конструктивному исполнению — лопастные, роторные, шаровые; по расположению валов — с горизонтальным и вертикальным расположением. Лопастные глиномешалки делятся по числу валов - наодновальные и двухвальные.

В методическом пособии рассмотрены конструкции основных технических средств для приготовления буровых промывочных жидкостей, применяемых в геолого-разведочной и нефтегазодобывающей отраслях, а так же гидродинамические и гидромеханические измельчительные устройства разработанные на кафедре ТТР МПИ за последние 30 лет.

1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ПРИГОТОВЛЕНИЕ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Механические глиномешалки используются для приготовления глинистых растворов, как из комовых, так и из порошковых глин. Привод глиномешалок осуществляется от индивидуальных двигателей или через трансмиссию.

Механические глиномешалки могут быть одноваловые, двухваловые, трехваловые с вертикальным или горизонтальным расположением валов. Привод глиномешалок осуществляется от индивидуальных двигателей или через трансмиссию.

Характеристика глиномешалок, применяемых при разведочном бурении, приведена в табл.1.

Механическая лопастная глиномешалка с горизонтальным валом (рис.1) состоит из металлической емкости-корпуса 1, в которой вращается вал 4 с укрепленными на нем поперечными лопастями 6 для измельчения и перемешивания глины с водой. Лопасти расположены одна относительно другой под углом 90°. Между внутренней поверхностью корпуса и лопастями имеется просвет в 30—35 мм.

Таблица 1

Техническая характеристика глиномешалок

Тип глиномешалки	Емкость, м ³	Расположение валов	Число валов	Скорость вращения рабочих валов, об/мин.	Мощность приводного двигателя, кВт.	Габариты, мм.			Масса, кг.
						Длина	Ширина	Высота	
Г-1-0,25	0,25	горизонт.	1	80	2,0	1400	870	115	260
Г1-0,30	0,30	горизонт.	1	37	2,0	2230	895	0	309
ГМ-0,7	0,70	горизонт.	1	125	5,0	1650	1000	108	-
ГМЭ-0,75	0,75	горизонт.	2	78	2,8	2050	1450	0	696
ОГХ-7А	0,75	вертик.	1	95	6,0	1250	1220	125	385
ГК-1	1,0	горизонт.	2	-	3,0	-	-	0	-
МГ-1-0,75	0,75	горизонт.	-	-	2,8	-	-	131	-
МГ-1-0,80	0,80	горизонт.	2	165	4,5	2450	1130	7	760
Г2-П-2-4	4,0	горизонт.	2	95	21,5	-	-	168	3734
МГ-2-4	4,0	горизонт.	2	90-100	14,0	3890	3015	5	3565
	3,0	горизонт.	2	-	8,8	-	-	-	-
	2,0	горизонт.	2	-	7,0	1450	2150	-	1857

Глину загружают через загрузочный люк 5, который закрывается крышкой. Приготовленный раствор выпускают через спускной люк 7. Вращение с рабочего шкива 2 на горизонтальный вал передается с помощью зубчатого редуктора 3. Как правило, глиномешалка устанавливается на полозьях. Для приготовления глинистого раствора лопастную глиномешалку заполняют водой примерно на $\frac{1}{3}$ объема и загружают в нее необходимое количество глины, периодически проворачивая вал с помощью электродвигателя. Затем доливают воду до верха глиномешалки, закрывают люк крышкой и включают электродвигатель.

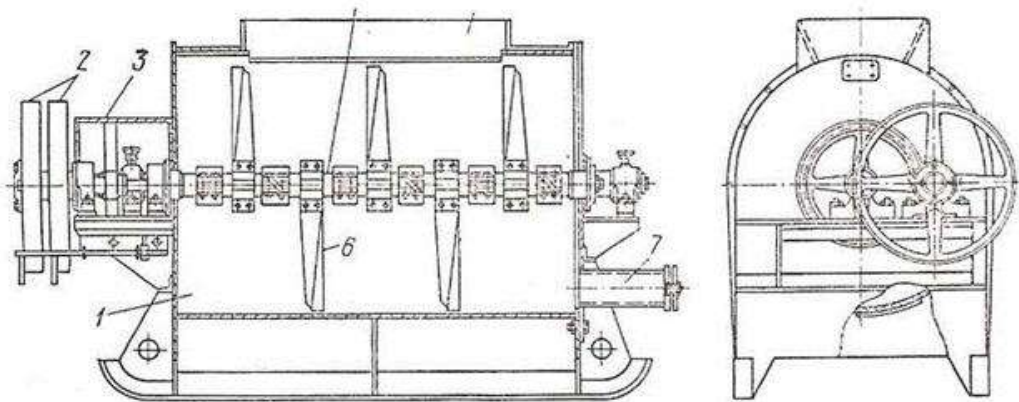


Рис. 1. Горизонтальная одновальная глиномешалка.

Глиномешалка МГ-2-4Х (рис. 2) представляет собой овальный сварной барабан 1, внутри которого на шарикоподшипниках, закрепленных на кронштейнах 6, параллельно установлены два рабочих вала 7 квадратного сечения. К этим валам с помощью болтов крепятся лопасти. Привод валов осуществляется от электродвигателя, передающего вращение ведомому шкиву 9, расположенному на одном валу с шестерней 8, которая, в свою очередь, передает вращение зубчатым колесам 5 на валу 7. Вода, глина и другие компоненты раствора подаются в барабан через загрузочный люк 2. Барабан установлен на раме 4. Рабочие лопасти, вращаясь, разбивают комья глины, в результате чего при смешивании их с водой образуется глинистый раствор. Приготовленный раствор сливается через спускной патрубок 3, расположенный в нижней части барабана, с помощью специального рычага. Конструкция глиномешалки ГКЛ-2М отличается от МГ-2-4Х существенно.

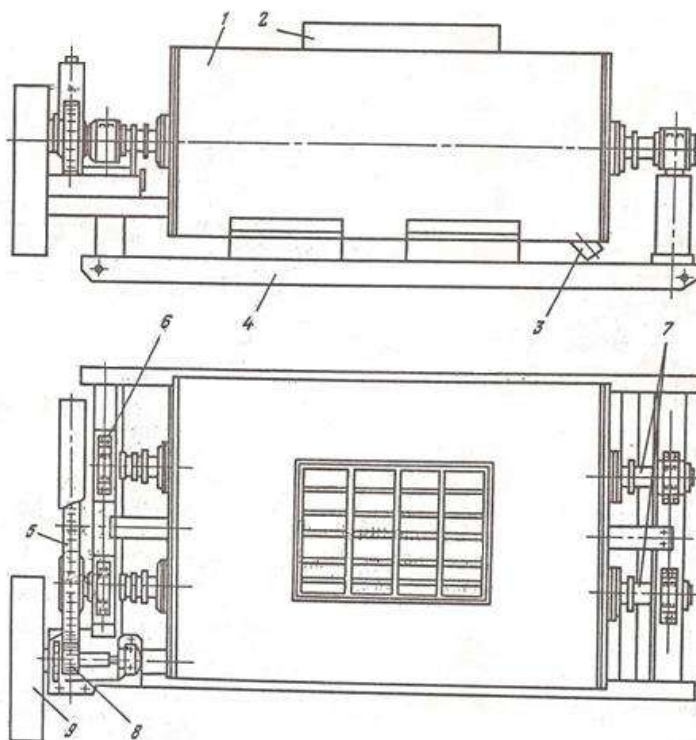


Рис. 2. Глиномешалка МГ-2-4Х

Техническая характеристика лопастных глиномешалок

Тип глиномешалки.....	МГ-2-4Х	ГКЛ-2М
Вместимость барабана, м ³	4	2
Число рабочих валов	2	2
Частота вращения валов, об/мин.....	90—100	184
Максимальная производительность по комовой глине, м ³ /ч	2	1,5
Мощность приводного двигателя, кВт.....	14	7
Габариты, мм:		
Длина	3890	1450
ширина.....	3015	2150
высота.....	1445	1500
Масса, кг	3565	1957

Механические лопастные глиномешалки отличаются простотой конструкции, но имеют и ряд существенных недостатков: сравнительно невысокую производительность; трудность доступа внутрь глиномешалки для выполнения ремонта и чистки; частые заклинивания и поломки лопастей при попадании в глину твердых включений большого размера; уменьшение рабочего объема глиномешалки при налипании глины к внутренним стенкам. Разновидность механических глиномешалок — фрезерно - струйные мельницы (ФСМ), разработанные Воронежским инженерно-строительным институтом для приготовления и утяжеления промывочных растворов. ФСМ—машины непрерывного действия, используются для приготовления глинистых растворов из комовых глин и глинопорошков.

Фрезерно-струйная мельница (рис.3) состоит из следующих основных узлов: лопастного ротора 2, приемного бункера 9, предохранительной шарнирной плиты 13, диспергирующей рифленной плиты 1, ловушки 16 и лотка 4 для отвода готового глинистого раствора.

Комовые или порошкообразные материалы подаются, в приемный бункер 9, вода—по перфорированной трубе 11. Подвижной щиток 10 ограничивает предельный размер комьев, попадающих из бункера во внутреннюю часть корпуса. Исходные материалы попадают по предохранительной плите 13 на вращающийся, на валу 3 ротор 2. Большие камни или куски металла, имеющиеся в глинистом материале, заклиниваются между лопастями ротора и предохранительной плитой. Значительные усилия, возникающие при ударе лопастей 7 ротора о крупные твердые включения, приводят к срезыванию специальных сменных штифтов 15. При этом предохранительная плита, поворачиваясь вокруг шарнира 12, отходит к задней стенке корпуса мельницы, а посторонние включения проваливаются в ловушку 16, закрытую снизу специальной откидной крышкой 18 с резиновой прокладкой 17. Из ловушки они периодически удаляются путем открывания крышки с помощью механизма 19.

Расстояние между лопастным ротором и предохранительной плитой изменяется путем перестановки штифтов в регулирующей планке 14. В нижней части корпуса мельницы расположена сменная диспергирующая рифленная плита 1, огибающая с небольшим зазором четверть ротора. В боковой части корпуса укреплен решетка 6. Размер отверстий ее обусловлен требованиями, предъявляемыми к приготовляемому раствору. Сверху решетка закрыта отражательным щитком 5, который может быть откинут поворотом вокруг шарнира 8.

Готовый раствор стекает, по внешней поверхности решетки и по лотку 4 отводится в сторону. Корпус мельницы укреплен на раме 20. Предусмотрен разъем

корпуса по горизонтальной плоскости, проходящей через ось вала лопастного ротора.

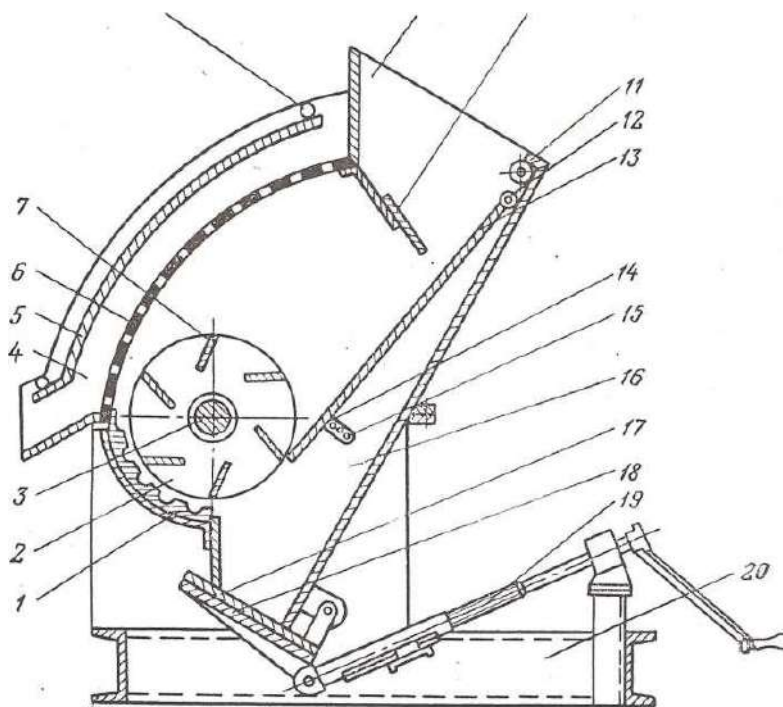


Рис. 3 Фрезерно-струйная мельница ФСМ-7

Принцип работы ФСМ заключается в следующем. Глина и вода, подаваемые в приемный бункер мельницы, захватываются лопастями ротора. При перемещении вдоль диспергирующей плиты происходит первичное измельчение глины. Дополнительное более тонкое измельчение их осуществляется при ударе струй, выбрасываемых лопастями ротора, о выходную решетку, а также при последующем перемещении суспензии вдоль решетки и прохождении раствора через ее отверстия. Частицы, не успевшие измельчиться в мельнице, вследствие циркуляции раствора вновь попадают под лопасти ротора.

Имеется ряд типов ФСМ: ФСМ-3, ФСМ-7, ФСМ-12, отличающихся, друг от друга, несущественными конструктивными изменениями.

Техническая характеристика фрезерно-струйной мельницы ФСМ-7

Производительность, т/ч:	
по комовой глине	8—10
по глинопорошку.....	20—25
Диаметр ротора, мм	400
Частота вращения ротора, об/мин	500
Мощность приводного электродвигателя, кВт	28
Габариты,	1950x1530x1410
Масса, кг.....	1400

Бесперебойная работа фрезерно-струйной мельницы может быть обеспечена только при наличии механизированной загрузки исходных материалов.

К преимуществам ФСМ относятся: высокая производительность, как по комовым глинам, так и по глинопорошку; простота конструкции и небольшие габариты; высокая экономичность.

Недостатками являются: низкое качество раствора, так как он содержит много нераспустившихся частиц глины относительно высокая приводная мощность, исключающая применение ФСМ в отдаленных партиях с ограниченными энергетическими ресурсами.

Первый недостаток устраняется многократной циркуляцией раствора по схеме ФСМ — емкость — насос — ФСМ. При приготовлении глинистого раствора по такой схеме производительность ФСМ остается более высокой, чем у лопастных глиномешалок.

В Канмансурской ГРЭ С. В. Яковлевым предложена, а Э. Н. Карповским усовершенствована высокопроизводительная вихревая глиномешалка с небольшой приводной мощностью.

Глиномешалка состоит (рис. 4) из корпуса 5 с конусной нижней частью и сливным крапом 10 и кронштейна 1, на котором установлен электродвигатель 2. Вращение от электромотора на рабочий элемент — активатор 8 (диск с ребрами на наружной поверхности) передается через вертикальный вал 6 и соединительную муфту 3. Вал крепится в верхней части к кронштейну с помощью опоры 4 с подшипниковым узлом внутри, а в нижней — фиксируется специальным опорным устройством 9. При работе с мерзлой глиной над активатором устанавливается предохранительный конус 7.

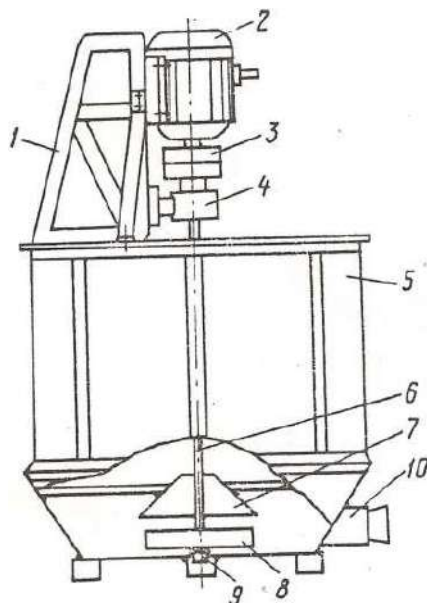


Рис. 4 Вихревая глиномешалка с вертикальным валом

При вращении активатора внутри глиномешалки создается завихрение жидкости и происходит размыв глины струями воды. Комья глины, отбрасываемые от активатора, после удара о стенки корпуса подхватываются струями раствора и вновь ударяются о ребра активатора, что способствует более интенсивному их разрушению.

Производительность вихревых глиномешалок примерно в три раза выше известных лопастных. Так, вместо 30—40 мин на приготовление 0,5 м³ раствора из комовой глины затрачивается 10—12 мин. За счет применения электродвигателя небольшой мощности (глиномешалка емкостью 0,5 м³ имеет двигатель мощностью 2,3 кВт) и повышения скорости приготовления раствора в несколько раз сокращается расход электроэнергии.

Вихревые глиномешалки просты по устройству и могут быть изготовлены в условиях механических мастерских экспедиций. Емкость их может быть практически любой.

Последнее время в некоторых геологоразведочных организациях применяется новая скоростная высокопроизводительная глиномешалка-диспергатор со шнековым перемешивающим устройством (рис.5) производительностью при механизированной загрузке до 240 м³/сут. Габариты ее примерно в два раза меньше, чем у двухвальной глиномешалки, масса 800 кг. Принципиальная схема глиномешалки приведена на рис. 5. Она состоит из шнекового перемешивающего устройства, диспергирующих крыльчаток, вращающихся на одном валу, и броневых гребенок со сменными пропускными решетками, неподвижно закрепленных в корпусе. Общий вид профиля пропускной решетки показан на разрезе А—А. Регулировка производительности глиномешалки осуществляется вентилями.

Приготовление раствора производится следующим образом: глина из приемного бункера захватывается шнеком и направляется на диспергирующее устройство. Удаление твердых включений, не поддающихся диспергированию, производится через ловушку с нижней откидной крышкой. Глиномешалка может работать в замкнутом прямом и обратном цикле. Принудительная циркуляция создается вращением шнека и крыльчаток.

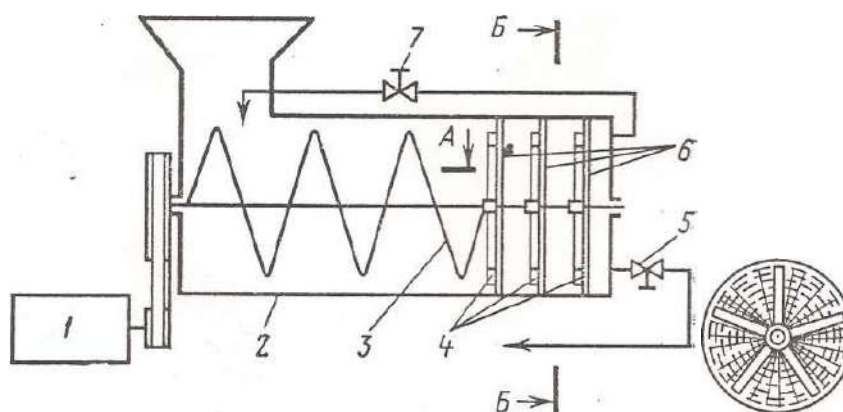


Рис. 5. Скоростная глиномешалка.

1- электромотор; 2- корпус; 3- шнековое устройство; 4- диспергирующие крыльчатки; 5- регулировочный вентиль; 6- пропускные решетки ; 7- регулировочный вентиль

Шаровые глиномешалки выпускали несколько последних лет. В качестве истирающих элементов в них применялись металлические шары. Барабан таких глиномешалок вращается, что приводит к перекатыванию шаров и истиранию твердой фазы. При более сложной конструкции производительность шаровых глиномешалок остается низкой, что и обусловило их снятие с производства.

Невысокая производительность лопастных и шаровых глиномешалок и высокая энергоемкость ФСМ вынуждают искать более приемлемые конструкции устройства, которые бы в большей мере учитывали конкретные условия работ. Так, имеются глиномешалки вихревого типа, (в которых перемешивание осуществляется по принципу, заложенному в стиральной машине), комбинированного типа, (в которых совмещены процесс предварительной пластической деформации и измельчения глины и перемешивание ее с жидкостью) и др.

2. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ.

В разведочном бурении подчиненное значение имеет гидравлический способ приготовления глинистых растворов, при котором для разрушения части твердой фазы используется только кинетическая энергия струи. Устройства для гидравлического способа приготовления глинистых растворов получили название гидравлических смесителей или гидромешалок. Различают гидромониторные и эжекторные гидросмесители.

Гидромониторные глиномешалки ГСТ, ГВФТ, Папиrowsкого, Резниченко и другие используют при бурении глубоких скважин. Производительность таких гидромешалок 40—120 м³/ч, давление жидкости перед насадками гидромониторов 4—10 МПа. Для условий разведочного колонкового бурения наиболее приемлем гидромониторный смеситель ГСТ (рис. 6)

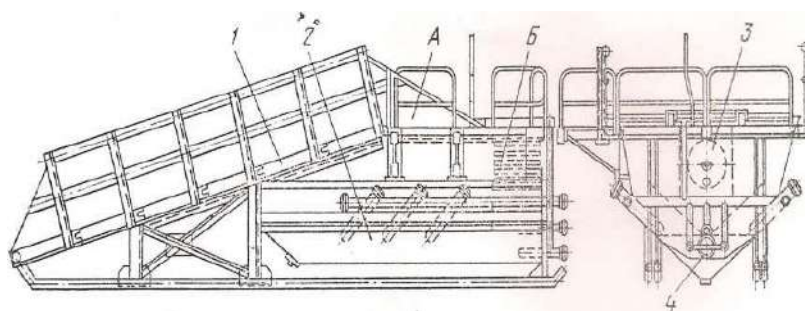


Рис. 6. Гидромониторный смеситель ГСТ.

Смеситель состоит из резервуара 2 и загрузочного трапа 1, по которому бульдозером подаются в резервуар исходные материалы. Резервуар разделен перегородкой на два сообщающихся отсека А и В. В отсек А встроены шесть мониторов, направленных под углом к оси резервуара. Такое расположение гидромониторов обеспечивает создание в отсеке А мощного потока, интенсивно размывающего глину.

В отсек В встроены три гидромонитора. Образовавшаяся в отсеке А суспензия движется в отсек В, который разделен перегородками на четыре полости. Проходя между перегородками, жидкость теряет нераспустившиеся комки глины, которые под действием трех гидромониторов возвращаются в отсек А. Освобожденная от комков суспензия поступает в барабанный фильтр 3, а оттуда через сливную трубу в приемный или запасной резервуар. Смеситель очищается через люк 4.

За один цикл нельзя получить высококачественный глинистый раствор, поэтому в процессе приготовления суспензия несколько раз циркулирует по замкнутому циклу буровой насос — смеситель — запасной резервуар — буровой насос до полной диспергации твердой фазы.

Производительность гидромониторного смесителя ГСТ 40 м³/ч, объем резервуара 14 м³, рабочее давление при работе одного насоса 4—5 МПа, двух насосов 7,5—9,5 МПа, масса 8390 кг.

Для получения глинистых растворов из комовых глин используют гидромониторную мешалку (гидросмеситель) Л. Т. Папиrowsкого (рис. 7). Она представляет собой корпус 6, имеющий форму горизонтально расположенного цилиндра, усеченного в нижней части. В корпусе на специальных опорах 2 монтируется нагнетательная линия, состоящая из нагнетательного кольца 1, с размывными трубками 3 и задвижками 9.

Приготовление глинистого раствора осуществляется по замкнутому циклу. После заправки глиномешалки расчетным количеством глины и воды включается насос. Жидкость забирается насосом из глиномешалки по всасывающей линии и вновь поступает в нее по нагнетательной линии. Для предохранения от попадания во всасывающую линию насоса крупных комков глины в корпусе глиномешалки устанавливаются две сетки 7 и 8.

Загрузку глиномешалки глиной осуществляют при помощи бульдозера или автомашин-самосвалов. Вода подается из трубопровода или с помощью насоса.

Количество приготовленного раствора зависит от скорости истечения жидкости из размывных сопел и времени перемешивания. Количество одновременно работающих мониторов может меняться путем отключения части мониторов задвижками. Давление в нагнетательной линии должно поддерживаться в пределах 30—40 кгс/см². Длительность приготовления составляет 1,0—1,5 ч.

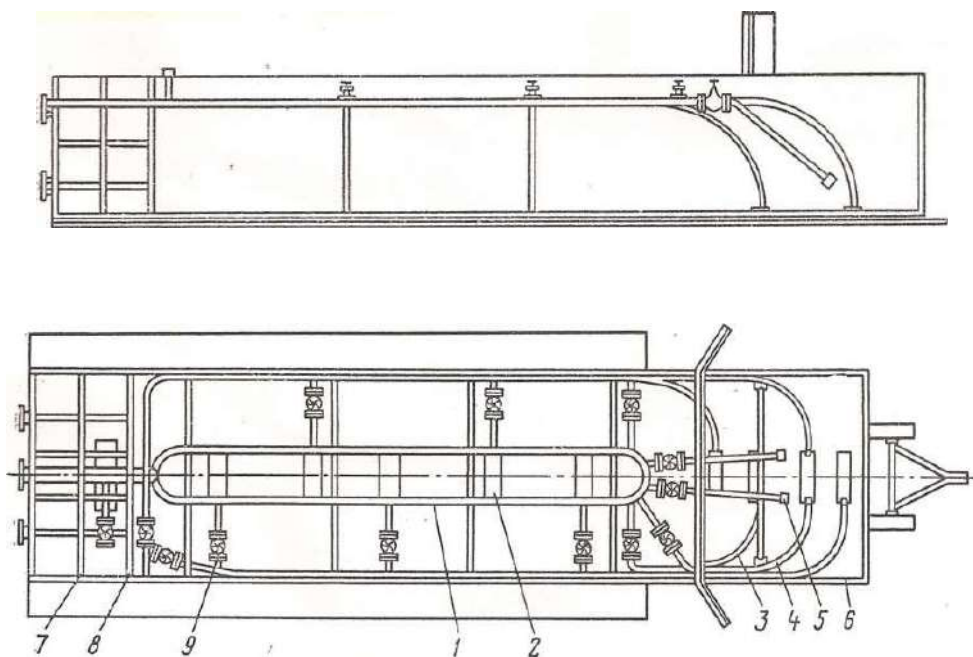


Рис. 7. Общий вид гидромониторной мешалки Л. Т. Папиrowsкого:

- 1 — нагнетательное кольцо гидромониторной системы; 2 — опора нагнетательного кольца; 3 — размывная трубка; 4 — водяная линия; 5 — штуцер размывной трубки; 6 — металлический корпус гидромешалки; 7 и 8 — металлические защитные сетки; 9 — задвижка высокого давления

Емкость глиномешалок Л. Т. Папиrowsкого может быть различной (от 25 до 200 м³). Производительность ее зависит от объема и примерно в 10—15 раз превышает производительность наиболее крупных лопастных глиномешалок МГ2-4 и Г2-П-2-4.

Для приготовления растворов из глинопорошка используются гидравлические мешалки эжекторного типа (гидроворонки). Это устройство непрерывного действия.

Гидравлические мешалки эжекторного типа (гидроворонки) используются для приготовления раствора из глинопорошка. Это — устройство непрерывного действия, наиболее распространена гидравлическая мешалка ГДМ-1 (рис. 8.). Она состоит из воронки 2 для загрузки глинопорошков, сопла 1, камеры смешения 3 и бака 5, смонтированных на общей раме 6. К соплу 1 под давлением подводится вода; при истечении ее в камере смешения образуется вакуум, благодаря чему туда засасывается порошок из воронки 2. Образовавшаяся пульпа поступает в бак и ударяется о специальный башмак, что способствует измельчению комочков глины и более интенсивному их перемешиванию с водой. Готовый глинистый раствор сливается через выходную трубу 4 в верхней части бака. Поднимаясь вверх, раствор теряет скорость, и из него выпадают на дно нераспустившиеся комочки глины.

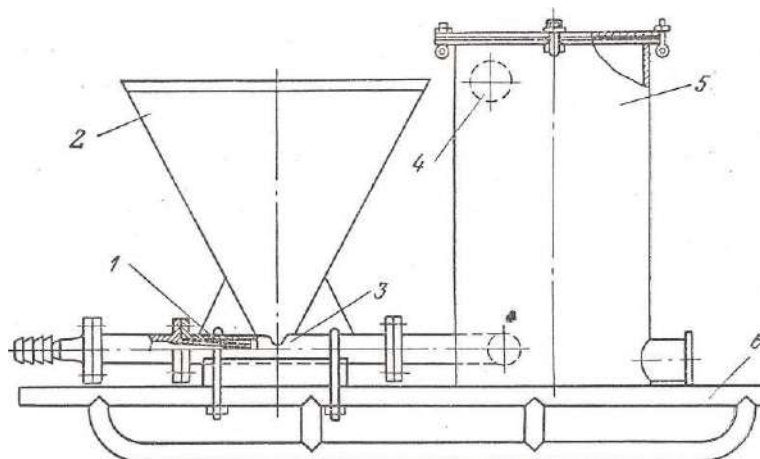


Рис. 8. Гидравлическая мешалка ГДМ-1

Имея относительно небольшие массу и габариты, гидроворонки отличаются высокой производительностью. Так, производительность гидравлической мешалки ГДМ-1 составляет по готовому раствору 70—90 м³/ч при объеме воронки 0,175 м³ и объеме бака 1 м³. Масса гидроворонки 1120 кг.

Следует отметить, что качество глинистого раствора, приготовленного в гидроворонках, довольно низкое. Несмотря на тонкий помол, частицы глинопорошка в процессе перемешивания с водой должны пройти дальнейшее диспергирование. Однако такое диспергирование происходит недостаточно интенсивно. За счет броуновского движения происходит частичная диспергация глины, но качество раствора остается хуже, чем при приготовлении в лопастных глиномешалках.

Качество раствора может быть существенно улучшено его многократным пропуском через гидроворонку без добавления твердой фазы.

Гидроэжекторный смеситель (рис. 9.) используется для приготовления глинистых растворов из глинопорошков. Смеситель для нужд разведочного бурения серийно не выпускается. Однако в различных конструктивных вариантах изготавливается в ГРЭ, широко использующих глинопорошки. Он состоит из насадки 1, загрузочной воронки 2 с клапаном 3, приемной 4 и смесительной 5 камер, диффузора 6 и сливного патрубка 7. Жидкость, прокачиваемая насосом через насадку 1, создает разрежение, под действием которого глинопорошок поступает в камеру гидросмесителя, где смешивается с жидкостью. Порошок может вводиться в смеситель через воронку 2 вручную.

Раствор, полученный в гидроэжекторном смесителе, для дополнительной диспергации глины должен выстоять в течение нескольких часов в приемной емкости с последующим интенсивным перемешиванием и обработкой в специальном диспергаторе.

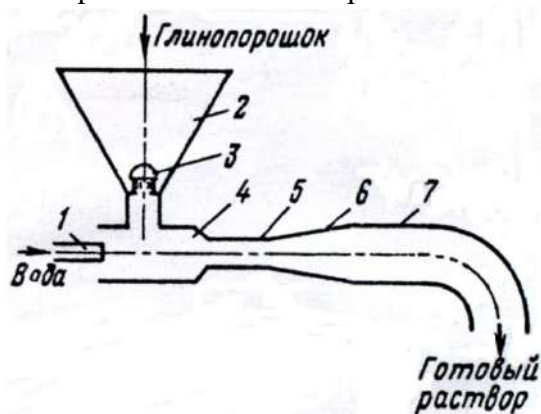


Рис. 9. Гидроэжекторный смеситель

Гидравлический диспергатор ДГ-1 (рис. 10.) состоит из корпуса с камерой 2, внутри которой помещены соосно керамические (металлокерамические, твердосплавные) насадки 3, закрепленные с помощью накладных гаек в посадочных выточках. Сверху камера закрыта глухим фланцем, открывающим доступ для смены насадок. К ней приварены входные и выходной патрубки для подачи и слива бурового раствора. Выходной патрубком 4 позволяет подсоединяться к гидроэжекторному смесителю БПР. На входной трубе 1 устанавливается задвижка высокого давления, манометр и предохранительный клапан на давление до 15 МПа.

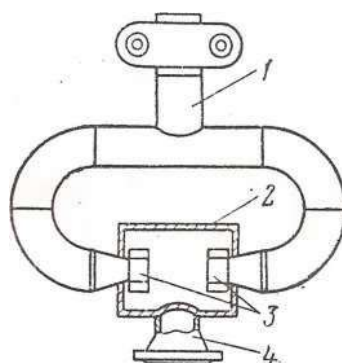


Рис. 10. Гидравлический диспергатор ДГ-1

Техническая характеристика ДГ-1

Рабочее давление, МПа	12 – 15
Подача по готовому буровому раствору, м ³ /ч.....	15 – 20
Диаметр насадок, мм.....	9; 11; 13; 16
Масса, кг	7 6

Принцип действия гидравлического диспергатора основан на том, что при соударении высокоскоростных встречных струй в камере ограниченного объема возникают кавитационные явления, ультразвук и другие эффекты, интенсифицирующие процессы диспергирования. Обработанные таким способом суспензии или эмульсии в последующем не изменяют своих свойств под влиянием менее мощных диспергирующих эффектов, возникающих при работе насосов, турбобуров, долот и других механизмов, в процессе бурения скважины. Кроме того, происходит дополнительное измельчение

глиноматериалов, нефти, битума, в результате чего для получения бурового раствора с одними и теми же показателями этих материалов и химических реагентов (стабилизаторов, эмульгаторов) требуется меньше.

3 СПОСОБЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРГАЦИИ ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ

Приготовление глинистых растворов в рассмотренных выше устройствах не обеспечивает полной диспергации твердой фазы. Увеличение времени перемешивания оказывается неэффективным, так как при этом резко падает производительность глиномешалок. Поэтому при необходимости глинистые растворы подвергают дополнительной обработке, пропуская их через специальные устройства — диспергаторы (иногда их называют также активаторами, дезинтеграторами). Методы диспергирования делятся на гидродинамические и механико-гидравлические.

Гидродинамическое воздействие обусловлено комплексом эффектов, из которых в качестве основных можно отметить энергию пульсирующих давлений в жидкости, взаимодействие ударных волн, гидравлический перетир слоев промывочной жидкости с твердой фазой, соударение частичек твердой фазы. Основным фактор измельчения частиц при гидродинамическом воздействии — кавитационный эффект, возникающий в поле переменного давления потока жидкости. Гидродинамическое воздействие реализуется гидравлическим, гидроакустическим и электрогидравлическим методами.

Механико-гидравлические методы воздействия осуществляются за счет энергии движущихся элементов механических устройств. Такие элементы могут быть либо свободно- движущимися телами, либо жесткозакрепленными.

В настоящее время разработаны и применяются диспергаторы различных конструкций. Примером гидравлического диспергатора является разработанное во ВНИИК нефти устройство, принцип действия которого основан на соударении двух струй жидкости, направленных навстречу друг другу.

Струйный диспергатор (рис. 11.) состоит из корпуса 8, в который вмонтированы два патрубка 4 с насадками 6, удерживаемыми заглушками 7. Гайками 5 патрубки крепятся к корпусу. Глинистый раствор подается через тройник 1, быстроразъемные соединения 2, по изогнутым трубкам 3 к насадкам 6. В корпусе происходит встреча потоков, обработанный раствор отводится по патрубку 9. У выходной кромки вследствие понижения давления образуются газовые пузырьки, которые, захлопываясь в зоне встречи струй, создают скачки давления, достигающие десятков и сотен МПа.

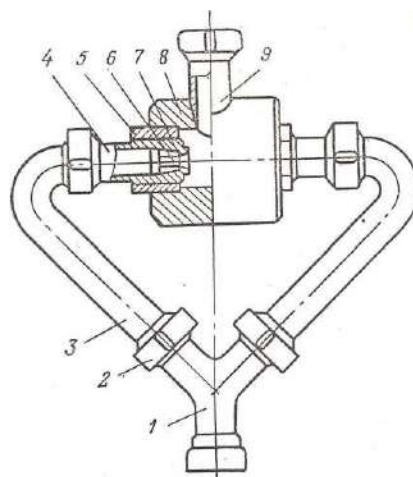


Рис. 11. Струйный диспергатор

Гидродинамический шаровой диспергатор представляет собой патрубок, заполненный стальными шарами, которые фиксируются с обеих сторон решетками. Он прост по устройству. Решетки удерживаются крышками с быстросъемными соединениями. Буровой раствор, проходя через толщу шаров, разделяется на ряд потоков, каждый из которых характеризуется множеством последовательных чередований зон повышения и понижения давления. Диспергация происходит за счет соударений частиц твердой фазы с шарами, а также вследствие кавитации.

Вихревой диспергатор ИГВ-2 (рис. 12.) представляет собой ультразвуковой излучатель. Устройство состоит из корпуса 5, в который с помощью стакана 4 вмонтирована улитка 2 с многоходовой винтовой канавкой и осевым соплом 1. Раствор под давлением поступает одновременно через осевое сопло и по канавкам улитки, попадая в вихревую камеру 3. Закручиваясь в ней, струи жидкости образуют вихревой слой, в котором генерируется мощное акустическое поле, усиливаемое диафрагмой 5. При встрече осевого потока и вихревого слоя за счет кинетической энергии встречных затопленных струй формируется кавитационный эффект.

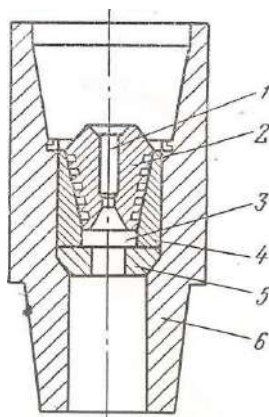


Рис. 12. Вихревой диспергатор ИГВ-2

Дисковый измельчитель (рис. 13.) состоит из корпуса 1 с подающим 2 и сливным 3 патрубками. В корпусе 1 смонтированы верхний неподвижный диск 4 и нижний диск 5, соединенный непосредственно с валом вертикально установленного электродвигателя 6. Глинистый раствор, поступающий по патрубку 2 в зазоры между дисками и корпусом, приобретает вращательное движение, при котором частицы твердой фазы интенсивно истираются.

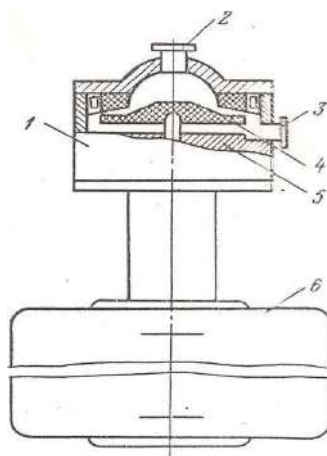


Рис. 13. Дискový измельчитель

Гидродинамический шариковый диспергатор показан на рис. 14. Диспергация происходит за счет соударения частиц твердой фазы с шарами, а также кавитации. Избыточное давление 1—3 МПа.

Многокамерный дискový диспергатор приведен на рис. 15. Гидродинамический режим работы диспергатора обеспечивается тем, что отверстия в дисках расположены по концентрическим окружностям с попеременным смещением в ряду.

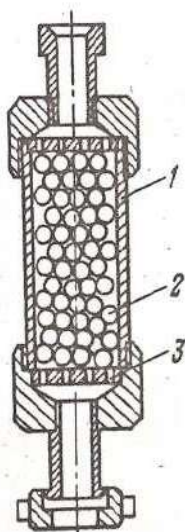


Рис. 14. Гидродинамический шариковый диспергатор

- 1-корпус;
- 2-стальные шары
- 3-решетки

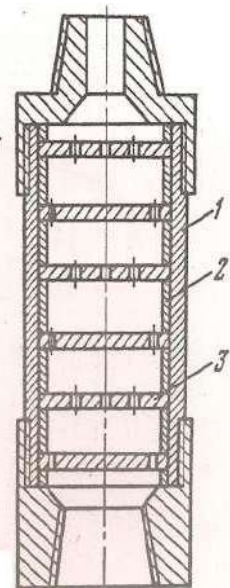


Рис. 15. Многокамерный дискový диспергатор

- 1- корпус
- 2 – распорное кольцо
- 3 – диск с отверстиями

Стержневой ультразвуковой излучатель УГИ-С (рис. 16.) предназначен для улучшения и интенсифицирования процесса эмульгирования. Он состоит из цилиндрического корпуса 4 с пазами, регулировочного штока / отражателей 2 патрубко-сопла 5, штифта 3. Смесь воды и эмульгирующего реагента под давлением 0,5-0,6 МПа поступает в патрубок и с большой скоростью отбрасывается отражателем в узкую кольцевую щель сопла в виде веерообразной струи. Турбулентно обтекая пластины жидкость возбуждает упругие колебания ультразвуковой частоты, способствующие тонкому диспергированию эмульгируемой смеси и улучшению качества эмульсионного

раствора. Спектр, упругих колебаний излучателя 5-12 кГц, интенсивность колебаний (1,0-И,2)-10 Вт/м .

Для каждого диспергатора существует определенная длительность процесса, увеличение которой уже не приводит к дальнейшему диспергированию твердых частиц. Наоборот, увеличение времени воздействия на глинистые растворы, особенно при ультразвуковой обработке, вызывает обратный процесс т. е. агрегирование частиц дисперсной фазы. Оптимальное время обработки зависит от типа глины и колеблется от 8,5 мин для монтмориллонита до 4,5 мин для каолина.

Диспергаторы можно устанавливать в нагнетательной линии циркуляционной системы скважин; на буровой установке в качестве самостоятельного аппарата с индивидуальным приводом или приводом от бурового насоса; входить в качестве узла в состав комбинированных установок для приготовления глинистых растворов (например, в агрегате АПР-I совместно с гидромониторным смесителем).

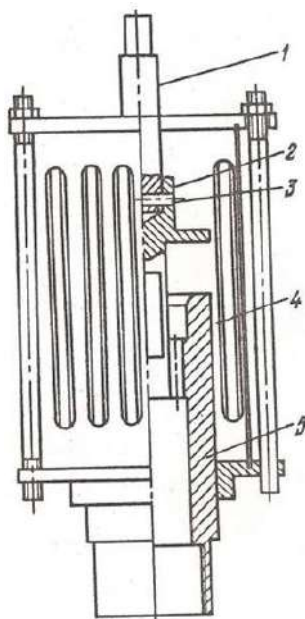


Рис. 16. Стержневой ультразвуковой излучатель УГИ-С

Все рассмотренные устройства могут использоваться и для приготовления прочих промывочных жидкостей.

4. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ И ЭМУЛЬСИОННЫХ РАСТВОРОВ

Некоторые полимеры трудно растворяются в воде, поэтому приготовление раствора из них сводится к постепенному уменьшению их концентрации. Так, при использовании ПАА сначала исходный 8%-ный реагент разбавляют до 1%-ной концентрации, а затем добавляют в воду до заданной концентрации. Для механизации процесса приготовления применяют различного рода устройства. На рис. 17 показана установка для приготовления полимерных растворов ППР, разработанная ВИТРОм.

Установка представляет собой бак 5, заключенный в водяную рубашку 4 с нагревательными элементами 2. В баке смонтировано лопастное устройство 3 с электродвигателем 7 для перемешивания компонентов. Дополнительное

перемешивание осуществляется вихревым^ насосом 11.через систему трубопроводов. Компоненты загружают через устройство 6, которым управляют с пульта Р, расположенного в шкафу 10. Для регулирования температуры, которая контролируется термометром 8, служит температурное реле 1.

Техническая характеристика установки ППР

Полезная вместимость бака, м ³	0,25
Вместимость бака водяной рубашки, м ³	0,12
Частота вращения перемешивающего устройства, об/мин.....	955
Потребляемая мощность, кВт:	
нагревательными элементами.....	10,5
электродвигателем перемешивающего устройства.....	4,0
электродвигателем насоса.....	1,5
Габариты, мм:	
длина	2090
ширина	920
высота.....	1740
Масса, кг.....	450

Время приготовления раствора 1,5—3%-ной концентрации из желеобразного ПАА составляет 15—25 мин, а из сухого гранулированного без предварительного замачивания — 2—3 ч. Установка ППР позволяет осуществлять гидролиз ПАА.

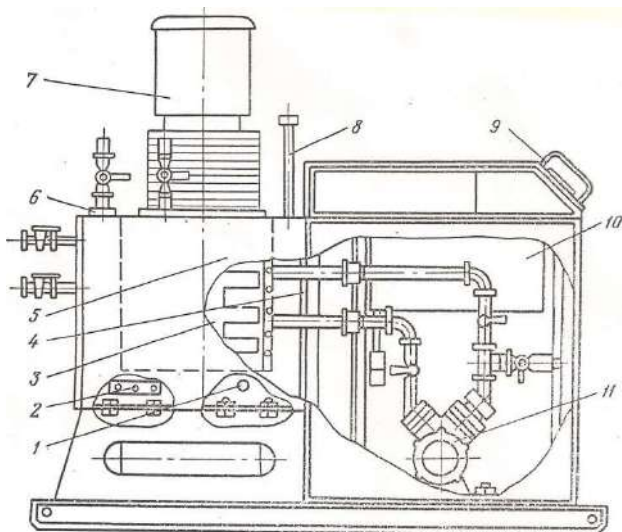


Рис. 17. Установка для приготовления полимерных растворов ППР

Наряду с глиномешалками широко распространены ультразвуковые генераторы. Установка на базе ультразвукового генератора (рис. 18.) отличается простотой, экономичностью, относительно высокой производительностью. Приготовление эмульсий на ней производится следующим образом.

В бак 3 установки (см. рис. 18.), смонтированной на раме 1, заливается вода (или другая исходная жидкость), а в маслобак 4 — концентрат-эмульгатор, например мылонафт. Концентрат подогревается с помощью теплоэлектронагревателя 7 до 50—60 °С. Затем включается насос 2, из бака 3 по всасывающему трубопроводу 8 в насос поступает эмульгируемая жидкость, а из маслобака по маслопроводу 9 — концентрат. Образующаяся смесь подается в гидродинамический излучатель 6, а получаемая эмульсия из приемного бака 5

отводится в емкость. Затем эмульсия дозируется в соответствии с заданной концентрацией и подачей насоса в процессе эмульгирования.

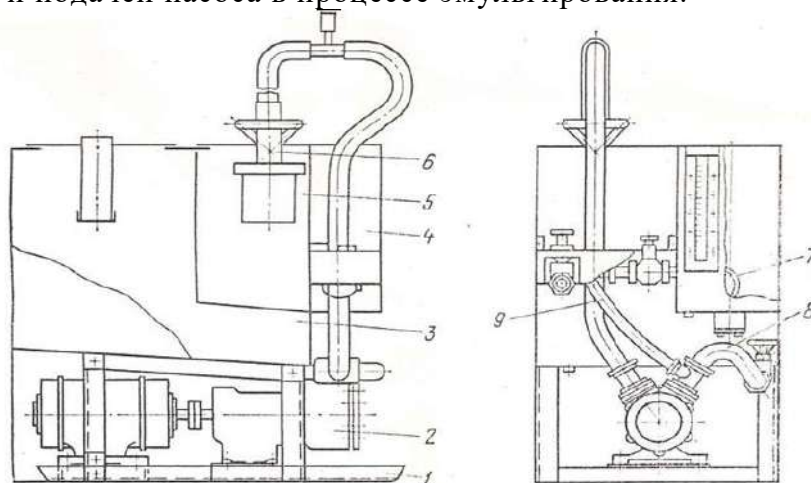


Рис. 18. Ультразвуковая установка для приготовления эмульсионных промывочных жидкостей

Принцип работы используемого в установке ультразвукового генератора (рис. 19.) заключается в следующем. Смесь исходной промывочной жидкости с эмульгируемым составом нагнетается насосом под давлением 0,6—0,8 МПа и поступает в зазор между насадкой 2 и отражателем 4. Выходя из зазора веерообразной струей, жидкость ударяется о пластины 5, закрепленные в дисках 3 и 6. Упругие колебания, образующиеся в результате завихрений жидкости, усиливаются резонансными колебаниями пластин и передаются в окружающую среду. Изменяя величину зазора между насадкой и отражателем с помощью штурвала 7, можно получить разную толщину выходящей струи смеси и настроить излучатель на оптимальный режим работы. Излучатель помещается в корпусе 1 и соединяется с нагнетательной линией с помощью муфты 8.

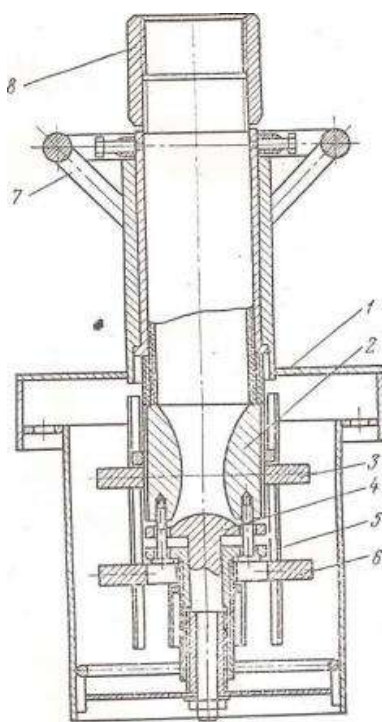


Рис. 19. Ультразвуковой генератор

Установка для приготовления эмульсионных растворов УЭМ-5 разработана в ИГО «Красноярскгеология». Она предназначена для приготовления тонкодисперсных эмульсий. Установка УЭМ-5 (рис. 20) выполнена в виде автономного агрегата, состоящего из насоса, электродвигателя 15, трехпозиционного крана 14, фильтра 13, всасывающего трубопровода 2, бака для воды 2, всасывающего трубопровода для эмульсола крана 4у бака для эмульсола 7, тройника 5, соединенного с излучателем 5, установленного в приемной камере 9, водонагревательного бака 6, уровнемеров 10 и 11 и пульта контрольно-измерительной аппаратуры.

Принцип действия установки заключается в следующем. При работе насоса 1 из бака 12 по всасывающему трубопроводу 2 (или непосредственно из водоема) поступает вода, а из бака 7 — разогретый концентрат (эмульсол). Смесь воды и концентрата через тройник 5 поступает в излучатель 5, где под действием ультразвукового эффекта в приемной камере 9 образуется тонкодисперсная эмульсия.

Установка УЭМ-5 при необходимости может быть использована для приготовления эмульсий непосредственно на скважине.

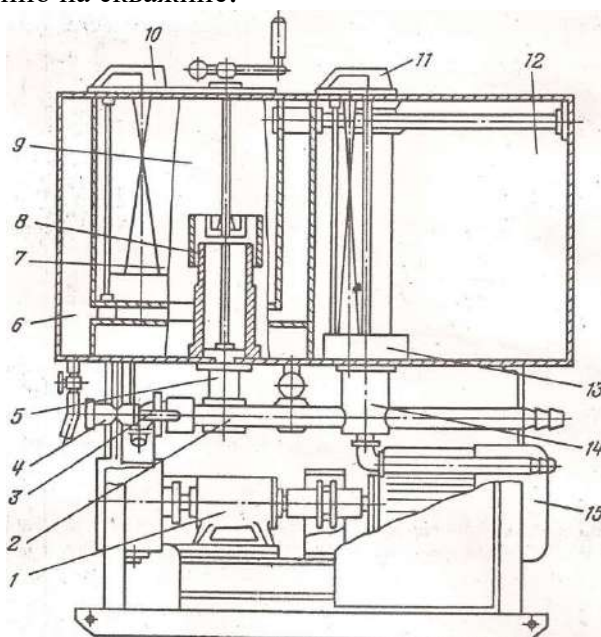


Рис. 20. Установка для приготовления эмульсионных растворов УЭМ-5

Техническая характеристика установки УЭМ-5

Производительность (для эмульсий 1-1.5 %-ной концентрации), м ³ /ч.....	5
Тип излучателя.....	гидродинамический стержневой (УГИ-С)
Частота возбуждаемых колебаний, кГц.....	6-20
Давление на излучателе, МПа.....	0,5
Объем бака, м ³ :	
для воды.....	0,25
для эмульсола.....	0,05
Мощность, кВт:	
электродвигателя.....	5,5
нагревателя ТЭН.....	7,5
Габариты, мм:	
длина.....	1000
ширина.....	700
высота.....	1500
Масса, кг.....	350

5. ПЕРЕМЕШИВАТЕЛИ

Основная функция перемешивателей — не допустить расслоения бурового раствора и обеспечить равномерное распределение его компонентов во всем объеме циркуляционной системы. Для приготовления, обработки и циркуляции бурового раствора в практике бурения скважин применяют гидравлические и механические перемешиватели.

5.1 Гидравлические перемешиватели

Отечественная промышленность выпускает гидравлические перемешиватели трех типов: 4УПГ, ПГ и ПГС. Перемешиватель 4УПГ (рис. 21) состоит из корпуса 2, вращающегося в тройнике 3 ствола 4 и закрепленной на консоли ствола насадки 5. Подвижные сочленения выполнены таким образом, что ствол с насадкой имеет возможность поворачиваться в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, обеспечивая тем самым любое направление струи посредством рукоятки 1.

Техническая характеристика перемешивателя 4УПГ

Рабочее давление, МПа	4,0
Диаметр сменной насадки, мм	16; 20; 30; 40
Расход жидкости, л/с	15—90
Габариты, мм	335x170x2200
Масса, кг.....	33,5

Раствор подается буровым или центробежным насосом по манифольду в корпус гидравлического перемешивателя, откуда через тройник и ствол поступает к насадке. Здесь поток существенно ускоряется и с высокой скоростью выбрасывается из насадки. Поворачивая ствол за рукоятку, оператор направляет струю бурового раствора в застойные и наиболее отдаленные от приема насоса зоны, тем самым обеспечиваются вовлечение всего объема бурового раствора в циркуляцию, гомогенизации раствора, диспергирование твердой фазы и эмульгирование жидких компонентов при приготовлении эмульсионных растворов.

Принцип работы перемешивателя ПГ такой же, как и 4УПГ, однако перемешиватель ПГ позволяет фиксировать с помощью двух пальцев положение монитора по отношению к корпусу и корпуса по отношению к приемному патрубку. Для этой цели к приемному патрубку и к корпусу приварены диски с отверстиями. Угольник монитора и приемный патрубок фиксируют в корпусе от осевого перемещения при помощи шариков, которые выполняют также роль подшипников качения. В связи с тем, что основные детали перемешивателя литые, масса его в 1,5 раза меньше массы перемешивателя 4УПГ.

Техническая характеристика перемешивателя ПГ

Наибольшее рабочее давление, МПа	6,0
Диаметр сменной насадки, мм	20; 25; 30; 40
Габариты, мм.....	273x160x2000
Масса, кг	23,8

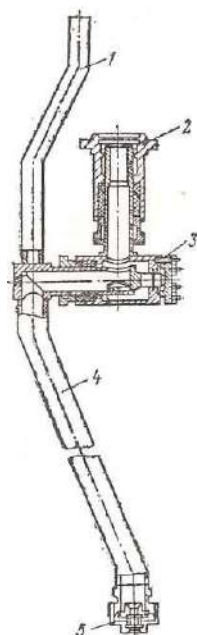


Рис. 21. Гидравлический перемешиватель 4УПГ

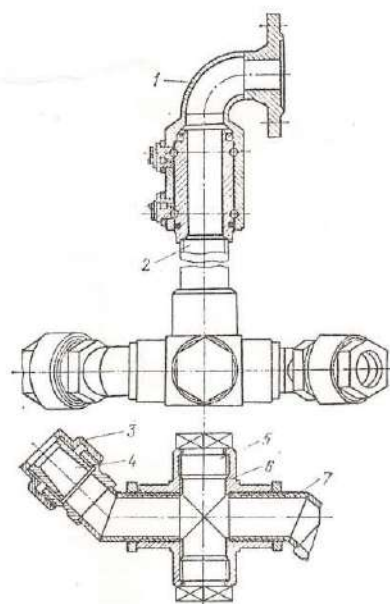


Рис. 22. Гидравлический перемешиватель ПГС

Гидравлический самовращающийся перемешиватель ПГС (рис. 22.) перемешивает жидкость без вмешательства оператора. Он состоит из приемного патрубка 7, ствола 2, крестовины 6, двух колен 7 с резьбовыми ниппелями, сменных насадок 4, закрепляемых с помощью накидных гаек 3. Сочленение ствола с приемным патрубком осуществляется при помощи специального шарикового подшипника. Крестовина присоединяется к нижней части ствола при помощи резьбы. Два конца крестовины заглушены пробками 5, а к двум другим (противоположащим) подсоединены колена с насадками.

Техническая характеристика ПГС

Наибольшее рабочее давление, МПа.....	4,0
Диаметр, мм:	
сменных насадок	20; 25; 30; 40
окружности, описываемой вращающимися коленями	480
Высота, мм	1777
Масса, кг	38

Буровой раствор, нагнетаемый насосом в ствол перемешивателя, с большой скоростью вытекает из насадок в противоположных направлениях. Возникающая при этом реактивная пара сил заставляет вращаться крестовину в подшипнике, в результате чего изменяется направление действия струи с некоторой постоянной скоростью, зависящей от рабочего давления, развиваемого насосом, и реологических свойств бурового раствора. Крестовина вращается против часовой стрелки.

Основной недостаток перемешивателя типа ПГС – направление действия струи бурового раствора изменяется только в одной плоскости.

5.2 Механические перемешиватели

Для циркуляционных систем буровых установок отечественной промышленностью выпускаются механические перемешиватели ПМ, ПМ₄, ПМ₂, ПЛ₁, ПЛ₂.

Механический перемешиватель ПМ (рис. 23.) состоит из мотор-редуктора который крепится болтами к опоре 2, установленной на сварной раме 3, промежуточного вала 4, закрепленного на валу мотор-редуктора при помощи пальцевой муфты, лопастного вала 5 и перемешивающего органа 6. Промежуточный вал установлен в двух шариковых подшипниках, расположенных в верхнем и нижнем концах цилиндрического корпуса, прикрепленного жестко к раме 3. Подшипники защищены от внешних воздействий и загрязнения кожухом, который при варен к фланцу промежуточного вала и вращается вместе с ним.

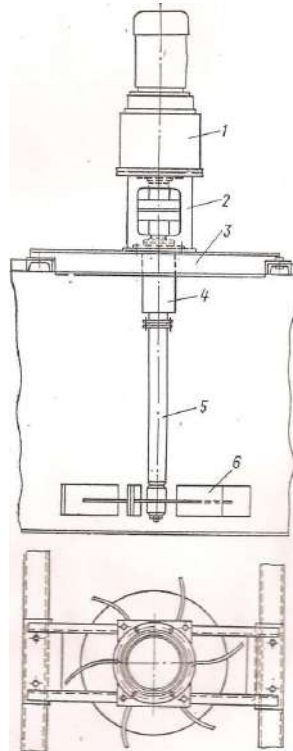


Рис. 23. Механический перемешиватель ПМ

Сварная рама ПМ устанавливается на верхней площадке емкости циркуляционной системы так, что зазор между лопастями и дном емкости составляет не менее 90 мм. На каждую емкость (или отдельный отсек) циркуляционной системы устанавливают, как правило, два механических перемешивателя.

На ПМ₁ установлен взрывозащищенный электродвигатель, а ПМ₂ отличается от описанного отсутствием цилиндрической опоры и пальцевой муфты.

В настоящее время налажен:» серийное производство наиболее совершенных механических перемешивателей ПЛ₁ и ПЛ₂ (рис. 24.). Главным преимуществом их является то? что они оснащены комбинированным турбинно-пропеллерным перемешивающим органом, позволяющим значительно повысить эффективность перемешивания буровых растворов. Кроме того, их конструкция упрощена, а вместо дефицитного мотор-редуктора МПО2-15В-5,5/45,5 используются редукторы массового производства.

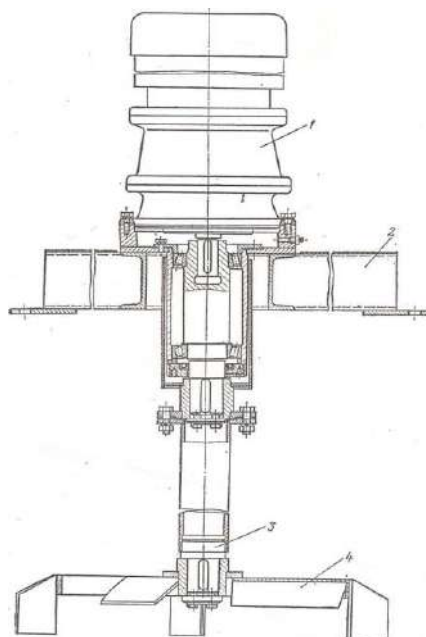


Рис. 24. Механический перемешиватель с турбинно-пропеллерной мешалкой:
1 — мотор-редуктор; 2 — основание; 3 — вал; 4 — мешалка

Техническая характеристика механического перемешивателя

Шифр.....	ПМ
Привод перемешивателя.....	мотор-редуктор МПО2-15В-5,5/45,5
Тип электродвигателя.....	АО-42-4
Мощность электродвигателя, кВт.....	5,5
Передаточное число планетарного редуктора.....	32,1
Скорость вращения вала с лопастями, об/мин.....	45,5
Диаметр лопастей мешалки, мм.....	950
Габаритные размеры, мм:	
длина	1430
ширина	950
высота.....	3262
Масса, кг.....	477

5.3. Перемешиватели, выпускаемые зарубежными фирмами

Зарубежные фирмы выпускают гидравлические перемешиватели, называемые гидравлическими пушками, трех, разновидностей.

Неподвижный перемешиватель, состоящий из патрубка диаметром 125—200 мм, внутри патрубка установлена насадка, питающаяся от нагнетательного трубопровода циркуляционной системы. Использование патрубка увеличивает эффективность действия струи, вытекающей из насадки. Неподвижные перемешиватели монтируют у дна резервуаров. Обычно монтируют два перемешивателя в двух противоположных углах резервуара. Насадки перемешивателей направлены параллельно продольным стенкам резервуара. Таким образом создаются условия: для вращения слоя жидкости, ограниченного стенками резервуара, а по высоте — эффективностью действия струй.

Фирма «Пенрод дриллинг компани» монтирует неподвижные перемешиватели посередине резервуара на расстоянии 450 мм от дна.

Самовращающиеся гидравлические перемешиватели, использующие для вращения реактивное действие вытекающих из насадок струй, благодаря чему осуществляется равномерное интенсивное перемешивание жидкости в плоскости насадок (рис. 25).



Рис. 25. Самовращающийся гидравлический перемешиватель.

Фирма «Сосьетэ де форажпетролье» применяет вращающиеся перемешиватели в прямоугольных резервуарах емкостью по 24 м³. В каждом резервуаре установлено по четыре перемешивателя, две насадки в каждом. Диаметр насадок 32 мм. Насадки укреплены на вращающейся трубе на расстоянии 300 мм от дна и наклонены под углом к горизонту вниз. Такое их расположение, по данным фирмы, приводит к образованию турбулентных потоков, направленных от дна резервуара кверху.

При этом газ, имеющийся в жидкости, выносится этими потоками на поверхность, воздух же не проникает в жидкость. По данным той же фирмы, описанная установка при скорости вращения насадок 60 об/мин способна за 3 мин привести в однородное состояние 24 м³ промывочной жидкости плотностью 2 г/см³, которая перед этим оставалась в покое в течение 3 сут.

Поворотные гидравлические перемешиватели изготавливают двух типов — одношарнирные и двухшарнирные. На (рис. 26) показан двухшарнирный перемешиватель фирмы «Демко», установленный на буровой установке «Айдекопиньёпи». Перемешиватель состоит из трубы с рукояткой, на конце трубы смонтирована сменная насадка, двух шарниров с фиксирующими дисками и приемного патрубка, смонтированного на пусковой задвижке. Благодаря наличию двух шарниров труба с помощью рукоятки может направляться оператором в любую точку резервуара. Наличие фиксирующих дисков с пальцами позволяет оператору зафиксировать трубу с насадкой в любом положении.

Фирма «Лайтнин» (США) изготавливает механические перемешиватели двух типов —лопастные (рис. 27.) и пропеллерные.

Перемешиватели приводятся от электродвигателей мощностью от 2 до 15 л. с. Перемешиватели крепятся на резервуарах или желобах в вертикальном положении, при этом лопасти вращаются в горизонтальной плоскости. Скорость вращения лопастного вала составляет около 60 об/мин. Наружный диаметр лопастей колеблется от 700 до 1200 мм. В зависимости от диаметра лопастей выбирают мощность приводного электродвигателя.

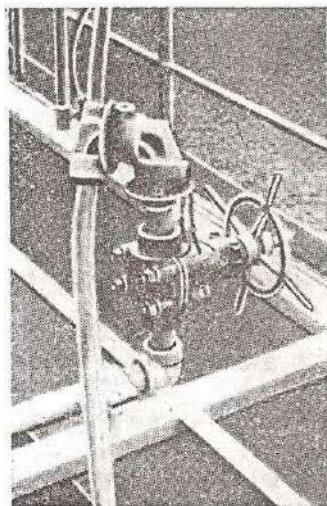


Рис. 26. Двухшарнирный гидравлический перемешиватель фирмы «Демко»

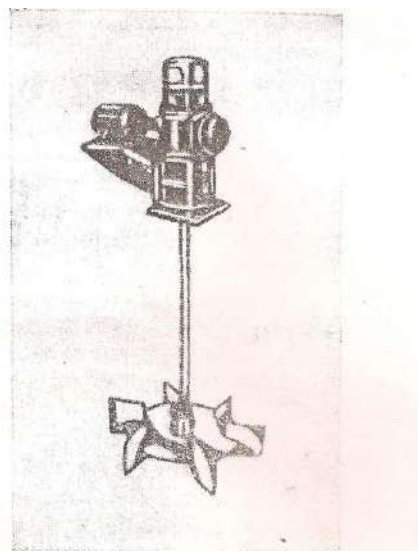


Рис. 27. Лопастной механический перемешиватель фирмы «Лайтнин»

У перемешивателей, устанавливаемых на желобах, предусматриваются лопасти диаметром менее 700 мм. Нижняя кромка лопастей отстоит от дна резервуара или желоба на 50— 100 мм.

6. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БУРОВЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ РАЗРАБОТАННЫЕ НА КАФЕДРЕ “ТТР МПИ”

6.1. Малогабаритная многосекционная роторная мельница «ММР-2»

Целью настоящей разработки конструкции мельницы с лопастным ротором явилась необходимость повышения степени измельчения и однородности твердой фазы в приготовлении суспензии роторными мельницами. Другой задачей явилось обеспечение предварительного измельчения крупных кусков исходной твердой фазыготавливаемых суспензий.

Работает мельницы следующим образом (рис. 28): исходный материал например, крупно-комовая глина непрерывно подается в загрузочный бункер 1, одновременно в мельницу подается жидкая фаза по трубопроводу 16. Крупные куски твердого материала проходят предварительное измельчение на более мелкие фракции между дисками 14 и лопастями 10 первой ступени ротора, т.е. предварительное измельчение твердой фазы невозможно без вращения ротора. При этом за счет свободного поворота дисков на оси 13 и наличия на них зубцов (или выступов) происходит смена режущих кромок в зазоре между дисками 14 и лопастями 10. Отсюда, в процессе измельчения участвуют все режущие кромки, расположенные по окружности дисков, и длительное время они остаются острыми, не затупляются из-за их значительной протяженности.

Вращаясь, диски 14 одновременно очищаются зубьями гребенки 15. Струя жидкости, истекая под давлением из сплошной щели трубопровода 16, дополнительно промывает диски. Дисками, очищенными от кусков налипшего или застрявшего между ними твердого материала, производится наиболее эффективно предварительное измельчение. Независимое друг от друга свободное вращение дисков обеспечивает наилучшее прохождение и измельчение более крупных кусков твердого материала.

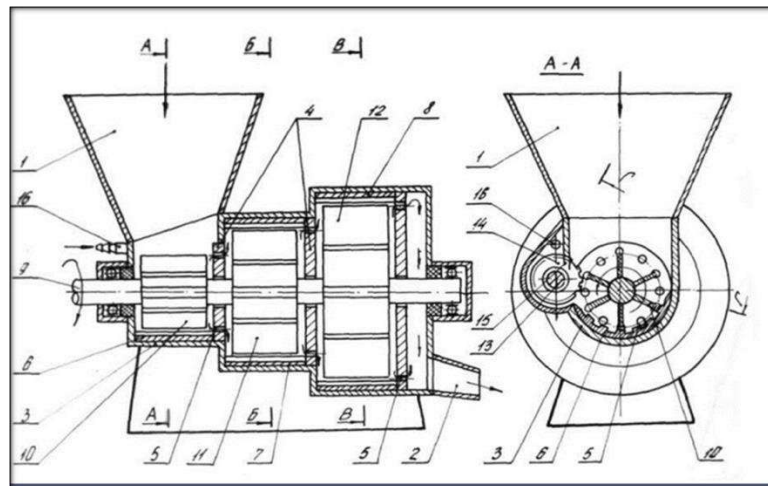


Рис. 28. Конструктивная схема роторной мельницы «ММР-2»

Пройдя стадию предварительного измельчения, твердая фаза продолжает измельчаться лопастями 10 о ребристую поверхность ударной плиты 6. Затем полученная в первой секции корпуса 3 крупнодисперсная пульпа под действием центробежных сил (а значит и давления пульпы), возникающих во вращающемся потоке, по сквозным отверстиям 5, расположенным в боковой стенке 4, поступает во вторую секцию. Во второй и последующей секциях крупнодисперсная пульпа претерпевает более тонкое измельчение, после чего готовая суспензия по отводному лотку 2 выводится наружу. Малый диаметральный размер первой секции корпуса 3 позволяет увеличить силовое усилие лопасти для раздавливания твердых комков исходного продукта измельчения, и, наоборот увеличения размеров последующих секции обеспечивает лучшее измельчение твердой фазы крупнодисперсной пульпы (приготовление в первой секции) при больших окружных скоростях движущегося потока пульпы в зонах измельчения (находящихся между ребристой поверхностью ударных плит 7,8 и периферийными кромками лопастей 11,12). Последовательное измельчение в первой, второй и третьей секциях позволяет получить суспензию однородной по фракционному составу и значительно повысить степень измельчения ее твердой фазы.

Производительность описанной мельницы выше известных в 2, 3 раза и более (в зависимости от числа секции корпуса). Она обеспечивает быстрое и качественное приготовление больших объемов буровых растворов, что позволяет упростить и осложнение при бурении скважин и получить существенный экономический эффект. Далее, уменьшается рабочая площадь глинозаводов, поскольку данная мельница заменяет несколько известных роторных мельниц типа «ФСМ». Более эффективно измельчение мельницы сокращает расход электроэнергии в 1.2-1.3 раза.

Техническая характеристика многосекционной роторной мельницы.

Вид измельчаемого материала.....	любая горная порода
Крупность кусков исходного материала (в поперечнике), мм.до	100/150
Производительность , м ³ /час.....	до 30
Частота вращения лопастного ротора в минуту.....	1000
Диаметр лопастного ротора, мм:	
первой ступени.....	30
второй ступени.....	50
третьей ступени.....	70
Длина лопастного ротора, мм.....	1100

Потребляемая мощность, кВт.....	20
Габаритные размеры, м	
Длина.....	200
Ширина.....	1600
Высота.....	1050
Масса (без электродвигателя), кг.....	420

6.2. Барабанный измельчитель.

Конструктивные особенности барабанного измельчителя в отличие от всех других устройств гидромеханического типа, применяемых для приготовления буровых промывочных жидкостей, позволяют реализовать в нем принципиально новый и эффективный способ диспергации глинистого материала. Отличие заключается и в расширении функциональных возможностей; разработанный измельчитель работает не только в качестве диспергатора, он осуществляет транспортирование промывочной жидкости, т.е. одновременно выполняет функцию перекачивающего насоса.

Принципиальная конструктивная схема измельчителя представлена на рис. 29: а- продольный разрез устройства; б- сечение по А-А. Барабанный измельчитель имеет цилиндрический корпус 1 с приводом и станину 2. внутри корпуса 1 соосно ему неподвижно закреплен на станине 2 рабочий орган, содержащий два параллельно расположенных диска 3 и 4. В центре диска 3 выполнено отверстие, соединенное посредством полой оси 5 с разгрузочным патрубком 6.

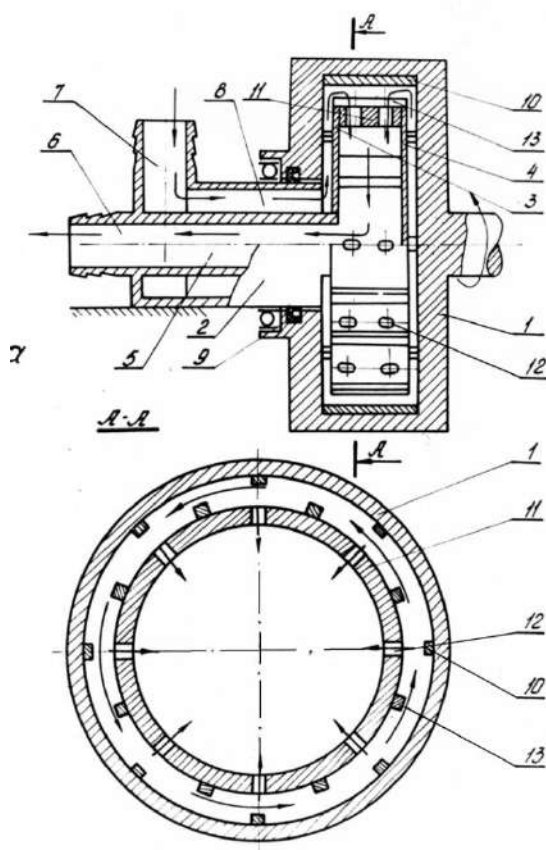


Рис.29. Конструктивная схема барабанного измельчителя.

а- продольный разрез; б- сечение по А-А.

1- цилиндрический корпус; 2- станина; 3- диск; 4- диск; 5-полая ось; 6-разгрузочный патрубок; 7- загрузочный патрубок; 8- кольцевые каналы; 9- герметизирующее устройство; 10- продольный ребра; 11- кольцевая муфта; 12- отверстия; 13- износостойкие вставки.

Загрузочный патрубок 7 соединен с внутренней полостью корпуса 1 с помощью кольцевых каналов 8, размещенных в станине 2. Для герметизации внутренней полости корпуса между ним и станиной 3 установлено герметизирующее устройство 9, в виде сальникового уплотнителя.

На внутренней поверхности корпуса 1 смонтированы продольные ребра 10, а диски 3 и 4 по периферии соединены между собой герметично кольцевой муфтой 11. В муфте 11 выполнены отверстия 12, сообщающие зону измельчения с внутренней полостью рабочего органа. Муфта 11 армирована с наружной поверхности износостойкими вставками 13.

Измельчитель работает следующим образом. Вращательное движение от привода передает корпусу 1, вследствие чего наступающая через кольцевые каналы приготавливаемая промывочная жидкость под действием центробежной силы отжимается к периферии корпуса 1, где образует высокоскоростной круговой поток. Ребра 10 на внутренней поверхности корпуса 1 способствуют лучшему захвату поступающей жидкости вращающимся корпусом 1, в результате чего по всей цилиндрической внутренней поверхности корпуса 1 создается круговой поток. Двигающийся высокоскоростной поток в результате взаимодействия с нормально расположенными к его оси вставками 13 тормозится. В результате происходит диспергация глинистых частиц промывочной жидкости, которая характеризуется процессом объемного их разрушения.

Одновременно в результате торможения потока происходит относительное смещение его движущихся слоев, следовательно Постоянное смещение диспергируемых частиц относительно друг друга и воздействие на них центробежной силы, возникающей во вращающемся круговом потоке, вызывает между ними интенсивное трение, что приводит к их разрушению. Из зоны диспергации приготовленная промывочная жидкость по отверстиям 12 поступает во внутреннюю полость рабочего органа. Выгружается приготовленный продукт через отверстие в диске 3, канал полой оси 5 и разгрузочный патрубок 6.

Техническая характеристика барабанного измельчителя.

Вид измельчаемого материала.....	глина бентонитовая
Степень измельчения (линейный размер частиц), м;	
исходная.....	10 ⁻⁴
минимальная.....	10 ⁻⁶
Производительность по глиноматериалу, м ³ /ч.....	1
Потребляемая мощность, кВт.....	6
Угловая скорость вращения рабочего органа, рад/с.....	104,6
Статический напор потока на выходе измельчителя ,МПа.....	0,2
Габариты , мм : ширина.....	800
длина.....	1200
высота.....	650
Масса (без привода), кг.....	158

6.3. Струйная вихревая мельница.

Разработанная струйная вихревая мельница конструктивно отличается от других подобных устройств, работающих по принципу гидродинамических генераторов тем, что содержит два когерентных источника звуковых колебаний, соединяющихся общим выходным каналом. Такое отличие позволило интенсифицировать процесс измельчения твердой фазы озвучиваемых буровых промывочных жидкостей за счет удвоения энергии звуковой волны.

Конструкция мельницы представлена на рис. 30. Мельница состоит из двух полых цилиндрических вихревых камер 1, снабженных тангенциально расположенными насадками 2 входного 3 и выходного 4 патрубков. Между вихревыми камерами 1 и выходным патрубком 4 помещены шайбы 5 с калиброванными отверстиями. В конструкции выходного патрубка 4 предусмотрена возможность расположения здесь приемника звуковых колебаний 6 для измерения параметров работы мельницы.

Мельница работает следующим способом. В полость вихревых камер 1 по тангенциальным насадкам 2 поступает обрабатываемая промывочная жидкость, подаваемая насосом через входной патрубок 3 мельницы. В камерах 1 поступающая жидкость раскручивается, образуя так называемый первичный вихрь. За счет вязкостного трения получает вращательное движение промывочная жидкость, которая уже находилась в полости камер, образуя вторичный вихрь. Вакуумизация осевой части вторичного вихря в полости камеры 1 вызывает поступление сюда жидкости из выходного патрубка 4, в результате чего происходит гидравлический удар с повышением давления в полости камеры до значения звукового. После рассеивания избыточного давления, т.е. после единичного звукового импульса, процесс повторяется.

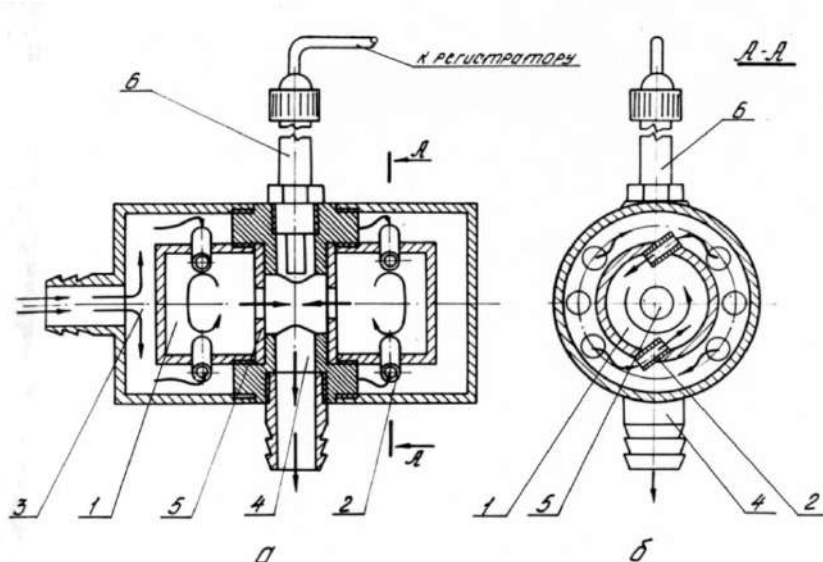


Рис. 30. Конструктивная схема струйной вихревой мельницы.
а-продольный разрез; б- сечение по А-А.

1-вихревая камера; 2- насадки; 3- входной патрубок; 4- выходной патрубок;
5- калибровочные шайбы; 6- приемник звуковых колебаний.

Техническая характеристика струйной вихревой мельницы.

Вид измельчаемого материала.....	глина бентонитовая
Степень измельчения (линейный размер частиц), м	
исходный.....	10^{-6}
минимальный.....	10^{-7}
Производительность по сухому глиноматериалу, м ³ /ч.....	0,5
Удельный затраты энергии на привод, кВт/м ³	2,4
Давление пульпы, МПа:	
на выходе.....	0,4
на входе.....	4,4
Частота генерируемых звуковых колебаний, кГц.....	20

Работает мельница следующим образом. Исходный материал, например, комовая глина, подается в бункер I. Затем исходный материал захватывается лопастями 9 и, попадая на ударную плиту 3, измельчается силовым усилием лопастей. Одновременно по трубопроводу 5 подается под давлением (до 2,0 - 5,0 МПа) жидкая фаза, например, вода, которая, истекая из сопел 12 с высокой скоростью через отверстия 11 в дисках 8, попадает в зону измельчения, расположенную между кромками лопастей 3 и ударной плитой 3. Поскольку диски 8 вращаются вместе с лопастями 9, то струя жидкости, истекающая из сопел 12, периодически прерывается; при этом достигается частота порядка 1500-2000 Гц. В результате в зоне измельчения предложенной мельницы возникает мощное гидроакустическое поле. В это поле лопастями ротора подаются все новые и новые порции твердого материала. При этом исходный твердый материал одновременно с силовым разрушающим воздействием лопастей ротора подвергается мощным звуковым колебаниям, передаваемым жидкой средой в зону измельчения. Данные колебания резко ослабляют связи между твердыми частицами, вследствие чего материал легко разрушается от силового воздействия лопастей ротора. Измельчаемый твердый материал вместе с жидкой фазой в виде суспензии выводится наружу через выходной канал 4. Подача глиноматериала лопастями 9 ротора в зону измельчения делает процесс разрушения материала непрерывным [3]. Техническая характеристика гидроакустической роторной мельницы МГР-2 представлена в таблице.

Техническая характеристики измельчительной машины “ГРМ-2”

Вид измельчаемого материала	Глина, мел, барит, слюда и др.
Линейный размер частиц, м:	
Исходный, не более	0,05
Конечный	$10^{-6} \dots 10^{-7}$
Производительность по глиноматериалу, м ³ /ч	1,5...2,0
Частота генерируемых гидроакустических колебаний в рабочей камере, Гц	1500...2000
Потребляемая мощность, кВт	28
Габаритные размеры, мм	
высота	1720
длина	1340
ширина	1065
Масса без электродвигателя, кг	280

Благодаря высокой эффективности измельчения в данной гидроакустической мельнице в несколько раз сокращается число циклов повторного прохождения суспензии через мельницу для измельчения твердого материала до требуемой фракции. В результате производительность мельницы увеличивается в 2-4 раза по сравнению с известными роторными мельницами. Это особенно важно для быстрого и качественного приготовления промывочных жидкостей при бурении скважин в сложных геологических условиях.

6.5 Многоступенчатая струйно-вихревая мельница “СВМ-3”

В предлагаемой измельчительной машине реализован перспективный принцип постадийного измельчения исходного продукта. Разработанная мельница конструкции “СВМ – 3” отличается от аналогичных конструкций тем, что позволяет на порядок

повысить дисперсность приготавливаемых суспензий при одновременном снижении энергозатрат на 30-40 % на работу устройства. Мельница предназначена для активации промывочных жидкостей после их длительного хранения и дополнительного диспергирования грубодисперсных промывочных жидкостей. Конструкция струйной вихревой мельницы поясняется чертежами на рис.36.

Мельница состоит из герметичного корпуса 1, выполненного в виде барабана с входным 2 и выходным 3 патрубками, расположенными по оси корпуса 1 с противоположных торцов. Внутри корпуса 1 размещен смеситель, выполненный из группы последовательно расположенных дисков 4 и 5, которые жестко прикреплены к корпусу 1 перпендикулярно его оси. В дисках 4 и 5 в направлении от входного 2 к выходному 3 патрубку выполнены отверстия 6 и 7 с определенной последовательностью. Первый диск 4 имеет периферические отверстия 6, второй диск 5 - центральные отверстия 7. Корпус 1 выполнен с возможностью вращения, которое передается от двигателя (на чертеже он не показан) с помощью клиноременной передачи через шкив 8, установленный на входном патрубке 2. Для обеспечения возможности вращения корпуса 1 входной 2 и выходной 3 патрубки установлены в опорах на радиальных самоустанавливающихся подшипниках 9.

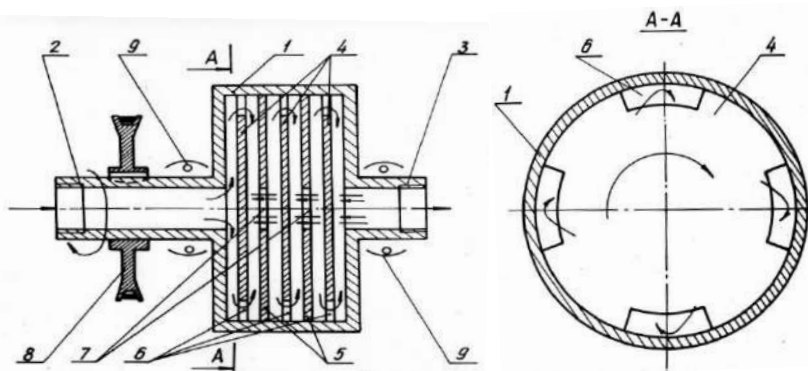


Рис. 36. Струйная вихревая мельница для активации промывочной жидкости СВМ-3
1 - корпус; 2 - входной патрубок; 3 - выходной патрубок; 4 и 5 - диски; 6 и 7 - отверстия; 8 - шкив; 9 - подшипники.

Работает мельница следующим образом.

Во внутрь вращающегося корпуса 1 по входному патрубку 2 через вертлюг (на чертеже не показан) непрерывно под давлением подают крупнодисперсную пульпу. Здесь пульпа, двигаясь по зазору между торцом корпуса 1 и диском 4 и через периферические отверстия 6, благодаря наличию сил трения внутри жидкости, раскручивается и приобретает частоту вращения, равную частоте вращения корпуса 1. Во вращающемся потоке происходит измельчение твердой фазы пульпы. Кроме того, пульпа, раскручиваясь в корпусе 1, под действием центробежных сил, возникающих во вращающемся потоке, прижимается к боковым стенкам корпуса 1. В результате этого в центре вращающегося потока около отверстия 7 диска 5 образуется зона разряжения. С одной стороны, в зону разряжения из отверстия 7 устремится часть пульпы, с другой стороны сюда по зазору между дисками 4 и 5 пульпа поступает непрерывно. Вследствие этого объем вращающегося потока возрастает, и пульпа стремится выйти по зазору между дисками 4 и 5, в результате происходит гидравлический удар встречных потоков. Одновременно с этим давление в зазоре между дисками 4 и 5 возрастает, в результате чего происходит выброс части пульпы через отверстие 7 в сторону выходного патрубка 3. А в центре вращающегося потока около отверстия 7 опять возникает зона разряжения и процесс повторяется с высокой частотой, достигая звукового или ультразвукового диапазонов. Так как смеситель мельницы выполнен в виде группы дисков, то пульпа, двигаясь через него, периодически и многократно подвергается колебаниям с высокой частотой, а твердая фаза интенсивно разрушается. Это повышает эффективность измельчения и

позволяет с высокой производительностью осуществлять приготовление буровых промывочных жидкостей [3]. Техническая характеристика многоступенчатой струйно-вихревой мельницы СВМ - 3 представлена в таблице.

Техническая характеристика измельчительной машины СВМ-3

Параметры	Значения
Вид измельчаемого материала	Крупнодисперсная пульпа
Линейный размер частиц, м:	
Исходный, не более	10^{-5}
Конечный	$10^{-7} \dots 10^{-8}$
Производительность по глиноматериалу, м ³ /ч	18...20
Частота генерируемых гидроакустических колебаний в рабочей камере, Гц	20000
Потребляемая мощность, кВт	18
Габаритные размеры, мм	
высота	650
длина	1340
ширина	720
Масса без электродвигателя, кг	176
Статистический напор потока, МПа:	
на выходе	0,4
на входе	4,5
Амплитуда звукового давления генерируемой волны, МПа	0,12

6.6 Многоступенчатая микромолотковая мельница для приготовления механоактивированных буровых растворов

Важным резервом повышения производительности бурения скважин и сокращения сроков разведки месторождений полезных ископаемых является правильный выбор технологии бурения, в том числе вида и качества промышленных жидкостей с высокой степенью механоактивации исходных компонентов. При этом для приготовления таких механоактивированных промывочных жидкостей используются самые разнообразные по физико-механическим свойствам сходные компоненты из твердых материалов: глина, мел, барит, гипс, доломит, гематит, торф, целлюлозосодержащие твердые материалы и другое минеральное и органическое сырье. Исходя из этого для качественного и производительного приготовления механоактивированных промывочных жидкостей необходимо использовать энергонапряженную измельчительную технику, обеспечивающую высокий потенциал передачи механической энергии мелющих органов измельчаемому продукту. Особенно это требование важно, как показывает практика, для разрушения при измельчении вязких и пластичных материалов с высокими деформационными характеристиками физико-механических свойств.

Учитывая вышеизложенное, на кафедре ТТР МПИ разработана новая технология энергонапряженного измельчения минерального и органического сырья с повышенным диапазоном величин прочностных и деформационных параметров физико-механических свойств этих твердых материалов. Причем конструкция измельчительного устройства, реализующая данную технологию измельчения, выполнена с учетом технологических и эксплуатационных требований приготовления высококачественных

буровых промывочных жидкостей из самых разнообразных исходных компонентов. Основными задачами разработки предлагаемой технологии измельчения многоступенчатой мельницей микролоткового типа являлось повышение эффективности измельчения и однородности по степени дисперсности готового продукта путем создания условий для последовательного перемещения всей массы материала через зоны наиболее интенсивного измельчения, а также увеличение долговечности работы мелющих тел.

Измельчительная машина (рис. 37.), реализующая предлагаемую технологию измельчения, представлена на рисунке. Она содержит камеру дробления 1, два вертикально установленных ротора на валах 2 и 3 с дисками 4. В дисках 4 на окружностях разного диаметра выполнены отверстия 5, в которых установлены оси 6 с размещенными на них пакетами длинных 7 и коротких 8 молотков. В некоторых местах вместо них установлены молотки 9 в форме лопастей. Количество лопастей, их размещение в пространстве камеры дробления и угол установки по отношению к потоку определяются свойствами материала и заданной степенью его измельчения. Камера дробления 1 снабжена входным 10 и выходным 11 каналами. Молотки 7 и 8 упрочнены по всей поверхности, например, путем цементирования, борирования, нитрирования и т. д., так, что толщина неупрочненной части составляет 40 % от общей толщины молотка, обычно равной 2-3 мм. По мере износа молотков их переставляют на новые места крепления так, чтобы сохранился заданный наружный диаметр молотков, установленных на роторе.

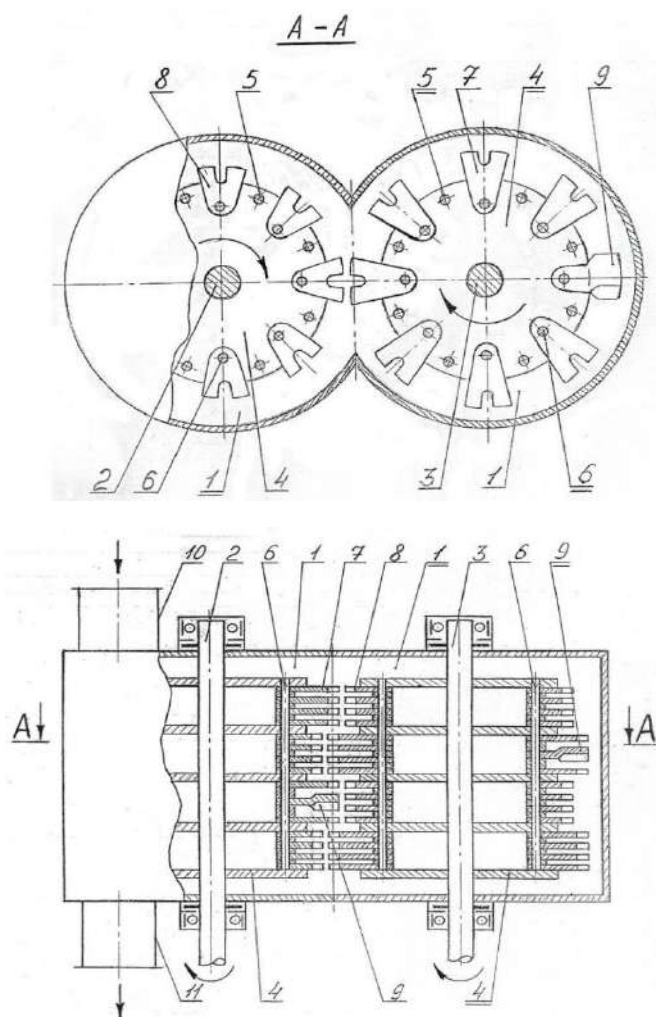


Рис. 37. Схема многоступенчатой микролотковой мельницы конструкции МММ-2.

При работе устройства измельчаемый материал через входной канал 10 подается в верхнюю часть камеры дробления 1 к пакету длинных молотков 7 ротора на валу 2, вращающегося в одном направлении с ротором на валу 3. Измельчаемый и перемещаемый этими молотками в кольцевом пространстве вокруг ротора на валу 2 материал поступает в зону встречного движения молотков 7 и 8, где интенсивно измельчается благодаря удвоенной скорости взаимодействия частиц материала с молотками в стесненных условиях и полностью перемещается в кольцевое пространство вокруг ротора на валу 2 за счет окружной скорости потока, большей, чем окружная скорость потока материала в кольцевом пространстве вокруг ротора на валу 3. По мере измельчения молотками 8 частицы материала под действием силы тяжести опускаются к нижележащему пакету длинных молотков 7 ротора на валу 3, и процесс измельчения повторяется аналогичным образом до тех пор, пока материал не достигнет самого нижнего пакета коротких молотков 8, после чего измельченный материал поступает в нижний выходной канал 11. Скорость перемещения продукта в зоне измельчения регулируют путем варьирования количеством на роторах молотков 9 и направлением угла атаки их лопастей.

Предлагаемая конструкция многоступенчатой микромолотковой мельницы МММ-2 имеет следующие технические данные.

Вид материала	Глина, барит, доломит, известняк, цемент, полевой шпат, слюда, тальк, древесный и каменный уголь, доменные шлаки и др.
Линейный размер частиц, м: исходного продукта конечного продукта	(2-10)*10 ⁻³ (5-20)*10 ⁻⁶
Степень измельчения	30-50
Число одновременно протекающих актов разрушения твердого материала в измельчительной машине, с-1	(1,1-1,4)*10 ⁴
Общее количество ударных рабочих элементов, шт.	2240
Тип системы охлаждения	Водяное
Потребляемая мощность, кВт	75
Производительность, т/ч	1,0-1,5
Габариты, мм	3200x2150x1650
Масса, кг	3950

Проведенные стендовые исследования опытного образца многоступенчатой молотковой мельницы МММ-2 показали высокую эффективность ее работы при измельчении материалов с различными прочностными и деформационными свойствами (глина комовая, барит, гематит, каменный уголь, торф и т. д.). Это позволяет рекомендовать ее для эксплуатации в различных геологоразведочных организациях при приготовлении весьма разнообразных по составу буровых промышленных жидкостей, поскольку помимо высокой эффективности измельчения твердых материалов данная мельница обеспечивает высокую степень массообмена (т. е. перемешивания) при измельчении. Наконец, предлагаемая конструкция мельницы МММ-2 может найти широкое применение при получении высокодиспергированных пульп и порошков различных технологических материалов в горно-обогатительной, химической, строительной и других отраслях промышленности.

6.7 Лопастной механоактиватор “ЛМА-2М”

Мокрый метод механоактивации дисперсных систем является наиболее технологичным при реализации в полевых условиях, с целью повышения вяжущих свойств тампонажных буровых растворов. Поэтому разработка новых высокоэффективных методов данного вида механоактивации дисперсных систем вяжущих материалов является актуальной проблемой, особенно при цементировании нефтегазовых скважин.

Эффективность мокрого метода механоактивации тампонажных смесей на основе цемента авторами предварительно исследовалась в лабораторных условиях. Выполнение лабораторных работ включало в себя предварительную активацию исходных вяжущих, из которых готовятся исследуемые тампонажные смеси, а затем активировались сами смеси. В качестве вяжущих использовались цементы следующих марок: М200; М300; М400.

Активация вяжущих осуществлялась путем мокрого механического сверхтонкого измельчения лабораторными лопастными активаторами до размеров частиц преимущественно от 10 до нескольких микрон с удельной поверхностью до 0,6-0,8 м²/г. Пробы были изготовлены из цементного теста, подвергнутого вышеуказанному гидромеханическому воздействию. Мокрая механоактивация растворов производилась на протяжении разных интервалов времени (20, 40, 60 мин.).

Анализ результатов лабораторных исследований подтверждает эффективность мокрого метода механоактивации вяжущих (предел прочности цементного камня на сжатие $\sigma_{сж}$ увеличивается на 30-40 %) и необходимость существенного увеличения энергонапряженности процесса механоактивации вяжущих. Для повышения эффективности мокрой механоактивации, как показали лабораторные исследования, целесообразно повышение скорости движения измельчающей среды. Это возможно осуществить в закрученных потоках жидкости.

Закрученный поток формирует поле центробежных массовых сил и обладает следующими специфическими особенностями:

- в случае формирования кольцевых закрученных потоков без механического воздействия на него рабочих органов измельчительного аппарата успешно решается проблема чистого помола, так как в кольцевом закрученном потоке реализуется процесс самоизмельчения;
- поток имеет соизмеримые значения осевой, вращательной и радиальной составляющих скорости;
- поток имеет продольный и поперечный градиенты статического и полного давления;
- поток имеет существенное значение градиента скорости в поперечном сечении; отличается высоким уровнем турбулентных пульсаций;
- осуществляет активное и консервативное воздействие центробежных сил на поток.

Закрученные потоки эффективно используются во многих механизмах для реализации сложных процессов.

Принцип работы предложенного способа, работающего в режиме самоизмельчения в кольцевом закрученном потоке, поясняется эскизом на рисунке 1.

Устройство, с помощью которого реализуется предлагаемый способ измельчения твердых материалов (рис.38), состоит из цилиндрического горизонтального корпуса 1 с футеровкой 2 внутренней его поверхности, загрузочного бункера 3 и выгрузочного патрубка 4 с регулировочным краном 5. Внутри корпуса 1 соосно размещен ротор, содержащий вал 6 с подшипниковыми опорами 7, две ступицы 8, на которых закреплены лопасти 9 с одинаковым зазором 10 между периферийной кромкой лопасти 9 и поверхностью футеровки 2 корпуса 1.

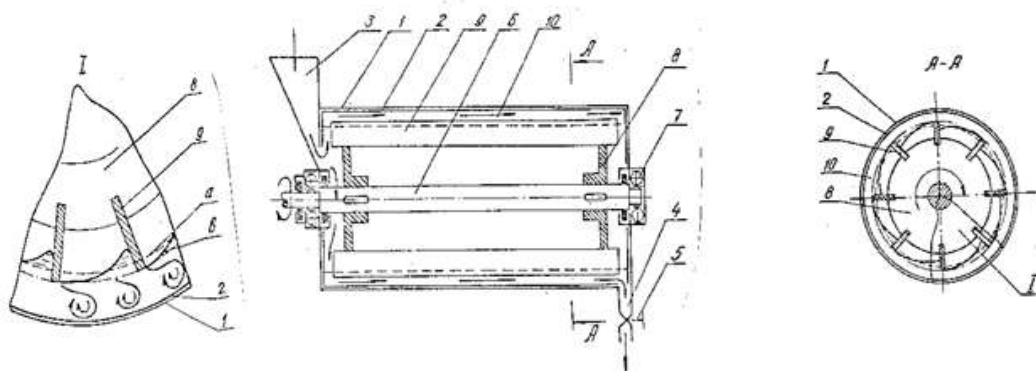


Рис. 38. Схема лопастного механоактиватора “ЛМА-2М”

Измельчение твердых материалов по предлагаемому способу осуществляется следующим образом.

При вращающемся роторе исходный продукт подается в рабочую камеру в виде пульпы с крупностью кусков от 1 до 10-15 мм при водотвердом отношении в пределах от 0,5 до 1,5. Вращающиеся лопасти 7 ротора механически формируют внутри корпуса кольцевой закрученный поток с усредненной внутренней поверхностью S' . При этом лопасти 7, вращаясь с высокой скоростью, порядка 1500-3000 об/мин, интенсивно деформируют внутреннюю поверхность кольцевого потока до некоторой граничной области S'' . В результате такой деформации во всем объеме кольцевого потока на всю его толщину возникают завихрения, обладающие повышенными турбулентными характеристиками. Твердый материал при этом активно взаимодействует друг с другом и с лопастями 7 ротора, измельчаясь вследствие малого значения водотвердого отношения измельчаемого продукта. Кроме того, находясь в области активного протекания кавитационных процессов в закрученном потоке, материал также эффективно разрушается. В процессе работы устройства необходимая толщина закрученного кольцевого потока устанавливается регулировочным краном 5. Проходя через рабочую камеру, исходный продукт в виде текучей пульпы измельчается и выводится наружу через выгрузочный патрубок 4.

Предлагаемое водотвердое отношение в пределах 0,5-1,5 обеспечивает высокую степень взаимодействия твердых частиц друг с другом и рабочими органами, например, лопастями вышеприведенного устройства, что способствует существенному повышению интенсификации разрушения твердых частиц путем их истирания. При этом во встречных закрученных потоках, имеющих, как известно, высокие скорости вращения, твердые частицы дополнительно разрушаются при соударении друг с другом.

Процесс механической активации дисперсных систем возможно интенсифицировать двумя путями: за счет увеличения доли динамической составляющей разрушающей нагрузки и за счет увеличения количества одновременно протекающих актов разрушения, что обеспечивает сокращение интервалов времени между двумя последовательными актами. Реализация намеченных путей может быть достигнута только при высоких скоростях движения рабочих органов и их количестве в устройстве. Однако ключевым условием эффективности измельчения по предложенному способу, как показали экспериментальные исследования, является водотвердое отношение в пределах 0,5-1,5 %. Это вполне отвечает требованиям приготовления буровых тампонажных растворов, в том числе при цементировании нефтегазовых скважин. Экономически внедрение предлагаемой разработки в производство, по мнению авторов, является крайне актуальным.

6.8 Малогабаритная щеточная мельница ММЩ-2М для приготовления буровых промывочных жидкостей

Разработанная щеточная мельница отличается от других измельчителей механического типа, применяемых для приготовления буровых промывочных жидкостей тем, что процесс измельчения глиноматериала осуществляется за счет непрерывного разрушения его поверхностного слоя щеткой ротора. Как показали теоретические исследования, затраты энергии на измельчение глиноматериала в мельницах со щеточным вооружением ротора гораздо ниже, чем в мельницах с лопастным ротором, где процесс разрушения материала носит объемный характер.

Конструктивная схема разработанной щеточной мельницы представлена на рис. 39. Мельница состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 с приемным бункером 2 и выходным каналом 3. Цилиндрические стенки внутри полости корпуса 1 покрыты футированной поверхностью 4. По оси в корпусе 1 размещен ротор 5, выполненный в виде щетки 6, охватывающий вал 7 ротора 5 по всей длине. Между валом 7 и щеткой 6 ротора 5 выполнен кольцевой канал 8. В его нижней части соосно с валом 7 установлена потоконаправляющая труба 9 с окнами 10, закрепленная с корпусом 1. Вал ротора 5 снабжен шнеком 11, расположенным внутри потоконаправляющей трубы 9.

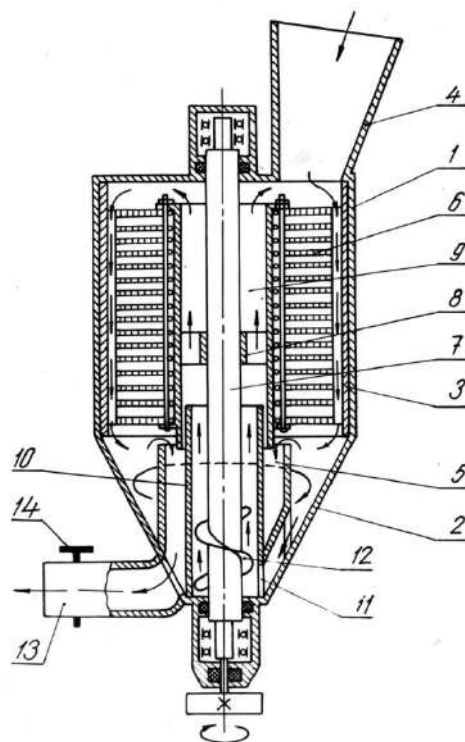


Рис.39. Схема щеточной мельницы ММЩ-2М.

Мельница работает следующим образом. В корпус 1 через приемный бункер 2 производится непрерывная подача твердой и жидкой фазы приготавливаемой буровой промывочной жидкости. Перемещаясь в корпусе 1 сверху вниз глиноматериал подвергается разрушению и одновременно перемешивается с жидкой фазой под воздействием щеток 6 вращающегося ротора 5. В нижней части корпуса 1 мельницы происходит разделение потока приготавливаемой промывочной жидкости. Приготовленная жидкость (глиноматериал измельчен до частиц заданного линейного размера) отводится из корпуса 1 через выходной канал 3. Недоизмельченные частицы твердой фазы, линейный размер

которых больше задаваемого, осаждаются в нижней части корпуса 1 мельницы. Отсюда они подхватываются движущимся потоком жидкости, который создается шнеком 11 и перемещаются через окна 10 по полости потоконаправляющей трубы 9 и кольцевому каналу 8 к верхнему пространству корпуса 1, т.е. в исходное положение.

Разработанная конструкция щеточной мельницы позволяет производить разделение измельчаемого глиноматериала по фракциям и выводить из рабочей полости готовую промывочную жидкость с частицами твердой фазы, измельченными до заданной степени дисперсности. Это способствует сокращению непроизводительных затрат энергии на осуществление процесса приготовления бурового раствора, т.к. практически конструкция мельницы исключает процесс переизмельчения.

Затраты мощности $N_{щ}$ на привод мельницы складываются из затрат мощности на осуществление процесса измельчения $N_{щ}'$, на преодоление вязкостного трения N_v при вращении ротора мельницы в среде приготавливаемой промывочной жидкости и на транспортирование N_m недоизмельченного глиноматериала в рабочей полости мельницы

$$N_{щ} = N_{щ}' + N_v + N_m \quad (1)$$

Затраты мощности $N_{щ}'$ на осуществление процесса измельчения определяются производительностью $Q_{щ}$ мельницы по глиноматериалу и величиной удельной энергии $E_{щ}$, затрачиваемой на измельчение единицы его объема.

$$N_{щ}' = E_{щ} * Q_{щ} \quad (2)$$

Затраты мощности на преодоление вязкостного трения при вращении ротора мельницы в среде приготавливаемой промывочной жидкости определяется как

$$N_v = \frac{200 \mu \omega^2 \pi}{1} ((R_{щ}^4 - \chi_{щ}^4) * 2 / Z_1 + (h_{щ} * R_{щ}^3) / Z_2) \quad (3)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости приготавливаемой промывочной жидкости;

ω - угловая скорость вращения ротора;

$R_{щ}$ и $\chi_{щ}$ - радиусы рабочей полости и ротора мельницы;

$h_{щ}$ - длина ротора;

Z_1 и Z_2 - зазоры, соответственно, между торцевыми поверхностями ротора и верхней и нижней крышками корпуса, и между щеткой ротора и футированной поверхностью корпуса.

Затраты мощности N_m на транспортирование недоизмельченного материала в рабочей полости определяется как

$$N_m = 2,72 Q_m * q_p * h_{щ} * K_m (W + 1) \quad (4)$$

где Q_m - производительность транспортирования шнеком;

K_m - коэффициент учитывающий потери на трение ($K_T = 1,3 - 1,5$);

q - постоянная ($q = 9,82$);

W - опытный коэффициент сопротивления при перемещении материала шнеком ($W = 1,9 - 2,3$)

$$Q_m = 1800 \pi^2 D_e^2 \psi h_e \xi \quad (5)$$

где D_e - диаметр шнека;

ψ - коэффициент заполнения шнека ($\psi = 1$);

h_e - шаг винта шнека;

ξ - коэффициент, учитывающий влияние угла наклона оси шнека к горизонту на его производительность (при $\delta = 90^\circ$, $\xi = 0,4$).

Решение уравнений (3), (4) и (5) при следующих конструктивных параметрах: $\mu = 10^{-4}$ Нс/м²; $\omega = 104,86$ рад/с; $R_{щ} = 0,25$ м и $\chi_{щ} = 0,24$ м; $Z_1 = 0,25$ м и $Z_2 = 0,81$ м; $h_{щ} = 0,6$ м; $D_e = 0,15$ м; $h_e = 0,07$ м, дало следующие численные значения: $N_v = 6,88$ кВт; $N_T = 1,77$ кВт при $Q_T = 16,11$ м³/ч.

Затраты энергии на привод мельницы без учета затрат на осуществление процесса измельчения составляет 8,65 кВт*ч. В зависимости от степени измельчения S и подачи $Q_{щ}$

Генерирование звуковых колебаний в излучателях с вихревой камерой осуществляется за счет создания в системе интенсивного энергообмена между первичным, вводимым тангенциально в цилиндрическую полость камеры, и вторичным, поступающим из выходного патрубка, вихрями. При этом давление на выходном патрубке меняется с частотой f , определяемой диаметром камеры D и перепадом давлений P_1 и P_2 на входе и выходе излучателя [1]:

$$f = \frac{C}{\pi D} \left(\frac{P_1 - P_2}{P_2} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где: C - скорость распространения звуковой волны в обрабатываемой среде

Излучатели с вихревой камерой надежны в работе, просты в конструктивном исполнении.

Их мощность в ультразвуковом диапазоне (до 30 кГц) составляет от 0,5 до 3 Вт.

Процесс диспергации твердой фазы суспензии в ультразвуковом поле происходит двумя путями: во-первых, под действием ударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков, которые зарождаются при частоте свыше 20 кГц и мощности звуковой волны до 1 Вт; во-вторых, под действием микроструек жидкости, возникающих при захлопывании несферических кавитационных пузырьков. Преобладание того или иного механизма разрушения обуславливается масштабным фактором, так как связано с начальной формой кавитационного пузырька при его захлопывании. Если размер кавитационного пузырька преобладает над размерами диспергируемых частиц, то условий для начального искажения формы пузырька нет, и он захлопывается с образованием ударной волны. В том случае, когда размер диспергируемых частиц больше диаметра кавитационного пузырька, последний теряет свою форму и при захлопывании образует микроструйку жидкости. При обработке буровых промывочных жидкостей имеет место механизм разрушения, связанный с действием ударных волн, что обусловлено малым линейным размером (до 10^{-6} м) частиц твердой фазы.

Причиной возникновения кавитации является высокочастотный перевод жидкостной среды обрабатываемой суспензии в метастабильное состояние, а затем возвращение ее в исходное. Переход в метастабильное состояние осуществляется вследствие создающегося отрицательного давления в местах разряжения распространяющейся звуковой волны. Кавитационный пузырек, попадая в область высокой интенсивности ультразвуковых колебаний, начинает пульсировать. Частота колебаний пузырька, кавитирующего под действием звуковых волн, практически равна частоте последних:

$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3K}{\rho_B}} \left(P_1 - P_2 + \frac{2\sigma_B}{R_0} \right), \quad (2)$$

где: K - отношение удельных теплоемкостей среды;

σ_B - поверхностное натяжение;

R_0 - радиус кавитационного пузырька.

Зависимость, определяющая радиус кавитационного пузырька, была эмпирически найдена Брониным Ф.А.:

$$R_0 = \frac{0,4}{f} \left(1 - \frac{P_\Gamma}{P} \right) \left(\frac{P}{\rho_B} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где: P - величина гидростатического давления, $P_\Gamma = P_1 - P_2$;

P - величина звукового давления.

На скорость протекания процесса ультразвуковой диспергации оказывает влияние тот факт, что единичный кавитационный пузырек обрабатывает одновременно только те

частицы, которые находятся в его зоне захвата, определяемой радиусом R_k воздействия кавитационного пузырька:

$$R_k = (XR^3_0 \rho_f f / \eta)^{0.5}, \quad (4)$$

где: ρ_f - плотность материала твердых частиц обрабатываемой суспензии;
 η - сдвиговая вязкость кавитирующей среды.

В результате захвата кавитационным пузырьком диспергируемые частицы флотируются у его поверхности, при этом их концентрация не должна быть выше

$$n_m \leq 4R^2_0 / X^2, \quad (5)$$

в противном случае наблюдается блокировка кавитационного пузырька.

Анализ материалов исследований показывает, что при диспергировании в ультразвуковом поле механизм разрушения частиц носит поверхностный характер. При каждом единичном всхлapyвании кавитационного пузырька, энергия ударной волны распространяется на частицы, флотированные у его поверхности. Под воздействием ударной нагрузки происходит отшелушивание материала с их поверхности. Величина энергии ударной волны, передаваемой диспергируемым частицам, определяется исходя из условия равенства кинетической энергии E_k жидкости, движущейся в поле кавитационного пузырька, и согласно Новицкому Б.Г. равна

$$E_k = 2\Pi \rho_b R_0^5 f^2, \quad (6)$$

где: ρ_b - плотность жидкой фазы обрабатываемой суспензии.

Так как флотированные частицы твердой фазы суспензии располагаются вблизи поверхности кавитационного пузырька, то величину эффективной энергии E' ударной волны, т.е. энергии волны в месте расположения частиц суспензии, определит соотношение:

$$E' = E_k / R^2_0, \quad (7)$$

Процесс ультразвукового диспергирования суспензии значительно интенсифицируется, если наряду со знакопеременным звуковым давлением на жидкость наложить определенное постоянное или гидростатическое давление. Очевидно, исходя из приведенной выше зависимости (3), определяющей радиус кавитационного пузырька, что при повышении гидростатического давления размер последнего будет уменьшаться, а это в свою очередь ведет к увеличению скорости распространения ударной волны при его всхлapyвании. Принцип работы и конструктивное исполнение излучателей с вихревой камерой позволяют регулировать величину гидростатического давления в весьма широких пределах.

6.10. Центробежная мельница мокрого помола “МЦ-Т”

Мокрый метод механоактивации дисперсных систем является наиболее технологичным для повышения вязущих свойств тампонажных буровых растворов в полевых условиях. Поэтому разработка новых высокоэффективных методов данного вида механоактивации дисперсных систем вязущих материалов является актуальной проблемой, особенно при цементировании нефтегазовых скважин.

Эффективность мокрого метода механоактивации тампонажных смесей на основе цементов авторами предварительно исследовалась в лабораторных условиях. Выполнение лабораторных работ включало в себя предварительную активацию исходных вязущих, из которых готовятся исследуемые тампонажные смеси, а затем активировались сами смеси. В качестве вязущих использовались цементы следующих марок: М400 и М500. Для повышения эффективности мокрой механоактивации, как показали лабораторные

исследования, целесообразно повышение скорости движения измельчающей среды. Это возможно осуществить в закрученных потоках жидкости.

Закрученный поток формируется в поле центробежных сил и обладает следующими специфическими особенностями: - в случае формирования кольцевых закрученных потоков без механического воздействия на него рабочих органов измельчительного аппарата успешно решается проблема чистого помола, так как в кольцевом закрученном потоке реализуется процесс самоизмельчения; - поток имеет соизмеримые значения осевой, вращательной и радиальной составляющих скорости; - поток имеет продольный и поперечный градиенты статического и полного давления; - поток имеет существенное значение градиента скорости в поперечном сечении, отличается высоким уровнем турбулентных пульсаций; - осуществляет активное и консервативное воздействие центробежных сил на поток.

Принцип работы предложенного способа, работающего в режиме самоизмельчения в кольцевом закрученном потоке, осуществляется измельчительной машиной центробежного типа МЦ-Т и поясняется эскизом на рис. 41. Измельчение твердых материалов по предлагаемому способу осуществляется следующим образом.

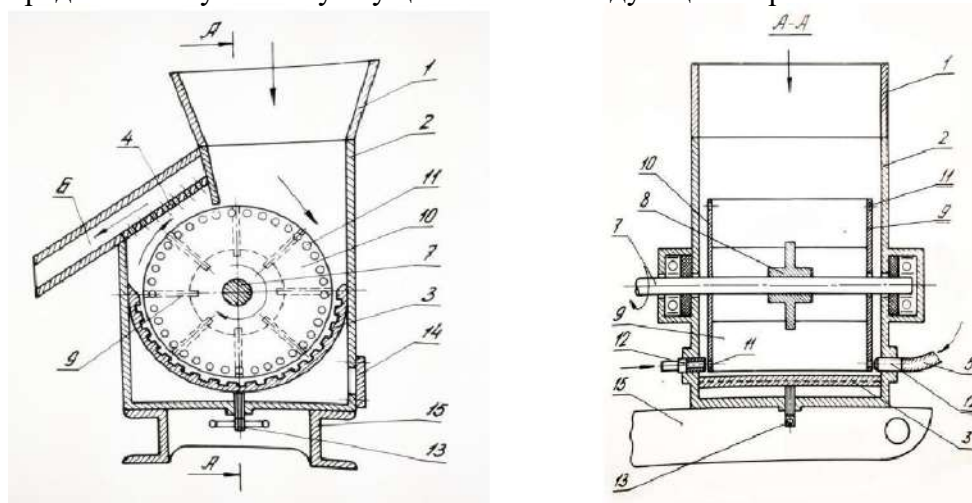


Рис. 41. Схема центробежной мельницы мокрого помола “МЦ-Т”

При вращающемся роторе исходный продукт подается в рабочую камеру в виде пульпы с крупностью частиц до 3 мм и водо-твердом отношением в пределах от 0,5 до 1,5. Вращающиеся лопасти 9 ротора механически формируют внутри корпуса кольцевой закрученный поток с усредненной внутренней поверхностью S' . При этом лопасти 9, вращаясь с высокой скоростью, порядка 1500-3000 об/мин, интенсивно деформируют внутреннюю поверхность кольцевого потока до некоторой граничной области S'' . В результате такой деформации во всем объеме кольцевого потока на всю его толщину возникают завихрения, обладающие повышенными турбулентными характеристиками. Твердый материал при этом активно взаимодействует друг с другом и с лопастями 9 ротора, измельчаясь вследствие малого значения водотвердого отношения измельчаемого продукта. Кроме того, находясь в области активного протекания кавитационных процессов в закрученном потоке, материал также эффективно разрушается. В процессе работы устройства необходимая толщина закрученного кольцевого потока устанавливается регулировочным краном 5. Проходя через рабочую камеру, исходный продукт в виде текучей пульпы измельчается и выводится наружу через выгрузочный патрубок 6. Формирование закрученного кольцевого потока, состоящего из текучей пульпы, с повышенным содержанием твердой фазы позволяет при заявленном способе производить механическое деформирование этого потока, например, лопастями 9 с высокими скоростями до 30-50 м/с. Механическое деформирование кольцевого потока при этом

производится частично с внутренней стороны. Высокие скорости деформирования кольцевого потока позволяют существенно повысить эффективность разрушения твердого материала, так как известно, что при высокодинамическом воздействии на твердое тело его разрушение происходит при меньших нагрузках по сравнению с низкоскоростным его нагружением.

Аналогичное высокоскоростное механическое воздействие на диспергируемую пульпу во всем объеме корпуса невозможно в известных гидромеханических способах из-за неоправданно высоких затрат энергии на вязкое течение потока. В то время как предлагаемый способ реализуется при относительно низких затратах энергии, которая расходуется на раскручивание небольшой массы потока и на частичное деформирование этого потока. Аналогичное высокоскоростное деформирование потока диспергируемой пульпы достигается лишь в струйных мельницах. Однако работа струйных мельниц характеризуется гораздо большими энергозатратами, в 4-6 раз по сравнению с предложенным способом, так как в них используется гидравлический привод с КПД, равным в пределах 6-7 %, не более.

Предложенный энергонапряженный гидродинамический способ измельчения твердых материалов, по сравнению с известными, обеспечивает активно протекающие процессы взаимодействия твердых частиц друг с другом и с рабочими органами измельчительных машин, а интенсивные процессы кавитации во всем объеме кольцевого потока существенно повышают эффективность измельчения материала по предлагаемому способу. Увеличение эффективности измельчения достигается также за счет высокоскоростного механического воздействия вращающихся рабочих органов устройства со скоростью до 40-60 м/с на измельчаемый материал, а также за счет многократной доставки закрученными потоками твердого тела в зону интенсивного измельчения, т. е. в зону скоростной механической деформации кольцевого потока.

Механическое измельчение как физический процесс характеризуется законом, который выражает соотношение между линейными размерами измельчаемого тела, его удельной поверхностью и удельными затратами энергии на разрушение. Следовательно процесс механической активации дисперсных систем возможно интенсифицировать двумя путями: за счет увеличения доли динамической составляющей разрушающей нагрузки и за счет увеличения количества одновременно протекающих актов разрушения, что обеспечивает сокращение интервалов времени между двумя последовательными актами. Реализация отмеченных путей может быть достигнута только при высоких скоростях движения рабочих органов и их количестве в устройстве. Однако ключевым условием эффективности измельчения по предложенному способу, как показали экспериментальные исследования, является водотвердое отношение в пределах 0,5-1,5 %. Это вполне отвечает требованиям приготовления буровых тампонажных растворов, в том числе при цементировании нефтегазовых скважин. Экономически внедрение предлагаемой разработки в производство, по мнению авторов, является крайне актуальным

6.11 Малогабаритная щеточная мельница «МЩ-1»

Для приготовления тампонажных смесей или реагентов на основе трудно смешиваемых компонентов (например, полиакриламида, УЦР и т. п.) очень важное значение приобретает увеличение перемешивающей способности и степени измельчения исходного продукта.

В предлагаемой мельнице МЩ-1 (рис. 42) выполнение рабочих органов ротора в виде щетки, состоящей из большого количества упругих стержней, повышает степень измельчения исходного продукта за счет увеличения числа наносимых ударов по измельчаемому продукту, по сравнению с лопастным ротором. Кроме того, щетка из упругих стержней гораздо лучше, чем лопасти, перемешивает и истирает измельчаемый

продукт за счет увеличения трения между отдельными кусками продукта, что также повышает степень измельчения материала.

Малогабаритная роторная мельница МЩ-1 может использоваться при бурении поисково-разведочных, гидрогеологических, инженерно-геологических скважин и позволяет решать следующие задачи:

- приготовление естественных промывочных жидкостей из неглинистых пород;
- приготовление глинистых, утяжеленных и тампонажных растворов;
- дегазация буровых растворов;
- восстановление качественных характеристик буровых промывочных жидкостей.

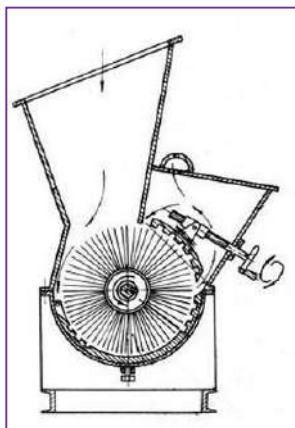


Рис. 42. Схема малогабаритной щеточной мельницы «МЩ-1»

Техническая характеристика

Вид измельчаемого материала.....	глина, мел, слежавшийся цемент и т. п.
Частота вращения ротора в минуту.....	1000-1500
Диаметр щеточного ротора, мм.....	450
Длина щеточного ротора, мм.....	600
Потребляемая мощность, кВт.....	15
Габаритные размеры, мм	
длина.....	1300
ширина.....	1000
высота.....	1250
Масса без электродвигателя, кг.....	350

6.12 Передвижная установка для приготовления буровых промывочных жидкостей.

Вообще, разработка измельчителей производилась с целью создания единого как стационарного, так и передвижного комплекса, способных удовлетворить потребности современной геологоразведочной партии по объему приготавливаемых промывочных жидкостей и их качеству и типам. Ниже будет рассмотрена передвижная установка, созданная на основе разработанных машин, в число которых вошли щеточная и струйная вихревая мельницы, барабанный измельчитель. Основное назначение установки состоит в обеспечении отдельного участка буровых работ из 5-7 буровых агрегатов комплексом промывочных жидкостей. Конструкция установки позволяет производить ее транспортировку волоком, с погрузкой на трейлер, вертолетом. Все это делает ее

пригодным для применения в труднодоступных районах, удаленных геологоразведочных партиях, отдельных участках буровых работ.

Технические средства, используемые в передвижной установке, позволяют при различных вариантах их применения получать глинистые растворы обрабатывать их реагентами, приготавливать растворы на основе полиакриламида и т.п. Наличие в установке перекачивающих средств делает возможным заливку приготовленных промывочных жидкостей в емкость автоцистерны или резервуары установки, подачу по трубопроводам к буровым агрегатам.

На рис. 31 и 32 показан вид агрегатного отсека установки. Все машины, осуществляющие процесс приготовления промывочных жидкостей смонтированы в единую технологическую линию, содержащую скреперную лебедку 1 марки ЛС-30, щеточную мельницу 2, барабанный измельчитель 3 и перекачивающий насос 4 со струйной вихревой мельницей 5. Основанием установки служит металлическая рама с настилом, выполненная в виде саней. В здании передвижной установки помещены резервуары 6, 7, 8, в которые производится заливка приготавливаемых промывочных жидкостей. Общий полезный объем резервуаров составляет $7,5 \text{ м}^3$, т.е. рассчитан на получасовую работу установки. На крыше здания размещены привод лебедки 1 и питающие емкости 11, 12, 13, заполняемые концентрированными растворами УЦР, КМЦ и гидролизом полиакриламида. Управление оборудованием производится с пульта 9. Регистрация рабочих режимов струйной вихревой мельницы осуществляется комплексом ИШВ-1-10. Управление лебедкой 1 может осуществляться с выносного пульта 9.

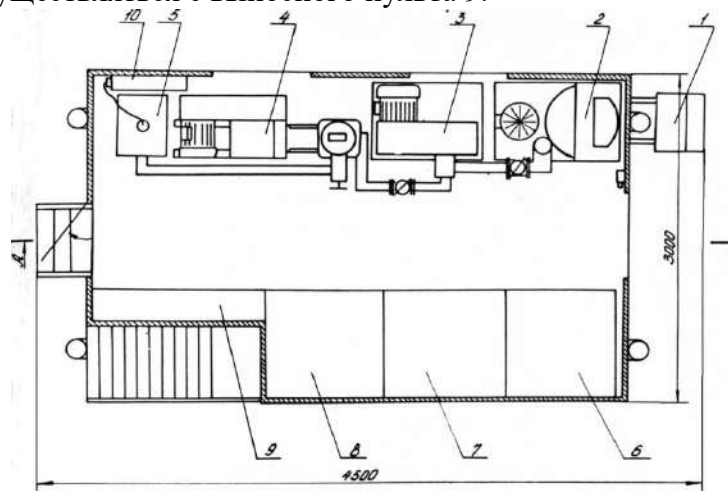


Рис. 31. Передвижная установка для приготовления буровых промывочных жидкостей.

- 1 – скреперная лебедка; 2 – щеточная мельница; 3 – барабанный измельчитель;
4 – перекачивающий насос; 5 – струйная вихревая мельница; 6, 7, 8 – резервуары; 9 – пульт управления; 10 – комплекс ИЖВ-1.

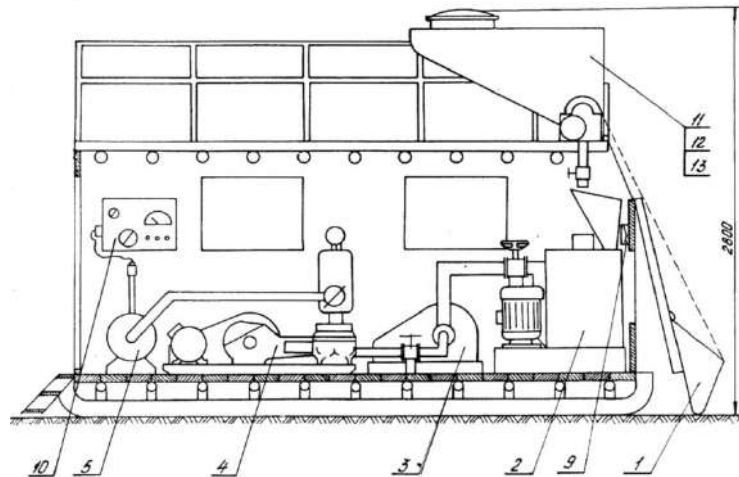


Рис. 32. Вид агрегатного отсека передвижной установки для приготовления буровых промывочных жидкостей, в плане.

1- скреперная лебедка; 2- щеточная мельница; 3- барабанный измельчитель;
4- перекачивающий насос; 5- струйная вихревая мельница; 6, 7, 8- резервуары;
9 - пульт управления; 10- комплекс ИШВ-1.

На рис. 33 показана схема управления гидросистемой установки. Кранами 14, 15, 16 и 17 регулируется подача в приемный бункер щеточной мельницы 2 воды, УЩР, КМЦ, полиакриламида, поступающих из питающих емкостей 11, 12, 13. Изменением объема подачи воды или реагентов регулируют плотность приготавливаемых промывочных жидкостей. Краны 18 и 19 служат для перекрытия трубопроводов к барабанному измельчителю 3 и струйной вихревой мельнице 5. Перекрытие осуществляется в том случае, когда производится приготовление крупнодисперсных глинистых растворов, применяемых при забурке скважин. Краны 20, 22 и 24 перекрывают отвод приготовленных промывочных жидкостей при их сливе в автоцистерны.

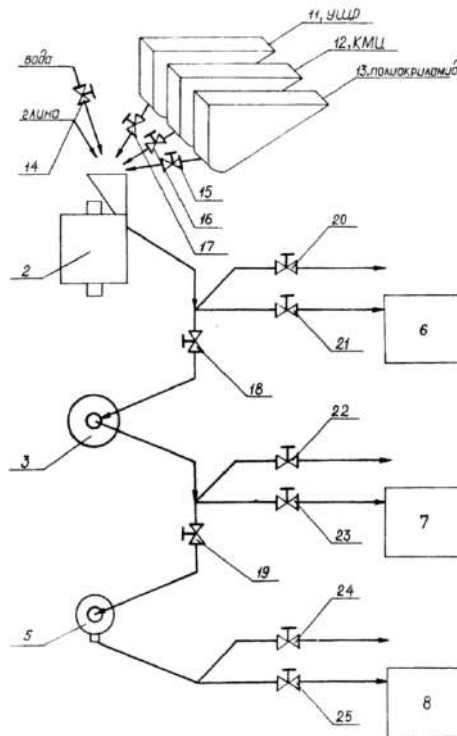


Рис. 33. Схема управления гидросистемой установки.

1- щеточная мельница; 3- барабанный измельчитель; 5- струйная вихревая мельница;
 6, 7, 8- резервуары; 14, 15, 16, 17- краны регулировки подачи материала в бункер
 щеточной мельницы; 18, 19- краны перекрытия трубопроводов; 20, 22, 24-краны
 перекрытия отвода в автоцистерны; 21, 23, 25- краны перекрытия отвода в резервуары.

Краны 21,23 и 25 установлены для осуществления слива жидкостей в резервуары 6,7 и 8. Технологическая схема приготовления буровых промывочных жидкостей (рис. 34.) в зависимости от применяемых компонентов может быть осуществлена по следующим вариантам.

Первый вариант: приготовление жидкостей из комовых глин. Скреперной лебедкой 1 производят загрузку комовой глины в приемный бункер щеточной мельницы 2, при этом должен быть открыт кран 14 подачи сюда же воды. Крупнодисперсная пульпа, приготавливаемая мельницей 2, поступает на доизмельчение в барабанный измельчитель 3, а оттуда в струйную вихревую мельницу 5. Для этого должны быть открыты краны 18 и 19. Приготовленная промывочная жидкость может быть отведена открытием кранов 24 или 25 в емкость автоцистерны или в резервуар 8.

Второй вариант: приготовление глинистого раствора с обработкой его УЩР, КМЦ или приготовление малоглинистого раствора с обработкой полиакриламидом. При приготовлении данных типов растворов кроме воды и глины в приемный бункер щеточной мельницы подается один из вышеперечисленных компонентов. Их подача из питающих емкостей 11, 12 и 13 осуществляется открытием кранов 15, 16 и 17. Приготовление осуществляется последовательно в щеточной мельнице 2, барабанном измельчителе 3 и струйной вихревой мельнице 5.

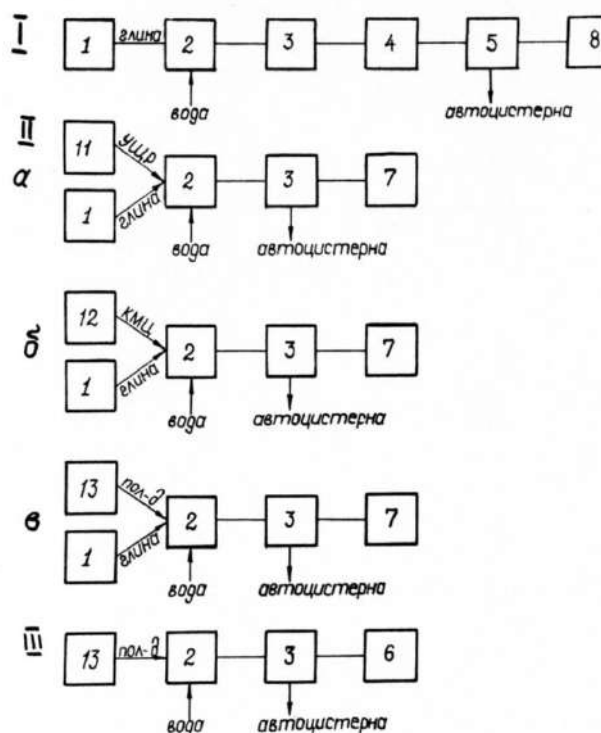


Рис. 34. Схема приготовления различных буровых растворов.

- I- приготовление глинистого раствора из комовых глин; II- приготовление глинистых растворов обработанных; III- приготовление полиакриламидного раствора; а- углещелочным реагентом; б- КМЦ; в- полиакриламидом

получения нативного крахмала из исходного сырья и энергоемкие процессы его клейстеризации, сушки и дробления (рис. 43).

Традиционная схема производства модифицированных крахмалов

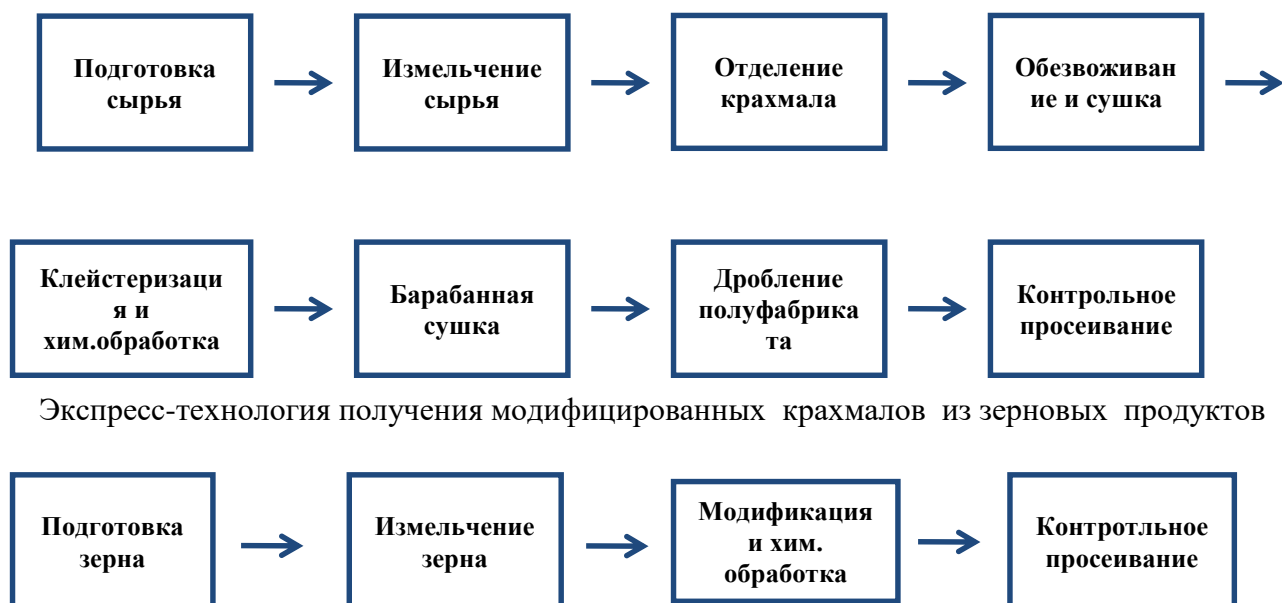


Рис. 43. Схемы традиционной и экспресс-технологии производства модифицированных крахмалов.

Разработанный на кафедре ТТР МПИ опытный образец каскадной измельчительной машины центробежного типа МКЦ-М (рис. 44.) работает в режиме энергонапряженного измельчения твердых материалов при ультраскоростных разрушающих нагрузках в измельчаемом продукте, находящимся в стесненных условиях. Рабочая камера измельчительной машины имеет три зоны измельчения, отличающихся по форме, массе и степени оснащения мелющими телами. В первой (самой верхней) зоне измельчения происходит дробление зерна и перемешивание с добавленным химреагентом, во второй зоне с мелющими телами, имеющими большую степень кривизны, а значит большую контактную нагрузку на измельчаемый материал, происходит измельчение зерновой смеси и химреагента до размеров сопоставимых с размерами кристалла крахмала, т.е. до состояния муки очень тонкого помола. В третьей зоне оснащенной значительно большим количеством (в 5 раз) мелющих тел с большой кривизной рабочей поверхности происходит модификация, высвободившегося из белковой оболочки, крахмала и его обработка необходимыми химреагентами.

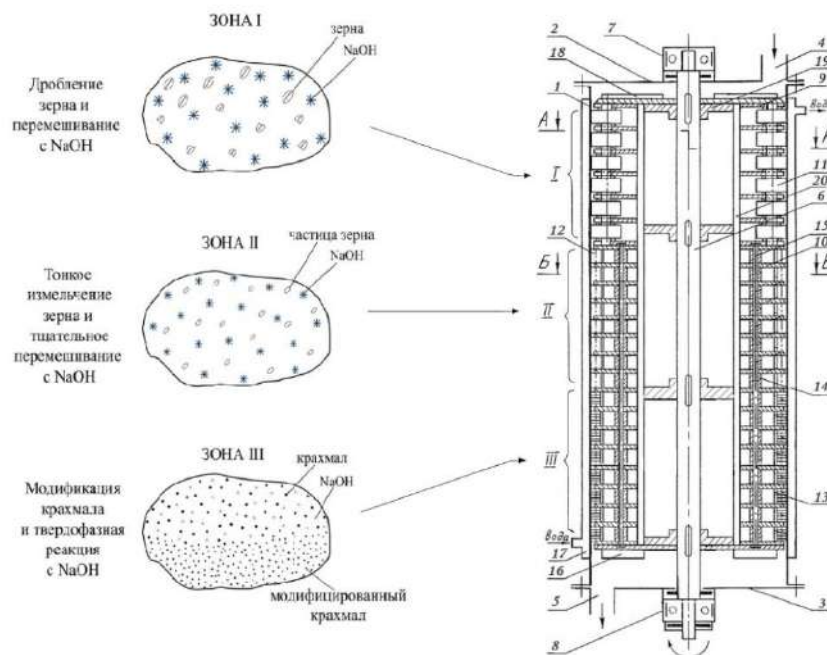


Рис.44. Схема процесса модификации крахмалосодержащего сырья методом механоактивации

Разработанная авторами экспресс-технология модификации нетрадиционного крахмалосодержащего сырья позволит значительно снизить себестоимость производства импортозамещающих, высокоэффективных буровых реагентов (на десятки процентов), за счет исключения операций производства самого нативного крахмала, его последующей клейстеризации, сушки и дополнительного дробления готового продукта.

Потенциальными потребителями крахмальных реагентов являются не только нефтегазодобывающие и геологоразведочные организации, но и горнообогатительные предприятия, производители строительных материалов, целлюлозно-бумажные, текстильные и другие предприятия. Экономический эффект от внедрения разработанной технологии только в нефтегазодобывающей отрасли ориентировочно может составить порядка 45-50 млн. рублей в год. На основе разработанной технологии и техники возможно открытие стационарного, многотоннажного, достаточно компактного и быстро окупаемого производства по выпуску импортозамещающих высокоэффективных буровых крахмальных реагентов типа “РБК-М” из нетрадиционного крахмалосодержащего сырья.

6.14 Универсальный буровой реагент “РБЦ-4” на основе механоактивированного древесного волокна с повышенным содержанием смол

В практике разведочного бурения из всего перечня геологотехнических осложнений наиболее трудоемкими являются поглощения промывочной жидкости, затраты календарного времени на ликвидацию которых составляют от 4 до 10 %. Поглощения приурочены, в основном, к карбонатным породам с естественной кавернозностью и трещиноватостью вторичного (экзогенного) и тектонического происхождения, а также песчаникам и некоторым разновидностям глин, где наблюдаются провалы бурильного

инструмента от 0.5 до 4 м и более, Поглощения техногенного характера связаны с гидроразрывом пласта в виду избыточного гидростатического давления, которое возникает при повышении плотности и реологических показателей бурового раствора.

Основными технологическими мероприятиями по предупреждению и ликвидации поглощений буровых промывочных жидкостей в нефтегазовом и геологоразведочном бурении являются следующие:

- регулирование гидравлического равновесия в системе “пласт-скважина” путем использования облегченных промывочных жидкостей и технологических ограничений при бурении (понижение скорости спускоподъемных операций, уменьшение подачи промывочной жидкости в скважину, увеличение зазора между буровым инструментом и стенками скважины, долив бурового раствора в скважину и др.);

- регулирование реологических свойств буровых растворов, путем перехода на бурение структурированными промывочными жидкостями с обработкой химическими реагентами;

- применение комбинированных методов (химическая обработка азрированных жидкостей и растворов с пониженным содержанием твердой фазы);

- закупоривание каналов поглощения одновременно с их вскрытием путем использования наполнителей различных типов.

Впервые наполнители для ликвидации поглощений применили в 40-е годы в США, в России их использование началось в начале 60-х годов. В зарубежных компаниях девяносто процентов всех поглощений ликвидируется путем добавки наполнителей, в качестве которых используются отходы различных производств. Наполнители подразделяются на волокнистые, зернистые (жесткие или упругие) и чешуйчатые (рис. 45.). Кроме этого, используется твердая фаза получаемая химическими методами (коагуляция, конденсация и др.), а также разбухающие наполнители. Большинство наполнителей закачиваемых в составе тампонажных смесей, позволяет закупорить трещины размером не более 6 мм, а в виде тампонов или при намыве до 20 мм. Волокнистые наполнители применяют при ликвидации всех видов поглощений при их размере $\frac{1}{2}$ диаметра поглощающего канала, но в первую очередь, в крупно пористых и трещиноватых породах с размером каналов 3-5 мм. При вводе в комплексе зернистых и чешуйчатых - соотношение составляет 1:1:1. Зернистые жесткие наполнители применяются при ликвидации всех видов поглощений при этом их размеры должны быть в три раза меньше поглощающих каналов. Зернистые упругие наполнители по своей закупоривающей способности занимают промежуточное положение между волокнистыми и зернистыми жесткими, при этом соотношение к гранулированным жестким составляет от 2:1 до 3:1. Чешуйчатые наполнители применяются при ликвидации поглощений с размером каналов в породах от 2.5 до 30мм, при этом эффект закупорки выше при их сочетании с волокнистыми и зернистыми наполнителями в соотношении 2:1:1 (при профилактике поглощений такое сочетание не рекомендуется) [2].

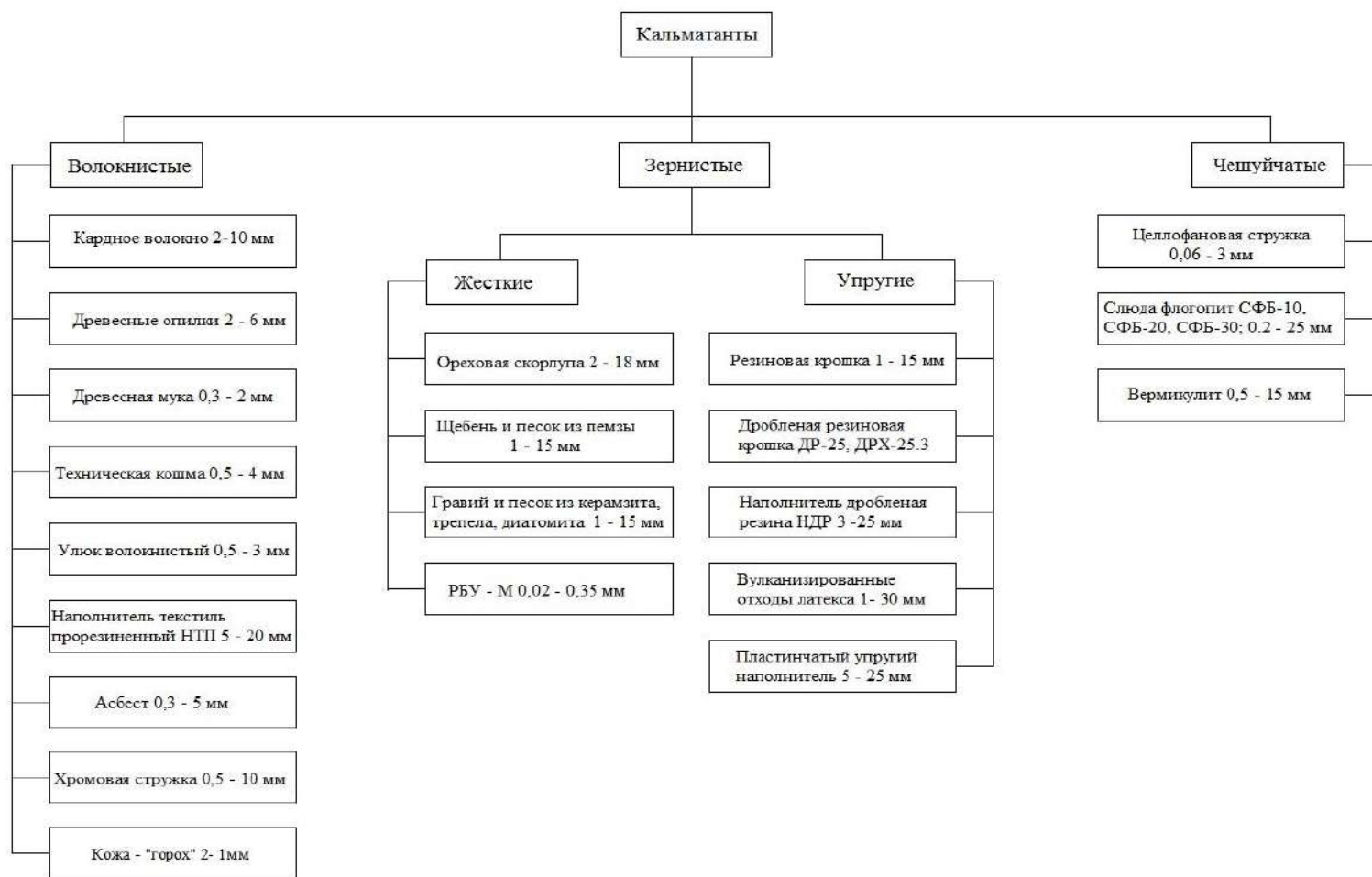


Рис. 45. Классификация материалов используемых в качестве кальматантов при ликвидации поглощений промывочной жидкости

Проведенный авторами анализ производственного опыта использования наполнителей и предварительные лабораторные исследования по использованию наиболее дешевых, доступных и экологически чистых материалов в качестве кальматанта позволяет сделать следующие выводы:

- с точки зрения экологической чистоты буровых промывочных жидкостей наиболее приемлемо использование органических материалов, подвергающихся после их применения разложению на безвредные составляющие;

- по кальматирующим свойствам, доступности и дешевизне исходного сырья наиболее подходящими являются целлюлозосодержащие материалы в измельченном состоянии с разной степенью дисперсности;

- улучшенные реологические и закупоривающие свойства буровых растворов с наполнителями на основе целлюлозосодержащих материалов объясняются сложным вещественным составом исходного сырья и возможностью его модификации путем химической обработки в процессе механоактивации;

- наиболее подходящим для решения поставленной задачи по мнению авторов является древесное волокно, состоящее из необходимого набора исходных компонентов, позволяющих в процессе их механохимической деструкции и химобработки получить multifunctional буровой реагент.

Древесина - продукт биологического (растительного) происхождения, представляющий сложный комплекс, как в анатомическом, так и химическом отношении. Вещество древесины - это вещество оболочек клеток (клеточных стенок) и биологическое происхождение этого вещества обуславливает его сложный химический состав, представленный на рис. 46.



Рис. 46. Схема химического состава древесины.

Древесина примерно на 99% состоит из органических веществ. Минеральные вещества составляют обычно очень небольшую часть - до 1%. Элементный состав органической части древесного вещества у различных древесных пород практически одинаков: 49...50% углерода, 43...44% кислорода, около 6% водорода и 0,1...0,3% азота по отношению к массе абсолютно сухой древесины.

Структурные компоненты древесины подразделяют на углеводную и ароматическую части. Углеводная часть, представляющая комплекс полисахаридов, называется

холоцеллюлозой. Массовая доля холоцеллюлозы составляет в древесине примерно 70...80 %, причем ее содержание в древесине лиственных пород выше по сравнению с хвойными. Выход холоцеллюлозы при выделении ее из древесины различными методами составляет в среднем для хвойных пород 70...73 %, лиственных пород - 72...79 %.

Ароматическая часть древесины - лигнин представляет собой смесь ароматических полимеров родственного строения фенольной природы, построенных из мономерных звеньев, называемых фенилпропановыми структурными единицами. Массовая доля лигнина в древесине составляет 20...30%, причем хвойные породы содержат больше лигнина, чем лиственные.

Целлюлоза в нативном состоянии представляет собой полимолекулярное соединение, в состав которого входят молекулы, идентичные по своему строению, но отличающиеся по длине. Элементарные звенья макромолекулы целлюлозы находятся в форме кресла, гидроксильные группы расположены в горизонтальном направлении, а атомы водорода — в вертикальном (рис. 47). Каждое второе звено цепи повернуто на 180° по отношению к оси молекулы.

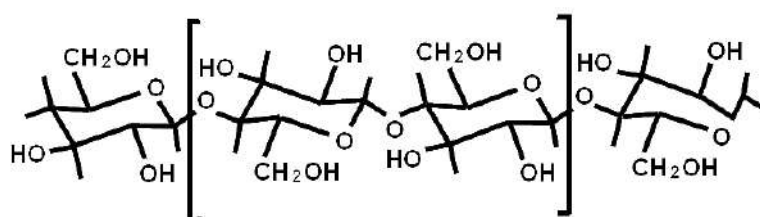


Рис. 47. Молекулярное строение целлюлозы

Целлюлоза состоит из звеньев β -D-глюкозы. Эмпирическая формула целлюлозы ($C_6H_{10}O_5$). В одной молекуле целлюлозы находится 10 000 единиц глюкозы. Молекулы целлюлозы соединены друг с другом в пучки. Самый маленький пучок в стенке клетки называется элементарной или начальной фибриллой, диаметр которой равен приблизительно 3,5 нанометра ($3,5 \cdot 10^{-9}$ м).

Фибриллы состоят приблизительно из 40 расположенных в одном направлении молекул целлюлозы. Элементарные фибриллы объединены в более крупные пучки - микрофибриллы, которые состоят из двух или больше элементарных фибрилл. Микрофибрилла – это самая маленькая частица волокна. Ее можно без особого труда наблюдать под электронным микроскопом. (Рис. 48).

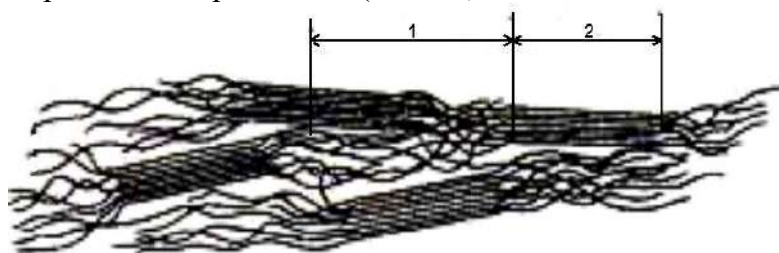


Рис.48. Элементарные фибриллы под микроскопом.

1 – кристаллический участок

2 – амфорный участок

О строении микрофибриллы существует много разных теорий. Одни ученые считают, что она почти цилиндрической формы (диаметр 20—30 нм), другие считают ее плоской нитью, ширина которой 10—30 нм, толщина 5—10 нм и длина несколько микрон ($1 \text{ мкм} = 10^{-6}$ м). Между микрофибриллами находятся каналы шириной 10 нм, которые содержат лигнин и другие компоненты. Предполагают, что внутри микрофибрилл, точнее между элементарными фибриллами, имеются капилляры шириной 1 нм, по которым могут проходить молекулы воды и другие небольшие молекулы [3].

Макромолекулы целлюлозы в первичных фибриллах образуют однородные высокоупорядоченные кристаллические зоны (кристаллиты), которые чередуются с неоднородными менее упорядоченными аморфными зонами. В кристаллитах существует трехмерный дальний порядок в расположении цепей целлюлозы. В аморфных участках дальний порядок отсутствует и сохраняется лишь общая продольная направленность цепей. В аморфных участках относительно легко могут проходить реакции целлюлозы с другими веществами. Длина макромолекул целлюлозы значительно больше длины кристаллических участков, поэтому каждая макромолекула проходит последовательно ряд кристаллических и аморфных участков.

Первичные фибриллы целлюлозы соединяются между собой с помощью водородных связей в микрофибриллы, которые и являются основными звеньями строения волокон целлюлозы. Микрофибриллы состоят из нескольких первичных фибрилл, поперечное сечение их составляет примерно 100 x 200 ангстрем, длина — около 600 ангстрем (рис. 49). Между первичными фибриллами в микрофибрилле находится лигнин и гемицеллюлозы.

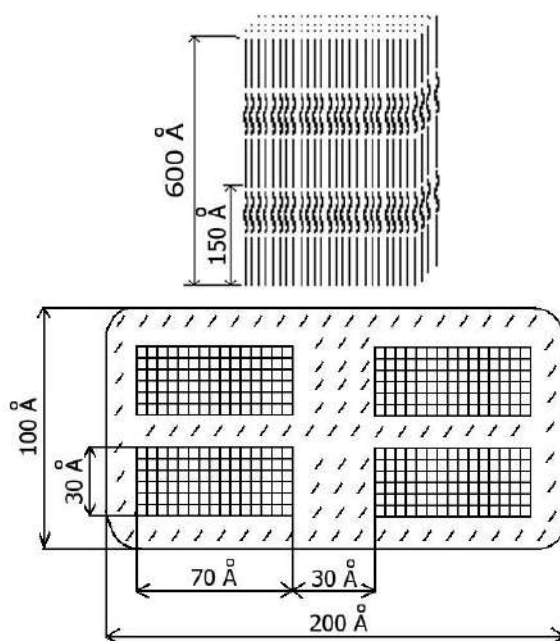


Рис. 49. Модель микрофибриллы целлюлозы (по теории Фрей-Висслинга)

Согласно данным большинства исследователей, лигнин впервые обнаруживается в растениях семейства папоротниковых и его появление связывается с выходом растений на сушу и возникшей в связи с этим необходимостью обеспечения механической прочности стеблей и стволов. Фрёйденберг еще в 1931 г. высказал предположение, что лигнин играет роль наполнителя, пронизывающего стенки растительных клеток и вместе с гемицеллюлозами заполняющего пространство между целлюлозными фибриллами, и в этом отношении его можно сравнить с цементом в армированном бетоне.

Лигнин — это ароматическая часть древесного вещества. С аналитической точки зрения лигнин рассматривают как ту часть древесины, которая получается в виде нерастворимого «негидролизующего» остатка после удаления экстрактивных веществ и полного гидролиза полисахаридов сильной кислотой. В действительности лигнин нельзя считать негидролизующим полимером, поскольку при действии кислот в лигнине могут гидролизироваться углерод-кислородные связи, но сохраняются существующие в нем углерод-углеродные связи и образуются новые.

Массовая доля лигнина в древесине хвойных пород составляет в среднем 27...30 %, а в древесине лиственных пород - 18...24 %. В отличие от целлюлозы и других

полисахаридов выделенный из древесины лигнин не является индивидуальным веществом, а представляет собой смесь ароматических полимеров родственного строения.

Размол древесины увеличивает доступность лигнина и вызывает его механическую деструкцию. При механической деструкции происходят реакции гемолитического расщепления связей лигнина с гемицеллюлозами и связей С-О-С и С-С в сетке лигнина с возникновением промежуточных свободных радикалов, которые вступают в реакции рекомбинации и инициируют реакции полимеризации и окисления кислородом воздуха.

Экстрактивными веществами называют вещества, которые могут извлекаться (экстрагироваться) из растительных тканей нейтральными растворителями: вода, диэтиловый эфир, петролейный эфир, толуол, метанол, этанол, ацетон и др. (рис. 50). Экстрактивные вещества широко распространены в природе. Они содержатся во всех древесных породах и травянистых растениях. Каждое растение, естественно, не может обладать всем набором экстрактивных веществ, но у любого ботанического вида их состав достаточно богат.



Рис. 50. Состав экстрактивных веществ

Содержание экстрактивных веществ в древесине пород умеренной климатической зоны, как правило, невелико; их массовая доля обычно не превышает 3...4 % (за исключением дуба и лиственницы, в древесине которых много водорастворимых веществ). Древесные породы тропической климатической зоны могут содержать значительно больше экстрактивных веществ, в отдельных случаях до 20...40 %.

По методу выделения экстрактивные вещества подразделяют на эфирные масла, древесные смолы и водорастворимые вещества (рис. 50). Эфирные масла представлены веществами с высокой летучестью, способными отгоняться с водяным паром. В их состав входят преимущественно монотерпены и другие летучие терпены и терпеноиды, а также ряд низкомолекулярных соединений различных классов (летучие кислоты, сложные и простые эфиры, лактоны, фенолы и др.). Древесные смолы (смола) - группа веществ, экстрагируемых из древесины органическими растворителями, но не способных растворяться в воде. Это - гидрофобные вещества, находящиеся в смолообразном состоянии из-за взаимного ингибирования кристаллизации. В смолах выделяют свободные кислоты (смоляные и жирные) и нейтральные вещества; последние, в свою очередь, подразделяют на омыляемые (жиры, воски) и неомыляемые (фитостерины, терпеновые спирты, высшие алифатические спирты, нелетучие терпеновые углеводороды и др.). Смолистые вещества древесины подразделяют на кислоты и нейтральные вещества. Массовая доля смоляных кислот в смоле хвойных пород может достигать 30...40 %, тогда как в смоле лиственных пород они отсутствуют (за редкими исключениями).

Смоляные кислоты относят к трудноэтерифицируемым кислотам. Карбоксильная группа в их молекуле находится у третичного атома углерода, т.е. в стерически затрудненном положении. Поэтому в отличие от жирных кислот смоляные кислоты находятся в древесине преимущественно в свободном виде. Соли смоляных кислот иногда называют резинатами.

Химические свойства наиболее распространенных смоляных кислот определяются также наличием в молекуле двух двойных связей - сопряженных или несопряженных. По этому признаку смоляные кислоты часто подразделяют только на две группы - кислоты абиеинового (17-52 % от всех смоляных кислот в живице хвойных пород деревьев) и пимарового типов.

Водорастворимые вещества экстрагируются холодной или горячей водой. Они содержат различные фенольные соединения (таннины, красящие вещества и др.), углеводы, гликозиды, растворимые соли [4].

Предварительные исследования проведенные в лаборатории кафедры ТТР МПИ подтвердили возможность использования в качестве регулятора структурно-механических и реологических свойств промывочных жидкостей, понизителя водоотдачи (за счет гидрофобизации абиеатом натрия глинистой корки стенок скважины), смазочной противоизносной добавки (за счет большой концентрации дитерпенов) и тонкодисперсного кальматанта - модифицированное древесное волокно с повышенным содержанием смол.

Данный эффект возможен благодаря уникальному вещественному составу основных компонентов древесины (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, древесные смолы, дитерпены и другие вещества) модификация которых путем обработки едким натром в процессе сухой холодной механохимической деструкции приводит к следующим химическим изменениям последних:

1. измельченная целлюлоза является тонкодисперсным кальматантом (с повышенной проникающей способностью) и выполняет функцию твердой фазы бурового раствора с очень малым удельным весом;

- гемицеллюлоза, освобожденная в процессе измельчения от лигнина и под воздействием каустической соды частично переходят в щелочную целлюлозу, то есть становятся структурообразователем на уровне карбонатметилцеллюлозы с небольшой атомной массой;

2. при механоактивации лигнина в присутствии едкого натра получается щелочной лигнин, являющийся понизителем вязкости бурового раствора и в определенных условиях термическим стабилизатором;

3. абиеиновая кислота входящая в состав древесных смол (0,8-1,5 % от массы древесины хвойных пород) при обработке каустиком в процессе механоактивации омыляется с образованием абиеата натрия (канифольного мыла), который в свою очередь является сильнейшим гидрофобизатором и микропенообразователем;

4. дитерпены высвобождающиеся из смолистой части древесины являются уникальной смазывающей добавкой снижающей износ буровых, обсадных труб и породоразрушающего инструмента в 10 раз и более.

При разработке рецептуры реагента РБЦ-4 и технологии его получения авторами решались следующие научно-исследовательские задачи:

- выбор породы древесины наиболее подходящей по вещественному составу и экономико-технологическим показателям;

- определение оптимального соотношения исходных компонентов древесная мука и гидроксид натрия;

- подбор оптимальных режимов процесса механоактивации древесного волокна, обеспечивающих возможность получения щелочной целлюлозы и омыления абиеиновой кислоты минуя жидкую фазу химического процесса;

- исследование структурообразующей и стабилизирующей способностей механоактивированных органопоорошков древесины при обработке различных типов буровых промывочных жидкостей;

5. исследование влияния концентрации гидрофобизатора (абитата натрия) в буровом растворе на водопроницаемость глинистой корки и соответственно на его водоотдачу;

6. исследование смазывающей способности разработанного реагента методом истирания стержня по Барону Л.И. в присутствии водного раствора РБЦ-4;

7. исследование кальматирующих свойств буровых промывочных жидкостей на основе механоактивированной древесины;

8. исследование возможности использования реагента РБЦ-4 для получения облегченных и аэрированных растворов.

Механоактивированные органопоорошки древесины для проведения лабораторных исследований готовились путем сверхтонкого измельчения древесной муки из хвойных пород деревьев с повышенным содержанием древесной смолы на лабораторном стенде каскадной мельницы центробежного типа МКЦ-2М, оснащенной десятью рядами мелющих тел шарообразной формы (рис. 51). Результаты дисперсионного анализа механоактивированных порошков древесины показали - средний диаметр получаемых частиц при измельчении на лабораторном стенде каскадной мельницы центробежного типа МКЦ колеблется в пределах 35-50 микрон, а удельная поверхность 990-1550 см²/г, при этом 60 % частиц порошка имеют средний размер меньше 50 микрон и 25-30 % - меньше 20 микрон. Необходимая степень механоактивации смеси древесной муки с едким натром при измельчении на МКЦ определялась по минимальному количеству сухого остатка после растворения органопоорошка в воде. Полученные образцы с максимальной степенью ратворимости исследовались в качестве буровых реагентов для различных типов промывочных жидкостей на стандартных приборах в "Лаборатории промывочных жидкостей и тампонажных смесей" кафедры ТТР МПИ. Особое внимание уделялось изучению кальмотирующих свойств разработанного реагента РБЦ-4, возможности его использования в качестве гидрофобизатора глинистой корки и стенок скважины и смазывающей противоизносной функции реагента.

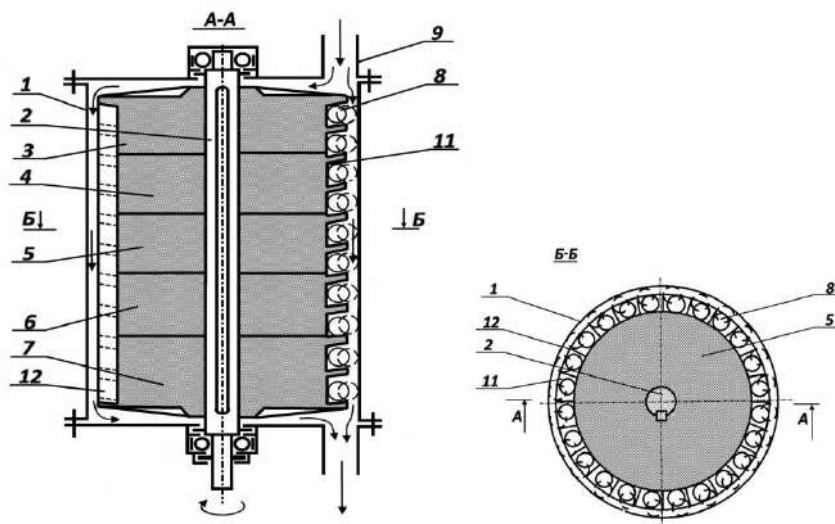


Рис. 51. Каскадная центробежная мельница МКЦ-2М.

1- корпус; 2 - вал; 3,4,5,6,7 - диски; 8 - мелющие тела; 9 - загрузочный; патрубок;
10 - выгрузочный патрубок; 11 - глухие радиальные каналы; 12 - пластина.

Фильтрационные свойства горных пород, определяющие в конечном счете поглощающую способность вскрытого скважиной пласта (интервала), характеризуются коэффициентом проницаемости «К» или просто проницаемостью. Наиболее распространенной практической единицей измерения коэффициента проницаемости

является 1 Д (дарси), когда через поперечное сечение породы площадью в 1 кв. см при перепаде давления в 1 кгс/см на 1 см пути проходит 1 см/с жидкости вязкостью 1 сП. В системе СИ единицей проницаемости является квадратный метр ($1 \text{ м}^2 = 10^{12} \text{ Д}$). В гидрогеологической литературе наиболее удобной единицей измерения проницаемости считается коэффициент фильтрации K_f в метрах в сутки (или реже в см/с).

Процесс фильтрации - это механическое движение свободной воды под действием градиента напора в порах и трещинах горных пород, т.е. их способность пропускать через себя воду. Водопроницаемость зависит от размера сообщающихся между собой пор и трещин в горных породах и характеризуется коэффициентом фильтрации, имеющим размерность скорости (см/с, м/с, м/сут). Такая размерность получается из закона линейности фильтрации – закона Дарси, согласно которому количество фильтрующей воды в единицу времени прямо пропорционально коэффициенту фильтрации K_f , площади фильтрации F и гидравлическому градиенту J [5]:

$$Q = K * F * J \quad (1)$$

Разделив правую и левую части этого уравнения на F , получим

$$Q/F = K * J, \quad \text{где } Q/F = V \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что коэффициент фильтрации есть скорость фильтрации при градиенте, равном единице.

$$V = K \quad \text{при } J = 1 \quad (3)$$

Формулой (2) определяется скоростная размерность коэффициента фильтрации горных пород.

Следует отметить, что расчетная скорость фильтрации отличается от истинной скорости движения воды в породах, так как жидкость движется не через всю площадь, а через площадь поровых и трещинных пространств. Величина коэффициента фильтрации зависит от физических свойств горных пород (гранулометрический состав, плотность сложения и др.). Средние значения коэффициента фильтрации для различных горных пород приведены в таблице 1.

В связи с вышеизложенным авторами предложено в лабораторных исследованиях оценивать кальмотирующий эффект разработанных реагентов по коэффициенту фильтрации песчаных пород с помощью прибора – трубка “СпецГео” по методике учебного пособия «Общая гидрогеология» для студентов специальности 080300.

Группа	K_f , м/сут	Типы проницаемых пород
Весьма проницаемые	>100	Крупный гравий, закарстованные сильнотрещиноватые известняки, галечник с песчаным наполнителем
Хорошо проницаемые	100 -10	Гравийно-галечниковые отложения, крупнозернистые пески, сильнотрещиноватые породы
Проницаемые	10 -1	Пески разной зернистости, трещиноватые породы
Слабопроницаемые	1-10 ⁻¹	Мелко- и тонкозернистые пылеватые пески, слаботрещиноватые породы
Весьма слабопроницаемые	10 ⁻¹ -10 ⁻³	Мелкие и средние суглинки, песчаные породы
Относительно водоупорные	10 ⁻³	Средние глины, плотные суглинки

В качестве поглощающей породы был использован гранитный отсев Шарташского корьера следующего фракционного состава:

- 1,5 – 5 мм – 50 %;
- 5 – 10 мм – 25 %;
- 10 – 20 мм – 25 %.

Данная модель поглощающего горизонта при испытаниях на технической воде показала коэффициент фильтрации 9,8 м/сут., что соответствует группе проницаемых пород (согласно табл. 2).

Лабораторным испытаниям подвергался биополимерный реагент на основе механоактивированного древесного волокна РБЦ-4 четырех модификаций, отличающихся друг от друга степенью механоактивации и обработки исходного сырья гидроксидом натрия. Отдельно исследовались пробы РБЦ-4 с повышенным содержанием соли абиетиновой кислоты полученные при использовании в качестве исходного сырья наиболее смолистой древесины (подсочная сосна, корневая древесина срубленных деревьев) или путем дополнительного добавления канифоли в опил перед процессом механоактивации совместно с каустиком. Наиболее показательные результаты лабораторных исследований представлены в таблице 2 и на графиках (рис. 52 и 53).

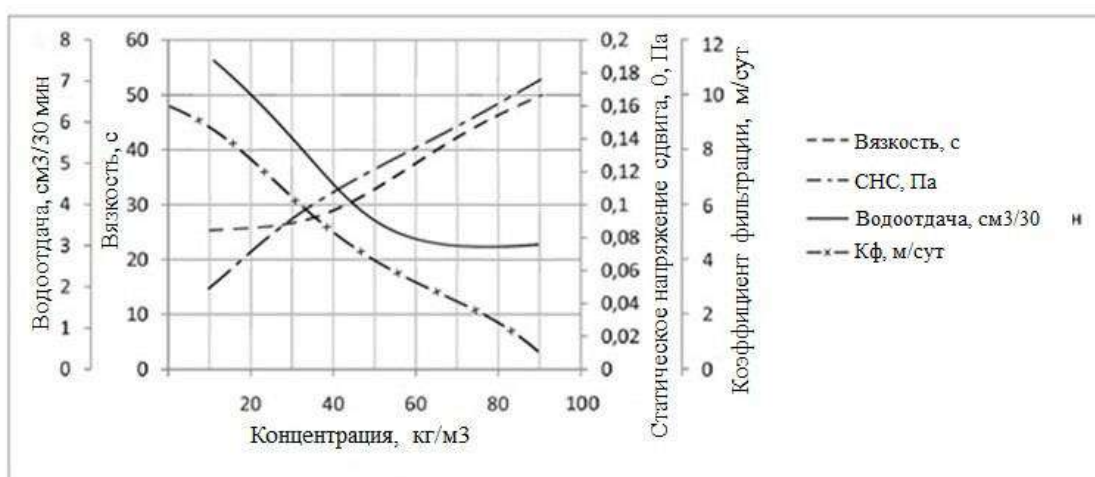


Рис. 52. Зависимость свойств биополимерного раствора на основе древесного волокна от концентрации реагента РБЦ-4

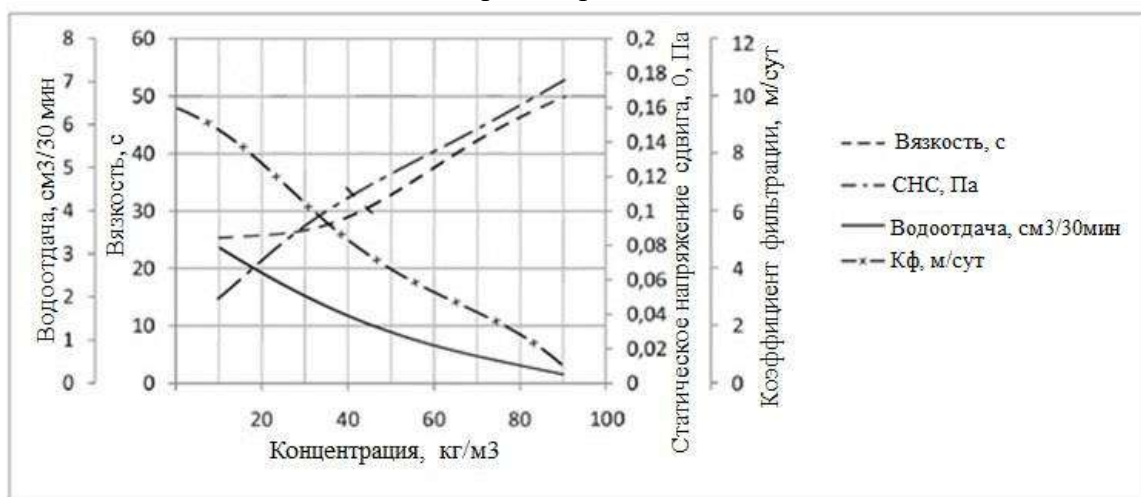


Рис. 53. Зависимость свойств биополимерного раствора на основе древесного волокна от концентрации соли абиетиновой кислоты в реагенте РБУ-М

Основные параметры бурового раствора на основе механоактивированного органопорошка РБЦ-4

№	Состав	Параметры
---	--------	-----------

	пробы	Плотность ρ , г/см ³	Вязкость T , с	Водоотдач а В, см ³ /30 мин	Толщина корки К, мм	СНС θ_1 , Па	K_{ϕ} , м/сут
1	1 л. – вода 7 г. – NaOH 35 г. – РБЦ-4	1,02	25	7,5	1	0,05	7,9
2	1 л. – вода 7 г. – NaOH 50 г. – РБЦ-4	1,025	27	5,5	1	0,092	5,5
3	1 л. – вода 7 г. – NaOH 75 г. – РБЦ-4	1,025	33	3,5	1,2	0,12	3,7
4	1 л. – вода 7 г. – NaOH 100 г. – РБЦ-4	1,028	42	3	1,3	0,15	1,8
5	1 л. – вода 7 г. – NaOH 150 г. – РБЦ-4	1,028	50	3	1,5	0,175	0,3

Результаты лабораторных исследований влияния механоактивированных органопорошков (на основе древесного волокна хвойных пород деревьев с повышенным содержанием смолы) на свойства дисперсных систем различных типов буровых растворов позволяют авторам сделать следующие выводы рекомендательного характера:

- буровой раствор на основе реагента РБЦ-4 обладает высокими кальматирующими, структурообразующими, реологическими и смазывающими свойствами;

- при соответствующей химической обработке в процессе приготовления буровых промывочных жидкостей, обеспечивает приготовление высококачественных облегченных безглинистых промывочных жидкостей с плотностью до 1,02 - 1,03 г/см куб с весьма высокими структурно-механическими и реологическими показателями и возможностью их изменять в широких пределах, в зависимости от геолого-технических условий бурения скважин;

- в рецептурах буровых промывочных жидкостей органопорошок марки РБЦ-4 в отличие от глиен эффективно структурирует как пресные, так и соленащенные буровые промывочные жидкости различной степени минерализации;

- буровая промывочная жидкость на основе органопорошка существенно снижает трение бурового снаряда о стенки скважины при его вращении и спускоподъемных операциях, что достигается за счет достаточно высокой степени омыления смолистой составляющей органопорошка марки РБЦ-4 и высвобождения дитерпенов в процессе его приготовления;

- органопорошок марки РБЦ-4 является экологически безвредным продуктом, т.к. подвергается бактериологическому разложению, не образуя вредных веществ;

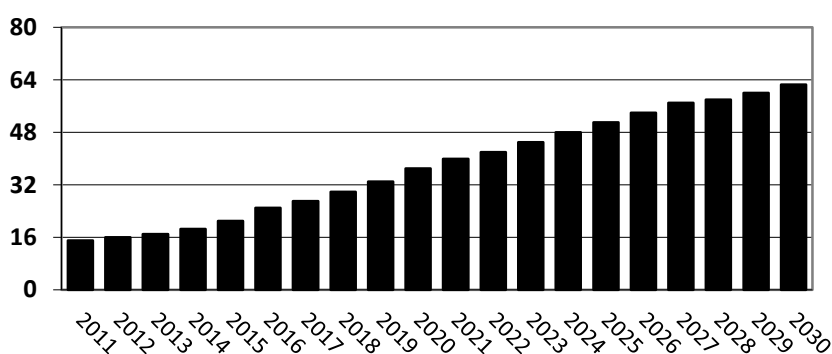
- регулирование структурно-механических и реологических параметров промывочных жидкостей, приготовленных на основе данного структурообразователя и кальматанта органопорошка РБЦ-4 можно производить в весьма широких диапазонах с применением традиционных буровых химических реагентов: полиакриламида, КМЦ, гипана, крахмальных реагентов и других отечественных и зарубежных химреагентов.

Технология и техника приготовления разработанного бурового универсального реагента марки РБЦ-4 защищена 5 патентами РФ на изобретения.

6.15. Буровой реагент для освоения шельфовых нефтегазовых месторождений «Peat-MA»

Повышение мировой потребности в углеводородном сырье и истощение его запасов на суше активизировали поисково – разведочные работы в акваториях морей и океанов, приведшие к существенному росту морской нефтегазодобычи. В 2010 – 2011 годах доли морской нефти и газа от мирового объема добычи составили, соответственно, 44 % и 35 %. Россия обладает около 21 % шельфа Мирового океана (свыше 6,2 млн. км²), при этом наиболее перспективный и доступный с точки зрения бурения шельф превышает 60 % площади ее акваторий. Общеизвестным является высокий углеводородный потенциал шельфа России – суммарные извлекаемые ресурсы оцениваются ведущими отечественными специалистами в 100 млрд. т., из которых газовая составляющая достигает 80 %. В соответствии с Энергетической стратегией РФ на период до 2030 г. освоение нефтегазовых месторождений на шельфе северных и дальневосточных морей является одним из стратегических направлений развития экономики (рис. 54).

■ Прогноз добычи нефти с месторождений шельфа РФ (млн тонн)



▨ Прогноз добычи газа с месторождений шельфа РФ (млрд куб. м)

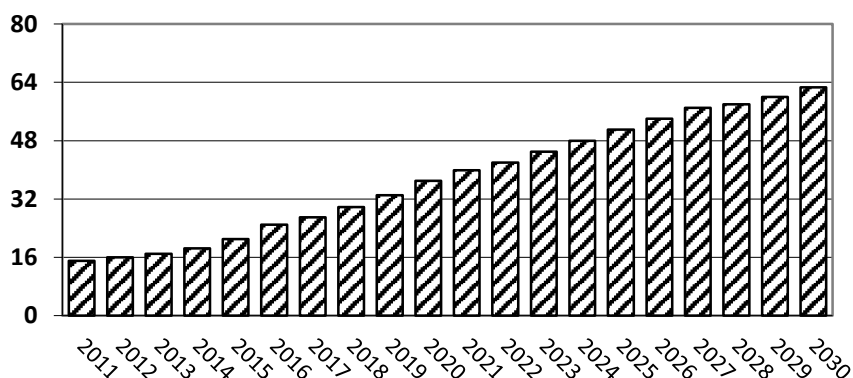


Рис. 54. Увеличение объемов добычи нефти и газа на шельфе РФ.

Кроме того нефтегазоносные площади на материковой части нашей страны (например Западно-Сибирский регион) в основном имеют низконапорные продуктивные горизонты. Для успешного их вскрытия при бурении скважин применяют облегченные промывочные жидкости, приготовленные из дорогостоящих зарубежных (США, Канада) бентонитовых глинопорошков стоимостью 1,2 – 1,5 \$ за килограмм и более, (например: Унифлок, ДК-дрилл, Сайдрил, Поликем-Д) которые содержат аномальное количество химреагентов, в том числе синтетических полимеров.

Такие промывочные жидкости, как известно, оказывают крайне недопустимую кальматацию (закупоривание) продуктивных горизонтов, вследствие чего на десятки

процентов снижается добыча полезных ископаемых. Так же, при этом происходит загрязнение акватории и практически неустранимое экологическое загрязнение земных недр, вызванное чрезмерным количеством используемых синтетических трудно разлагающихся полимеров входящих в рецептуру промывочных жидкостей [1].

Значительную часть названных экологических проблем возможно решить путем использования специальных буровых очистных агентов и тампонажных растворов разработанных на основе экологически безопасных материалов органического происхождения (торфопорошки), прошедших специальную механо-химическую обработку. В связи с этим авторами статьи разработана эксклюзивная технология производства дешевого, экологически чистого бурового реагента «Peat-MA» (Peat - Mechanical Activation) для использования при бурении нефтегазовых скважин на шельфе и вскрытии низконапорных продуктивных горизонтов на материковых месторождениях. Непосредственно разработка рецептов и оценка эффективности регулирования параметров различных типов промывочных жидкостей реагентами типа «Peat-MA» проводилась научным коллективом кафедры ТТР МПИ. В качестве измельчающего устройства и механоактиватора при разработке технологии использовалась каскадная измельчительная машина центробежного типа МКЦ-4М (рис. 55) - так же авторская разработка кафедры.

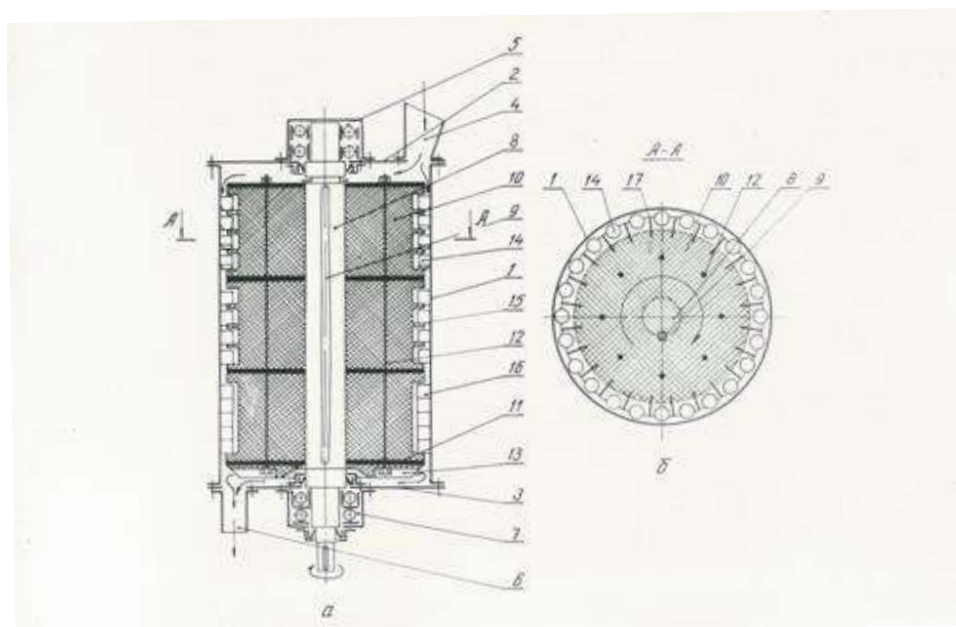


Рис. 55. Сема каскадной измельчительной машины центробежного типа МКЦ-4М. 1-корпус мельницы; 2 – крышка верхняя; 3 – нижняя плита; 4 – загрузочный патрубок; 5 – верхний подшипниковый узел; 6 – разгрузочный патрубок; 7 – нижний подшипниковый узел; 8 – вал ротора; 9 – шпонка; 10 – ротор; 11 – разделительный диск; 12 – стягивающие шпильки; 13 – выгребные лопатки; 14, 15, 16 – мелющие тела; 17 – толкающая пластина.

При выполнении значительного объема лабораторных работ решались следующие технико-технологические задачи:

- получение механоактивированных порошков путем их сверхтонкого измельчения на экспериментальном стенде каскадной центробежной мельницы;

- исследование структурно-механических и реологических параметров водных растворов и суспензий на основе механоактивированных порошков торфа «Peat-MA», применительно к требованиям параметров буровых промывочных жидкостей, используемых при бурении нефтяных скважин;

- модификация буровых промывочных жидкостей при обработке их буровым реагентом «Peat-MA»;
- исследование и оценка устойчивости к минеральной агрессии промывочных жидкостей, приготовленных на основе механоактивированных порошков торфа;
- исследование эффективности модификации технологических свойств буровых промывочных жидкостей, базовым материалом которых является реагент «Peat-MA», с использованием традиционных, применяемых в бурении химреагентов;
- аналитические исследования гидродинамики течения в циркуляционной системе буровой скважины промывочной жидкости на основе реагента «Peat-MA».

Механоактивированные порошки торфа для проведения вышеуказанных исследований готовились путем сверхтонкого измельчения высушенного торфа средней степени разложения на стенде каскадной центробежной мельницы МКЦ-4. При этом одна проба торфа проходила два цикла измельчения в прямоточном режиме, а вторая проба четыре цикла измельчения. В результате был получен торф измельченный дважды и четырежды. Задачей исследований являлось определение предела измельчаемости торфа и необходимая степень его механоактивации для использования в качестве бурового реагента. Суспензия на водной основе была получена путем щелочного гидролиза механоактивированного торфа. Целью начальных исследований был поиск наиболее эффективного соотношения: диспергированный торф - гидроксид натрия - вода. Как следует из табл. 1 и табл. 2 наиболее оптимальными параметрами данной промывочной жидкости являются: плотность $\rho=1,028\div 1,03$ г/см³; условная вязкость $T=20\div 25$ с; водоотдача $B=21\div 25$ см³/30 мин; толщина корки $K\leq 3$ мм; статическое напряжение сдвига $\Theta_1=0\div 0,009$ Па и $\Theta_{10}=0\div 0,0045$ Па. Данные параметры бурового раствора достигаются при соотношении: 100 г тонкодисперсного торфа, 7,5÷10 г гидроксид натрия и 1,5 л воды. При этом наиболее выгодные параметры получаются при щелочном гидролизе торфа двойного помола в соотношении: 100 г торфа, 10 г гидроксид натрия и 1,5 л воды.

Следует отметить, что малые значения статического напряжения сдвига Θ_1 и Θ_{10} (соответственно динамического напряжения сдвига) при наличии оптимальных значений других параметров позволяют существенно снизить энергозатраты на работу забойных двигателей турбобуров и значительно уменьшить кальматацию продуктивных горизонтов, а следовательно увеличить нефтеотдачу данных горизонтов и сократить сроки освоения эксплуатационных скважин.

Исследование физико-химической совместимости бурового реагента «Peat-MA» с другими типами буровых реагентов проводились на рецептурах глинистых растворов наиболее часто используемых в нефтегазовом бурении. Проведенные исследования показали, что применение реагента «Peat-MA» позволяет повысить вязкость (T) в 1,5 - 2 раза при весьма незначительном повышении статического напряжения сдвига (Θ_1 и Θ_{10}).

Однако при этом значительно увеличивается водоотдача (B) с 12 до 30 см³/30 мин и толщина корки (K) с 2 до 4 мм соответственно. Поскольку вязкость глинистого раствора увеличивается на 15÷20 %, а статическое напряжение сдвига уменьшается примерно в таких же пределах при незначительном уменьшении водоотдачи, бурение нефтяных скважин такими специальными глинистыми промывочными жидкостями будет существенно снижать кальматацию продуктивных горизонтов, тем самым повышая их нефтеотдачу.

Исследование устойчивости к минеральной агрессии промывочной жидкости с добавлением гидролизованного реагента «Peat-MA» проводились путем сравнения параметров данной промывочной жидкости и глинистых растворов с достаточно высокой плотностью (ρ), равной 1,11 и 1,16 г/см³ в процессе их обработки хлористым натрием NaCl. Лабораторные исследования показали, что даже при такой большой разнице содержание твердой фазы сравниваемых промывочных жидкостей: $\rho = 1,02\div 1,03$ г/см³ у раствора на

основе «Peat-MA», и $\rho = 1,1 \div 1,6 \text{ г/см}^3$ у глинистых растворов, первая промывочная жидкость более устойчиво сохраняет свои структурно-механические и реологические параметры при добавке NaCl 1÷2 %. Установлено, что при повышении содержания твердой фазы (т. е. плотности) устойчивость к минеральной агрессии промывочной жидкости на основе гидролизованного реагента «Peat-MA» повышается (см. табл.4,5,6,7). Следует так же отметить, что при увеличении степени минерализации дисперсионной среды исследуемой промывочной жидкости в виде водного раствора реагента «Peat-MA» ее вязкость изменяется незначительно, что очень важно в ряде случаев, например, для работы турбобуров в нефтегазовом бурении.

Исследование возможностей регулирования свойств буровых промывочных жидкостей путем применения гидролизованного реагента «Peat-MA», проводились с использованием самых распространенных в бурении реагентов - ПАА (гидролизированный полиакриламид) и КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза) (табл. 8,9).

КМЦ - продукт взаимодействия целлюлозы с гидроксидом натрия и монохлоруксусной кислотой. Как реагент КМЦ используют в виде водного раствора, обычно 10 % концентрации, для чего КМЦ предварительно растворяют. Чем выше степень полимеризации карбоксиметилцеллюлозы, тем более устойчив буровой раствор к солевой агрессии и тем эффективнее снижает водоотдачу. Высоковязкие КМЦ способны снижать водоотдачу очень сильно. В растворе с небольшим содержанием твердой фазы добавка КМЦ может вызывать разжижение. Однако при достаточно высоком содержании твердой фазы КМЦ усиливает структурообразование, объединяя частицы, находящиеся даже за пределами действия молекулярных сил. Отличительной особенностью полученных результатов, при добавлении КМЦ в буровой раствор на основе гидролизованного реагента «Peat-MA», является малая плотность, порядка $1,03 \text{ г/см}^3$ и низкий показатель водоотдачи $7 \div 10 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$ (см. табл.8). Оптимальная концентрация карбоксиметилцеллюлозы в растворе гидролизованного реагента «Peat-MA» порядка 5 %.

Полиакриламид получают путем преобразования ряда синтетических веществ: этилен, окись этилена и др., а водные и щелочные растворы ПАА являются полиэлектролитами. Наличие зарядов в молекулах полимера обуславливает их адсорбцию на бурильных трубах, на стенках скважины и частицах горной породы, оказывая ингибирующее действие. ПАА вводится в промывочные жидкости в виде 1÷2 % - го раствора. В результате лабораторных исследований выявлено, что при добавлении ПАА в буровой раствор на основе гидролизованного реагента «Peat-MA», значительно снижается его водоотдача и статическое напряжение сдвига.

Лабораторными исследованиями свойств гидролизованного реагента «Peat-MA» установлено следующее:

- разработанный буровой реагент позволяет регулировать структурно-механические и реологические параметры в весьма высоких пределах: условная вязкость $T=17 \div 18 \text{ с}$; водоотдача $B=4 \div 20 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$; статическое напряжение $\Theta_1 \approx 0,1 \div 0,5 \text{ Па}$ и $\Theta_{10} \approx 0,15 \div 0,6 \text{ Па}$; плотность данных промывочных жидкостей при этом имеет крайне малые значения в пределах $\rho=1,01 \div 1,03 \text{ г/см}^3$;

- обработка промывочной жидкости гидролизированным реагентом «Peat-MA» позволяет получить облегченную промывочную жидкость плотностью до $\rho=0,01 \text{ г/см}^3$ с уникальными параметрами для такой малой величины плотности известных буровых промывочных растворов: условная вязкость $T=18 \div 20 \text{ с}$; водоотдача $B=10 \div 12 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$; статическое напряжение $\Theta_1 \approx 0,1 \div 0,25 \text{ Па}$ и $\Theta_{10} \approx 0,04 \div 0,06 \text{ Па}$;

- промывочная жидкость на основе «Peat-MA», после дополнительной обработки химвеществами имеет весьма невысокие значения статического напряжения сдвига и условной вязкости, что существенно снижает энергозатраты на работу турбобуров и насосных станций.

Теоретические исследования гидродинамики течения в трубопроводах промысловых жидкостей на основе реагента «Peat-MA», применительно к промывке буровых скважин, дают основания однозначно утверждать о многократном снижении кавитационной физико-химической эрозии бурового оборудования. Это в первую очередь относится к значительному снижению вышеуказанного износа бурильных труб и их соединений, турбобуров и других погружных механизмов.

В целом вышеуказанные отличительные особенности буровых жидкостей на основе механоактивных порошков торфа «Peat-MA» позволяют:

- значительно повысить дебит продуктивных нефтеносных пластов при бурении и освоении скважин;
- увеличить механическую скорость бурения нефтегазовых скважин;
- снизить в ряде случаев энергозатраты на процесс бурения;
- снизить износ бурового оборудования и инструмента;
- исключить экологическое загрязнение среды, особенно при бурении на шельфе.

На основе разработанной технологии и техники модификации органических полимеров, методом механоактивации возможно открытие стационарного, много тоннажного, достаточно компактного и быстро окупаемого производства универсального экологически чистого бурового реагента «Peat-MA» или серийный выпуск малогабаритных измельчительных комплексов, для производства выше названного реагента непосредственно в районе приближенном к нефтепромыслу, имеющем в достатке исходное сырье – торф. Дополнительно данная технология и техника сверхтонкого измельчения и механоактивации позволит производить различные импортозамещающие, экологически безопасные буровые реагенты (структурообразователи, понизители водоотдачи, смазывающие добавки, кальматанты и др.) в промышленных объемах. Использование последних при приготовлении высококачественных буровых растворов и тампонажных смесей позволит повысить механическую скорость бурения на 25-40 %, сократить временные и материальные затраты на сооружения скважин до 20%, снизить абразивный износ бурового оборудования в 10 раз, повысить на сотни процентов добычу жидких и газообразных ископаемых, а главное - полностью исключить экологическое загрязнение окружающей среды техногенными флюидами используемыми при бурении скважин, как на шельфе, так и на материке.

7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ ПРОМЫСЛОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ

7.1. Меры безопасности при работе с промысловыми жидкостями

Все работы по приготовлению промысловых жидкостей и их химической обработке должны проводиться в полном соответствии с правилами безопасности при геологоразведочных работах. Особое внимание следует обратить на оборудование

механизмов для приготовления промывочных жидкостей надежными ограждениями, на соблюдение правил пуска механизмов после осмотра и текущего ремонта.

Во время работы мешалок запрещается проталкивать торф и другие материалы в люки ломами, лопатами и другими предметами, снимать с люка крышку и брать пробу раствора через люк. Вращение лопастей и ротора и лопастей должно быть обязательно проведено перед пуском, крышки люков и отводных патрубков не должны пропускать раствор. Насосы должны иметь предохранительные клапаны.

Работать с реагентами, особенно щелочами и кислотами, необходимо в специальной одежде, включающей резиновые перчатки, очки или специальную маску с очками, респиратор, резиновые фартук и сапоги, с соблюдением правил безопасности при работе с щелочами и кислотами. Следует понимать, что попадание кислот и щелочей на кожу вызывает опасные ожоги. Порошкообразные, и жидкие в виде брызг и тумана кислоты и щелочи раздражают дыхательные пути иногда до язв. При длительной работе с растворами щелочей и кислот без соблюдения правил техники безопасности наблюдаются воспалительные процессы в виде покраснений и язв, кожа становится рыхлой. Попадание щелочей и кислот в глаза может вызвать потерю зрения.

Кожу или одежду, на которую попала щелочь, следует незамедлительно промыть разбавленной кислотой (рекомендуется 10 %-ный раствор уксусной кислоты). Запас такой кислоты должен быть обязательно на месте работ. Для промывки глаз в аптечке должен быть специальный стаканчик и марлевые салфетки. Кожу и одежду очищать от кислоты следует 10 %-ным раствором двууглекислой (чайной) соды.

Все работающие на приготовлении и химической обработке промывочных жидкостей должны пройти вводный инструктаж по технике безопасности, инструктаж на рабочем месте, а также регулярно, в установленные сроки, проходить повторные инструктажи.

А также должны выполняться следующие требования:

Площадка для приготовления раствора по размерам должна обеспечивать удобное обслуживание, иметь прочный настил (пол) из досок толщиной не менее 20 мм и дренажные канавки для отвода жидкости.

Вокруг люка глиномешалки, должен устанавливаться помост шириной не менее расстояния между перилами и трапами к нему.

Люк глиномешалки должен закрываться решеткой с заглушкой. Ячейки решетки могут иметь размер 10x10 см.

Земляные хранилища бурового раствора должны иметь ограждение не менее 1 м или перекрываться настилом.

На стационарной, передвижной и самоходной буровой должны быть освещены следующие объекты:

- а) рабочее место у станка и устье скважины;
- б) полати, площадка для кронблока или подвешенный блок;
- в) двигатель и насос;
- г) лестницы;
- д) слесарный верстак;
- е) приемный мост;
- ж) входы в буровую и отстойники промывочной жидкости;

Самоходные и передвижные буровые установки, питающиеся энергией от двигателя автомобиля, трактора, могут освещаться прожекторами или фарами, направленными к устью скважины, насосу, полатам бурового оборудования. Освещение не должно ослеплять рабочих.

В качестве аварийного освещения должны применяться переносные электрические лампы напряжением до 36 В или переносные керосиновые фонари закрытого типа. Применение факелов и других источников открытого огня для аварийного освещения запрещается.

Современная хозяйственная деятельность человека связана с все увеличивающимся воздействием на окружающую среду. Особую опасность представляют собой отходы производства. Не случайно поэтому, охрана окружающей среды стала одной из важнейших экономических и социальных задач, находящихся под пристальным вниманием.

При бурении промывочными жидкостями на основе механоактивированных порошков торфа должны соблюдаться общие для всех видов бурения, мероприятия по охране окружающей среды.

Буровой агрегат должен проверяться в начале смены машинистом буровой установки и периодически, но не реже одного раза в декаду, буровым мастером.

Результаты проверки следует заносить в буровой журнал, а обнаруженные неисправности устранять до начала работ.

Во время работы буровых станков запрещается:

а) переключать скорости лебедки и вращателя, а также переключать вращение с лебедки на вращатель и обратно до их полной остановки;

б) заклинивать рукоятки управления машин и механизмов;

в) пользоваться патронами шпинделя с выступающими головками зажимных болтов.

Во время спускоподъемных операций запрещается:

а) работать на лебедке с неисправными тормозами;

б) стоять в непосредственной близости от спускаемых (поднимаемых) труб и элеватора;

в) спускать трубы с не полностью завинченными резьбовыми соединениями;

г) производить быстрый спуск на всех уступах и переходах в скважине;

д) держать на весу талевую систему под нагрузкой или без нее при помощи груза, наложенного на рукоятку тормоза или путем ее заклинивания;

е) проверять или чистить резьбовые соединения голыми руками.

Запрещается охлаждать трущиеся поверхности тормозных шкивов водой, глинистым раствором.

Все операции по свинчиванию и развинчиванию сальника, бурильных труб и другие работы на высоте более 1,5 м, требуется производить со специальных полатей и площадок или переносных лестниц, огражденных перилами.

При кратковременных остановках бурения необходимо приподнять бурильные трубы на высоту, исключающую возможность их прихвата.

Подтягивание бурильных труб диаметром 63,5 м и выше от устья скважины к подсвечнику и обратно, а также к полатам верхового рабочего на расстояние не более 0,7 м должно осуществляться с помощью специальных приспособлений (крючка, захвата и др.).

Находящиеся на полатах крючки для подтягивания, установки свечей за палец должны быть привязаны.

Соединять и отвинчивать вертлюг-сальник от рабочей трубы следует только штанговыми ключами.

После окончания разведочных буровых работ на скважине необходимо выполнить следующее:

а) засыпать все ямы и шурфы, оставшиеся после демонтажа буровой;

б) герметизировать устье скважины;

в) выровнять площадку.

Запрещается:

а) во время подъема бурильных труб очищать их непосредственно руками от глинистого раствора; очистка должна производиться механическим способом;

б) оставлять свечи, не заведенными за палец полатей;

в) составлять свечи бурового инструмента такой длины, что при выполнении спускоподъемных операций верховой рабочий вынужден становиться на перила полатей или работать с лестниц;

г) перемещать в шпинделе бурильные трубы, а также свинчивать и развинчивать их во время вращения шпинделя;

д) поднимать бурильные, колонковые и обсадные трубы из горизонтального положения в вертикальное со скоростью лебедки на прямом канате.

Для ограничения предельной высоты подъема элеватора (фарштуля, талевого блока) и предупреждения затягивания его в кронблок или подвесной блок в вышке или мачте требуется установить противозатаскиватель или на подъемном канате в надлежащем месте должна быть нанесена ясно видимая метка.

Подкладная вилка должна иметь скобу для держания и загнутый кверху конец рукоятки.

При работе лебедкой с помощью рукоятки ручного подъема следует:

а) правильно сочетать действия рукояток ручного подъема и тормоза;

б) по прекращении работы немедленно снять со станка рукоятку подъема.

Перекрепление патронов шпинделя необходимо производить при выключенном вращателе и полной остановке шпинделя.

Разрешается свинчивание и развинчивание рабочего наконечника и извлечение керна из подвешенной колонковой трубы при соблюдении следующих условий:

а) труба удерживается на весу тормозом, управляемым буровым мастером, причем для подвески трубы запрещается применять полуавтоматические элеваторы и фарштули;

б) если расстояние от нижнего конца трубы до пола не более 0,2 м.

При извлечении керна из колонковой трубы запрещается:

а) поддерживать руками снизу колонковую трубу, находящуюся в подвешенном состоянии;

б) проверять рукой положение керна в подвешенной колонковой трубе.

При использовании полуавтоматических элеваторов необходимо:

а) проверять перед началом работы исправность их запоров, упорного подшипника подвесной головки, вращение подвесной головки;

б) содержать элеваторы и наголовники в чистоте;

в) производить операции, связанные с расхаживанием, перемещением и заменой бурового снаряда, только на фарштуле;

г) навинчивать свечу при ослабленном канате;

д) поднимать элеватор по свече, без рывков, со скоростью, не превышающей второй скорости лебедки на прямом канате;

е) довинчивать наголовники ключом или вилкой;

ж) обеспечить буровую бригаду шахтерскими касками. Запрещается применять полуавтоматические элеваторы при работе со свечами "на вынос".

Механизмы для свинчивания и развинчивания бурильных труб должны быть установлены на прочном основании, закреплены и отцентрированы по оси скважины и кронблока.

При свинчивании и развинчивании бурильных труб с помощью механизмов запрещается:

а) держать руками вращающуюся свечу;

б) вставлять или снимать вилки в прорези замка свечи при включенном двигателе механизма;

в) пользоваться ведущими вилками с удлиненными рукоятками без защелок и с разработанными зевами, превышающими размеры прорезей в замках и ниппелях более чем на 2,5 мм;

г) откреплять сильно затянутые резьбовые соединения одновременно с помощью трубных ключей;

д) стоять в направлении усилия водила в начальный момент открытия резьбового соединения.

7.2. Производственная санитария

Используемые в бурении промывочные жидкости в той или иной степени неизбежно загрязняют окружающую среду. Промывочная жидкость и ее компоненты при попадании в грунтовые и подземные воды, поверхностные водоемы, почву и атмосферу отрицательно влияют на окружающую среду. Бурение с промывкой скважин, как правило, связано с применением больших объемов материалов различной степени токсичности и с различным содержанием углеводородных соединений, представляющих опасность для окружающей среды, как флоры, так и фауны. Из практики бурения известно, что почва, подверженная воздействию промывочной жидкости, лишена растительности на долгие годы. Проблемы защиты окружающей среды обостряются, когда бурение ведут вблизи водоемов. В этих условиях возникает опасность отравления большого количества фауны, вследствие попадания в водоемы с поверхности или через проницаемые горизонты, вскрытые скважиной, токсичных компонентов промывочной жидкости. При этом наиболее опасными, с точки зрения токсичности, являются органические составляющие промывочной жидкости с низкой относительной молекулярной массой, соединения хлора, а также поверхностно-активные вещества, нефть и нефтепродукты. В комплекс природоохранных предприятий при использовании промывочных жидкостей входят предупредительные мероприятия, связанные с рекультивацией земель после окончания бурения скважины. Предупредительные мероприятия сводятся к организации работ, которые бы исключали потери вредных компонентов, уменьшали бы потребность в промывочных жидкостях и их компонентах, загрязняющих окружающую среду. К ним относятся следующие:

а) соответствующая организация транспортировки реагентов и готовых промывочных жидкостей. Такие не сложные меры, как затаривание рассыпных реагентов, максимальное сохранение заводской упаковки, герметизация емкостей, применяемых при перевозке реагентов и промывочных жидкостей, весьма эффективны и не требуют значительных затрат;

б) надежное хранение промывочных жидкостей и всех их компонентов. Предупреждение утечек промывочных жидкостей из желобной системы, предупреждение попадания и перетока дождевых вод через желобную систему;

в) непригодные промывочные жидкости целесообразно складировать в бункерах-накопителях с последующей утилизацией или обезвоживанием;

г) сбор буровых сточных вод с пола буровой. Для этого площадка под буровую установку должна быть подготовлена соответствующим образом;

д) выбор и применение нетоксичных или малотоксичных промывочных жидкостей и материалов для регулирования их свойств;

ж) предупреждение поглощения промывочной жидкости, а при возникновении - быстрая и надежная его ликвидация. Это важно не только с точки зрения предупреждения загрязнения водоносных зон, которые могут использоваться для питьевого и хозяйственного водоснабжения, но и сокращения потерь при транспортировке.

Обязательным условием успешной рекультивации земли после завершения бурения скважины является ликвидация желобной системы с предварительным сбором шлама, удалением из отстойников и приемных емкостей промывочных жидкостей или ее обезвоживанием. В противном случае при засыпке приемных емкостей промывочная жидкость будет вытеснена на поверхность и загрязнит плодородный слой земли.

Безвредный шлам засыпают в отстойниках и приемных емкостей Шлам, содержащий вредные вещества, необходимо складировать с последующим обезвреживанием и засыпкой. Шлам нефтеэмульсионных растворов следует подвергать высокотемпературной термической обработке.

Все работы, связанные с уничтожением вредных промывочных жидкостей, должны согласоваться с санитарной службой в районе работ.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию новых экологически чистых промывочных жидкостей. Торф, крахмал, какао-велла как сырье для приготовления промывочных жидкостей - экологически чистые и безопасные материалы.

7.3. Меры пожарной безопасности

При установке буровой, в радиусе 50 м, рабочая площадка должна быть очищена от валежника, листьев и травы.

Трубы от двигателей и печей должны быть выведены не менее чем на 1,5 м выше откоса буровой и снабжены искрогасителями. При прохождении выхлопной трубы через деревянные конструкции или около них зазор между трубой и конструкцией должен составлять не менее 15 см, а трубу необходимо обернуть асбестом.

Пол под печкой и возле нее на расстоянии 0,5 м, а со стороны топки - 0,7 м должен быть покрыт листовой сталью. У печки стенка буровой должна быть изолирована песком между листом и стенкой буровой слоем не менее 10 см. Расстояние от стенки до печки должно быть не менее 0,7 м.

Для выключения электроэнергии, питающей буровую, требуется предусмотреть отключающее устройство, расположенное снаружи на расстоянии не менее 5 м от буровой.

Запрещается:

а) в буровой разводить открытый огонь и применять факелы и другие источники открытого пламени для освещения;

б) утеплять буровую обшивкой легковоспламеняющимися материалами;

в) располагать электропроводку в буровой в местах возможного ее повреждения буровым снарядом или инструментом при ремонте;

г) хранить ГСМ в металлических бачках ближе 15 м от буровой, при обшитой вышке высотой более 15 м не ближе 50 м от вышки.

При установке в буровой двигателей внутреннего сгорания под них должен устанавливаться металлический противень для сбора стекающего горючего и масла, которые необходимо систематически убирать.

Пол помещения, в котором устанавливаются двигатели внутреннего сгорания, должен быть защищен от возгорания обивкой листовой сталью по асбесту на расстоянии 0,5 м вокруг двигателя.

Глушитель следует систематически очищать от нагара.

Бак двигателя должен иметь объем, который рассчитан не более чем на 8 ч работы, но не более 50 л.

Запрещается:

а) работающий двигатель заправлять ГСМ, а также пользоваться открытым огнем при заправке баков с горючим и для определения уровня горючего в баке;

б) разогревать масло- и топливопроводную систему двигателя открытым огнем (факелами, паяльной лампой) и допускать работу двигателя с неисправной подводкой горючего (подтекание).

Все буровые установки должны быть обеспечены противопожарным инвентарем в следующих количествах:

- огнетушители на буровые вышки с приводом от электродвигателя — один пенный, один углекислотный, на буровые с приводом от двигателя внутреннего сгорания - 2 пенных огнетушителя;

- ящики объемом 0,5 м³ с песком и лопатой - 2 комплекта (один в буровой и один у входа в буровую);

- бочки с водой емкостью 250 литров - 1 шт.

- ведра пожарные - 2 шт.
- комплект шанцевого инструмента (топор, багор, лом) -2 комплекта

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подгорнов Ю.М. Эксплуатационное и разведочное бурение на нефть и газ – Учеб. пособие для рабочих на производстве. М.: Недра, 1988
2. Овчинников В.П., Грачева С.И., Фролов А.А. – Справочник бурового мастера. – Научно-практическое пособие в 2-х томах. М.: «Инфра-Инженерия», 2006.
3. Рябченко В. И. Управление свойствами буровых растворов. М.: Недра, 1990.
4. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: «Летопись», 2005-664с.
5. Ахмадеев Р.Г., Данюшевский В.С. Химия промывочных и тампонажных жидкостей: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1981. - 152 с.

6. Круглицкий Н.Н., Агабалянц Э.Г. Методы физико-химического анализа промывочных жидкостей. - Киев: Техника, 1972
7. Малахова А.Я. Физическая и коллоидная химия. - Минск: Высшая школа, 1981. - 304 с.
8. Киреев В.А. Курс физической химии. - М.: Химия, 1975. - 776 с.
9. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. - М.: Наука, 1979. - 381 с.
10. Дедусенко Г.Я., Иванников В.И., Липкес М.И. Буровые растворы с малым содержанием твердой фазы. - М.: Недра, 1985. - 160 с.
11. Паус К.Ф. Буровые промывочные жидкости. - М.: Недра, 1967. - 310 с.
12. Промывочные жидкости и тампонажные растворы (физикохимия и основы применения) // Булатов А.И., Круглицкий Н.Н., Мариампольский Н.А., Рябченко В.И. - Киев.: Техника, 1974.
13. Грей Дж. Р., Дарли Г.С. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей): Пер. с англ. - М.: Недра, 1985. - 509 с.



МИНОБРНАУКИ РФ

**ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»**

Л. И. Кралина, Ф. П. Сердюков, Г. А. Усов

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
В БУРЕНИИ**

**Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по профилирующим дисциплинам
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
21.05.02 Прикладная геология
очного обучения**

**Екатеринбург
2020**

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено в помощь преподавателям и студентам при проведении занятий по бурению скважин, а также для подготовки курсовых и квалификационных работ по профилирующим дисциплинам. Сборник выполнен для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки и 21.05.02 Прикладная геология. При выполнении работ используются справочные материалы, которые приведены в таблицах каждого расчета. Большинство работ рассчитано на выполнение и оформление непосредственно на занятиях. Если работа не закончена, то с разрешения преподавателя она может быть оформлена и сдана к следующему занятию.

В конце приводится список литературы, использованной при написании данного учебно-методического пособия.

Расчет №1

Расчет предельного значения кернопотерь

1. Расчет предельного значения кернопотерь

$$B_k^{\min} = F(\text{НП}, \text{И}, [m_k]).$$

При НП, И $[m_k]$ табличные значения (см. таблицу) расчет по формуле для реального (различного) B_k и по данным лабораторных анализов $P, P_k, P_{\text{сред}}$

$$B_k^{\min} = \frac{(\text{НП}-1)*\text{И}}{(\text{НП}-1)*\text{И}+m_k^{\text{доп}}} * 100 \%$$

где B_k^{\min} - выход керна минимальный, %;
 НП- неоднородность оруденения, %;
 И- избирательность кернопотерь, %;
 $m_k^{\text{доп}}$ - погрешность опробования, %.

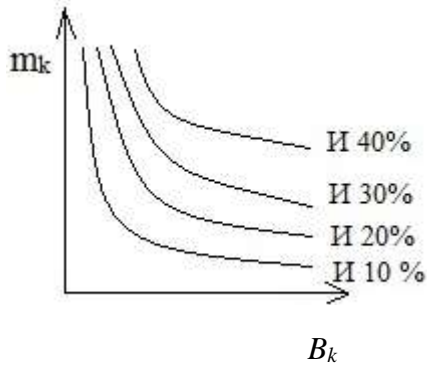
Группировка месторождений по значениям НП и И

Группы и типы руд	Примеры руд и месторождений	Характерные значения	
		НП, %	И
I. Сплошные массивные			
I.1. Мономинеральные	Сплошные мартитовые, магнетитовые, гидромагнетитовые и другие богатые железные руды криворожского типа, сплошные мономинеральные руды каменной соли, бокситы Боксонского месторождения, тальк Алгуйского месторождения и т. п.	1,2±10	40±15
I.2. Полиминеральные	Сплошные колчеданные медные и медно-цинковые месторождения уральского типа, сплошные полиметаллические руды Горевского, Риддер-Сокольного и других месторождений. Апатиты Ошурковского месторождения и т. п.	4±10	15±10
		2,5±10	20±10
II. Вкрапленные			
II. 1. В массивных изверженных и осадочных породах	Вкрапленные руды полиметаллических месторождений Садовое, Миргалимсай. медные руды Алмалык, редкометалльных месторождений Белозиминское, Африкандское и т. п.	6,5±10	7± 5
II. 2. В жилах и дайках	Руды жильных золоторудных месторождений Средней Азии, Забайкалья, Якутии, оловянных и вольфрамовых месторождений Приморья, Якутии и др.	16±5	5±4
III. Прожилково- и слоисто-вкрапленные			
III. 1. Руды штокверковых месторождений	Руды вольфрамовых, молибденовых, медно-молибденовых месторождений Забайкалья, Казахстана и Средней Азии	6,5±5	10±8
III. 2. В линейно-вытянутых зонах трещиноватости	Руды полиметаллических месторождений Алтая, Средней Азии, Прибайкалья, оловянных месторождений Комсомольского района, ртутных месторождений Терлиг-Хая и частично Никитовки и т. п.	8,3±6	10±8
IV. Прожилковые, слоистые и переливающиеся			
IV. Прожилковые	1. Медные руды месторождения Дальнего: никель-кобальтовые руды Тувинской АССР, асбестовое месторождение Молодежное; оловянные - Тарбальджей, Иигода, Хрустальное; золотые - Советское, Коммунар и др.	3,3±15	25±15
IV. 2. Переслаивающиеся и полосчатые	Железистые кварциты Кольского полуострова, Кривоного, сферосидериты Дагестана	1,7±10	30±15
V. Прожилково-гнездовые			
V. Прожилково-гнездовые	Руды ртутных месторождений Средней Азии (Хайдаркан, Акташ, Чувай), отдельных участков Никитовки и др. Мусковит Луговского, Чуйского и Согдиондонского месторождений	20±10 6,5±5	4±3 8±5

2. Изучение влияния выхода зерна на погрешность опробования для различных сортов руд (для бакалаврской работы)

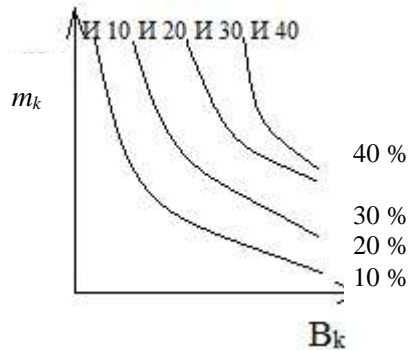
Слабонеоднородные руды **НП=2**

$m_k \backslash I$	10 %	20 %	30 %	40 %
5 %	B_k^{1-1}	B_k^{1-2}	...	...
10 %	...	B_k		B_k^{2-4}
15 %	B_k^{3-1}			B_k^{4-4}
20 %	...			B_k^{5-4}
25 %	B_k^{5-1}	...	...	B_k^{5-4}

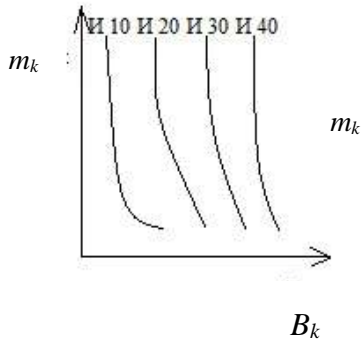


Среднеоднородные руды **НП=6**

$m_k \backslash I$	10 %	20 %	30 %	40 %
5 %	B_k^{1-1}	B_k^{1-2}	...	...
10 %	...	B_k		B_k^{2-4}
15 %	B_k^{3-1}			B_k^{4-4}
20 %	...			B_k^{5-4}
25 %	B_k^{5-1}	...	...	B_k^{5-4}



Сильнеоднородные руды **НП=15**



$m_k \backslash I$	10 %	20 %	30 %	40 %
5 %	B_k^{1-1}	B_k^{1-2}	...	...
10 %	...	B_k		B_k^{2-4}
15 %	B_k^{3-1}			B_k^{4-4}
20 %	...			B_k^{5-4}
25 %	B_k^{5-1}	...	...	B_k^{5-4}

3. Основные аналитические задачи:

- 3.1. Для каких руд избирательность истирания более всего влияет на погрешность опробования?
- 3.2. При какой избирательности и в каких сортах руд наибольший эффект дают мероприятия по повышению выхода зерна?
- 3.3. Постройте таблицу нормативных значений минимального выхода зерна, при допустимой погрешности $m_k=5\%$ (10 %, 15 %, 20 %, 25 %) для всех сортов руд (для всех табличных комбинаций НП и I).

Расчет №2

Определение рациональной частоты вращения бурового снаряда при твердосплавном бурении, рад/с

$$n = \frac{60 \cdot 0,105 \omega_0}{\pi \cdot D_0} \approx \frac{2 \cdot \omega_0}{D_0} ;$$

$$n = \frac{60 \cdot \omega_0}{\pi \cdot D_0} \approx \frac{20 \cdot \omega_0}{D_0} .$$

Таблица исходных данных

Обозначение	Наименование	Ед.изм	Пределы изменения		Примечание
			от	до	
ω_0	Окружная скорость движения резцов	м/с	1,0 крепкие породы (УІ-УІІ кат.)	3,0 мягкие породы (ІІ-ІУ кат.)	Ограничивается сверхнормативным износом
D_0	Средний диаметр коронки	м	$46 \cdot 10^{-3}$	$223 \cdot 10^{-3}$	Стандарт
n_0	Частота вращения	Рад/с об/ мин	9,3 93	65 500	Ограничение техническими условиями бурения

Расчет №3

Минимальная (критическая) частота вращения шнекового снаряда, рад/с

$$n_{\min} = \frac{30}{\pi} * \frac{\sqrt{g * (\tan a + f)}}{f' * R * (1 - f * \tan a)}.$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Единица измерения	Пределы измерения	
			от	до
R	Радиус вала шнека	м	$50 * 10^{-3}$	$89 * 10^{-3}$
a	Угол подъема винтовой ленты	град	10	30
f	Коэффициент трения породы о шнек	-	0,25	1,4
f'	Коэффициент трения породы о породу	-	0,2	1,5
g	Ускорение силы тяжести	м/с ²	9,8	

Основные аналитические задачи

- 1.1. Оцените влияние коэффициента трения породы о шнек и породы о породу на n_{\min} . Постройте графики зависимости n_{\min} от f и f' для различных значений R и a .
- 1.2. Оцените влияние конструктивных параметров шнека (R и a) на n_{\min} для вязких ($f'=1,5$; $F=0,25$). Постройте графики.

Расчет №4

Определение критической скорости восходящего потока и расхода очистного агента по предельным нормативным характеристикам (для воды малоглинистых растворов)

1. Критическая скорость восходящего потока очистного агента, м/с:

$$U_{кр} = K_{\phi} \sqrt{\frac{d_u(\gamma_n - \gamma_p)}{\gamma_p}}$$

2. Рациональная скорость восходящего потока, м/с:

$$U_p = U_{кр} + U$$

3. Расход промывочной жидкости, обеспечивающий рациональную скорость движения восходящего потока, м³/с:

$$Q_{кр} = U_p * \frac{\pi(D_{скв}^2 - d_{бур.тр.}^2)}{4}$$

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			от	до
K_{ϕ}	Коэффициент формы частиц шлама	-	2,5 (плоские)	5,11 (ид. шар)
d_u	Диаметр (средний размер) частиц	м	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
γ_n	Удельный вес горной породы, руды	т/м ³	2,0	5,5
γ_p	Удельный вес раствора	т/м ³	1	1,15
U	Желательная скорость движения шлама вверх	м/с	0,1	0,3
$d_{бур.тр.}$	Диаметр бурильной колонны, номинальный (без учета износа)	м	$32 \cdot 10^{-3}$	$73 \cdot 10^{-3}$
$d'_{бур.тр.}$	Диаметр бурильной колонны, с учетом износа	м	$30 \cdot 10^{-3}$	$70 \cdot 10^{-3}$
$D_{скв}$	Диаметр скважины, номинальный	м	$46 \cdot 10^{-3}$	$225 \cdot 10^{-3}$
$D'_{скв}$	Диаметр скважины, с учетом разработки ствола	м	$47 \cdot 10^{-3}$ $230 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-3}$ $250 \cdot 10^{-3}$
$D''_{скв}$	Диаметр скважины, с учетом каверн	м	По геолого-геофизическим и гидрогеологическим данным $D_{скв} \quad 500 \cdot 10^{-3}$	
Q	Расход очистного агента	м ³ /с л/мин	0,0002 10,0	0,003 160

Расчет №5

Критический расход глинистого раствора с учетом реологии раствора

$$Q_{кр} = 0,392 * \eta * \frac{D+d}{\gamma} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2*10^{-3}*\gamma*\tau_0*(D-d)^2}{3*\eta}} \right]$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы измерения		Примечания
			от	до	
D	Диаметр долота	мм	46	225	
d	Диаметр колонны	мм	32	73	
η	Пластическая вязкость	Пуаз (Па*с)	0,05	0,4	В зависимости от содержания глины в качестве раствора
γ	Уд. вес раствора	г/см ³	1,01	1,2	
τ_0	Динамическое напряжение сдвига	Дин/см ²	50	600	
Q	Расход глинистого раствора Критическая скорость восходящего потока	л/с м/с	0,1	5,0	В зависимости от диаметра скважины

Расчет №6

Расчет осевой нагрузки при твердосплавном бурении, кН

$$P = \frac{b^2 * m}{\eta \sqrt{\frac{2\omega * \mu_k * D_H * n * K * \tan a}{b * P_{ш}}}}$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			от	до
b	Ширина резца	м	$3 * 10^3$	$30 * 10^3$
K	Количество резцов на ширине кольца	шт	2 (М-1)	4 (СТ-2)
m	Количество основных резцов	шт	8 (М-1)	30 (СА-3)
μ_k	Коэффициент резцов о породу	-	0,2	1,0
ω	Удельный износ резца	м ³ /Н*м	2	60
D_H	Наружный диаметр коронки	М	$46 * 10^3$	$225 * 10^3$
n	Частота вращения снаряда	рад/с	60	360
a	Угол приострения резца	град	45	90
η	Коэффициент угла приострения	-	0,97	0,9
$P_{ш}$	Твердость породы по штампу	Па	$1 * 10^6$	$70 * 10^3$

Расчет №7

Определение механической скорости (интенсивности) углубки скважины при твердосплавном бурении, м/ч

$$V_M = V_0 * e^{-\gamma t} = V_0 * \left(\frac{1}{e}\right)^{\gamma t}.$$

Если $V_0 = 60 * n * h_0 * K * t$,

то $V_M = 60 * n * h_0 * K * t * e^{-\gamma t}$.

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			от	до
n	Частота вращения снаряда	об/мин	40	600
h_0	Торцовый вылет основных резцов	М	$0,1 * 10^{-3}$	$5 * 10^{-3}$
t	Количество резцов	шт	4	20
K	Коэффициент включения резцов	-	0,3	0,5
e	Основание натуральных логарифмов	1/град	2,71	2,71
γ	Декремент затухания	-	0,1	1
t	Текущее время (длительность рейса)	Ч	0,5	6
V_M	Интенсивность углубки (механическая скорость)	м/ч	0,15	25
V_0	Начальная механическая скорость	м/ч		

Здесь V_M - величина приращения глубины скважины в единицу времени на данный момент (интенсивности углубки). Выражается показательной функцией постепенного замедления от максимального начального значения V_0 в соответствии с γ .

V_0 и γ зависят от технологических условий: прочности пород, абразивности, характеристик инструмента, параметров бурения $\{P_{ш}, K_{абр}, X_i, P_б\}$.

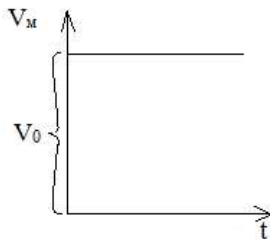
Чем легче условия бурения и лучше инструмент, тем больше V_0 (\uparrow) и меньше γ (\downarrow) - долго не замедляется бурение.

Чем интенсивнее режим бурения (максимальные параметры), тем больше V_0 (\uparrow) и γ (\uparrow) - вначале углубка идет быстро, но очень быстро замедляется - на малой глубине приемлемо.

Чем слабее режим бурения, тем меньше V_0 , но и тем медленнее затухание V_M (см. рисунок).

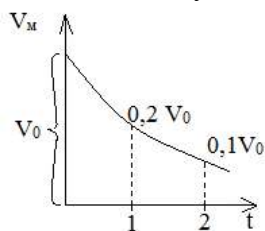
$$\gamma = 0; V_M = V_0$$

Незатупл. инструмент



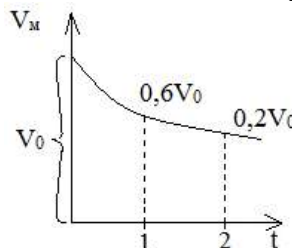
$$\gamma = 1; V_M = V_0 * \left(\frac{1}{2,7}\right)^t$$

Интенсивное затупление



$$\gamma = 0,5; V_M = V_0 * \left(\frac{1}{2,7}\right)^t$$

Интенсивное затупление



Графики изменения механической скорости от декремента затухания

Расчет №8

Определение механической скорости бурения на основе физико-механических свойств пород при алмазном бурении, м/ч

$$V_m = L * F_d^{-a} * K_{абр}^{-\beta}$$

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			однослойные алмазные коронки	импрегнированные алмазные коронки
F_d	Коэффициент динамической прочности	-	10-15	15-30
$K_{абр}$	Коэффициент абразивности пород	-	1,1-2,0	2,1-2,6
L	Коэффициент конструктивности коронки	-	5,9	0,14
$-a$	Коэффициент влияния прочности пород	-	0,36	0,2
$-\beta$	Коэффициент влияния абразивности пород	-	0,5	0,2
V_m	Механическая скорость бурения	м/ч	1,8-1,9	0,15-0,12

Расчет №9

Расчет шпинделя бурового станка

Шпиндель испытывает осевую нагрузку от механизма подачи и крутящий момент.

1. Напряжение от осевой нагрузки, Н/м²:

$$\sigma = \frac{4Q}{\pi(D^2 - d^2)}.$$

2. Крутящий момент на шпинделе, Н·м:

$$M = 9750 \frac{N^{max}}{n}.$$
$$N_{max} = N_g * \eta * \lambda, \text{ кВт}$$

3. Касательные напряжения от крутящего момента, снимаемого со шпинделя, Н/м²:

$$\tau = \frac{M}{2W};$$
$$W = \frac{\pi}{16} * \frac{D^4 - d^4}{D}, \text{ м}^3.$$

4. Полное приведенное напряжение в теле шпинделя, Н/м²:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}.$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменений	
			от	до
Q	Усилие подачи станка	Н	40000	50000
D	Наружный диаметр шпинделя	м	$51 * 10^{-3}$	$61 * 10^{-3}$
d	Внутренний диаметр шпинделя	м	$43 * 10^{-3}$	$53 * 10^{-3}$
N_{max}	Мощность, передаваемая на шпиндель	кВт	-	-
n	Число оборотов шпинделя	-	80	1500
N_g	Номинальная мощность шпинделя	-	0,8	
η	КПД передачи от вала двигателя до шпинделя	-		
λ	Коэффициент возможной перегрузки:			
	- электродвигатель	-	1,5	2,0
	-двигатель внутреннего сгорания	-	1,1	1,15

Расчет №10

Расчет механического зажимного патрона

Расчет патрона приведен для двух плашек, управляемых двумя болтами.

1. Допустимое осевое усилие по болту из условий его прочности на сжатие, Н:

$$P = F[\sigma_{сж}].$$

2. Допустимое осевое давление, развиваемое болтом, Н:

$$P' = \frac{\pi*(d^2-d_t^2)*l*P}{4t}.$$

3. Сила трения, при закреплении ведущей трубы в двух патронах, Н:

$$T = 4P' * f.$$

4. Окружное усилие, передаваемое патроном, Н:

$$P_0 = \sqrt{T_0^2 - Q^2}$$

5. Передаваемая мощность патронами, кВт:

$$N = \frac{P_v*V}{75}.$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменений	
			от	до
F	Площадь поперечного сечения	м ²	0,04	0,06
$[\sigma_{сж}]$	Допустимое напряжение сжатия	Н/м ²	1000*10 ⁵	1400*10 ⁵
d	Наружный диаметр резьбы болта	м	0,03	0,5
d_l	Внутренний диаметр резьбы болта	м	0,025	0,4
l	Длина резьбы болта	м	0,03	0,5
P	Наибольшее удельное давление болта	Н/м ²	65*10 ⁵	75*10 ⁵
t	Шаг резьбы болта	м	0,003	0,004
f	Коэффициент трения между плашками и бурильной трубой	-	0,35	0,4
Q	Осевое усилие	Н	40000	120000
V	Окружная скорость	м/с	0,2	0,85

Расчет №11

Расчет фрикционной лебедки

1. Скорость вращения подъемного вала лебедки, мин⁻¹:

$$n_2 = n_1 \frac{d_1}{d_2} \varphi.$$

2. Скорость навивки каната на барабан, м/с:

$$V = \frac{(D+d)n_2}{60}.$$

3. Окружная скорость на ободе большого фрикционного колеса, м/с:

$$V_1 = \frac{\pi * d_2 * n_2}{60}.$$

4. Окружное усилие на ободе барабана, Н:

$$P = \frac{75 * N * \eta}{V}.$$

5. Окружное усилие на ободе фрикционного колеса, Н:

$$P_\phi = \frac{75 * N * \eta}{V_1}.$$

6. Необходимое усилие нажатия фрикционных колес друг на друга, Н:

$$Q = \frac{k * P_\phi * \sin \alpha}{f}$$

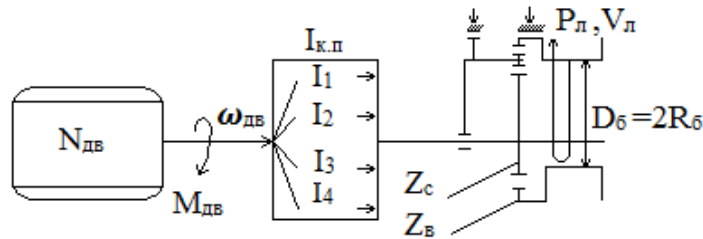
Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменений	
			от	до
n_1	Число оборотов приводного вала станка	мин ⁻¹	80	
d_1	Диаметр малого фрикционного колеса	м	0,15	
d_2	Диаметр большого фрикционного колеса	м	0,8	
φ	Коэффициент скольжения при фрикционной передаче	-	0,98	
D	Диаметр барабана	м	0,22	
d	Диаметр каната	м	0,12	
N	Мощность электродвигателя станка	кВт	11	
η	КПД передачи от двигателя до барабана	-	0,8	
k	Коэффициент запаса	-	1,5	
α	Угол наклона боковых поверхностей клиньев	град	12	15
f	Коэффициент трения чугуна по стали	-	0,2	

Расчет №12

Анализ взаимосвязи мощности привода, конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик планетарной лебедки бурового станка

1. Принципиальная расчетная схема



2. Основные расчетные формулы:

$$N_{дв} = 713 * M_{дв} * \omega_{дв} (\text{л.с.}) = 973 * M_{дв} * \omega_{дв}, \text{ кВт}$$

$$M_Б = \frac{N_{дв}}{\omega_{дв}} * i_{к.п.} * \frac{Z_с}{Z_в}, \text{ Н*М;}$$

$$P_л = \frac{M_Б}{R_Б}, \text{ Н;}$$

$$\omega_Б = \frac{N_{дв}}{M_Б} * \frac{i}{i_{к.п.}} * \frac{Z_в}{Z_с}, \text{ об/мин;}$$

$$V_л = \omega_Б * 2\pi * R_Б, \text{ м/мин.}$$

Таблица основных исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			от	до
$N_{дв}$	Мощность двигателя	кВт л.с.	10 15	150 220
$\omega_{дв}$	Число оборотов двигателя	об/мин	1200	5000
$i_{к.п.}$	Передаточное число коробки перемены передач	-	1 (прямая передача)	10 (высшая передача)
$D_б$	Диаметр барабана лебедки	м	0,2	0,7
$Z_с$	Число зубьев солнечной шестерни лебедки	шт	50	150
$Z_в$	Число зубьев венца лебедки	шт	250	1500

3. Основные эксплуатационные характеристики лебедки

$P_л$ – рабочее усилие (грузоподъемность на прямом канате, кГс, Тс, кН, даН) на конкретной передаче ($P_{л1}, P_{л2}, P_{л3}, \dots$);

$V_л$ – скорость подъема груза (на прямом канате, м/мин) на конкретной передаче ($V_{л1}, V_{л2}, V_{л3}, \dots$).

4. Основное задание

4.1. Рассчитать и построить графики зависимости эксплуатационных характеристик лебедки ($V_л, P_л$) от конкретных параметров бурового станка: $Z_с$ и $Z_в, D_б, i_1$.

4.2. Рассчитать и построить графики зависимости мощности и механической характеристики ($\omega_{дв}=F(N_{дв})$) двигателя.

Расчет №13

Расчет талевой системы

1. Натяжение на струне талевой системы, Н:

$$P_m = \frac{P_l}{\beta^m}.$$

2. Натяжение каната наматываемого на барабан лебедки, Н:

$$P_l = Q * \frac{\beta^m(\beta-1)}{\beta^m-1}.$$

3. Натяжение закрепленного конца каната, Н:

$$P_m = Q * \frac{\beta-1}{\beta(\beta^m-1)}.$$

4. КПД талевой системы, Н:

$$\eta = \frac{1}{m} * \frac{(\beta^m-1)}{\beta^m * (\beta-1)}.$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменений	
			от	до
β	Коэффициент сопротивления узла одного ролика	-	1,03	1,04
m	Число струн талевой системы	шт	1	6
Q	Нагрузка на крюке	Н	15000	55000

Расчет №14

Расчет колонны бурильных труб на прочность

Сечение I-I

1. Напряжение растяжения, Н/м²:

$$\sigma_p = \frac{Q_{кр}}{F}.$$

2. Напряжение кручения, Н/м²:

$$\tau = \frac{M_{\phi}}{W_p}.$$

3. Крутящий момент при бурении, Н*м:

$$M_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{\omega}.$$

4. Мощность, затрачиваемая на бурение, кВт:

$$N_{\phi} = N_{тр} + N.$$

5. Первый момент сопротивления, м³:

$$W_p = 0,1 * \frac{d_{н}^4 - d_{в}^4}{d_{н}}.$$

6. Суммарное напряжение в сечении I-I:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_p^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma_g].$$

Сечение II-II

7. Напряжение сжатия, Н/м²:

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{ос}}{F}.$$

8. Напряжение изгиба, Н/м²:

$$\sigma_{из} = \frac{\pi^2 * E * D * f}{2 * 1^2}.$$

9. Напряжения кручения, Н/м²:

$$\tau = \frac{M_{\phi}}{W_p}.$$

10. Мощность, затрачиваемая на бурение, кВт:

$$N_{\phi} = 1,5 * N_3.$$

11. Суммарное напряжение в сечении II-II, Н/м²:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_{сж} + \sigma_{из})^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma_g].$$

12. Запас статической прочности колонны:

$$n = \frac{\sigma_r}{\sigma_\Sigma} \geq 1,7 .$$

13. Запас прочности по нормальным напряжениям:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{из} * k_g} .$$

14. Запас прочности по касательным напряжениям:

$$n_\tau = \frac{\tau_r}{\tau} .$$

15. Суммарный запас прочности:

$$n_\Sigma = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 * n_\tau^2}} .$$

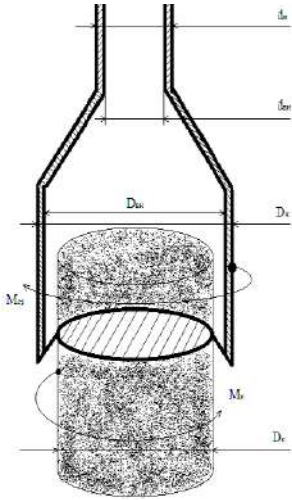
Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменений	
			от	до
$Q_{кр}$	Нагрузка на крюке	Н	0	55000
F	Площадь опасного сечения	м ²	$2,16 * 10^{-4}$	$7,06 * 10^{-4}$
$M_б$	Крутящий момент при бурении	Н*м	70	6500
W_p	Полярный момент сопротивления	м ³	$5,4 * 10^{-6}$	$10,6 * 10^{-6}$
$N_б$	Мощность, затрачиваемая на бурение	кВт	1,5	70
d_n	Наружный диаметр бурильных труб	м	42	54
d_v	Внутренний диаметр бурильных труб	м	22	40
$P_{ос}$	Осевая нагрузка на забой	Н	0	120000
E	Модуль упругости	Н/м ²	$0,7 * 10^{11}$	$2,1 * 10^{11}$
D	Диаметр скважины	м	0,037	0,133
f	Стрела прогиба	м	0,01	0,025
l	Длина полуволны	м	5	30
ω	Угловая скорость вращения снаряда	с ⁻¹	8,3	156
$N_{гр}$	Затраты мощности на вращение колонны бурильных труб	кВт	12	40
$N_з$	Затраты мощности на разрушение забоя	кВт	1,2	2,5
$[\sigma_g]$	Предел прочности материала, из которого изготовлены бурильные трубы	Н/м ²	$230 * 10^5$	$683 * 10^5$

Расчет №15

Сопоставление конструктивных характеристик бурового снаряда и параметров керна при срыве вращением

1. Принципиальная схема и таблица исходных расчетных данных



Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			от	до
d_n	Наружный диаметр бурильных труб	м	$32 \cdot 10^{-3}$	$73 \cdot 10^{-3}$
$d_{вн}$	Внутренний диаметр бурильных труб	м	$22 \cdot 10^{-3}$	$59 \cdot 10^{-3}$
D_n	Наружный диаметр колонковой трубы	м	$34 \cdot 10^{-3}$	$219 \cdot 10^{-3}$
$D_{вн}$	Внутренний диаметр колонковой трубы	м	$27 \cdot 10^{-3}$	$203 \cdot 10^{-3}$
D_k	Диаметр керна	м	$23 \cdot 10^{-3}$	$199 \cdot 10^{-3}$
$[\tau_{тр}]$	Прочность материала труб при кручении	МПа	162	284
$[\tau_k]$	Прочность горных пород при кручении	МПа	1,5	56,0

2. Основные аналитические зависимости.

Момент срыва керна $M_{ср}$ равен моменту реакции керна M_k , Н*м :

$$M_{ср} = [\tau_{тр}] * W_{тр} = [\tau_k] * W_k = M_k$$

где $W_{тр}$ - момент сопротивления поперечного сечения труб, м³:

а) бурильных труб:

$$W_{тр}^{б.тр} = \frac{\pi}{16} * \frac{d_n^4 - d_{вн}^4}{d}$$

б) колонковых труб:

$$W_{тр}^k = \frac{\pi}{16} * \frac{D_{н.к.т}^4 - D_{вн.к.т}^4}{D_{н.к.т}}$$

W_k - момент сопротивления поперечного сечения керна, м³:

$$W_k = \frac{\pi * D_k^4}{32}$$

3. Основные аналитические задачи

3.1. Задайте некоторое значение прочности горной породы и материала труб. Постройте графики зависимости минимальных значений наружного диаметра бурильных труб (при постоянной толщине стенок) от диаметра керна.

3.2. При тех же условиях постройте график зависимости диаметра колонковой трубы от диаметра срываемого керна.

3.3. Задайте некоторый постоянный диаметр керна и материала труб. Постройте графики зависимости минимального диаметра бурильных труб от прочности горной породы.

3.4. При тех же условиях постройте график зависимости диаметра колонковой трубы от прочности горной породы.

3.5. Задайте диаметры труб и керна, постройте график зависимости необходимой прочности труб от диаметра срываемого керна.

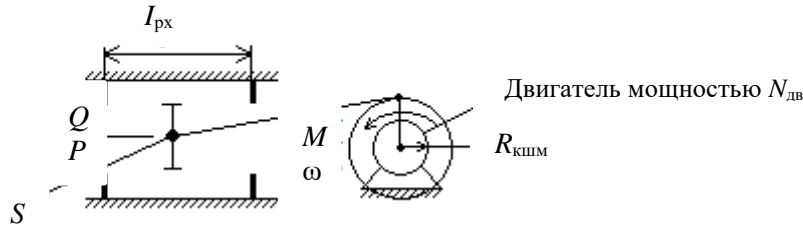
3.6. Задайте диаметры труб, прочность горной породы и постройте график зависимости необходимой прочности труб от диаметра срываемого керна.

3.7. Повторите расчеты 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 при измененных начальных условиях.

Расчет №16

Анализ взаимосвязи мощности привода, конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик бурового промывочного насоса

1. Принципиальная расчетная схема



2. Основные расчетные формулы

$$N_{\text{дв}} = K_i * M * \beta ,$$

где M – крутящий момент, кгс*м;

ω – частота вращения, об/мин;

$N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя (при $K_1=973$ кВт, а при $K_2=713$ л. с.).

$$Q = S * I_{\text{рх}} * \omega ;$$

$$P = \frac{M}{R_{\text{кшм}}} * \frac{1}{S} ;$$

$$I_{\text{рх}} = 2 * R_{\text{кшм}} ,$$

где Q – расход промывочной жидкости, м³/мин;

S – площадь поршня, м²;

$I_{\text{рх}}$ – ход поршня, м;

P – рабочее давление в напорной магистрали, кгс/м²

$R_{\text{кшм}}$ – радиус кривошипа, м.

3. Расчетно-аналитические задачи

3.1. При постоянной мощности асинхронного двигателя:

- Как влияет площадь поршня S на эксплуатационные характеристики насоса (построить графики $P=f_1(S)$ и $Q=f_2(S)$ для $N=10, \dots 50$ кВт).
- Как влияет радиус кривошипа и величина рабочего хода поршня на эксплуатационные характеристики насоса.

3.2. С изменяемой мощностью:

- До какой глубины возможно применение насоса с приводом 10, 20, ... 50 кВт, если гидросопротивления на каждые 100 м скважины при алмазном бурении ($Q=300$ л/мин) составляют 10 атмосфер, при твердосплавном бурении ($Q=60$ л/мин) 7 атмосфер, при шарошечном бурении ($Q=100$ л/мин) 15 атмосфер.

Расчет №17

Расчет эрлифта для откачки воды из скважины

Условия откачки:

- Проектный дебит откачки Q , м³/ч.
- Глубина статического уровня в скважине h_0 , м.
- Проектное понижение уровня воды при откачке $h_{п}$, м.
- Мощность водоносного горизонта m , м.
- Глубина залегания водоносного горизонта L , м.
- Конструкция эрлифта с расположением эрлифтных труб по схеме «рядом».

Расчетная схема представлена на рисунке.

1. Расчет глубины погружения смесителя

1.1 Определяется проектный динамический уровень воды в скважине, при откачке воды относительно излива:

$$h_g = h_0 + h_{п} + h_{и} ,$$

где h_g – проектный динамический уровень, м;

h_0 – статический уровень, м;

$h_{п}$ – проектное понижение уровня, при откачке ($h_{п} \leq 0,4 m$), м;

m – мощность водоносного горизонта, м;

$h_{и}$ – высота расположения излива относительно устья скважины (0,5 м), м.

1.2. Определяется глубина погружения смесителя относительно уровня излива, при проектном динамическом уровне воды в скважине:

$$H = K + h_g ,$$

где H – погружение смесителя относительно уровня излива, м;

h_g – динамический уровень относительно излива, м;

K – коэффициент погружения смесителя.

Абсолютная величина коэффициента погружения смесителя K в зависимости от динамического уровня определяется опытным путем и поэтому принимается при расчетах согласно табл.1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента погружения смесителя эрлифта от динамического уровня

h_g	70-40	60-20	30-10
K	1,4-1,6	1,7-2	2,5-3

2. Расчет расхода и давления воздуха, нагнетаемого в эрлифтную систему

2.1. Определяется удельный расход воздуха для откачки из скважины 1 м³ воды:

$$W_0 = \frac{h_g}{C_0 \cdot \log_{10} \frac{h_g^{*(K-1)+10}}{10}} ,$$

где W_0 – удельный расход воздуха, приводимый к 1 атм или 0,1 МПа, м³/мин;

h_g – динамический уровень воды в скважине, м;

K – принятый коэффициент погружения смесителя;

C_0 – опытный коэффициент, зависящий от коэффициента погружения смесителя, принимается согласно табл. 2.

Таблица 2

Зависимость коэффициента C_0 от K

K	4	3,35	2,85	2,5	2,2	2	1,8	1,7	1,55
C_0	14,3	13,9	13,6	13,1	12,4	11,5	10	9	8

При расчете удельного расхода воздуха для откачки из скважины жидкостей, имеющих удельный вес больше единицы ($\gamma_{ж} > 1$), г/см³, необходимо W_0 умножить на $\gamma_{ж}$.

2.2. Определяется полный расход воздуха для откачки воды из скважины с проектной производительностью Q , м³/ч:

$$\sum W_0 = \frac{Q \cdot W_0}{60},$$

где $\sum W_0$ – суммарный полный расход воздуха, приведенный к 1 атм или 0,1 МПа, м³/мин;

Q – проектный дебит откачки, м³/мин

W_0 – удельный расход воздуха, приведенный к 1 атм или 0,1 МПа, м³/мин.

3. Расчет необходимого давления и производительности для выбора компрессора

3.1. Определение необходимого давления сжатого воздуха, при спуске компрессора:

$$P_{п} = 0,01 * (K * (h_g - h_0) + P_1),$$

где $P_{п}$ – пусковое давление компрессора, МПа;

K – принятый коэффициент погружения смесителя;

h_g – динамический уровень воды в скважине, м;

h_0 – статический уровень воды в скважине, м;

P_0 – потери напора в воздухопроводах, при спуске компрессора: $P_1 = 1$ м. вод. ст.

3.2. Определение рабочего давления компрессора в процессе откачки воды из скважины:

$$P_{р} = 0,01 * (h_g * (K - 1) + P_2),$$

где $P_{р}$ – рабочее давление компрессора, МПа;

h_g – динамический уровень воды в скважине, м;

K – принятый коэффициент погружения смесителя;

$P_{р}$ – потери напора в воздухопроводах, при процессе откачки.

3.3. Определение рабочего расхода сжатого воздуха в процессе откачки воды из скважины с проектной производительностью Q , м³/ч:

$$W_{р} = \sum W_0 * \frac{P_0}{P_{р}},$$

где $W_{р}$ – рабочий расход промывочной жидкости, м³/мин;

$\sum W_0$ – полный расход воздуха, приведенный к 1 атм или 0,1 МПа, м³/мин;

P_0 – атмосферное давление воздуха, $P_0=0,1$ МПа;

P_p – рабочее давление сжатого воздуха, МПа.

3.4. Выбор компрессора для оборудования эрлифта.

Для откачки воды из скважины с проектной производительностью Q давление компрессора P_k и производительностью компрессора q_k выбирается согласно следующим условиям:

$$P_k \geq P_n; \quad P_k \geq P_p; \quad q_k \geq W_p.$$

4. Расчет внутренних диаметров эрлифтных колонн

4.1. Выбор скоростей движения потоков воздуха и аэрированной воды в эрлифтных колоннах труб.

Для устойчивой и эффективной работы эрлифта необходимо обеспечить следующие скорости движения потоков воздуха и аэрированной воды в эрлифтных колоннах труб:

V_b – скорость потока в воздухопроводной колонне труб:

$$V_b = 10 \text{ м/с};$$

V_c – скорость потока аэрированной воды в водоподъемной колонне труб над смесителем

$$V_c = (2-4) \text{ м/с};$$

V_n – скорость потока аэрированной воды в водоподъемной колонне труб, перед изливом

$$V_n = (6-12) \text{ м/с}.$$

V_c и V_n зависят от h_g (чем больше h_g , тем больше V_c и V_n).

4.2. Расчет площади сечения потока воздуха в воздухопроводной колонне:

$$\omega_b = \frac{W_p}{60 \cdot V_b},$$

где ω_b – площадь сечения потока воздуха в воздухопроводной колонне, м²;

W_p – рабочий расход сжатого воздуха, м³/мин;

V_b – скорость потока воздуха в воздухопроводной колонне, м/с.

4.3. Расчет площади потока аэрированной воды в водоподъемной колонне

4.3.1. Определение расхода воды над смесителем:

$$q_c = \frac{Q}{360} + \frac{W_p}{60},$$

где q_c – расход аэрированной воды над смесителем, м³/с;

Q – проектный дебит откачки, м³/ч;

W_p – рабочий расход сжатого воздуха, м³/мин.

4.3.2. Расчет площади сечения потока аэрированной воды над смесителем:

$$\omega_c = \frac{q_c}{V_c},$$

где ω_c – площадь сечения потока над смесителем, м²;

q_c – расход потока над смесителем, м³/ч;

V_c – скорость потока над смесителем, м/с.

4.3.3. Определение расхода аэрированной воды перед изливом:

$$q_n = \frac{Q}{3600} + \frac{\sum W_0}{60},$$

где q_n – расход аэрированной воды перед изливом, м³/ч;

Q – проектный дебит откачки, м³/ч;

$\sum W_0$ – суммарный полный расход воздуха, приведенный к 1 атм или 0,1 МПа, м³/мин.

4.3.4. Расчет площади сечения аэрированной воды перед изливом:

$$\omega_n = \frac{q_n}{V_n},$$

где ω_n – площадь потока перед изливом, м³;
 q_n – расход потока перед изливом, м³/ч;
 V_n – скорость потока перед изливом, м/с.

4.4. Расчет внутренних диаметров внутренних эрлифтных колонн

Внутренние диаметры эрлифтных колонн определяются на основании площадей сечений потоков воздуха в воздухопроводной колонне и аэрированной воды в водоподъемной колонне по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4\omega_n}{\pi}},$$

где d - внутренний диаметр трубы, м;
 ω_n - площадь сечения потока в трубе, м².

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменений	
			от	до
L	Глубина залегания водоносного горизонта	м	50	150
h_0	Статический уровень воды	м	8	26
h_n	Понижение уровня воды	м	1	5
Q	Дебит	м ³ /ч	10	130
m	Мощность водоносного горизонта	м	2	14

Расчет №18

Цементирование скважин

Основная цель цементирования – получение прочного водогазонефте непроницаемого, концентрично расположенного в затрубном пространстве кольца цементного камня, который по всей высоте обеспечивал бы разобщение и надежную изоляцию вскрытых скважиной продуктивных горизонтов и зон осложнений.

Способ цементирования выбирается в зависимости от температуры в ее стволе, опасности поглощения при заданной высоте подъема цементного раствора и возникновения затрубных проявлений в период ОЗЦ для каждой конкретной скважины.

Расчет цементирования сводится к определению:

- потребного количества сухого цемента, воды, промывочной жидкости;
- конечного давления при цементировании и выбора типа и потребного количества цементировочных агрегатов и цементно-смесительных машин;
- продолжительности цементирования.

1. Определение потребного количества сухого цемента, воды, промывочной жидкости при цементировании обсадной колонны

1.1. Определение потребного количества цементного раствора, м³:

$$V_{п.р.} = \frac{\pi}{4} [(k^2 \cdot D^2 - d^2) \cdot h_{ц} + h_0 \cdot d_{в}^2],$$

где k – коэффициент увеличения ствола скважины ($k = 1,1 \div 1,25$).

1.2. Определение удельного веса цементного раствора, г/см³:

$$\gamma_{ц,р} = \frac{\gamma_{ц} \cdot \gamma_{в} \cdot (1+m)}{m \cdot \gamma_{ц} + \gamma_{в}},$$

где $\gamma_{ц}$, $\gamma_{в}$ – соответственно удельный вес сухого цемента и воды

($\gamma_{ц} = 3,15$ г/см³, $\gamma_{в} = 1,0$ г/см³);

m – цементное отношение.

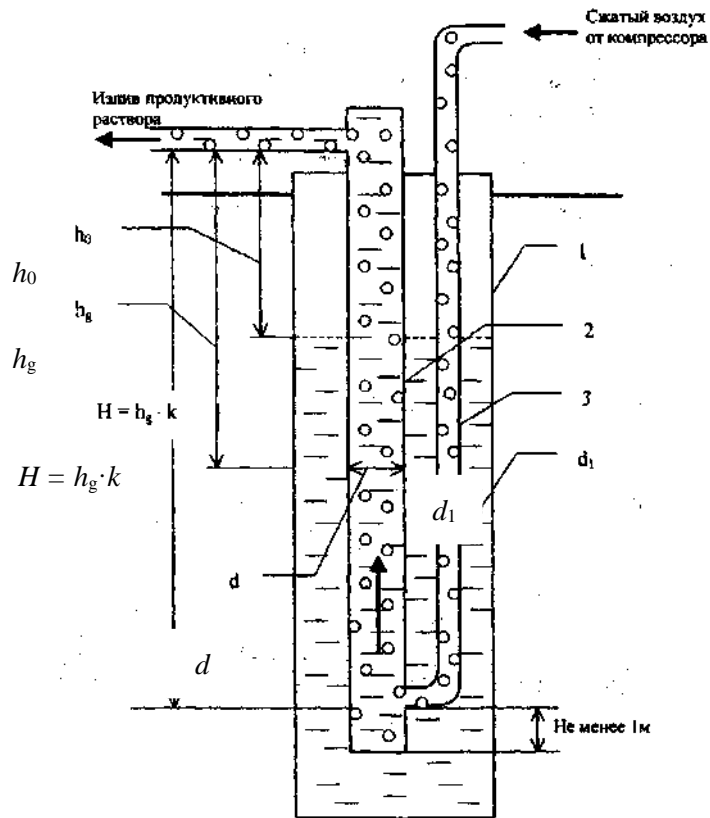


Схема эрлифта с расположением труб «рядом»:

1 – обсадные трубы; 2 – водоподъемные трубы; 3 – воздухопроводные трубы

1.3. Определение потребного количества сухого цемента, т:

$$Q_{\text{ц}} = e \cdot \frac{1}{1+m} \cdot \gamma_{\text{ц,п}} \cdot V_{\text{ц,п}},$$

где e – коэффициент, учитывающий потери сухого цемента при транспортировке и затворении ($e = 1,03 \div 1,05$).

1.4. Определение потребного количества воды для затворения цемента, м³:

$$V_{\text{в}} = m \cdot Q_{\text{ц}}.$$

1.5. Определение объема продавочной жидкости, м³:

$$V_{\text{пр}} = \Delta \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{вн.сп}}^2 \cdot (L - h_0),$$

где Δ – коэффициент, учитывающий сжатие жидкости ($\Delta = 1,03 \div 1,05$).

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы измерений		Примечание
			от	до	
D	Диаметр долота	м	161	445	D (161, 172, 190, 214, 243, 269, 295, 320, 346, 370, 394, 445)
d	Диаметр обсадных труб	м	114	340	d (114, 127, 146, 168, 178, 194, 219, 245, 273, 299, 324, 340, 508)
δ	Толщина стенки обсадных труб	мм	6,5	12	
$d_{\text{вн.ср}}$	Средний внутренний диаметр обсадных труб	м	$(d - \delta)$		
$h_{\text{ц}}$	Высота подъема цементного раствора за колонной	м	50	4000	
h_0	Высота цементного стакана в колонне	м	20	20	
L	Глубина спуска обсадных труб	м	50	4000	

2. Определение конечного давления при цементировании

2.1 Определение давления в цементировочной головке в конце цементирования, атм:

$$P_{\text{max}} = P_{\text{гидр}} + 0,1 \cdot [(L - h_{\text{ц}})\gamma_{\text{г.р}} + (h_{\text{ц}} - h_0)\gamma_{\text{г.р}} - (L - h_0)\gamma_{\text{пр.ж}}] + (15 \div 20),$$

где $P_{\text{гидр}}$ – гидравлические сопротивления, атм.:

$$P_{\text{гидр}} = 0,01L + 8, (V_{\text{восх}} \leq 1 \text{ м/с и } 1 \text{ агрегатом}),$$

$$P_{\text{гидр}} = 0,02L + 16, (V_{\text{восх}} > (1 \div 2) \text{ м/с});$$

L – длина эксплуатационной колонны, м;

$h_{\text{ц}}$ – высота цементирования, м;

h_0 – высота цементного стакана, м;

$\gamma_{\text{г.р}}$ – плотность глинистого раствора, г/см³;

$\gamma_{\text{п}}$ – плотность продавочной жидкости, г/см³.

(15 ÷ 20) – скачок давления на манометре в момент посадки продавочной пробки на упорное кольцо, атм.

Выбор ЦА $P_{\text{агр}} \geq P_{\text{max}}$ (выписываем характеристику ЦА – P и q).

2.2. Определение производительности цементировочного кольца агрегата в конце цементировочного агрегата в конце цементирования, м³/с:

$$\sum q = \frac{\pi}{4} \cdot (K^2 \cdot D^2 - d^2) \cdot V_{\text{восх}},$$

где K – коэффициент кавернозности;

$V_{\text{восх}}$ – скорость восходящего потока, м/с.

2.3. Определение необходимого количества цементировочных агрегатов по скорости, шт:

$$n = \frac{\sum q}{q^v} + 1,$$

где $\sum q$ – необходимый расход для обеспечения заданной скорости поднятия цементного раствора за эксплуатационную колонну, м³/с;

q^v – производительность выбранного агрегата на высшей скорости, л/с.

Характеристика ЗЦА-400

Скорость	Число двойных ходов поршня насоса в 1 мин	d = 100 мм		d = 115 мм		d = 127 мм	
		подача, л/с	давление, атм	подача, л/с	давление, атм	подача, л/с	давление, атм
I	53,2	6,5	400	8,6	305	11,25	232
II	76,2	9,6	270	12,7	205	16,10	163
III	112,5	14,2	182	18,7	138	23,8	110
IV	156,0	19,7	131	26,0	100	33,0	79

Характеристика ЦА-320М

Режим работы	Скорость	Число двойных ходов поршня насоса в 1 мин	d = 90 мм		d = 100 мм		d = 115 мм		d = 127 мм	
			подача, л/с	подача, л/с	давление, атм	давление, атм	давление, атм	давление, атм	давление, атм	давление, атм
Максимальная производительность	I	28	2,4	390	3,0	305	4,1	225	5,1	182
	II	54	4,5	202	5,8	159	7,9	117	9,9	95
	III	97	8,3	113	10,4	88	14,2	65	17,6	52
	IV	125	10,6	87	13,5	69	18,3	50	22,8	40
Максимальное давление	I	27	2,3	400	2,9	320	3,9	230	4,9	185
	II	41	3,5	231	4,4	182	6,0	134	7,5	109
	III	73	6,2	130	7,8	103	10,7	75	13,3	61
	IV	94	8,0	102	10,1	80	13,8	59	17,1	47

2.4. Определение количества цементно-смесительных машин, шт:

$$i = \frac{Q_{ц}}{20}$$

где $Q_{ц}$ - количество цемента, необходимое для цементирования эксплуатационной колонны, т.

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы измерений	
			от	до
D	Диаметр долота	м	161	445
d	Диаметр обсадных труб	м	114	340
L	Глубина спуска обсадной колонны	м	50	4000
$h_{ц}$	Высота подъема цементного раствора за колонной	м	50	4000
h_0	Высота цементного стакана в колонне	м	20	20
$\gamma_{г.р}$	Удельный вес глинистого раствора	г/см ³	1,2 ÷ 1,25 ÷ 1,3	
$\gamma_{ц.р}$	Удельный вес цементного раствора	г/см ³	1,9 ÷ 1,85 ÷ 1,8	
$\gamma_{п}$	Удельный вес продажной жидкости	г/см ³	1,0 ÷ 1,25	
$V_{восх.}$	Скорость подъема восходящего потока цементного раствора в затрубном пространстве: - для кондукторов и технических колонн - для эксплуатационных колонн	м/с	(0,6 ÷ 0,8) (1,2 ÷ 1,5)	
k	Коэффициент увеличения диаметра ствола скважины	-	1,1	1,25

3. Определение продолжительности цементирования обсадной колонны
Возможность начала закачки определяется следующим условием:

$$P^V > P_r,$$

где P^V – максимальное давление, развиваемое ЦА на наивысшей скорости, атм;
 P_r - давление на преодоление в скважине в скважине гидравлических сопротивлений, атм.

$$P_r = 0,01L + 8 \text{ (при } V_{\text{восх}} \leq 1 \text{ м/с);}$$

$$P_r = 0,02L + 16 \text{ (при } V_{\text{восх}} \leq 2 \text{ м/с).}$$

Если условие не выполняется, выбираем ближайшую скорость, на которой

$$P_{\text{агр}} > P_r.$$

3.1. Определяем, сколько цементного раствора будет закачено на этих скоростях:

$$h_{\text{ц,р}}^{IV} = \frac{10(P_r - P^V)}{(\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}})},$$

где $h_{\text{ц,р}}^{IV}$ - высота столба цементного раствора, который необходимо закачать на IV скорости, м;

P^V – давление, создаваемое насосом агрегата на V скорости.

Определяем объем раствора, закачанного на IV скорости, м³:

$$V_{\text{ц,р}}^{IV} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн.ср}}^2}{4} \cdot h_{\text{ц,р}}^{IV},$$

Определяем объем цементного раствора, закачанного на V скорости, м³:

$$V_{\text{ц,р}}^V = V_{\text{ц,р}} - V_{\text{ц,р}}^{IV}.$$

3.2. Определение высоты столба продажной жидкости в колонне при работе агрегата на V скорости, м:

$$I_i^V = \frac{L \cdot (d_{\text{вн}}^2 + k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2) + (k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2) \cdot \frac{10(P_H^V - P_r)}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}} - \frac{4V_{\text{ц,р}}}{\pi}}{(k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2) \frac{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{пр.ж}}}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}} + d_{\text{вн}}^2}.$$

Определяем постоянные элементы для данной формулы:

$$a = L \cdot (d_{\text{вн}}^2 + k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2);$$

$$b = (k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2);$$

$$c = \frac{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{пр.ж}}}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}};$$

$$Z = \frac{4V_{\text{ц,р}}}{\pi};$$

$$I_1^V = \frac{a + b \cdot \frac{10(P_H^V - P_r)}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}} - Z}{b \cdot c + d_{\text{вн}}^2}.$$

3.3. Определение высоты подъема цементного раствора за колонной на V скорости агрегата, м:

$$I_2^V = \frac{a + b \cdot \frac{10(P_H^V - P_r)}{\gamma_{ц.р} - \gamma_{гл.р}} - Z}{b \cdot c + d_{BH}^2},$$

т. е.

$$I_2^V = \frac{Z - d^2(L - I_1^V)}{b}.$$

3.4. Высота столба продавочной жидкости на IV скорости агрегата, м:

$$I_1^{IV} = \frac{a + b \cdot \frac{10(P^{IV} - P^V)}{\gamma_{ц.р} - \gamma_{гл.р}} - Z}{b \cdot c + d_{BH}^2}.$$

3.5. Высота подъема цементного раствора за колонной на IV скорости агрегата, м:

$$I_2^{IV} = \frac{Z - d^2(L - I_1^{IV})}{b}.$$

3.6. Высота столба продавочной жидкости на III скорости агрегата, м:

$$I_2^{III} = \frac{a + b \cdot \frac{10(P^{III} - P^{IV})}{\gamma_{ц.р} - \gamma_{гл.р}} - Z}{b \cdot c + d_{BH}^2}.$$

3.7. Высота подъема цементного раствора за колонной, на III скорости агрегата, м:

$$I_2^{III} = \frac{Z - d^2(L - I_1^{III})}{b}.$$

3.8. Определяем количество продавочной жидкости, закачиваемой на различных скоростях агрегата, м³:

$$V_{пр}^V = e \cdot \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot I_1^V;$$

$$V_{пр}^{IV} = e \cdot \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot (I_1^{IV} - I_1^V);$$

$$V_{пр}^{III} = e \cdot \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot (I_1^{III} - I_1^{IV});$$

$$V_{пр}^I = V_{пр} - V_{пр}^I - V_{пр}^{III} - V_{пр}^{IV} - V_{пр}^V;$$

$$V_{пр}^I = 2.$$

3.9. Определяем время работы одним агрегатом на разных скоростях, мин:

$$t^V = \frac{(V_{ц.р}^V + V_{пр}^V)}{q^V \cdot 60};$$

$$t^{IV} = \frac{(V_{ц.р}^{IV} + V_{пр}^{IV})}{q^{IV} \cdot 60};$$

$$t^{III} = \frac{(V_{ц,р}^{III} + V_{пр}^{III})}{q^{III} \cdot 60};$$

$$t^{II} = \frac{(V_{ц,р}^{II} + V_{пр}^{II})}{q^{II} \cdot 60};$$

$$t^I = \frac{(V_{ц,р}^I + V_{пр}^I)}{q^I \cdot 60}.$$

3.10. Общее время цементирования, мин:

$$T' = t^I + t^{II} + t^{III} + t^{IV} + t^V.$$

С учетом подготовительно-заключительных работ

$$T_{ц} = T' + 15 \text{ мин.}$$

3.11. Определяем температуру на забое скважины, °С:

$$t_{заб} = t_{ср} + 0,025L,$$

где $t_{ср}$ – среднегодовая температура воздуха, °С,

L – глубина скважины, м.

3.12. Определяем количество агрегатов, шт:

По времени схватывания

$$n_{ЦА} = \frac{T}{0,75T_{скв}} + 1,$$

по скорости

$$n = \frac{\sum q}{q^V} + 1,$$

где $\sum q$ – необходимый расход для обеспечения заданной скорости поднятия цементного раствора за эксплуатационную колонну, л/с;

q^V – производительность выбранного агрегата на высшей скорости, л/с.

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Технология бурения разведочных скважин / А. Г. Калинин, В. И. Власюк, О. В. Ошкордин, Р. М. Скрябин. - М.: Техника, ТУМА ГРУПП, 2004. - 528 с.
2. Башкатов Д. Н., Кривошеев В. В., Соловьев Н. В. Бурение разведочных скважин: учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 2007.
3. Гусман А. М., Порожский К. П. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование. – Екатеринбург, 2002. - 592 с.

Дополнительная:

1. Ошкордин О. В. Технологическое проектирование в разведочном бурении на твердые полезные ископаемые: учебное пособие. – Екатеринбург: УГГГА, 1994.
2. Калинин А. Г., Ошкордин О. В. Разведочное бурение. – М.: Недра, 2000.
3. Михайлова Н. Д. Техническое проектирование колонкового бурения. – М.: Недра, 1985.
4. Ганджумян Р. А. Практические расчеты в разведочном бурении. – М.: Недра, 1986.
5. Поляков Г. Д., Булгаков Е. С. Проектирование, расчет и эксплуатация буровых установок. – М.: Недра, 1983.
6. Кирсанов А. Н., Зиненко В. П., Кардыш В. Г. Буровые машины и механизмы. – М.: Недра, 1986.
7. Элияшевский И. В., Орсуляк А. М. Типовые задачи и расчеты в бурении. – М.: Недра, 1974.
8. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду /под общей ред. В. В. Дубровского – Второе издание, перераб. и доп. – М.: Недра, 1972.
9. Справочник по бурению скважин на воду / под общей ред. Д. Н. Башкатова. – М.: Недра, 1979.
10. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин /авторский колл.; гл. ред. проф. Е. А. Козловский. – СПб, 2000.



МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Г.А. Усов, Л.И. Кралина, Ф.П. Сердюков

Методические указания
по выполнению курсового проекта
по дисциплине «Бурение скважин»

для студентов специальности

21.05.03 Технология геологической разведки

Специализация № 3 Технология и техника разведки МПИ

очного и заочного обучения

Екатеринбург

2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Занятие 1. Разработка конструкции скважины.....	4
Занятие 2. Выбор типа породоразрушающего инструмента и расчет параметров режима вращательного бурения.....	5
Занятие 3. Выбор типа породоразрушающего инструмента для канатно-ударного бурения и расчет параметров режима бурения.....	9
Список литературы.....	11
Приложение 1 Исходные данные для составления конструкции скважины.....	12
Приложение 2. Рекомендуемый диаметр керна по полезному ископаемому.....	13
Приложение 3. Графическое оформление конструкции скважины.....	13
Приложение 4. Значения рекомендуемых нагрузок на один основной резец твердосплавной коронки (даН).....	14
Приложение 5. Удельный расход промывочной жидкости (10^{-3} м ³ /с) на 1м диаметра коронки	14
Приложение 6. Рекомендуемые значения удельной осевой нагрузки для алмазных коронок, 10^4 даН/м ²	14
Приложение 7. Значения удельных нагрузок, окружной скорости вращения долота и скорости восходящего потока промывочной жидкости для бескернового бурения	15
Приложение 8. Исходные данные для расчета режимных параметров канатно-ударного бурения.....	16
Приложение 9. Удельный расход промывочной жидкости.....	16

ВВЕДЕНИЕ

Успех разведочного бурения во многом зависит от правильного выбора конструкции скважины, которая должна обеспечить ее безаварийную проходку при соответствующем качестве буровых работ.

При бурении разведочных скважин применяется различный породоразрушающий инструмент: твердосплавные и алмазные коронки. При бескерновом бурении – лопастные, шарошечные и алмазные долота. При канатно-ударном бурении – плоские, двугавровые, крестовые и округляющие долота. Применение того или иного вида породоразрушающего инструмента зависит от физико-механических свойств горных пород и назначения скважины. Рациональный выбор породоразрушающего инструмента и параметров режима бурения определяют производительность бурения и его экономическую эффективность.

Занятие 1

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИНЫ

Задание: Разработать конструкцию скважины согласно геологического разреза, приведенного в приложении 1, и дать спецификацию бурового инструмента для спуска обсадных труб.

Цель занятия: изучить типы обсадных труб и буровой инструмент для спуска их в скважину. Освоить методику составления конструкции скважины.

1.1. Назначение обсадных труб.

Обсадные трубы служат для крепления стенок скважин в следующих случаях:

- 1) для закрепления устья скважины с целью предохранения его от размыва и отвода промывочной жидкости;
- 2) для закрепления (кондуктором) залегающих сверху наносов и других неустойчивых пород;
- 3) для перекрытия зон разрушенных и раздробленных пород, которые не закрепляются глинистым раствором, а после проходки не могут быть затампонированы быстросхватывающими смесями;
- 4) для перекрытия зон интенсивных и катастрофических поглощений промывочных жидкостей;
- 5) перед пересечением полезного ископаемого (рыхлые руды, бокситы), над которыми залегают неустойчивые породы, дающие осыпи;
- 6) перед переходом с промывки глинистым раствором на промывку технической водой.

1.2. Требования к конструкции скважины.

Конструкция скважины – это схема изменения диаметров бурения, обсадных труб и их глубин, обеспечивающих безаварийную проходку скважины и выполнение геофизических и гидрогеологических исследований при соответствующем качестве бурения.

Конструкция скважины должна быть наиболее простой – малоступенчатой. В этом случае облегчается бурение, сокращается набор бурового инструмента и расход обсадных труб, снижается стоимость работ. Простота конструкции достигается правильным применением качественных промывочных жидкостей и укреплением маломощных зон осложнений без применения обсадных труб. Конструкция скважины должна обеспечивать получение диаметра керна в соответствии с геологическими требованиями и применения форсированных режимов бурения.

1.3. Выбор конструкции скважины

В основу составления конструкции скважины положены следующие факторы: конечный диаметр бурения, определяемый целевым назначением скважины (диаметр бурения по полезному ископаемому, диаметр фильтра для скважины на нефть и газ), устойчивостью пород геологического разреза и необходимостью их укрепления обсадными трубами (смотри пункт 1.1).

Поэтому конструкция скважины составляется по методу снизу вверх. Вначале определяется конечный диаметр скважины, исходя из требований минимально допустимого диаметра керна по полезному ископаемому (см. приложение 2). Дальше диаметр скважины будет определяться устойчивостью выше залегающих пород и необходимостью их укрепления обсадными трубами.

Для обеспечения нормального спуска обсадных колонн, перекрывающих валунно-галечные отложения или значительные мощности песчано-глинистых пород, а также колонн, подлежащих цементированию, необходимо предусмотреть диаметр скважины на один диаметр больше диаметра колонны. После разработки конструкции скважины

приводится ее описание сверху вниз с обоснованием смены диаметра и установки обсадных колонн.

Конструкция скважины выполняется графически с соблюдением вертикального масштаба. Прилагается спецификация бурового инструмента для спуска обсадных труб в скважину.

Занятие 2

ВЫБОР ТИПА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ

Задание. Выбрать тип породоразрушающего инструмента для вращательного бурения в соответствии с физико-механическими свойствами горных пород (приложение 3), подобрать состав бурового снаряда (компановка колонкового набора, тип и диаметр бурильных труб) и определить параметры режима бурения.

Цель занятия: изучить типы твердосплавных, алмазных коронок и долот для бескернового бурения, а также технологический буровой инструмент: бурильные и утяжеленные трубы, колонковые трубы, переходники, расширители, кернорватели; освоить методику выбора параметров режима бурения.

2.1 Породоразрушающий инструмент для бурения разведочных скважин вращательным способом и область его применения.

Тип породоразрушающего инструмента выбирается с учетом физико-механических свойств горных пород и целевого назначения скважины.

Твердосплавные коронки применяются для бурения горных пород от I до VIII категории по буримости и по конструктивному исполнению подразделяются на ребристые, резцовые и самозатачивающиеся.

Таблица 1

Область применения твердосплавных коронок

Группа коронок	Тип коронок	Категория пород по буримости								Характеристика пород
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Ребристые	M1, M2, M5	x	x	x	x					Мягкие с прослоями пород средней твердости
Резцовые	СМ-4					x	x	x		Монолитные и перемежающиеся породы. Монолитные и трещиноватые
	СМ-5					x	x			
	СМ-6						x	x		
	СТ-2				x	x	x			
Самозатачивающиеся	СА1						x	x	x	Плотные, тонко и мелкозернистые. Слаботрещиноватые. Перемежающиеся по твердости
	СА2						x	x	x	
	СА4						x	x	x	
	СА5						x	x	x	
	СА6						x	x	x	

Алмазные коронки применяются для бурения твердых и крепких абразивных пород VI-XII категории по буримости.

В настоящее время в зависимости от расположения объемных алмазов выпускаются следующие коронки:

а) однослойные – с расположением объемных алмазов в один слой;

б) импрегнированные – объемные алмазы расположены без определенного порядка, т.е. перемешаны с материалом матрицы;

в) зубчатые – режущая кромка зуба армируется по поверхности крупными полированными алмазами, кроме того, вершина каждого зуба армирована по всему объему импрегнированными алмазами с зернистостью 120-200 шт./карат.

Зубчатые алмазные коронки целесообразно использовать в породах VI-VII категории по буримости.

Однослойные коронки дают наилучшие результаты в плотных, монолитных малоабразивных породах VIII-IX категории по буримости.

Импрегнированные коронки рекомендуют использовать в твердых, трещиноватых и абразивных породах X-XII категории по буримости.

Бурение скважин сплошным забоем осуществляется при детальной разведке, по хорошо изученным вмещающим породам. Для бурения применяются лопастные, шарошечные и алмазные долота.

Таблица 2

Область применения долот при бескерновом бурении

Тип долота	Категория пород по буримости										Характеристика пород
	I-IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
Лопастные долота	x										Мягкие и пластичные породы
2Д	x										
3Л	x										
ИР		x	x	x							
ИРГ		x	x								
Пикобуры	x	x									
Шарошечные											Мягкие с пропластками пород средней твердости. Средней твердости. Твердые породы
МС	x										
С		x	x	x							
Т				x	x	x					
ТК						x	x				С пропластками крепких пород. Крепкие. Весьма крепкие. Малоабразивные твердые
К							x	x			
ОК								x	x		
ДДА				x	x	x				x	
Дисковое долото		x	x								Средней твердости
Алмазные долота											Плотные, монолитные породы. Крепкие, абразивные породы
08А3 и											
09А3				x	x	x					
08И3							x	x	x		

Шарошечные долота имеют различную конструкцию. Конструктивные особенности долота указываются в его шифре. Первые цифры в шифре долота указывают количество шарошек (I, II, III), после дефиса указывается диаметр, тип долота, а после второго дефиса – система промывки (Ц – центральная, Г – гидромониторная) и тип опоры (А – с двумя подшипниками скольжения, В – с подшипником качения).

Например, долото II-132 М-ГВ

Долото двухшарошечное, диаметр 132 мм, тип М, с гидромониторной промывкой, опора на подшипнике качения.

2.2. Компоновка бурового снаряда

Колонковый набор – часть бурового снаряда, предназначенная для разрушения горной породы, приема и сохранения керна. Простейший колонковый набор состоит из породоразрушающего инструмента, колонковой трубы и переходника. В колонковый набор могут также входить расширитель (при алмазном бурении), кернорватель и шламовая труба.

При бурении сплошным забоем в зависимости от диаметра бурения могут применяться различные компоновки бурового снаряда. При бурении скважин небольшого диаметра (76-112 мм) компоновка бурового снаряда состоит из долота, утяжеленных бурильных труб (УБТ) и бурильных труб. При бурении скважин диаметром более 151 мм в состав бурового снаряда включают долото, направляющую трубу, УБТ. При бурении хрупких пород большим диаметром буровой снаряд состоит из долота, шламовой трубы закрытого типа, УБТ. Шламовая труба служит для сбора шлама, который не может быть вынесен потоком промывочной жидкости на поверхность.

2.3. Проектирование параметров режима бурения.

При вращательном бурении параметрами режима бурения являются: осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент, частота вращения и расход промывочной жидкости.

2.3.1. Твердосплавное бурение

Осевую нагрузку на твердосплавную коронку определяют, исходя из рекомендуемой нагрузки на один резец (объемный), обеспечивающий объемный процесс разрушения породы, и рассчитывают по формуле

$$P = p_0 * t \quad (2.1)$$

где P – осевая нагрузка на коронку, даН;

p_0 – рекомендуемая нагрузка на один основной резец, даН;

t – число основных резцов в коронке, шт;

При бурении трещиноватых или переслаивающихся пород с резким различием по твердости следует уменьшать рекомендуемую нагрузку на 30-50%.

Частота вращения коронки рассчитывается: исходя из рекомендуемых значений окружной скорости вращения коронки, которые применяются тем больше, чем меньше диаметр коронки.

Частота вращения коронки в об/мин рассчитывается по формуле

$$n = \frac{v_0 * 60}{\pi * D_{cp}} \quad (2.2)$$

где v_0 – окружная скорость коронки, м/с;

D_{cp} – средний диаметр коронки, м;

$$D_{cp} = \frac{D_n + D_{вн}}{2}$$

где D_n – наружный диаметр коронки, м;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр коронки, м.

Рекомендуемые окружные скорости для твердосплавных коронок приведены ниже:

Коронки	Резиновые	Резцовые	Самозатачивающиеся
v_0 , м/с	0,7-1,5	1-2,5	0,7-1,5

При бурении трещиноватых пород и неоднородных по твердости рекомендуется снижать частоту вращения коронки на 20-30%. При увеличении глубины скважины частота вращения должна уменьшаться, так как возрастают затраты мощности на холостое вращение бурового снаряда.

Количество промывочной жидкости выбирается в зависимости от физико-механических свойств горных пород, диаметра бурения. Расход промывочной жидкости можно определить по формуле

$$Q = k * D \quad (2.3)$$

где Q – расход промывочной жидкости, м³/с

k – удельный расход промывочной жидкости на 1 м диаметра коронки, м³/с

D – наружный диаметр коронки, м

2.3.2. Алмазное бурение

Экспериментальными исследованиями установлено и практикой бурения доказано, что наибольшее влияние на механическую скорость алмазного бурения оказывает частота вращения. В связи с этим алмазное бурение целесообразно вести при возможно высокой частоте вращения коронки, допускаемой состоянием бурового снаряда, а также характером разбуриваемых пород и при отсутствии вибрации или возможном ее снижении.

Осевая нагрузка на коронку определяется с учетом физико-механических свойств горных пород и заданной частоты вращения коронки. Оптимальная осевая нагрузка может быть рассчитана на основании значений удельной нагрузки на 1 м рабочей площади торца алмазной коронки рекомендуемой для различных категорий пород по формуле

$$P = p_0 * S \quad (2.4)$$

где P – осевая нагрузка на коронку, даН;

p_0 – удельная нагрузка на 1 м² площади торца коронки, даН/м²;

S – площадь торца алмазной коронки (за вычетом площади промывочных каналов), м²;

Частота вращения коронки рассчитывается по формуле (2.2)

Рекомендуемые значения окружной скорости коронки, м/с

Для пород VIII-IX категории	3-4
Для пород X-XI категории	2-3
Для пород XII категории	1,5-2

Расход промывочной жидкости можно определить по формуле (2.3). Рекомендуемые значения удельного расхода промывочной жидкости для различных типов алмазных коронок приведены в приложении 9.

2.3.3. Бескерновое бурение

Осевая нагрузка при бурении сплошным забоем оказывает существенное влияние на механическую скорость бурения. При увеличении диаметра бурения и крепости пород осевую нагрузку необходимо повышать. Осевую нагрузку на долото можно рассчитать по формуле

$$P = p_0 * D \quad (2.5)$$

где P – осевая нагрузка на долото, даН;

p_0 – удельная нагрузка на 1 м диаметра долота, даН;

D – диаметр долота, м;

При больших значениях осевой нагрузки, рассчитанной по формуле (2.5), могут использоваться УБТ, которые передают большую часть осевой нагрузки на долото за счет своего веса, создают направление скважине и улучшают условия работы бурильных труб. В данном случае длина УБТ рассчитывается по формуле

$$L = \frac{k * P}{q * g \left(1 - \frac{\gamma_p}{\gamma}\right) * \cos \theta} \quad (2.6)$$

где L – длина УБТ, м;

k – коэффициент увеличения веса УБТ относительно осевой нагрузки (принимается);

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

q – вес 1 метра УБТ, даН;

γ – удельный вес материала УБТ, кг/м³;

γ_p – удельный вес промывочной жидкости, кг/м³;

θ – зенитный угол, ...°

Число труб в колонне УБТ определяется по формуле

$$n = \frac{L}{l}$$

где L – длина УБТ, м;

l – длина одной трубы, м;

Частоту вращения долота (в об/мин.) можно рассчитать по формуле

$$n = \frac{60v_0}{\pi D} \quad (2.7)$$

где v_0 – окружная скорость долота, м/с;

D – диаметр долота, м.

Расход промывочной жидкости определяется, исходя из скорости восходящего потока промывочной жидкости и площади кольцевого пространства скважины

$$Q = 0,785 * (D^2 - d^2) * v \quad (2.8)$$

где Q – расход промывочной жидкости, м³/с;

D – диаметр долота, м;

d – наружный диаметр бурильных труб, м;

v – скорость восходящего потока промывочной жидкости, м/с;

При оформлении задания дать обоснование выбора типа породоразрушающего инструмента, типа колонкового набора и колонны бурильных труб. Дать эскиз компоновки бурового снаряда, с указанием назначения каждого из его элементов.

Занятие 3

ВЫБОР ТИПА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ КАНАТНО-УДАРНОГО БУРЕНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА БУРЕНИЯ

Задание. Выбрать тип долота и состав бурового снаряда для канатно-ударного бурения в соответствии с физико-механическими свойствами горных пород и рассчитать параметры режима бурения.

Цель задания – изучить типы долот для канатно-ударного бурения и область их применения, а также состав и конструкцию бурового снаряда. Освоить методику расчета параметров режима бурения.

3.1. Область применения канатно-ударного бурения

Канатно-ударное бурение применяется при:

- 1) сооружении разведочных и эксплуатационных скважин на воду;
- 2) разведке россыпных месторождений и мелковкрапленных руд;
- 3) бурение технических скважин: для замораживания водоносных пород, водопонижения, вентиляции подземных выработок и т.д.;
- 4) бурение взрывных скважин при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Буровой снаряд при канатно-ударном бурении состоит из долота, ударной штанги, раздвижной штанги, канатного замка. Для чистки скважины от шлама применяют желонки.

При бурении скважин применяют плоские долота, двутавровые, округляющие и крестовые долота. В зависимости от крепости пород угол заострения лезвия долота меняется от 70 до 130° (чем тверже порода, тем больше должен быть этот угол).

Плоские долота служат для бурения в мягких породах. Двутавровые долота применяют при бурении в вязких породах средней твердости. Округляющие долота используют для бурения в твердых породах, а также в трещиноватых породах и валунно-галечных отложениях. Крестовыми долотами бурят в трещиноватых породах.

3.2. Расчет параметров режима бурения

Производительность ударно-канатного бурения зависит от правильно подобранных параметров режима бурения: массы ударного снаряда, высоты его подъема над забоем или высоты сбрасывания, частоты ударов и количества подливаемой воды в скважину.

Вес рабочей части снаряда (в даН) определяется по формуле

$$M_p = D * m_o \quad (3.1.)$$

где D – длина лезвия долота, см;

m_o – относительный вес (даН/см), приходящийся на 1 см лезвия долота, даН/см;

Величина относительного веса бурового снаряда выбирается, исходя из крепости горных пород:

- 1) по мягким породам (I-III категории по буримости) 15-25 даН/см;
- 2) по породам средней твердости (IV-V категории буримости) 30-40 даН/см;
- 3) по твердым породам (VI категории буримости) 40-50 даН/см;
- 4) по весьма твердым породам (VIII категории буримости) 60-80 даН/см.

Необходимый вес ударной штанги определяется по формулам:

$$M_2 = M_p - (M_1 + 0,5M_3), \text{ даН} \quad (3.2)$$

при работе без раздвижной штанги

$$M_2 = M_p - (M_1 + M_4), \text{ даН} \quad (3.3)$$

где M_1 – вес долота, даН;

M_2 – вес ударной штанги, даН;

M_3 – вес раздвижной штанги, даН;

M_4 – вес канатного замка, даН

Современные буровые станки канатно-ударного бурения обеспечивают высоту подъема снаряда над забоем на 0,35 – 1 м и частоту ударов от 40 до 60 в 1 мин. В зависимости от характера пород и глубины скважины задаются высотой сбрасывания снарядов, после чего определяют частоту ударов (уд/мин)

$$n_y = 21 \sqrt{\frac{b}{S}} \quad (3.4)$$

где b – ускорение падения снаряда в шламовой среде, м/с²;

S – высота сбрасывания снаряда, м.

При бурении по глинистым породам принимают $b=4,5-5$ м/с², по твердым породам $b=6-6,5$ м/с².

Высота сбрасывания снаряда увеличивается при бурении по твердым монолитным породам, а частота ударов снижается. При бурении пород сильно - трещиноватых или слоистых, перемежающихся по твердости следует увеличивать частоту ударов, уменьшать высоту сбрасывания снаряда. С ростом глубины бурения высоту сбрасывания снаряда нужно увеличивать, а частоту ударов снижать.

При бурении мягких пород рекомендуется на каждый рейс подливать в скважину 35-40 л. воды, а при бурении твердых пород – 10-15 л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.С., Долгов Б.П. Вращательное бурение разведочных скважин.-М.: Недра, 1988, 318с.
2. Волков А.С., Буровой геологоразведочный инструмент.-М.: Недра, 1979, 285с.
3. Володин Ю.И. Руководство к практическим занятиям и сборник задач по бурению скважин.-М.: Недра, 1987, 204с.
4. Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения.-М.: Недра, 1985, 197с.
5. Шамшев Ф.А., Тараканов С.Н., Кудряшов Б.В. Технология и техника разведочного бурения.-М.: Недра, 1983, 564 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1

Исходные данные для составления конструкции скважины

Геологический разрез	Категория пород	Номера вариантов и мощность слоя, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Почвенно-растительный слой	II	2	3	1	1,5	4	2,5	3,5	5	4,5	5
		3	4	2	5	6	4,5	5,5	6	5,5	7
Суглинки	III	5	6	7	8	10	15	20	30	40	50
		8	10	9	12	15	20	30	40	50	60
Песок среднезернистый	II	3	4	5	6	8	9	10	12	14	16
		4	6	7	9	10	12	14	16	18	20
Известняк трещиноватый (зона поглощения)	V	10	15	20	30	40	50	60	70	25	35
		20	30	40	50	60	70	80	90	45	45
Мергель	VI	30	50	60	80	40	25	15	35	45	70
		40	60	70	90	50	30	25	55	60	65
Песок разномзернистый	I	15	40	35	50	45	30	25	55	18	42
		20	25	45	35	60	50	55	65	28	65
Глины плотные	IV	40	50	60	70	65	70	65	75	80	85
		25	35	45	50	60	30	45	55	90	100
Бокситы	VI	1	2	3	2,5	3,5	5	5,5	2,6	2	1,5
		2	3	4	3,5	4,5	6	6,5	3	2,5	4
Глины углистые	IV	1	1,5	2	1,4	1,8	3,4	4,2	2	1,4	2,5
		2,2	2,5	3	1,6	2,2	4,4	5,2	1,8	3	1,6

Таблица П.1.2

Исходные данные для составления конструкции скважины

Геологический разрез	Категория пород	Номера вариантов и мощность слоя, м											
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Суглинок	III	3	5	4	2	3,5	4,6	5	6	7	8	9	5
		4	6	8	3	5,5	7	9	5,5	4	6	7	9
Кварцево-хлоритовый сланец, трещиноватый	V	10	15	20	30	40	25	35	45	50	60	70	80
		15	20	25	23	37	48	52	65	49	86	67	58
Серпентинит сильно трещиноватый	VI	30	40	60	35	55	65	75	35	45	40	38	28
		40	50	70	45	65	80	36	58	26	46	68	84
Метасоматит хлористокарбонатный	VIII	60	80	58	65	76	48	34	28	62	54	58	86
		48	54	68	52	78	86	46	34	62	78	96	100
Туфопесчаник	IX	50	70	80	65	45	38	26	48	54	66	87	96
		34	65	82	54	86	68	76	56	42	75	62	96
Медный колчедан	VII	2	4	3	6	8	10	5	12	8	14	16	3
		3	5	2,5	7	6	8	4	9	4	6	4	2
Альбитофир	XI	4	1	5	6	8	12	14	5	7	9	4	15
		6	12	15	4	10	8	6	4	11	18	6	8

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Рекомендуемый диаметр керна по полезному ископаемому

Тип полезного ископаемого	Минимальный диаметр керна, мм	Диаметр скважины, мм
Железный кварцит	32	46
Титаномагнетит	32	46
Медно-никелевые руды	32	46
Медно-колчеданные руды	32	46
Медистый песчаник	22	36
Медно-порфиновые руды		59
Бокситы	32-42	46-59
Свинцово-цинковые руды	22-42	46-59
Вольфрамо-молибденовые руды	32-42	46-76
Золотоносные шляпы	32	46
Оловянные руды	32-42	46-59
Редкометалльные	42-60	59-76
Уголь	60	76

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Графическое оформление конструкции скважины

Геологический разрез	Можность слоя, м	Конструкция скважины
Почвенно-растительный слой	3	
Суглинки	10	
Песок среднезернистый	16	
Глины плотные	20	
Мергель сильнотрещиноватый (поглощение)	30	
Песок	10	
Глины	20	
Бокситы	5	
Глины углистые	6	

Примечание: Ø - обозначение диаметра;
 Вертикальный масштаб
 М 1:10 или М 1:20

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Значения рекомендуемых нагрузок на один основной резец твердосплавной коронки (даН)

Группа и тип коронки	Категория пород по буримости				
	I-II	III-IV	V	VI	VII-VIII
Ребристые					
M1	30-50	50-60	-	-	-
M2	-	60-80	-	-	-
M5	-	40-60	-	-	-
Резцовые					
CM3	-	40-50	50-80	80-100	-
CM4	-	-	50-60	60-80	-
CM5	-	-	40-50	50-60	-
CM6	-	-	-	-	60-70
CT2	-	40-60	60-80	80-100	-
Самозатачивающиеся					
CA-1	-	-	30-50	40-80	50-100
CA-2	-	-	-	40-60	50-80
CA-4	-	-	-	40-60	50-80
CA-5	-	-	-	40-60	50-80
CA-6	-	-	-	40-60	50-80

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Удельный расход промывочной жидкости ($10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) на 1м диаметра коронки

Группа коронок	Категория пород по буримости				
	I-II	III-IV	V	VI	VII-VIII
Ребристые	17-20	20-27	-	-	-
Резцовые	-	-	20-23	17-20	15-17
Самозатачивающиеся	-	-	-	17-20	15-17

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Рекомендуемые значения удельной осевой нагрузки для алмазных коронок, $10^{-4} \text{ даН}/\text{м}^2$

Тип коронки	Категория пород по буримости			
	VII	VIII-IX	IX-X	XI-XII
Однослойные	60	60-75	-	-
Импрегнированные	-	-	75-90	100-170

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Значения удельных нагрузок, окружной скорости вращения долота и скорости восходящего потока промывочной жидкости для бескернового бурения

Тип долота	$P * 10^3$ даН/м	v_0 , м/с	v , м/с
Лопастные			
2Л	6-7,5	0,8-2,0	0,6-1
3Л	8-12	0,8-1,5	
ИР	8-15	0,8-1,2	
Пикобуры	4,5-9,5	0,8-1,4	
Шарошечные долота			
М	15-25	0,8-1,2	0,6-1 (вода) 0,4-0,8 (гл.раствор)
С	20-35	0,8-1,4	
Т	20-40	0,6-1,2	
ТК	20-45	0,6-1,0	
К и ОК	20-30	0,6-0,8	
Дисковые долота	20-30	1,0-1,6	
ДДА	30-40	0,75-1,5	
Алмазные долота			
08А3 и 09А3	24-32	0,8-1,7	0,5-0,8 (вода) 0,4-0,8 (гл.раствор)
08ИЗ	25-35	1,0-2,0	

Исходные данные для расчета режимных параметров канатно-ударного бурения

№ задания		Глубина бурения, м		Описание пород	Диаметр скважины, мм	
					Дресва III категории	495	445
3	4	80	120	Известняк IV категории	345	148
5	6	100	150	Конгломерат V -"	248	198
7	8	90	200	Мрамор IV -"	298	148
9	10	60	150	Мергель IV -"	395	198
11	12	30	50	Суглинок II -"	495	445
13	14	10	30	Глина III -"	345	395
15	16	180	250	Опока IV -"	198	148
17	18	120	190	Сланец глинистый V -"	248	148
19	20	250	300	Порфирит VI -"	198	148
21	22	200	280	Туф VII -"	248	198
23	24	40	50	Сланец кремнистый V -"	345	445
25	26	80	100	Сerpентинит V -"	248	198
27	28	50	60	Порфирит VI -"	345	298
29	30	25	45	Глина III -"	248	445
31	32	160	280	Песчаник VI -"	198	148
33	34	100	120	Альбит IV -"	298	198
35	36	30	40	Галечно-щебенистые отложения IV -"	495	445
37	38	10	20	Галечник крупный V -"	345	298
39	40	20	35	Гранит выветренный IV -"	298	248
41	42	80	120	Гнейс VI -"	248	148
43	44	110	150	Гранит VII -"	198	148
45	46	150	230	Диабаз VI -"	248	198
47	48	200	300	Габбро VI -"	198	148
49	50	60	130	Песчаник трещиноватый IV категории	298	345

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Удельный расход промывочной жидкости при алмазном бурении ($10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$)

Коронки	Характеристика горных пород	Удельный расход жидкости, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$
Однослойные	Малоабразивные	12-17
	Абразивные	13-20
Импрегнированные	Малоабразивные	5-10
	Абразивные	8-13



МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»

В.Н. Калашников, Г.А. Усов,
Л.И. Кралина, Ф.П. Сердюков

**Методические указания
по выполнению практических занятий
по дисциплинам «Бурение скважин»,
«Техника разведки»,
«Сооружение нефтяных, газовых и
геотехнологических скважин»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
Специализация № 3 Технология и техника разведки МПИ
очного и заочного обучения**

Екатеринбург
2020

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в разведочном колонковом бурении достигнуты значительные успехи по улучшению качества и совершенствованию составов промывочных жидкостей. Этому в большой степени способствовало применение прогрессивных способов бурения малыми диаметрами и увеличение глубин скважин.

При бурении разведочных скважин стали широко применяться малоглинистые и безглинистые промывочные жидкости, аэрированные растворы, активные промывочные жидкости с улучшенными смазочными свойствами. Значительное внимание стало уделяться реологии промывочных жидкостей.

В связи с этим расширился ассортимент приборов для оценки качества промывочных жидкостей и были разработаны новые методы их определения.

Настоящие методические разработки имеют цель ознакомить студентов со всеми приборами и методами оценки структурно-механических, реологических и смазочных свойств промывочных жидкостей, применяемых в разведочном бурении.

В соответствии с ГОСТ 8.002-71 все средства измерений должны пройти государственную или ведомственную поверку. На пригодный к измерениям прибор выдается свидетельство или наносится клеймо с указанием даты поверки.

Приборы и методы оценки структурно-механических свойств промывочных жидкостей

Основными структурно-механическими свойствами промывочных жидкостей являются:

- 1) удельный вес, г/см³;
- 2) условная вязкость, с ;
- 3) водоотдача, см³ за 30 мин;
- 4) содержание песка, %;
- 5) стабильность, г/см³;

- 6) суточный отстой, %;
- 7) статическое напряжение сдвига, Па ;
- 8) динамическое напряжение сдвига, Па ;
- 9) пластическая или структурная вязкость, Па · с;
- 10) эффективная вязкость, Па · с.

Первые шесть параметров определяются непосредственно на буровых вышках с помощью приборов и лабораторной посуды, входящих в комплект переносной лаборатории ЛРГ-3. Приборы и лабораторная посуда размещены в специальном деревянном ящике с гнездами и креплениями для каждого предмета, входящего в комплект лаборатории.

Статическое и динамическое напряжение сдвига, а также пластическая и эффективная вязкость определяются в стационарных лабораториях геологоразведочных партий и экспедиций с помощью приборов СНС-2 и ВСН-3.

АРЕОМЕТР АГ-2

Назначение: Ареометр АГ-2 предназначен для измерения удельного веса глинистых и цементных растворов, применяющихся при бурении скважин.

ОПИСАНИЕ АРЕОМЕТРА

Ареометр АГ-2 (рис. 1) состоит из поплавка 3 со шкалой 2, соединяющегося на байонете 4 с мерным стаканом 5, и съемного груза 6, крепящегося к стакану. В комплекте с ареометром поставляется ведро-футляр 1 с крышкой, в котором он укладывается между резиновыми гнездами.

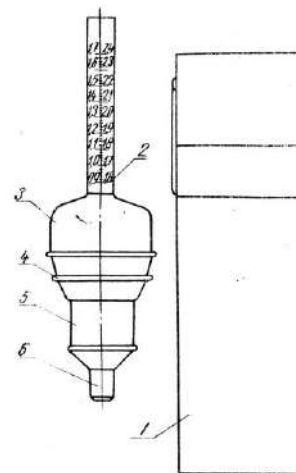


Рис. 1. Ареометр АГ-2 в сборе и ведро-футляр

Техническая характеристика

Ареометр АГ-2 имеет два предела измерения: от 0,90 до 1,70 г/см³ - при накрутом съемном грузе, от 1,60 до 2,40 г/см³ - при снятом съемном грузе.

Цена деления ареометра на шкале.....	0,02
Точность измерения, г/см ³	±0,01
Габаритные размеры, мм:	
ареометра.....	100x450
ведра-	
футляра.....	120x480
Вес комплекта, кг.....	2

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ИЗМЕРЕНИЯ

Подготовка прибора к измерению

Подготовку прибора к измерению следует производить в следующей последовательности:

открыть крышку ведра и вынуть ареометр, налить воду в ведро (рекомендуется применять чистую пресную воду, так как в этом случае получаются наиболее точные результаты измерения и не требуется вносить поправку на удельный вес воды),

поворотом поплавка относительно мерного стакана открыть байонетный затвор и отделить стакан от затвора, проверить чистоту мерного стакана и поплавок и при надобности вымыть их водой.

Проверка прибора

Проверку прибора следует производить в следующей последовательности: налить в мерный стакан ареометра воду до края гофра, соединить поплавок с мерным стаканом, выдавив при этом избыток воды из него, и погрузить собранный ареометр в воду. Стакан заполняется той же водой, что и ведро.

При пресной воде ареометр должен погрузиться под уровень воды в ведре до деления на шкале поплавок, обозначенного "1,0", при навернутом съемном грузе, с точностью $>0,005 \text{ г/см}^3$ (четверть деления).

Если удельный вес воды больше $1,00 \text{ г/см}^3$ (морская вода, соленая, буровая), то ареометр погрузится на несколько делений ниже деления, обозначенного "1,0". В этом случае к результатам измерений удельного веса глинистых растворов необходимо прибавить поправку, определяемую как разность между 1,00 и показанием ареометра, заполненного водой.

Ниже приводится пример измерения.

Измерение производится погружением ареометра в морскую воду. Ареометр, заполненный морской водой, при погружении в эту же воду показал на шкале 0,96. Поправка составляет $1,00 - 0,96 = 0,04 \text{ г/см}^3$

При измерении удельного веса глинистого раствора при погружении в эту же морскую воду показание было 1,41. Истинный удельный вес раствора получается прибавлением поправки, а именно:

$$1,41 + 0,04 = 1,45 \text{ г/см}^3$$

Измерение удельного веса

Измерение удельного веса при помощи ареометра АГ-2 следует производить в следующей последовательности.

Принести в вымытой крышке ведра пробу раствора и перемешать её.

Налить в мерный стакан ареометра раствор до края гофра. Стакан держать в вертикальном положении.

Соединить поплавок со стаканом - вставить штифты на

нижней части поплавок в байонетные прорези мерного стакана и повернуть поплавок относительно стакана слева направо до упора. При этом из стакана выдавить избыток раствора. Таким образом отмерится объем пробы.

Смыть водой выдавленный раствор с поверхности мерного стакана, удерживая ареометр в вертикальном положении.

Погрузить ареометр в ведро с водой, дать ему успокоиться и прочесть показание по шкале ареометра на уровне воды в ведре

При навернутом съемном грузе отсчет вести по левой шкале с оцифровкой от 0,9 до $1,7 \text{ г/см}^3$. Если ареометр при навернутом съемном грузе погрузился выше последнего оцифрованного деления на шкале - $1,7 \text{ г/см}^3$, то следует снять груз и отсчет вести по правой шкале с оцифровкой от 1,6 до $2,4 \text{ г/см}^3$.

При погружении ареометра в соленую, морскую или буровую воду обязательно вносить поправку, как указано выше.

После окончания измерения ареометр следует вымыть, насухо вытереть и положить в тумбочку.

Крышку ведра вымыть и закрыть её ведром с водой. При частых намерениях воду из ведра можно не выливать, но обязательно следует следить за её чистотой.

2. ВИСКОЗИМЕТР СПВ-5

Назначение: Стандартный полевой вискозиметр СПВ-5 предназначен для определения условной вязкости глинистого раствора. Вязкость определяется в секундах времени истечения 500 см^3 раствора из стандартной воронки через трубку диаметром проходного сечения 5 мм и длиной 100 мм при заполнении воронки 700 см^3 раствора.

Комплект вискозиметра (рис. 2) состоит из стандартной воронки и мерной кружки.

В верхнюю часть воронки встроена сетка для очистки раствора от крупных твердых частиц. Воронка заканчивается латунной трубкой с калиброванным отверстием.

Мерная кружка имеет два отделения.

Техническая характеристика

Размеры воронки, мм:	
Высота.....	400
верхний диаметр.....	150
время истечения из воронки 500 см ³ воды, с.....	15-+0,4
Объем мерной кружки, см ³ :	
первого отделения.....	500
второго отделения.....	200
Размеры кружки, мм.....	70x190

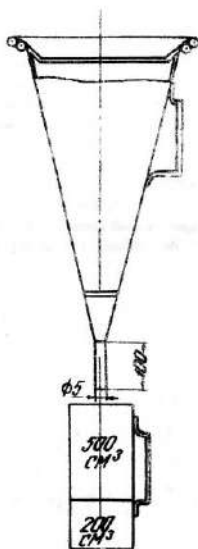


Рис. 2. Вискозиметр СПВ – 5 с кружкой

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ИЗМЕРЕНИЙ

Определение условной вязкости глинистых растворов при помощи вискозиметра СПВ-5 следует производить в следующей последовательности:

- промыть воронку вискозиметра и кружку водой и подготовить пробу раствора;
- закрыть отверстие трубки пальцем правой руки и налить в воронку через сито 700 см³ испытуемого раствора мерной кружкой - 500 см³ и 200 см³

с) подставить кружку объемом 500 см³ под трубку вискозиметра, слить в нее часть раствора и влить обратно его в воронку. Повторить эту операцию два-три раза;

д) подставить кружку объемом 300 см³ под трубку вискозиметра и одновременно открыть отверстие трубки, убрать палец, и пустить левой рукой секундомер;

е) в момент заполнения кружки до края остановить секундомер, закрыть отверстие трубки пальцем и прочесть показание секундомера;

ф) для определения условной вязкости испытуемого раствора провести 10-15 замеров и, применяя распределение Стьюдента, определить среднее значение \bar{A} и доверительный интервал δ при выбранной вероятности P ;

г) вымыть и вытереть воронку и кружку и вложить их в ящик лаборатории в соответствующие гнезда.

3. ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ВОДООТДАЧИ ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ ТИПА ВМ-6

Назначение: Прибор ВМ-6 предназначен для определения фильтруемости водоотдачи глинистых растворов в производственных условиях бурения.

Показатель водоотдачи глинистых растворов представляет собой количество фильтрата в см³, выделяющегося в течение 30 мин под избыточным давлением в 1 кг/см² при диаметре фильтра 75 мм.

Показатель водоотдачи характеризует способность глинистого раствора отдавать свободную воду под давлением через пористую перегородку в пласт и образовывать на этих перегородках глинистую корку.

Прибор градуирован в кубических сантиметрах при диаметре фильтра 75 мм.

При измерении водоотдачи раствора одновременно определяют толщину образующейся на фильтре глинистой корки.

Описание конструкции

Прибор ВМ-6 (рис. 3.) состоит из трех основных узлов; фильтрационного стакана 6 с принадлежностями, напорного цилиндра 4 и Кронштейна 13.

Фильтрационный стакан 6 на верхнем конце имеет горловину с наружной резьбой и отверстием. Нижний конец его имеет расточку

диаметром 53 мм, выточку под решетку фильтра и наружную резьбу М68х3 под поддон 10, которым крепится решетка 7.

Для предупреждения проворачивания решетки и поддержания в связи с этим фильтровальной бумаги на решетке сделан пав под выступ, имеющийся в выточке фильтрационного стакана. В нижней части поддона 10 имеется резьба, в которую ввернут винт 11 с перекидной ручкой 12. В поддон вложен клапан 9 с резиновой прокладкой, который винтом 11 прижимается к решетке 7 и таким образом запирает отверстие.

При определенной водоотдачи раствор наливается в стакан с закрытым клапаном решеткой и вложенной фильтровальной бумагой.

Узел напорного цилиндра состоит из собственно цилиндра 4 в ввернутой в него на красно-медной прокладке втулкой и напрессованной в горячем виде чашкой, плунжера 1, притертого по втулке, и груза-шкалы 3, укрепленного на плунжере. Шкала нанесена на прозрачную пластмассу (оргстекло) и прикреплена к грузу винтами; шкала прикрывает сквозную прорезь на снятой вдоль груза лыске. Сквозь эту прорезь видна отсчетная риска 2 на верхнем конце втулки цилиндра.

Для установки шкалы прибора на ноль и для спуска масла из цилиндра в нижней части цилиндра имеется отверстие, перекрываемое иглой 5. Масло из этого отверстия сливается в чашку.

Нижний конец цилиндра имеет внутреннюю резьбу для соединения с фильтрационным станком. Для уплотнения места соединения цилиндра со стаканом предусмотрена прокладка из маслостойкой резины, которая меняется по мере износа. Размеры прокладки: наружный диаметр - 35 мм, диаметр отверстия - 20

мм, толщина 3 * 4 мм.

Кронштейн 13 литой, в нижней части его предусмотрено место для чашки, в которую стекает фильтрат. Кронштейн стоит на трех резиновых ножках 14. В кольцо 10 кронштейна вставляется прибор в собранном виде.

Техническая характеристика

Предел измерения за 30 мин при диаметре фильтра 75 мм, см³. 40
Цена деления шкалы при диаметре фильтра 75 мм, см³..... 1
Точность измерения, см³.....±0,5
Давление фильтрации, Па9,81*10⁴
фактический диаметр фильтра, мм53
Габаритные размеры, мм.....120x160x360
Вес (без упаковки), кг.....0,7

Принцип действия:

Испытуемый раствор наливается в фильтрационный стакан 6, (рис. 3) с фильтром на решетке 7; закрытым клапаном 9, впредь до открытия которого фильтрация не начинается. На фильтрационный стакан наверх цилиндра 4, заполненный поверх раствора маслом. В этот цилиндр входит плунжер 1 с грузом-шкалой 3, создающий давление фильтрации 98066,5 Па фильтрация начинается после открытия клапана 9.

По мере фильтрации объем пробы раствора в фильтрационном стакане уменьшается на количество выделившегося фильтрата и плунжер под действием груза соответственно опускается. Количество выделившегося фильтрата определяется по перемещениям плунжера, градуированным на шкале в см³.

В притертой паре плунжер-втулка возникает трение, влияющее на постоянство давления фильтрации. Для устранения трения плунжер необходимо периодически вращать рукой. С целью уменьшения этих вращений в плунжере имеется глухое сверление - воздушный буфер.

Принцип действия прибора обеспечивает:

- а) точное определение момента, начала фильтрации при помощи запорного клапана на решетке фильтра;
- б) точное измерение количества фильтрата, которое выделяется за любой промежуток времени;

с) постоянство давления с момента начала фильтрации.

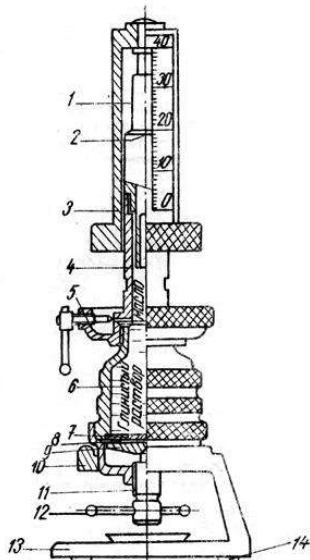


Рис. 3. Прибор ВМ-6 в сборе

Подготовка прибора к работе

Для предупреждения ржавления прибор ВМ-6 при упаковке на заводе смазывается снаружи и внутри вазелином. При длительном хранении в неблагоприятных условиях вазелин может загустеть и частично окислиться, в результате чего плунжер будет трудно вынуть из цилиндра. Поэтому по получении со склада прибор следует разобрать в следующем порядке:

- а) отвернуть цилиндр от стакана;
- вынуть плунжер из цилиндра (при необходимости плунжер можно извлечь осторожными ударами деревянного молотка по его нижнему концу);
- б) вывернуть винт из поддона;
- с) вывернуть стакан из поддона и извлечь решетку и клапан.

Все детали прибора вымыть бензином или горячей водой и насухо вытереть, а плунжерную пару вымыть керосином и смазать маслом. Не смазанный маслом плунжер во втулку не вставлять.

Чтобы убедиться в исправности прибора, необходимо проверить:

- а) резьбовые соединения (при надобности их следует расходить, чтобы они легко заворачивались от руки);
- б) герметичность плунжерной пары и места соединения цилиндра со стаканом;
- с) плавность движения плунжера.

Проверка герметичности производится следующим образом:

- а) в собранный фильтрационный стакан с вложенной в него фильтровальной бумагой и закрытым на решетке фильтра клапаном наливается густой глинистый раствор;
- б) стакан устанавливается в кронштейне и на него наворачивается цилиндр без плунжера;
- с) цилиндр заполняется маслом до верха, после чего в него вставляется плунжер;
- д) с помощью иглы из цилиндра спускается масло, и нулевое деление на шкале подводится к риску на цилиндре. При такой операции плунжер следует вращать рукой;
- е) места резьбовых соединений и поверхность цилиндра должны быть насухо вытерты, чтобы можно было обнаружить места утечки;
- ф) периодически вращая плунжер, в течение 30 минут наблюдают за его показаниями, в исправном приборе заметного изменения показаний не должно быть; максимальное изменение может быть не более 1/2 деления.

Если утечка больше 1/2 деления, то необходимо выявить место утечки. Утечка может быть в плунжерной паре, местах крепления втулки к цилиндру и соединения цилиндра со стаканом, в местах неплотного прилегания клапана, в месте прижатия решетки к стакану.

Об утечке в плунжерной паре и в месте крепления втулки к цилиндру свидетельствуют подтеки, появляющиеся в верхней части цилиндра, который до пуска прибора в работу должен быть чисто вытерт.

Утечки в месте соединения цилиндра со стаканом легко обнаруживаются по появлению масла под резьбой. Это место также должно быть тщательно вытерто. Ликвидировать утечку

можно сменой прокладки или подтягиванием резьбы. Слишком туго затягивать резьбу не следует, так как при этом прокладка может иногда выворачиваться.

Утечки через клапан в месте прижатия решетки к стакану не оказывают влияния на работу прибора, но при проверке на герметичность их необходимо устранять, для этого клапан следует туго прижать.

Утечки через место прижатия решетки к стакану обнаруживается по появлению раствора или фильтрата на выходе резьбы.

Плавность движения плунжера проверяется при промытой и смазанной машинным маслом плунжерной паре и заключается в том, что плунжер с любого положения должен свободно и равномерно опускаться без поворачивания. Если плунжер задерживается или движется очень медленно, его следует вновь промыть керосином и смазать маслом, после чего расходить во втулке.

ПРОМЫВАТЬ ПЛУНЖЕРНУЮ ПАРУ БЕНЗИНОМ НЕЛЬЗЯ - ЭТО МОЖЕТ ВЫЗВАТЬ ЗАЕДАНИЕ!

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения водоотдачи должно быть произведено при температуре не ниже 10 °С, так как при более низких температурах водоотдача раствора уменьшается.

Работу по определению водоотдачи глинистых растворов следует вести в следующей последовательности:

1. Установить прибор на ровной поверхности.
2. Вынуть плунжер из цилиндра и положить рядом с кронштейном.
3. Отвернуть цилиндр, проверить, закрыта ли игла, и положить цилиндр на тумбочку.
4. Разобрать стакан - вывернуть из поддона, вынуть решетку и клапан - вытереть насухо все детали.
5. Взять заготовленный кружок фильтровальной бумаги, смочить его водой и наложить на решетку, после чего удалить избыток воды с поверхности бумаги, промокнув её сухим кружком. При непрочной фильтровальной бумаге следует положить на решетку два кружка.

6. Решетку с фильтровальной бумагой вложить в выточку стакана, бумагой внутрь так, чтобы паз на решетке попал на штифт в выточке стакана. Наложить на решетку клапан и навернуть поддон на стакан. Винт, крепящий клапан, должен быть вывернут. Вставить собранный стакан в кронштейн и прочно затянуть руками резьбу, после чего клапан закрыть винтом.

7. Подготовить секундомер и положить его рядом с прибором.

8. Взять ведро с пробой раствора, последнюю тщательно перемешать и налить в стакан кружкой от вискозиметра (стороной объемом 200 см³). После окончания вытереть резьбу стакана. Стакан следует заполнить на 3-4 мм ниже края горлышка.

9. Навернуть цилиндр на стакан, предварительно проверить исправность прокладки.

10. Налить в цилиндр машинное масло (масло должно быть не очень густым; слишком густое масло разбавляется керосином). Масло наливается на внутренний край цилиндра так, чтобы оно стекало по стенкам цилиндра. Масло следует наливать до такого уровня, чтобы до верхнего края втулки оставался 1 см.

11. Вставить плунжер в цилиндр. При этом плунжер за счет сжатия воздуха в его плотности просядет на 2-3 см.

12. Приоткрыть спускную иглу и, вращая плунжер рукой за накатку на грузе, подвести нулевое деление на шкале к отсчетной риску на верхнем крае втулки цилиндра.

Неопытному исполнителю это не всегда удается, и нулевое деление опускается ниже риски. В этом случае надо записать показание по шкале против риски, принять его за нуль и из всех следующих показаний вычитать нулевое показание (например: нулевое показание 1,5 см³, показание за 30 минут - 23 см³. Вычитая из 23 см³ 1,5 см³, получаем 21,5 см³).

Нулевое деление может опускаться ниже риски и в случае определения водоотдачи раствора, насыщенного газом (из-за сжатия газа в растворе под давлением). Если в этом случае нулевое деление опустится ниже риски не более чем на шесть делений и водоотдача у раствора будет небольшая, то следует пользоваться тем же приемом, что и в первом случае, т.е. из

показаний вычитать нулевое показание.

Если же нулевое деление опустится ниже, чем на десять делений, то следует вынуть плунжер, перевернуть его, залить его полость маслом, прикрыть отверстие пальцем и вновь вставить в цилиндр. В этом случае шкала остановится на 6-8 делений выше, чем при незаполненной полости плунжера.

Примечание. Операции, перечисленные в пунктах 7, 8, 9, 10 и 11 следует производить быстро, так как при нестабильных растворах за время от момента налива раствора в стакан до момента начала фильтрации может образоваться осадок, из-за чего исказится результат измерения.

13. Взять в левую руку секундомер, а правой открыть клапан, вывернув винт на один - два оборота. В момент открытия клапана пустить секундомер.

14. При производственных измерениях достаточно везть один отсчет через 30 минут. В течение этого времени периодически вначале чаще, вращать плунжер за накатку на грузе.

При взятии отсчетов глаз исполнителя должен находиться на уровне отсчетной риски на втулке цилиндра и на расстоянии от нее около 30-40 см.

15. После взятия отсчета открыть спускную иглу, выпустив масло из цилиндра и опустить плунжер с грузом. После этого при открытой игле вынуть плунжер с грузом. После этого при открытой игле вынуть плунжер из цилиндра и, если его конец запачкан раствором, смыть последний.

16. Закрывать иглу, отвернуть цилиндр со стакана и слить масло из чашки цилиндра в бачок для масла.

17. Промыть фильтрационный стакан, не разбирая его. Для этого подставить его горлышко под слабую струю воды; масло при этом всплывет и уйдет из стакана вместе с водой и раствором. Затем вылить воду и остаток раствора из стакана и разобрать его.

18. Поставить стакан на ладонь левой руки так, чтобы он опирался на нее краями, а не решеткой, и легкими ударами правой ладони по горлышку выбить корку с решеткой.

Если корка прочно прилипла к стенкам стакана, её следует выдуть ртом.

19. Смерить толщину корки и записать.

20. Вымыть и вытереть детали фильтрационного стакана и собрать их.

Вымыть и вытереть цилиндр; проверить, не загрязнена ли внутренняя поверхность втулки цилиндра глинистым раствором, прочистить втулку, смазать её маслом и наверхнуть цилиндр на стакан.

Вставить смазанный маслом плунжер в цилиндр и установить прибор на кронштейн.

21. Прибор следует хранить в собранном виде, в защищенном от пыли месте - в ящике переносной лаборатории или в шкафу.

Примечание: 1. Так как прибор точно воспроизводит кинетику процесса фильтрации, т.е. зависимость количества выделившегося фильтра по времени, и так как эта зависимость, изображенная в логарифмических координатах, представляет собой прямую линию, то на приборе ВМ-6 можно производить фильтрацию в течение 10-15 минут с последующей экстерполяцией по графику. Для этого в комплекте прибора поставляются бланки со специальной логарифмической сеткой.

В этом случае за время определения следует взять не менее двух отсчетов - один за 2 или 3 минуты фильтрации и второй за 10 или 15 минут. Полученные отсчеты наносятся на бланк, который разграфлен девятью вертикальными линиями на минуты (левая крайняя линия соответствует 1-ой минуте, следующие - 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой, 10-ой, 15-ой, 20-ой и 30 минутам), горизонтальными линиями на кубические сантиметры (от 1 до 100 см³). Часть этих линий обозначена цифрами, соответствующими числу кубических сантиметров.

На вертикальной линии, соответствующей 2-ой минуте, в месте её пересечения с горизонтальной линией, соответствующей отсчитанному числу кубических сантиметров, ставится точка. Таким же образом наносится точка, соответствующая отсчету за 10 и 15 минут. Через полученные две точки карандашом проводится прямая линия до пересечения с правой крайней вертикальной линией, соответствующей 30-ти минутам фильтрации.

По шкале горизонтальных линий отсчитывается величина водоотдач в кубических сантиметрах за 30 минут фильтрации, поскольку за единицу водоотдачи глинистых растворов принято количество фильтрата, выделяющегося из раствора за 30 минут через фильтр диаметром 75 мм.

Пользуясь этим приемом, можно сократить время фильтрации до 10 минут и, кроме того, определять водоотдачу раствора большую, чем 40 см^3 за 30 минут.

Ошибка в определении водоотдачи за 30 минут по 10-минутному замеру не превышает $0,5 \text{ см}^3$ при водоотдачах до 20 см^3 и не больше 2 см^3 при больших водоотдачах.

Для сопоставления результатов измерения водоотдачи прибором ВМ-6 с другими приборами, градуированными в кубических сантиметрах, при фильтре диаметром 75 мм, необходимо применять нерасчетный коэффициент. Последний определяется как отношение площадей фильтрации, так как количество фильтрата прямо пропорционально площади фильтрации.

4. ОТСТОЙНИК - ОМ

Назначение: Металлический отстойник ОМ-2 предназначен для определения процента содержания песка в глинистом растворе.

Содержание в глинистом растворе твердых частиц разбуренных пород и нерастворенных комков глины определяется процентом песка в пробе раствора, отстоявшегося за одну минуту покоя в отстойнике из пробы разжиженной водой в отношении 1:9.

Описание прибора:

Отстойник ОМ-2 (рис. 4) представляет собой цилиндрический сосуд 2 с плотной крышкой 1, в нижней части которого укреплена сменная бюретка 3, защищенная чехлом. В верхней части цилиндра на уровне объема 500 см^3 имеется отверстие $\text{Ø} 3 \text{ мм}$.

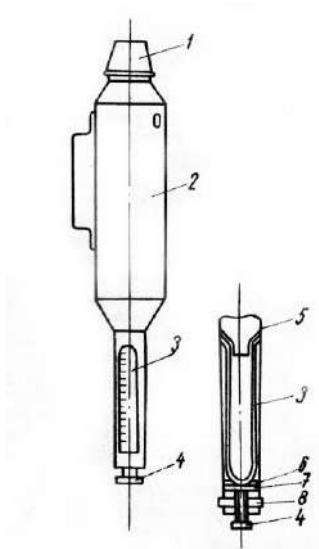


Рис. 4 Отстойник ОМ-2 Крышка отстойника служит для отмеривания раствора.

Крепление бюретки 3 осуществляется при помощи винта 4, через перекладину 5 и шайбу 6 с резиновой прокладкой 7.

Герметизация крепления бюретки обеспечивается резиновой прокладкой 8.

Техническая характеристика

Объем отстойника, см^3	600
Объем крышки, см^3	50
Объем бюретки, см^3	10
Габаритные размеры, мм:	
Диаметр.....	60
Высота.....	345
Вес.....	0,3

Бюретка градуирована через $0,1 \text{ см}^3$, каждое десятое деление шкалы обозначено цифрой.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Определение процента содержания песка в глинистом растворе при помощи отстойника ОМ-2 следует производить в следующей последовательности:

- а) промыть отстойник и вытереть его;
- б) снять крышку отстойника, отмерить ею 50 см³ раствора и влить его в отстойник через горлышко;
- в) не вынимая крышки, зачерпнуть ею воду, растворить в ней оставшийся на её внутренних стенках раствор и влить в отстойник.

С помощью крышки наполнить отстойник водой до уровня трехмиллиметрового отверстия на его боковой поверхности, держа отстойник вертикально. Подождать, пока вода прекратит вытекать из этого отверстия;

- д) плотно закрыть отстойник крышкой и повернуть его в горизонтальное положение трехмиллиметровым отверстием вверх.

Прижимая крышку ладонью правой руки и прикрывая отверстие пальцем той же руки, интенсивно взболтать содержимое отстойника

- е) повернуть отстойник в вертикальное положение, выждать одну минуту по часам или секундомеру и прочесть показание по шкале бюретки против уровня осевшего песка

ПРОЧИТАННОЕ ПОКАЗАНИЕ, УМНОЖЕННОЕ НА ДВА, БУДЕТ ПОКАЗАТЕЛЕМ СОДЕРЖАНИЯ ПЕСКА В РАСТВОРЕ, ВЫРАЖЕННОМ В ПРОЦЕНТАХ.

- ф) вылить из отстойника содержимое, промыть его водой, вытереть и вложить на место в ящик лаборатории.

При поломке бюретки или необходимости извлечь её для чистки следует вывернуть винт 4 (рис. 4), извлечь перекладину 5 и шайбу 6 с резиновой прокладкой 7, а за ними - бюретку 3.

Перед тем как вставить бюретку, следует проверить исправность верхней прокладки 8 и при надобности сменить её.

Сборка ведется в следующем порядке: вставить бюретку, плотно уперев её в верхнюю прокладку, вложить шайбу 6 с резиновой прокладкой 7, вставить перекладину 5 в овальные отверстия чехла, ввернуть винт 4 и прижать им бюретку.

5. ЦИЛИНДР ЦС-2

Назначение:

Цилиндр ЦС-2 предназначен для определения стабильности глинистых растворов.

Показатель стабильности глинистого раствора определяется как разность удельных весов верхней и нижней половины пробы раствора отстоявшегося в течение суток в цилиндре высотой 200 мм.

Описание прибора:

Цилиндр ЦС-2 (рис. 5) выполнен из тонкого листового железа и окрашен нитроэмалью. Посредине высоты цилиндра имеется отвод с резиновой пробкой для слива верхней половины раствора.

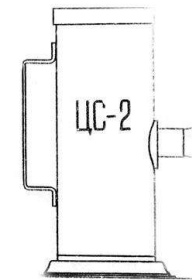


Рис. 5. Цилиндр ЦС-2

Техническая характеристика

Высота столба раствора в цилиндре.....	200
Объем цилиндра, см ³	800
Габаритные размеры, мм.....	100x210x110
Вес, кг.....	0,5

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Определение стабильности глинистых растворов при помощи цилиндра ЦС-2 следует производить в следующей последовательности:

- a) Вымыть цилиндр водой и вытереть насухо снаружи и внутри;
- b) Влить пробу раствора в цилиндр до края, предварительно тщательно перемешать её;
- c) Установить заполненный цилиндр в спокойном месте на сутки, отметив время по часам;
- d) Через 24 часа открыть пробку, слить верхнюю часть пробы раствора вместе с отстоявшейся водой в кружку, тщательно перемешать слитый раствор и определить его удельный вес ареометром АГ-2, закрыть отвод пробкой, тщательно перемешать в цилиндре отстоявшуюся нижнюю половину раствора и определить её удельный вес. 1
- e) При определении удельного веса ареометром АГ-2 обязательно погружать его при обоих измерениях в одну и ту же воду;
- f) Определить показатель стабильности глинистого раствора вычитанием первого показания ареометра из второго;
- g) Вымыть цилиндр, вытереть насухо и вложить на место в ящик лаборатории.

6. ИНСТРУКЦИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СУТОЧНОГО ОТСТОЯ ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ МЕРНЫМ ЦИЛИНДРОМ

Показатель суточного отстоя глинистого раствора определяется как процент воды, отстоявшейся за сутки на пробы раствора.

Определение суточного отстоя глинистых растворов производится стандартным мерным цилиндром объемом 100 см³ с ценой деления 1 см. Для этих определений также необходимы часы.

Определения следует производить в следующей последовательности:

- a) вымыть мерный цилиндр водой и вытереть насухо снаружи и внутри;
- b) тщательно перемешанную пробу раствора налить в цилиндр до сотого деления на шкале;
- c) поставить цилиндр с раствором в спокойное место, отметить время и оставить на 24 часа;
- d) через 24 часа прочесть на шкале цилиндра отсчет положения уровня раздела раствора и отстоявшейся воды и вычесть полученное показание из 100. Результат вычитания является показателем суточного отстоя в процентах;
- e) вымыть цилиндр и вложить его в ящик лаборатории.

7. ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ ТИПА СНС-2

Прибор СНС-2 предназначен для измерения статического напряжения сдвига глинистых растворов и применяется в условиях лабораторий геологоразведочных партий и экспедиций.

Прибор переносной и может быть использован в полевых условиях на буровой вышке.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Прибор для определения статического напряжения сдвига основан на принципе вискозиметра с соосными цилиндрами.

На тонкой упругой нити подвешен цилиндр, погруженный в соосный полый цилиндр, заполненный испытуемой жидкостью, при вращении внешнего цилиндра жидкость, находящаяся в нем, увлекает за собой подвешенный цилиндр до тех пор, пока момент закрученной нити не станет равным крутящему моменту, определяемому вязкостью испытуемой жидкости и размерами подвешенного цилиндра.

Измерение статического напряжения сдвига глинистых растворов является частным случаем применения вискозиметра с соосными цилиндрами и производится при весьма малых скоростях вращения внешнего цилиндра, в данном приборе принята скорость вращения внешнего цилиндра $0,0032 \text{ с}^{-1}$, что соответствует линейной скорости $4 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$; эта скорость несколько превышает предел скорости так называемой вариантной зоны, в которой определяемая величина строго соответствует понятию статического напряжения сдвига любых известных глинистых растворов. Однако уменьшение скорости влечет за собой либо снижение точности отсчета и измерения либо увеличение производства измерений.

Время для производства измерений при наличии тиксотропии растворов должно быть, как можно меньше и в соответствии с принятой методикой измерения не должно превосходить 60 секунд, чему соответствует поворот внешнего цилиндра прибора на 72° , а шкалы прибора - на несколько меньшую величину.

Нити для различных пределов измерения подбираются из этих соображений, а именно: закручивание нити на угол $65-70^\circ$ должно соответствовать крутящему моменту, определяемому по предельному значению измеряемого статического напряжения сдвига.

В приборах с соосными цилиндрами на результаты измерения оказывает влияние момент, возникающий на донной части подвешенного внутреннего цилиндра. С целью уменьшения этого влияния нижняя часть внутреннего цилиндра расточена,

благодаря чему при погружении цилиндра в испытуемую жидкость в расточке остается воздух. Таким образом, дно цилиндра не имеет контакта с испытуемой жидкостью.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Прибор для измерения статического напряжения сдвига глинистых растворов (рис. 8) состоит из измерительной части и привода, смонтированных на прямоугольной плите 1. Для регулировки положения прибора плита снабжена двумя регулируемы опорами 2 и одной неподвижной 11. Измерительная часть состоит из двух узлов: узла внешнего подвижного цилиндра и узла подвесного цилиндра с упругой измерительной системой.

Узел внешнего цилиндра состоит из корпуса 10, расположенном на стояке 12, имеющем строго концентрическую расточку под внешний цилиндр и канавку под спиральную бесконечную пружину.

Узел подвесного цилиндра, монтирующийся на вертикальном кронштейне 3, состоит из:

1. Цилиндра 9 с расточкой под конус Морзе № 1 и расточка в донной части для защитного пузыря. Цилиндр имеет накатанную наружную поверхность, обеспечивающую прочную связь с испытуемым раствором.

Выполнен цилиндр из латуни с матовым никелевым покрытием.

2. Трубки 6, один конец которой имеет конусную поверхность и резьбу под винт соосного соединения с цилиндром, а второй конец выполнен открытым для размещения в нем упругой нити 5. Крепление нити в трубке и регулирование соосности нити с трубкой осуществляется тремя винтами в утолщении трубки над конусом. Средняя часть трубки имеет концентричную площадку с уступом для установки шкалы 7.

3. Шкала 7 с делениями, нанесенными через 1° на её конической поверхности. Для грубой установки шкалы на нуль предусмотрены 8 отверстий, одним из которых она надевается на штифт, имеющийся на соответствующей площадке трубки.

4. Стрелки 3, укрепленной на кронштейне и имеющей наконечник из прозрачного оргстекла и нанесенными на нем с

обеих сторон рисками, исключаящими ошибку параллакса при отсчете.

5. Нити 5, изготавливаемой из стальной пружинной проволоки и имеющей 2 наконечника: нижний в виде втулки, входящий в трубку с зазором в 1 мм на сторону, и верхний в виде диска с фаской, на которой выгравирован номер нити.

Весь узел подвешивается на конусной пробке 13, которая в свою очередь плотно устанавливается в конусной втулке, запрессованной в кронштейн. Поворотом пробки шкала прибора устанавливается на ноль по стрелке.

Привод внешнего цилиндра осуществлен от синхронного электрического двигателя СД-2 (2 позиции 4) через редуктор и гибкую передачу 1:2.

Привод прикреплен к плите прибора через амортизатор из губчатой резины, предназначенный для защиты измерительной части прибора от вибраций двигателя.

Для включения двигателя предусмотрены тумблер, укрепленный на кронштейне прибора, и шнур с вилкой для подключения к сети.

Для заполнения внешнего цилиндра испытуемым глинистым раствором предусмотрена специальная мерная кружка объемом 120 мл.

Прибор поставляется в специальном ящике.

ПОДГОТОВКА ПРИБОРА К РАБОТЕ

Лабораторные занятия выполняются на уже отградуированном приборе; данные градуировки приводятся в паспорте для каждой поставляемой нити.

Для работы прибор должен быть установлен на устойчивом и прочном столе. Подвесная система подвешивается за верхний конец нити в пробке кронштейна и прибор устанавливается регулировочными нитями так, чтобы подвесной цилиндр встал соосно с вращающимся столиком прибора (регулировка соосности нити с трубкой подвесной системы выполнена при сборке прибора).

Устанавливают "О" шкалы против риски на стрелке указателя. Установку нуля можно производить грубо путем поворота шкалы на трубке и точно: путем осторожного и

плавного поворота в гнезде кронштейна. Чтобы убедиться, что установка на ноль произведена правильно, следует выждать, пока подвесная система успокоится. Затем следует снять подвесную систему, не трогая и не сдвигая пробку в гнезде кронштейна, и установить на вращающийся столик внешний цилиндр.

Подготовленный для работы прибор подключить к сети напряжением 220 вольт и, включая тумблер, проверить работу электродвигателя.

ПРОИЗВОДСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

При производстве измерений следует:

1. Пробу раствора сильно взболтать.
2. Снять подвесной цилиндр.
3. Взболтанный раствор зачерпнуть меркой объемом 120 мл, прикладываемой к прибору, и валить установленный на вращающемся столике прибора внешний цилиндр.
4. Погрузить подвесной цилиндр во внешний цилиндр и подвесить нить на пробку. При погружении подвесного цилиндра нужно следить за тем, чтобы его верхний конец не погрузился под уровень раствора. Если раствор не достигает верхнего края подвесного цилиндра, следует осторожно долить раствор. Подвесной цилиндр должен быть погружен в раствор точно до верхнего края.
5. Взять в левую руку секундомер, а правой осторожно поворачивать подвесную систему и перемешивать раствор. После окончания перемешивания раствора поставить на "О" шкалу против риски на стрелке прибора и одновременно включить секундомер. Во время этой операции следует следить за тем, чтобы подвесной цилиндр был в центре внешнего цилиндра.
6. По истечении одной минуты нажатием тумблера включить электродвигатель и наблюдать за движением подвесного цилиндра по шкале прибора. Увлекаемый глинистым раствором, подвесной цилиндр вращается вместе с внешним цилиндром до тех пор, пока момент в закручивающейся нити не станет равным моменту, обусловленному статическому напряжению сдвига раствора на подвесном цилиндре. Когда подвесной цилиндр остановится, произвести отсчет по шкале в градусах.

7. Включить электродвигатель.

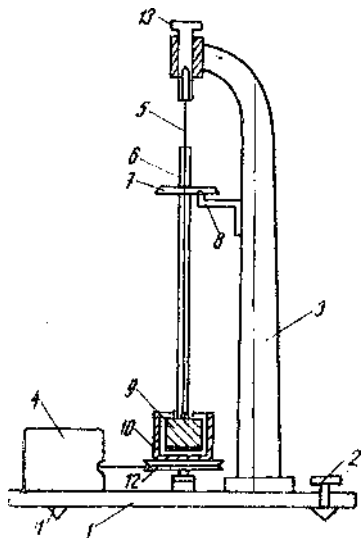


Рис. 6. Прибор СНС-2

Для определения тиксотропии раствора выполняется повторное измерение, но уже по истечении 10 минут по секундомеру. С этой целью сразу же после первого измерения осторожно внутренним цилиндром размешать раствор, установить "0" шкалы против риски и дать глинистому раствору стабилизироваться в течение 10 минут и выполнить измерение.

При работе и установке шкалы "0" наблюдающий должен следить за совпадением рисок, нанесенных с обеих сторон, чтобы исключить ошибку параллакса при отсчете.

Производство каждого замера от момента пуска электродвигателя до момента остановки подвесного цилиндра не должно продолжаться более 1 минуты, чему соответствует максимальный отсчет 70° .

Если замер продолжался более 1 минуты, его следует признать некачественным, а выбранный предел измерения недостаточным. В этом случае следует заменить нить на более толстую с большим пределом измерения.

Если показания прибора было в пределах 10° , замер следует признать неточным, а выбранный предел измерения слишком большим.

В этом случае следует заменить нить на более тонкую с меньшим пределом измерения.

Полученное в результате измерения показание в градусах следует пересчитать в $\text{мг}/\text{см}^2$ путем умножения на коэффициент, соответствующий данной нити и приведенный в паспорте.

Например, в процессе измерения статического напряжения сдвига глинистого раствора внутренний цилиндр, подвешенный на упругой нити с коэффициентом $2,725 \text{ м г}/\text{см} \cdot \text{град}$ повернулся на 21° . Статическое напряжение сдвига в этом случае будет $2,725 \text{ мг}/\text{см} \cdot \text{град} \cdot 21 = 57 \text{ мг}/\text{см}^2 = 5,7 \text{ Па}$.

После измерений все детали, испачканные глинистым раствором, следует вымыть и насухо вытереть.

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ВСН – 3

К реологическим параметрам относятся:

а) предельное напряжение сдвига – θ_1 и θ_{10} Па, характеризующее прочность структуры, образующейся в промывочной жидкости после 1 и 10 минут;

б) эффективная вязкость $\eta_{\text{эф}}$, спз характеризующая вязкое сопротивление промывочной жидкости при данной скорости сдвига;

в) пластическая вязкость $\eta_{\text{пл}}$, спз - условная величина, являющаяся долей эффективной вязкости, которая возникает вследствие структурообразования в потоке промывочной жидкости;

г) предельное динамическое напряжение сдвига T_0 , условная величина, характеризующая предел текучести в потоке промывочной жидкости.

Реологические показатели измеряются с помощью ВСН-3 по величине усилия, возникающего на подвесном цилиндре, погруженном в буровой раствор, при заданной скорости вращения наружного цилиндра.

Прибор ВСН-3 (рис. 7) состоит из корпуса 15, измерительного механизма 7-12, привода к нему 1,2 и подвесного кронштейна 14, на который ставится стакан с буровым раствором 13. Измерительный механизм имеет два коаксиально расположенных цилиндра, наружный (ротор) 11 и внутренний 12, укрепленный на оси, в верхней части которой расположен манометр 9 и измерительная шкала с делениями в градусах. Установка шкалы на "0" производится с помощью крутильной головки 8. Привод ротора осуществляется двигателями через многоступенчатую коробку передач. Прибор работает от сети переменного тока.

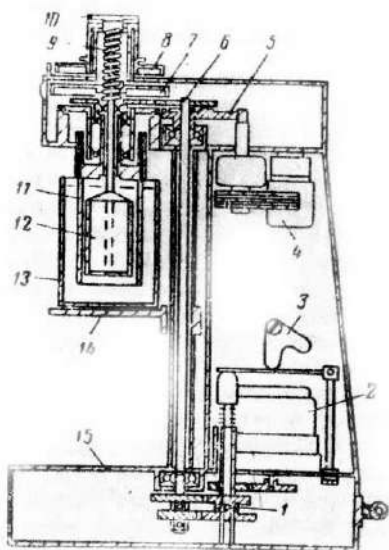


Рис. 7. Вискозиметр ВСН-3

- 1 - двухскоростной редуктор; 2 - синхронный двигатель СД-54;
- 3 - переключатель редуктора; 4 - синхронный двигатель СД-2;
- 5 - шестерня обгонной муфты; 6 - трансмиссионный вал;
- 7 - шкала измерительная; 8 - шкала крутильной головки;
- 9 - пружинный динамометр; 10 - наружный цилиндр;
- 11 - внутренний цилиндр, 13 - стакан с раствором; 14 - кронштейн; 15 - корпус.

ИЗМЕРЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА

Перед измерением чистый сухой стакан заполняют буровым раствором и ставят на кронштейн. Прибор включают и размешивают раствор при $9,600 \text{ с}^{-1}$ в течение 0,5 мин. По окончании перемешивания устанавливают шкалу на "0" и раствор оставляют на 1 минуту. Одновременно переключают скорость вращения ротора на $0,0032 \text{ с}^{-1}$, снова включают прибор и отмечают угол максимального закручивания нити в градусах (y_1). Замер y_{10} производят аналогично после 10 минут покоя. Статическое напряжение сдвига определяется по формуле:

$$Q_1 = k \cdot y_1$$

$$Q_{10} = k \cdot y_{10}$$

где: k - коэффициент прибора.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ, ДИНАМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА

Стакан прибора заполняют буровым раствором до метки и устанавливают на кронштейн. Включают прибор со скоростью вращения ротора $9,600 \text{ с}^{-1}$ и измеряют угол поворота (y) по установившимся показателям шкалы. Замер повторяют последовательно при $6,400$; $4,800$ и $3,200 \text{ с}^{-1}$. По окончании измерения прибор выключают, цилиндры моют и вытирают насухо.

По результатам измерений, полученных на приборе ВСН-3, рассчитывают реологические показатели - эффективную и пластическую вязкости, а также динамическое напряжение сдвига. Для расчета необходимо сделать графическое построение в координатах $n - Y_1$, аналогичное изображенному на рис. 3.

Через точки, соответствующие значениям Y при различных n проводят плавную линию 1 - реологическую кривую течения. Прямолинейный участок кривой продолжают до пересечения с осью абсцисс в точке Y_1 , и получают прямую 2.

Опустив перпендикуляр на ось абсцисс от точки прямой 2, соответствующей $9,600 \text{ с}^{-1}$ получают точку ϕ_2 .

Реологические показатели рассчитывают по формулам:

$$\eta_{эф}(n) = \beta \frac{y_2}{n} ;$$

$$\eta_{пл} = \beta \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{n} ;$$

$$\tau_0 = A \cdot y_1$$

где:

$\eta_{эф}$ - эффективная вязкость, спз;

$\eta_{пл}$ - пластическая вязкость, спз;

τ_0 – предельное динамическое напряжение сдвига, Па ;

A и B – коэффициенты приборов (указываются в паспортах);

Y_1 и Y_2 - углы в градусах (определяются по графику и соответствуют отрезкам ОУ1 и ОУ2).

Примечание: Если реологическая кривая имеет обратный наклон или не содержит прямолинейного участка (аналогично кривой 3 на рис. 8) определяют только эффективную вязкость по формуле (1) с углом

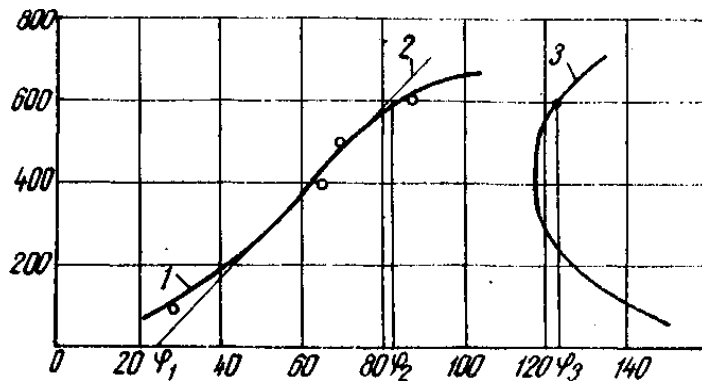


Рис. 8. Типы реологических кривых
1 - кривая, построенная по опытным точкам; 2 - прямая для расчета $\eta_{пл}$ и τ_0 ; 3 – кривая с обратным наклоном.

2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ АКТИВНОСТИ И СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Смазочные свойства промывочных жидкостей проявляются при введении в них активных добавок и эмульсолов.

Смазочные свойства в основном связаны с формированием смазочных пленок, в результате адсорбции поверхностно-активных веществ на трущихся поверхностях (бурильных трубах, стенках скважин, буровых наконечниках). Вольную роль на смазочные свойства оказывает рН среды.

Оценку адсорбционной активности ПАВ и их смазочных свойств можно осуществить по следующим параметрам:

- 1) поверхностное натяжение, Н/м ;
- 2) смачиваемость, $B = \cos \theta$;
- 3) стабильность, %;
- 4) порог быстрой коагуляции Пб.к, к/л;
- 5) водородный показатель, рН;
- 6) коэффициент трения, Кт;
- 7) предельная прочность смазочной пленки, $p_{кр}$ Па

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ (рН)

Водородный показатель определяет концентрацию ионов водорода в промывочной жидкости, которые оказывают существенные влияния на физико-химические процессы, протекающие в жидкости и на эффективность химической обработки.

Для различных промывочных жидкостей существует своя оптимальная концентрация водородных ионов, при которой они более полно удовлетворяют требованиям технологии бурения в конкретных геолого-технических условиях. Контроль за концентрацией водородных ионов позволяет определить причины изменения свойств промывочной жидкости в процессе бурения и принять меры по восстановлению её качества.

Вода является слабо диссоциирующим веществом, в 1 л при 22 °С диссоциирует одна десятиллионная часть грамм-молекулы с образованием $1 \cdot 10^{-7}$ г. ион водорода H^+ и $1 \cdot 10^{-7}$ г. ион гидроксильной группы OH^- . Концентрация диссоциированных молекул H_2O в воде и разбавленных водных растворов является величиной постоянной, постоянным является и произведение концентраций водородных и гидроксильных ионов - так называемое ионное произведение воды (численное значение равно $1 \cdot 10^{-14}$).

Кислотность и щелочность раствора можно выражать через концентрации ионов H^+ . Чтобы избежать неудобств, связанных с применением степенных отрицательных чисел, концентрацию водородных ионов принято выражать и логарифмом с обратным знаком и называть водородным показателем pH.

$$pH = - \lg H^+$$

В нейтральных растворах $pH = 7$ и уменьшается с ростом кислотности. В щелочных растворах $pH > 7$ и повышается с ростом щелочности.

При повышении щелочности АГЖ ухудшаются щелочные свойства, происходит быстрое удаление адсорбционных пленок ПАВ с трущихся поверхностей, а у глинистого раствора наблюдается коагуляция, растет вязкость.

Для измерения pH в лабораторных условиях применяют специальные приборы pH-метры. Для измерения величины pH в этих приборах используется система со стеклянным электродом, электродвижущая сила которой зависит от активности ионов водорода в растворе.

Схема для измерения величины pH приведена на рис. 13. Стеклянный электрод 2 представляет собой трубку с полым шариком 1 из специального стекла на конце. При погружении электрода в раствор между поверхностью шарика электрода и раствором происходит обмен ионами, в результате которого ионы лития в поверхностных слоях замещаются ионами водорода, и стеклянный электрод приобретает свойства водородного электрода.

Между поверхностью стекла и контролирующим раствором возникает разность потенциалов, величина которой определяется активностью ионов водорода в растворе.

Для создания электрической цепи при измерении применяются контактные электроды: внутренний контактный электрод, осуществляющий электрический контакт с раствором, заполняющим внутреннюю полость стеклянного электрода, и внешний контактный электрод (вспомогательный электрод), осуществляющий электрический контакт с контролируемым раствором. Для защиты от воздействия высоких температур (при измерении pH растворов, температуры которых выше температуры окружающей среды) вспомогательный электрод помещают вне контролируемого раствора и соединяют с ним при помощи электролитического ключа трубки, наполненной раствором хлористого калия и заканчивающейся пористой перегородкой.

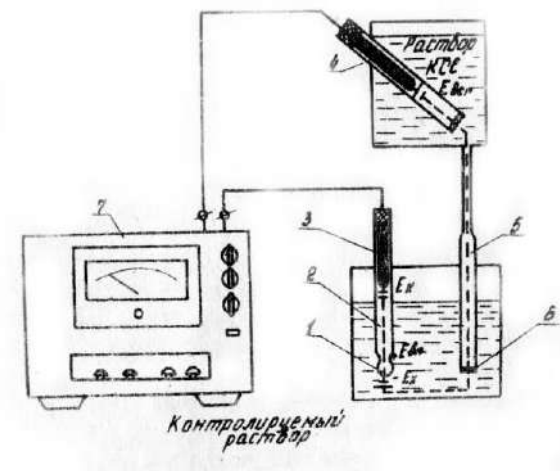


Рис. 9. Схема измерения pH раствора

- 1- полый шарик ив электродного стекла; 2- стеклянный электрод; 3- внутренне контактный электрод; 4- вспомогательный электрод; 5- электролитический ключ; 6- пористая перегородка; 7- pH-метр - pH-262 (измерительный прибор).

Изменение поверхностного натяжения воды в зависимости от температуры

Температура воды, °С	Поверхностное натяжение, Н/м	Температура воды, °С	Поверхностное натяжение, Н/м
15	73,49	22	72,44
16	73,34	23	72,28
17	73,19	24	72,12
18	73,05	25	71,96
19	72,90	26	71,80
20	72,75	27	71,64
21	72,59	28	71,47

Раствор хлористого калия непрерывно просачивается через пористую перегородку, предотвращая проникновение из контролируемого раствора в систему электрода посторонних ионов, которые могли бы изменить величину ЭДС электрода.

Для измерения ЭДС электродной системы применяется компенсационная схема, позволяющая существенно уменьшить потребляемый ток электродной системы при измерении. При намерении электродвижущая сила E электродной системы сравнивается с падением напряжения на сопротивлении, через которое протекает ток конечного каскада усилителя рН-метра. Этот ток пропорционален ЭДС электродвижущей системы, а следовательно, и величине рН контролируемого раствора.

Измерение поверхностного натяжения

Поверхностное натяжение - это величина удельной работы, которую нужно затратить, чтобы образовать единицу свободной поверхности (капли).

Измерение поверхностного натяжения в лабораторных условиях наиболее удобно производить на сталагмометре БашНИИнефть (рис. 10). Определяется число капель в единице объема, формирующихся на границе раздела: водный раствор ПАВ - воздух.

Основными частями прибора являются: 1 - микрометр, определяющий объем выдавливаемого раствора; 2 - медицинский шприц, куда заливается исследуемый раствор ПАВ; 3 - капилляр с внутренним диаметром 0,8 мм и 4 - кронштейн.

Перед началом опыта внутреннюю поверхность шприца и капилляр обезжиривают хромовой смесью (5% порошка двуххромового калия, растворенного в концентрированной серной кислоте) или ацетоном, а потом промывают дистиллированной водой.

Перед началом замеров необходимо определить постоянную капилляра. Для этого берут дистиллированную воду, поверхностное натяжение которой известно, и измеряют количество капель, появляющихся при выдвижении микрометрического винта на 1 см. Поверхностное натяжение воды при данной температуре берется из табл.

Постоянная капилляра определяется по формуле:

$$K = \sigma_e \cdot n_B$$

где σ_e - поверхностное натяжение воды при данной температуре Н/м

n_B - число капель воды при выдвижении шприца на 1 см.

Затем 50 см³ активной промывочной жидкости профильтровывают через складчатый фильтр < менее 50 см³ фильтрата брать не рекомендуется, так как в этом случае концентрация ПАВ существенно изменится вследствие адсорбции на фильтровальной бумаге).

При работе с глинистым раствором можно использовать для получения фильтра прибор ВМ-6.

Определяют температуру фильтрата, После получения равенства температур воды и фильтрата приступают к измерению. Подсчитывают число капель фильтрата при выдвижении микрометрического винта на 1 см. Замеры проводят три раза и находят среднее количество капель.

Поверхностное натяжение фильтрата определяется по формуле:

$$\sigma_u = \frac{\sigma_B \cdot n_B}{n_u} = \frac{K}{n_u}$$

где n_u - число капель исследуемой жидкости;
 K - постоянная капилляра.

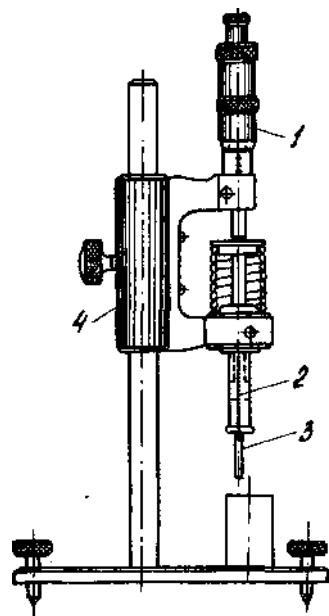


Рис. 10. Сталагмометр
1- микрометр, 2-медицинский шприц;
3-капилляр; 4 - кронштейн

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ АПЖ

Способность АПЖ смачивать твердые поверхности характеризуется косинусом краевого угла смачивания, которая навивается смачиваемостью ($B = \cos \theta$)

Краевой угол смачивания на исследуемой поверхности (бурильная труба, горная порода) измеряется по форме капли, сфотографированной на пластинке.

Для снятия капли на пластинку применяется установка, схема которой приведена на рис. 11.

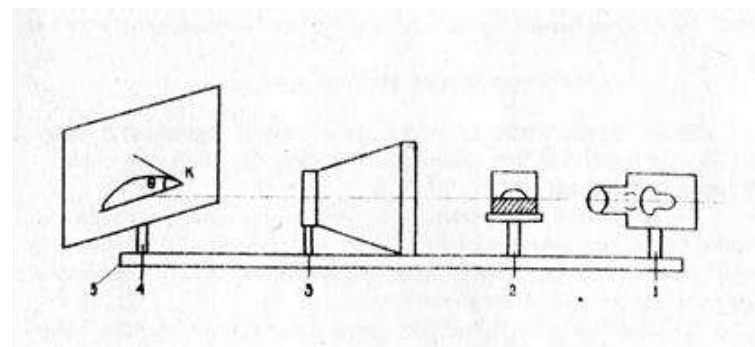


Рис.11. Установка для определения краевого угла смачивания.
источник света; 2 - испытуемая поверхность; 3 -
увеличитель экран-пластинка; 5 - рама.

Установка состоит из источника света 1, испытуемой поверхности 2, увеличителя с длинно-фокусной линзой 3, экрана 4, рамки 5.

Для измерения краевого угла смачивания исследуемых поверхностей готовится АПЖ с концентрациями ПАВ 0,5; 1; 2; 3; 4%. Перед нанесением капли на исследуемую поверхность её нужно обезжирить ацетоном или хромовой смесью, промыть дистиллированной водой и хорошо просушить. Для нанесения капель на поверхность дается выдержка 4 минуты с целью придания капле равновесного кривого угла.

В течение данного времени капля проектируется на экран путем установки максимальной резкости в изображении контура капли перемещением увеличителя 3 по направляющей рамки 5.

После снятия капли на пластинку и её проявления, замеряется краевой угол. Для этого измеряется высота капли h и радиус площади контакта с поверхностью r_k . Зная эти размеры, рассчитывается смачиваемость по формулам:

$$C_{\sigma\theta} = \frac{r_k^2 - h^2}{r_k^2 + h^2}$$

при $\theta < 90^\circ$

$$C_{\sigma\theta} = 1 - \frac{h}{r_k}$$

при $\theta > 90^\circ$

Полученные расчетные данные заносятся в таблицу, на основании которых строятся графики $\text{Cos}\theta=f(c)$. Данные графики позволяют оценить смачиваемость АПК поверхности горных пород и бурильных труб в зависимости от концентрации ПАВ. На основании полученных данных вычисляется работа адгезии, которая характеризует энергию сцепления смазочной пленки с трущимися поверхностями.

$$W_a = \sigma_{жг}(1 + C_{\sigma\theta}\theta)$$

где W_a - работа адгезии, Н/м ;

$\sigma_{жг}$ - поверхностное натяжение на границе раздела жидкость-газ, Н/м ; $\text{Cos } \theta$ - смачиваемость.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ АПЖ

Под стабильностью, или устойчивостью понимается способность АПЖ сохранить свое агрегативное состояние, не расслаиваться в течение продолжительного времени.

Проба АПК заливается в мерный цилиндр, который оставляют в покое в течение трех часов при комнатной температуре. Если за это время расслоение жидкости не произойдет, то она считается стабильной. Расслоение может произойти в результате повышенной жесткости воды.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА БЫСТРОЙ КОАГУЛЯЦИИ

Мерой агрегативной устойчивости активной промывочной жидкости по отношению к солям поливалентных металлов является порог быстрой коагуляции (Пб·К).

Порог быстрой коагуляции - это та наименьшая концентрация электролита, которая вызывает снятие энергетического барьера электростатического отталкивания сближающихся коллоидных частиц и быстрое расслоение дисперсной системы.

Определение порога быстрой коагуляции осуществляется следующим образом. В начале готовятся растворы активной промывочной жидкости с концентрациями эмульсолов или ПАВ 0,5; 1; 2; 3; 4 %. Затем приготавливаются растворы с концентрациями электролитов (CaCl_2 , MgCl_2) от 0,25 до 10/б в зависимости от коагулирующей активности электролита.

Раствор электролита заливается в бюретки объемом 10 мл с ценой деления 0,1 мл. Для проведения наблюдений берется пробирка и заполняется 2 мл активной промывочной жидкости. Потом исследуется раствор с помощью бюретки вводится электролит небольшими дозами (по 0,1 мл). После каждой добавки раствор интенсивно встряхивается и просматривается при просвечивании электрической лампой. Интенсивное помутнение раствора и выделение коагулированных хлопьев ПАВ свидетельствует о начале быстрой коагуляции раствора. Концентрация электролита, выраженная в г/л, которая вызывает быструю коагуляцию АПЖ, применяется за порог быстрой коагуляции.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

Коэффициент трения определяется на установке трения, которая монтируется узлы трения 2 и 3. Узел 2 служит для измерения коэффициента трения на контакте металл-металл, и узел 3 - на контакте металл-горная порода. Узел 2 представляет собой четырехшариковую пирамиду, установленную на поверхности стола, который связан с измерительной пружиной, с наклеенными на ней тензодатчиками 4. К тензодатчику подсоединяется тензоусилитель 8, и осциллограф 7. Давление на узел трения осуществляется шпинделем 8, смонтированным в корпусе 9. Вращение шпинделя передается через шкив 10 от двигателя 11. Нагрузка на шпиндель создается винтом 12 гидропресса 13, которая регистрируется по манометру 14. Винт 12 перемещается по резьбе в нагрузочной traversе 15.

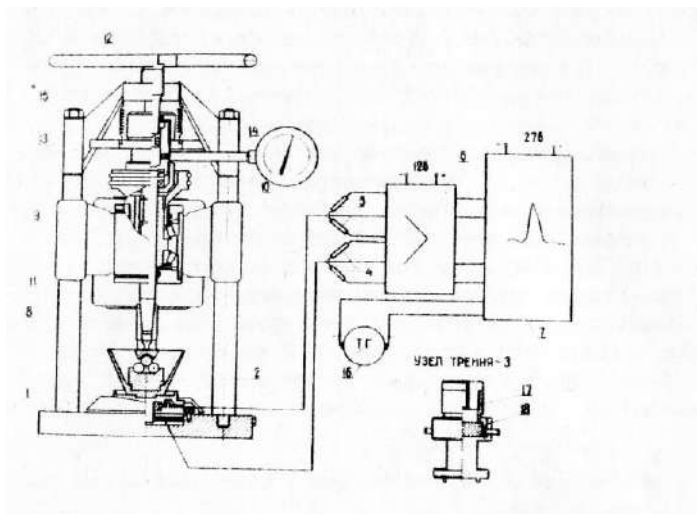


Рис. 12. Установка трения 1 - опорная станина; 2, 3 - узлы трения; 4, 5 - тензодатчик; 6 - тензоусилитель; 7 - осциллограф; 8 - шпиндель; 9 - корпус шпинделя; 10 - шкив; 11 - электродвигатель; 12 - нагрузочный винт; 13 - гидропресс; 14 - манометр, 15 - нагрузочная траверса; 16 - тахогвнератор

Замеры производятся по следующей методике. Стальные шары диаметром 8,5 мм из стали IX, предварительно обезжириваются ацетоном, устанавливаются в узел трения, в который заливается исследуемая АПЖ. С помощью гидропресса создается нагрузка, которая регистрируется по манометру. Латером плавно включается мотор до полных оборотов, которые регистрируется счетчиком 16. В этот момент включается записывающее устройство осциллографа. После обработки осциллограмм определяется крутящий момент $M_{кр}$. По аналогичной методике производятся замеры на узле трения металл- горная порода Коэффициент трения определяется по формуле:

$$K_{\tau} = \frac{F_{\tau p} \cdot R}{P \cdot r} = \frac{M_{кр}}{P \cdot r}$$

где $F_{\tau p}$ - сила трения или горизонтальное усилие, вызывающее движение стола, Н;

R - радиус подвижного стола, м ;
 P - осевая нагрузка на шпиндель, Н ;
 r - радиус четырехшариковой пирамиды, м ;
 $M_{кр}$ - крутящий момент на подвижном столе, кг · м²;

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ

Под предельной прочностью смазочной пленки подразумевается критическое давление на площадь контакта, при котором происходит выдавливание (разрушение) смазочной пленки.

Определение предельной прочности смазочной пленки производится на установке трения в следующей последовательности.

Исследуемая активная промывочная жидкость заливается в узел трения, создается последовательно нагрузка на шпиндель, ступенями включается вращение и измеряется величина крутящего момента при каждом нагружении.

Затем строится график в логарифмических координатах, $M_{кр} = f(P)$. На графике находится точка резкого возрастания величины крутящего момента. Нагрузка, соответствующая этой точке принимается за P_{\max} .

Величина предельной прочности смазочной пленки в месте контакта определяется по формуле Герца-Беляева:

$$P_{кр} = 0,388 \sqrt{\frac{1,64 P_k E^2}{r^2}}$$

где $P_{кр}$ - критическое давление на площадь контакта, кг · м²,
 P_k - контактная нагрузка, Н; E - модуль упругости, кг/мм² (для стали $E = 2,1 \times 10^4$ кг/мм²); r - радиус шара, м; $P_k = 0,41 P$; P_{\max} - осевая нагрузка в момент выдавливания пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

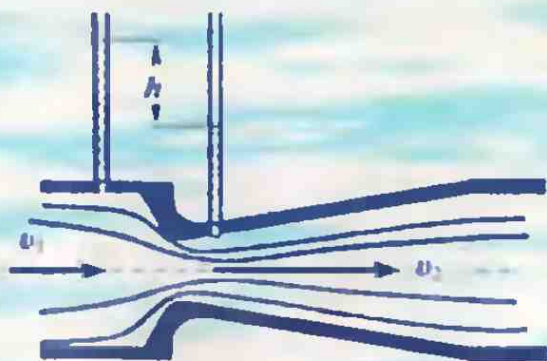
Контроль параметров промывочных жидкостей в процессе бурения является важным условием сохранения качества промывочной жидкости и поддержания устойчивости ствола скважины.

В методических разработках приведено описание основных приборов для измерения структурно-механических и антифрикционных параметров промывочных жидкостей и изложена методика их определения.

С.И. Часс

ГИДРОМЕХАНИКА В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие



Екатеринбург
2006

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



С. И. Часс

ГИДРОМЕХАНИКА В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

*Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия*

УДК 532
Ч 24

Часс С. И.

Ч 24 Гидромеханика в примерах и задачах: Учебное пособие. –
Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 216 с.
ISBN 5-8019-0119-1

В учебном пособии изложены теоретические положения, примеры гидравлических расчётов и задачи для самостоятельной работы по основным разделам курса гидромеханики (гидравлики).

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности “Горное дело”; “Горные машины и оборудование”; “Технологические машины и оборудование”, а также может быть рекомендовано для студентов других вузов, изучающих курсы “Гидромеханика”, “Гидравлика”, “Механика жидкости и газа”.

Рис. 126. Табл. 10. Библ.: 7 назв.

Рецензент: Лаптева Н. Е., кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики Уральского государственного технического университета.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета.

ISBN 5-8019-0119-1

© Часс С. И., 2006
© Уральский государственный
горный университет, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное изучение любого курса прикладных технических дисциплин, в том числе технической гидромеханики, или гидравлики, зависит от умения студента работать самостоятельно. Основное назначение данного учебного пособия – помочь изучающим гидромеханику применить теоретические знания и освоить методику гидравлических расчётов для решения практических и инженерных задач.

Книга включает три основных раздела курса гидромеханики: “Гидростатика”, “Гидродинамика”, “Прикладная гидромеханика”. Каждый раздел содержит несколько глав конкретной тематики. Глава начинается с теоретической части, в которой приводятся основные расчётные формулы с подробным пояснением их применения для решения примеров по данной теме.

Учебное пособие содержит разнообразные по тематике и степени сложности примеры, охватывающие основные разделы курса гидромеханики. Примеры гидравлических расчётов приближены к горному производству.

В приложении приводятся таблицы справочного характера, которые используются при решении примеров и задач. Кроме приведённых справочных таблиц можно пользоваться справочным материалом других учебников и учебных пособий.

Опыт преподавания гидромеханики показал, что студенты сравнительно легко усваивают те сведения, которые поясняются в учебнике при помощи чертежей. Именно поэтому в данном учебном пособии примеры гидравлических расчётов содержат большое количество графического материала. Задачи даются с подробными численными решениями. Некоторые приведённые примеры общеизвестны по другим учебным пособиям, но отличаются методикой решения, которой нет в других учебниках и учебных пособиях.

По каждой теме предложены задачи с ответами для самостоятельной работы. Такое изложение материала позволяет студентам проверить свои знания и способности в решении задач по гидромеханике.

ВВЕДЕНИЕ

Гидромеханика (гидравлика) – наука о механических свойствах жидкой среды, о законах равновесия и движения жидкости, взаимодействия жидкости с твёрдыми поверхностями. Гидромеханика – техническая прикладная дисциплина, выводы и законы которой предназначены для решения технических и инженерных задач.

Гидромеханика является одной из наук, составляющих фундамент инженерных знаний, и включает несколько разделов.

В разделе “Гидростатика” даётся вывод основного уравнения гидростатики, определяется давление в покоящейся жидкости, действие жидкости на плоские и криволинейные поверхности.

В разделе “Гидродинамика” рассматриваются основные законы движения жидкости, уравнение Д. Бернулли, изучаются режимы движения жидкости и потери напора в гидравлических сопротивлениях.

Раздел “Гидравлический расчёт трубопроводных систем” является основой для решения инженерных задач по расчёту простых и сложных трубопроводных систем.

В разделе “Истечение жидкости через отверстия и насадки” даётся расчёт малых и больших отверстий, истечения жидкости из насадков.

В соответствии со специализацией изучаются вопросы равномерного движения жидкости в открытых руслах, фильтрации, взаимодействия потока жидкости и твёрдого тела и другие .

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ

Жидкость – непрерывная среда, обладающая свойством текучести и чрезвычайно малым сопротивлением деформации разрыва.

Различают капельные, газообразные и многофазные жидкости. **Капельные жидкости** (вода, масла, спирт, ртуть и т. п.), в отличие от газообразных, образуют **свободную поверхность**, т. е. поверхность, отделяющую капельную жидкость от газообразной среды. К многофазным жидкостям относятся туман, дым, илстые растворы и т. п.

Прежде чем перейти к изучению физических свойств жидкости и законов равновесия и движения жидкости, отметим, что единицы измерения в гидромеханике приняты согласно Международной системе единиц измерения (СИ). Вместе с этим, в некоторых расчётах пользуются внесистемными единицами, широко применяющимися в производственной деятельности.

Плотность и удельный вес жидкости

Плотность – это масса жидкости, заключённая в единице объёма, единица измерения кг/м^3 :

$$\rho = m/V.$$

Удельный вес – сила тяжести жидкости в единице объёма, единица измерения Н/м^3 :

$$\gamma = G/V.$$

Так как сила тяжести $G=mg$, получим пересчётную формулу между удельным весом и плотностью:

$$\gamma = \rho g.$$

Удельный вес не является справочной величиной, так как зависит от ускорения силы тяжести (g) в месте измерения, поэтому в дальнейших расчётах будем пользоваться справочной величиной плотности (ρ).

Для технических расчётов с достаточной точностью можно принимать плотность воды (в дальнейшем будем записывать без индекса) $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Для других жидкостей следует пользоваться табл. 1 (см. приложение). В этой таблице приводятся коэффициенты плотности жидкостей.

Физические свойства жидкостей

В курсе гидромеханики следует изучить по любому учебнику или курсу лекций следующие физические свойства жидкостей: *сжимаемость, капиллярность, кавитацию и вязкость*.

Обратим внимание на физическое свойство жидкости - вязкость. **Вязкость** – свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу или относительному перемещению слоёв жидкости.

В технических расчётах и при решении задач пользуются двумя коэффициентами вязкости: коэффициент динамической вязкости μ , размерность Па·с; коэффициент кинематической вязкости ν , представляющий собой отношение динамической вязкости к плотности:

$$\nu = \mu / \rho .$$

Подставив размерности μ и ρ в расчётную формулу коэффициента кинематической вязкости, получим размерность ν в системе СИ – $\text{м}^2/\text{с}$.

Экспериментально вязкость жидкости определяется вискозиметрами. По вискозиметру определяют вязкость относительную, условную (ВУ), или так называемый градус Энглера ($^{\circ}E$). Для перехода от условной вязкости к коэффициенту кинематической вязкости ν пользуются эмпирической формулой Уббелюде:

$$\nu = (0,0731 \cdot ^{\circ}E - 0,0631 / ^{\circ}E) \cdot 10^{-4}.$$

Отметим, что значеные коэффициентов вязкости жидкостей приводятся в табл.1 (см. приложение) и будет использовано при решении задач в разделе “Гидродинамика”.

ГИДРОСТАТИКА

Глава 1

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТИ

1. Понятие гидростатического давления

В результате действия внешних сил (поверхностных и массовых) в жидкости возникают *внутренние нормальные* напряжения, называемые *гидростатическим давлением*. Таким образом, гидростатическое давление — это нормальная сила с точностью до бесконечно малых (dR), равномерно распределённая на бесконечно малой площадке (dA):

$$p = dR/dA.$$

Единица измерения давления соответствует размерности напряжения Н/м^2 .

Примечание. В данном учебном пособии силу давления будем обозначать буквой R , чтобы не путать при написании давление p и силу P , площадь буквой A , как это принято в дисциплинах механического профиля.

1.1. Свойства гидростатического давления

Первое свойство. Давление, как нормальное напряжение, всегда направлено по внутренней нормали к площадке, величина давления является функцией только координат точки и не изменяется во времени:

$$p = f(x, y, z).$$

Второе свойство. Давление в точке жидкости действует по всем направлениям и имеет одинаковую величину.

1.2. Основное уравнение гидростатики. Абсолютное, манометрическое, вакуумметрическое давление

Для определения давления в покоящейся жидкости пользуются основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (1.1)$$

Давление в любой точке покоящейся жидкости складывается из давления на поверхности жидкости (p_0) и силы тяжести столба жидкости с основанием, равным единице, и высотой, равной глубине погружения точки в жидкость (ρgh). Величина ρgh может быть названа *весовым* давлением, или *избыточным* давлением жидкости.

Поверхностное давление p_0 может быть обусловлено давлением на поверхности капельной жидкости газа, воздуха или твёрдого тела, например поршня.

Давление на поверхности жидкости p_0 может быть равным атмосферному давлению, больше атмосферного или недостающим до атмосферного.

Давление, рассчитанное от абсолютного нуля, т. е. с учётом атмосферного давления, называется **абсолютным**. Так, если в уравнении (1.1) давление на поверхности жидкости равно атмосферному ($p_0 = p_a$), то у давления p следует поставить индекс "абс" и считать его абсолютным давлением:

$$p_{\text{абс}} = p_a + \rho gh. \quad (1.2)$$

Если абсолютное давление больше атмосферного, то давление, **превышающее** атмосферное, называется **манометрическим**, или **избыточным** (термины равнозначны). В закрытом резервуаре при условии, что $p_{0\text{абс}} > p_a$, величина манометрического давления

$$p_{\text{ман}} = p_{0\text{абс}} - p_a + \rho gh$$

Манометрическое давление в открытом резервуаре на глубине h

$$p_{\text{ман}} = \rho gh. \quad (1.3)$$

Давление, **недостающее** до атмосферного, называется **вакуумметрическим**:

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}}, \quad (1.4)$$

при условии, что $p_{\text{абс}} < p_a$.

При решении задач манометрическое давление учитывается со знаком "+", вакуумметрическое - со знаком "-".

Следует запомнить: чтобы записать абсолютное давление в месте установки **манометра**, нужно к атмосферному давлению **прибавить** манометрическое, т. е.

$$p_{\text{абс}} = p_a + p_{\text{ман}}$$

Чтобы записать абсолютное давление в месте установки **вакуумметра**, нужно к атмосферному давлению **прибавить** $p_{\text{вак}}$ со знаком минус, т. е.

$$p_{\text{абс}} = p_a - p_{\text{вак}}$$

В соответствии с изложенным учётом, как в дальнейших расчётах пользоваться понятиями манометрического, вакуумметрического и абсолютного давлений.

1.3. Плоскость уровня. Понятие пьезометрической высоты.

Эшоры гидростатического давления

При решении задач по определению давления в покоящейся жидкости используют условие равновесия жидкости относительно **плоскости уровня** (плоскости равного давления).

Плоскость уровня – это плоскость с постоянным гидростатическим давлением во всех точках этой плоскости. Вывод уравнения плоскости уровня

и примеры плоскости уровня приводятся в учебниках и учебных пособиях по гидромеханике (см. библиографический список).

Частным случаем плоскости уровня является *горизонтальная* плоскость в однородной покоящейся жидкости, находящейся в поле действия только сил тяжести.

Пьезометрическая высота, или пьезометрический напор, - это такая высота столба жидкости, которая своим весовым давлением (ρgh) соответствует давлению (p) в покоящейся жидкости. Характерные случаи представления пьезометрической высоты приведены в учебной литературе.

Рассмотрим один из случаев. Пусть имеем закрытый резервуар, в котором на свободной поверхности действует абсолютное давление, больше атмосферного ($p_{\text{абс}} > p_a$) (рис. 1.1,а). На глубине h выведена открытая стеклянная трубка, называемая **пьезометром**. Если бы резервуар был открыт, уровни жидкости в резервуаре и в пьезометре были бы на одном горизонте (как в сообщающихся сосудах). Поскольку давление на поверхности жидкости в резервуаре больше, чем атмосферное, уровень жидкости в пьезометре будет выше, чем в резервуаре.

Высота, на которую поднимется жидкость в пьезометре, называется **пьезометрической** высотой и обозначается h_p . Докажем, что пьезометрическая высота h_p соответствует избыточному давлению. Проведём горизонтальную **плоскость уровня** 0 - 0 на глубине h и составим условие равенства давления, рассчитанного слева по пьезометру (p_1), и давления (p_2) справа в баке на глубине h :

$$p_1 = p_2.$$

Согласно основному уравнению гидростатики (1.1):

$$p_1 = p_a + \rho gh_p; \quad p_2 = p_{\text{абс}} - \rho gh;$$

$$p_a + \rho gh_p = p_{\text{абс}} - \rho gh;$$

$$h_p = \frac{p_{\text{абс}} - p_a + \rho gh}{\rho g} = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g}. \quad (1.5)$$

Условие доказано, таким образом, избыточное давление в любой точке покоящейся жидкости можно заменить давлением столба жидкости в пьезометре. Аналогичные рассуждения можно провести по вакуумметрическому давлению.

Графическое представление величины и направления гидростатического давления, действующего на любую точку поверхности, называется **эпюрой давления**. Согласно основному уравнению гидростатики (1.1), закон распределения давления (p) по глубине (h) линейный.

На рис. 1.1 представлены эпюры абсолютного давления (б) и весового давления жидкости без учёта давления на поверхности жидкости (в).

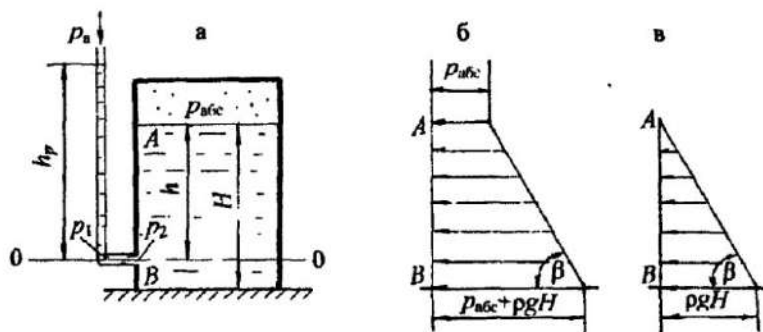


Рис. 1.1

Эпюры давления представляют соответственно равномерно распределённую нагрузку в виде трапеции для абсолютного или полного давления и в виде треугольника для весового давления. Угол наклона эпюры β зависит от величины плотности жидкости ρ . Стрелками показано, что давление в любой точке по глубине действует по внутренней нормали к поверхности AB .

1.4. Единицы измерения давления

Основной системой единиц измерения давления является система СИ. Но наряду с этой системой при технических расчётах и в производственной практике пользуются технической системой (CGS) и внесистемными единицами измерения.

Система СИ: $\text{Н/м}^2 = \text{Па}$; $10^3 \text{ Па} = \text{кПа}$; $10^6 \text{ Па} = \text{МПа}$; $\text{бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Техническая система: $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат}$; кгс/м^2 .

Внесистемные единицы измерения: мм рт. ст.; м вод. ст.; мм вод. ст.

Покажем перевод единиц измерения давления:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 98 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ ат} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$$

$$1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па.}$$

Перевод единиц измерения давления из ат или Па в высоту столба жидкости и наоборот может быть выполнен по формулам:

$$H = p/\rho g \quad \text{и} \quad p = \rho g H.$$

Проверим приведённые выше величины. Переведём 1 ат в м вод.ст., зная, что плотность воды $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$H_{\text{вол.ст.}} = (98 \cdot 10^3) / (10^3 \cdot 9,8) = 10 \text{ м.}$$

Теперь переведём 1 ат в мм рт. ст. при плотности ртути $\rho_{\text{рт.}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$H_{\text{рт.ст.}} = (98 \cdot 10^3) / (13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8) = 0,7356 \text{ м} = 735,6 \text{ мм.}$$

В приложении (табл. 2) приведено соотношение между единицами давления.

1.5. Примеры решения задач по теме: “Гидростатическое давление в жидкости”

Задача 1.5.1. К резервуару (рис. 1.2), заполненному бензином плотностью $\rho_{\text{бенз.}} = 700 \text{ кг/м}^3$, присоединён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт.}} = 0,1 \text{ м}$; уровень масла над ртутью $h_{\text{м.}} = 0,2 \text{ м}$.

Определить абсолютное давление $p_{\text{абс}}$ паров на поверхности бензина и показание пружинного манометра (см. обозначение буквой М), установленного на крышке резервуара, а также возможную высоту уровня бензина в пьезометре h_p при условии, что $h = 0,75 \text{ м}$; $a = 0,15 \text{ м}$; $H = 1,1 \text{ м}$; принять плотность ртути $\rho_{\text{рт.}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; плотность масла $\rho_{\text{мас.}} = 820 \text{ кг/м}^3$.

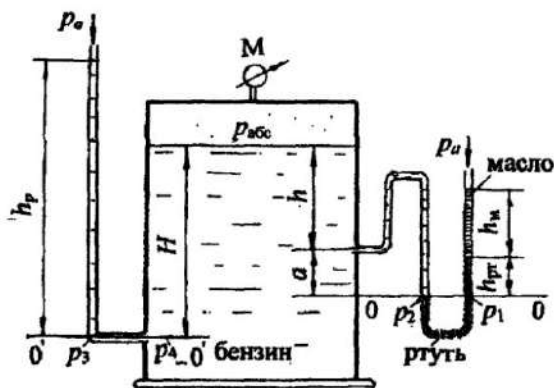


Рис. 1.2

Решение. Решение ведём с учётом атмосферного давления, так как по условию задачи требуется определить абсолютное давление паров бензина.

Для решения задачи воспользуемся понятием *плоскости уровня*. Выберем плоскость уровня 0-0 на разделе жидкостей бензин - ртуть и составим условие равенства давления, приравняв давления в правом (p_1) и левом колене (p_2) U-образного манометра:

$$p_1 = p_2;$$

$$p_1 = p_a + \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}};$$

$$p_2 = p_{\text{абс}} + \rho_{\text{бенз}} g (h + a).$$

Приравняем давление в правом и левом колене U-образного манометра:

$$p_a + \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} = p_{\text{абс}} + \rho_{\text{бенз}} g (h + a),$$

отсюда абсолютное давление паров бензина:

$$p_{\text{абс}} = p_a + \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бенз}} g (h + a).$$

Принимая атмосферное давление $p_a = 98 \cdot 10^3 \text{ Па} = 98 \text{ кПа}$, получим:

$$p_{\text{абс}} = 98 \cdot 10^3 + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,1 - 700 \cdot 9,8 \cdot 0,9 = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Показание манометра, установленного на крышке бака, можно определить так:

$$p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - p_a = \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бенз}} g (h + a) = 8,76 \text{ кПа} = 0,089 \text{ ат}.$$

Для определения возможной высоты бензина в пьезометрической трубке h_p составим условие равновесия жидкости относительно плоскости уровня 0-0, в этом случае расчёты можно вести по избыточному (манометрическому) давлению. Для плоскости уровня 0-0 запишем равенство давлений $p_3 = p_4$:

$$\rho_{\text{бенз}} g h_p = p_{\text{ман}} + \rho_{\text{бенз}} g H,$$

отсюда

$$h_p = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho_{\text{бенз}} g} + H = 2,38 \text{ м}.$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па} = 106,76 \text{ кПа}$; $p_{\text{ман}} = 8,76 \text{ кПа}$; $h_p = 2,38 \text{ м}$.

Задача 1.5.2. Два резервуара, заполненные водой и бензином, имеют центры которых находятся на одном уровне, соединены двухколенным ртутным манометром (рис. 1.3). Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$.

Определить, в каком резервуаре давление больше и на какую величину, если высоты уровней жидкостей соответственно: $h_1 = 250 \text{ мм}$; $h_2 = 120 \text{ мм}$; $h_3 = 80 \text{ мм}$; $h_4 = 50 \text{ мм}$. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$, ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Резервуары закрыты, поэтому давление будем рассчитывать по избыточному давлению без учёта атмосферного давления. Обозначим давление на уровне центра в левом резервуаре p_A , в правом - p_B .

Покажем положение плоскостей уровня для данной равновесной системы: это плоскости 0-0; 0'-0' и 0''-0''. Эти горизонтальные плоскости проводятся по однородной жидкости: плоскость 0-0 по маслу, две другие по ртути. Для этих плоскостей запишем условие равенства давлений: $p_1 = p_2$;

$p_3 = p_4$; $p_5 = p_6$. Плоскость 0-0 является основной плоскостью равновесного состояния, для которой $p_1 = p_2$.

Согласно основному уравнению гидростатики (1.1), чтобы записать давление p_1 , нужно к давлению в центре резервуара A (p_A) прибавить давление столба воды ρgh_1 - получим давление $p_3 = p_4$, из давления p_4 вычтем (поднимаемся вверх) давление столба ртути $\rho_{рт} gh_2$ и, таким образом, получим давление p_1 :

$$p_1 = p_A + \rho gh_1 - \rho_{рт} gh_2.$$

Аналогично запишем давление p_2 : к давлению в центре резервуара B (p_B) прибавим давление столба бензина $\rho_{бенз} gh_5$ и давление столба ртути $\rho_{рт} gh_4$ - получим давление $p_6 = p_5$. Затем от плоскости 0'-0' поднимемся вверх до плоскости 0-0, т. е. вычтем давление столба масла $\rho_{мас} gh_3$ и получим давление p_2 :

$$p_2 = p_B + \rho_{бенз} gh_5 + \rho_{рт} gh_4 - \rho_{мас} gh_3.$$

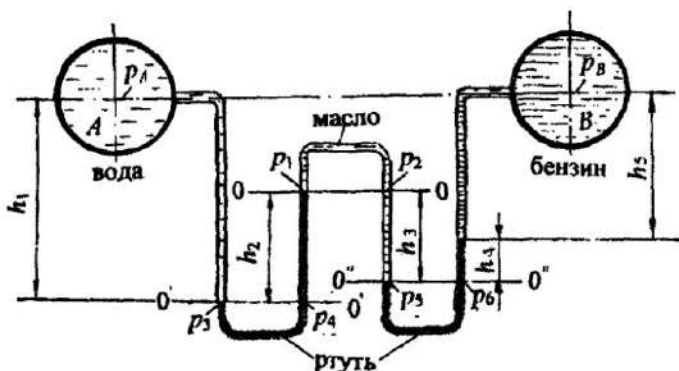


Рис. 1.3

Согласно чертежу, высота столба бензина $h_5 = h_1 - h_2 + h_3 - h_4 = 160$ мм.

По распределению уровня ртути в дифференциальном манометре предполагаем, что давление в резервуаре A больше, чем давление в резервуаре B . Находим эту разность:

$$\Delta p = p_A - p_B = \rho_{бенз} gh_5 - \rho_{рт} gh_4 - \rho_{мас} gh_3 - \rho gh_1 + \rho_{рт} gh_2.$$

При подстановке численных значений следует перевести высоты уровней жидкости в м.

Ответ: $\Delta p = p_A - p_B = 20,63$ кПа.

Ответ получился положительным, значит, предположение, что давление в резервуаре A больше, верно.

Задача 1.5.3. Определить, какое давление - манометрическое или вакуум, показывает мановакуумметр ($p_{\text{ман}}$), установленный по оси резервуара B с керосином, если показание манометра по центру резервуара A с водой $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Между резервуарами подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 200$ мм; расстояние от уровня ртути в левом колене до оси резервуара A $h = 300$ мм. Оси центров резервуаров находятся на одной линии (рис. 1.4).

Принять плотность керосина $\rho_{\text{кер}} = 820$ кг/м³; ртути - $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Примечание. *Мановакуумметр* - это прибор для измерения как манометрического, так и вакуумметрического давления, имеющий шкалу измерения со знаком "+" (манометрическое давление) и со знаком "-" (вакуумметрическое давление).

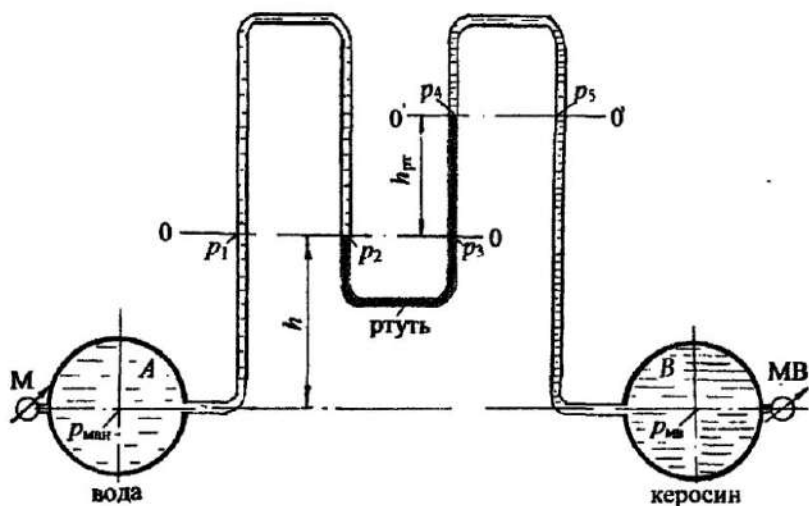


Рис. 1.4

Решение. В задачах 1.5.1 и 1.5.2 подробно изложена методика определения давления путём составления условия равенства давления относительно плоскости уровня. Из этих решений следует сделать *выводы*.

Во-первых, по плоскости уровня можно перейти в любую точку жидкости, и давление останется той же величины.

Во-вторых, при расчёте весового давления жидкости (ρgh) в случае *увеличения глубины* (отсчёты вниз) давление увеличивается и учитывается со знаком "+", в случае *уменьшения глубины* (поднимаемся вверх) давление уменьшается и учитывается со знаком "-".

В данной задаче (см. рис. 1.4) основной плоскостью уровня для всей системы является плоскость 0-0, в левой части она проходит по воде, в правой - по ртути U-образного манометра. Для этой плоскости $p_1 = p_2 = p_3$. В другой плоскости 0'-0', проведённой в керосине, $p_4 = p_5$. Задачу будем решать без учёта атмосферного давления. Значит, если рассчитанное давление на уровне установки мановакуумметра (МВ) получится положительным, прибор работает как манометр, если давление получится отрицательным, т. е. вакуумметрическим, прибор работает как вакуумметр.

А теперь запишем давление на уровне установки мановакуумметра путем следующих рассуждений. Имеем манометрическое давление $p_{\text{ман}}$ по оси резервуара А, *поднимаемся* до плоскости уровня 0-0, значит, *вычитаем* давление столба воды $\rho g h$, получаем давление p_1 , по плоскости уровня переходим в левое колено U-образного манометра, где $p_1 = p_2$. Затем переходим в правое колено манометра, где $p_3 = p_2$; *поднимаемся* к плоскости 0'-0', значит, *вычитаем* давление столба ртути $\rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}}$, получаем давление p_4 ; переходим по плоскости уровня 0'-0' к давлению $p_5 = p_4$. И последний этап: к полученному давлению p_5 *прибавляем* давление столба керосина $\rho_{\text{кер}} g(h+h_{\text{рт}})$, поскольку *опускаемся вниз* до оси резервуара В.

Таким образом, записали давление по оси резервуара с керосином, где установлен *мановакуумметр*.

Представленные рассуждения запишем следующим образом:

$$p_{\text{ман}} - \rho g h - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} + \rho_{\text{кер}} g(h+h_{\text{рт}}) = p_{\text{ман}}$$

Подставим численные значения:

$$p_{\text{ман}} = 0,12 \cdot 98 \cdot 10^3 - 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,3 - 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,5 = 9,8 \cdot 10^3 \cdot (1,2 - 0,3 - 2,72 + 0,41) = -1,41 \cdot 9,8 \cdot 10^3 \text{ Па} = -13,82 \text{ кПа}$$

Знак "-" свидетельствует о том, что *мановакуумметр* работает как *вакуумметр*. Показание вакуумметра $p_{\text{вак}} = 13,82 \text{ кПа} = 0,14 \text{ ат}$ (в такой записи индекс *вак* заменяет знак "-").

Ответ: мановакуумметр работает как вакуумметр и показывает вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,14 \text{ ат}$.

В разделе 1.6 приведены задачи для самостоятельной работы по усвоению знаний определения давления в покоящейся жидкости.

1.6. Задачи для самостоятельной работы по теме:
“Гидростатическое давление в жидкости”

Задача 1.6.1

Определить, каким прибором следует измерять давление в баке, заполненном маслом, и показание этого прибора (в ат), установленного на глубине $h = 1,2$ м, если показание U -образного ртутного манометра, установленного на поверхности масла, $h_{рт} = 200$ мм. Принять плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.5).

Ответ: следует пользоваться вакуумметром, $p_{приб} = p_{вак} = 0,163$ ат.

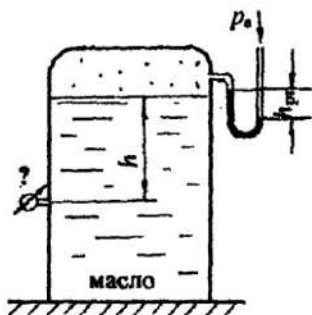


Рис. 1.5

Задача 1.6.2

Определить показание U -образного ртутного манометра ($h_{рт}$), подключённого к резервуару с маслом на глубине $h = 0,8$ м, если показание пружинного манометра, установленного на глубине $h_1 = 1,2$ м, $p_{мвн} = 0,15$ ат. Принять поправку ртутного манометра $a = 0,3$ м, плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.6).

Ответ: $h_{рт} = 104$ мм.

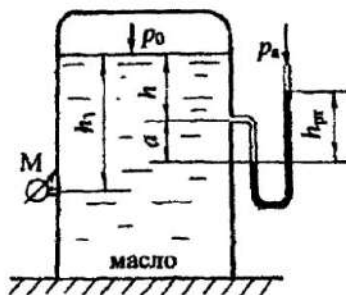


Рис. 1.6

Задача 1.6.3

Определить давление (p_0) на поверхности бензина в закрытом резервуаре и показание мановакуумметра ($p_{\text{мв}}$), установленного на глубине $h = 1,5$ м, если показание U-образного ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 400$ мм. Принять глубину $h_1 = 1,0$ м, плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720$ кг/м³ (рис. 1.7).

Ответ: $p_0 = p_{\text{вак}} = 60,4$ кПа; $p_{\text{мв}} = p_{\text{вак}} = 49,8$ кПа.

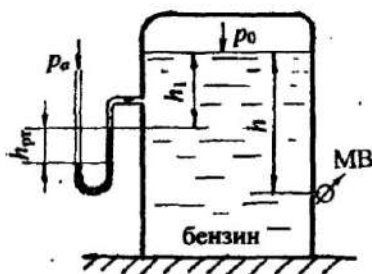


Рис. 1.7

Задача 1.6.4

Определить абсолютное давление на поверхности бензина в закрытом резервуаре ($p_{\text{абс}}$), а также показание мановакуумметра ($p_{\text{мв}}$ в бар), установленного на глубине $h_1 = 1,6$ м при заданных величинах $h = 0,5$ м, $h_{\text{рт}} = 300$ мм, атмосферное давление $p_a = 740$ мм рт. ст. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³. Давлением воздуха в U-образном ртутном манометре можно пренебречь (рис. 1.8).

Ответ: $p_{\text{абс}} = 55,13$ кПа; $p_{\text{мв}} = p_{\text{вак}} = 0,32$ бар.

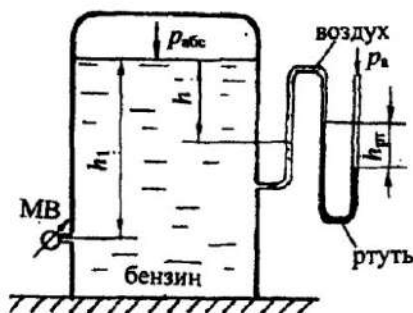


Рис. 1.8

Задача 1.6.5

Определить, каким прибором (манометром или вакуумметром) следует измерить давление газа в баллоне по показанию (h) двухжидкостного чашечного манометра, заполненного водой и ртутью ($\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), если $H = 0,6 \text{ м}$; $h = 100 \text{ мм}$; $\Delta h = 40 \text{ мм}$. Показание прибора представить в ат (рис. 1.9).

Ответ: следует пользоваться вакуумметром, $p_{\text{приб.}} = p_{\text{вак}} = 0,13 \text{ ат}$.

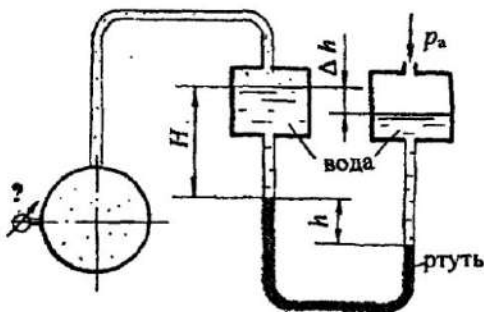


Рис. 1.9

Задача 1.6.6

Определить абсолютное давление воздуха в резервуаре B, если показание манометра, установленного по центру резервуара A, заполненного маслом, $p_{\text{ман}} = 0,12 \text{ ат}$, высоты уровней масла и ртути в U-образном ртутном дифференциальном манометре $h_m = 600 \text{ мм}$; $h_{рт} = 200 \text{ мм}$ (рис. 1.10).

Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 88,4 \text{ кПа}$.

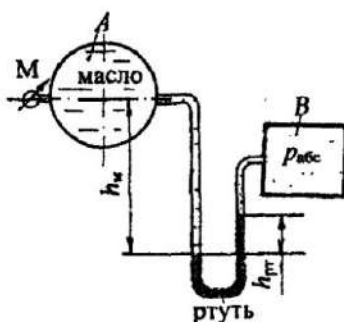


Рис. 1.10

Задача 1.6.7

Определить разность давлений (в ат) в центрах трубопроводов *A* и *B*, заполненных водой и маслом, если высоты уровней воды и масла в *U*-образном ртутном дифференциальном манометре: $h_n = 500$ мм; $h_m = 400$ мм (рис. 1.11).

Принять плотности масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Ответ: $\Delta p = p_A - p_B = 0,122$ ат.

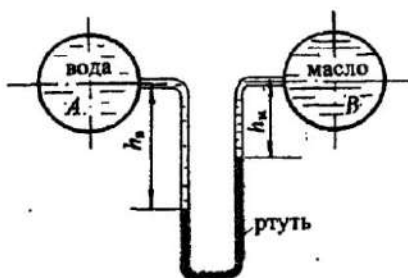


Рис. 1.11

Задача 1.6.8

Два сосуда наполнены разнородными жидкостями: маслом и керосином. На поверхности жидкостей в сосудах действуют давления p_1 и p_2 .

Найти разность этих давлений, если показание *U*-образного ртутного манометра $h = 100$ мм, высота уровня масла $H = 500$ мм, превышение уровня керосина $\Delta h = 40$ мм. Принять плотности жидкостей: масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; керосина $\rho_{\text{кер}} = 800$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.12).

Ответ: $\Delta p = p_1 - p_2 = 0,126$ ат.

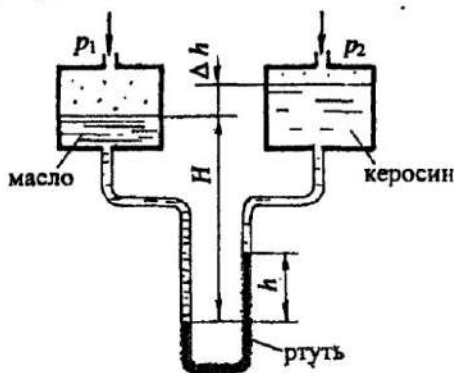


Рис. 1.12

Задача 1.6.9

Из открытого резервуара C через трубу B вода поднята в резервуар A с глубиной заполнения $h = 0,5$ м. Давление воздуха на поверхности воды в резервуаре A измерено U -образным ртутным манометром, показание которого $h_{рт} = 200$ мм (рис. 1.13). Определить высоту воды H в трубе B . Принять плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Ответ: $H = 2,22$ м.

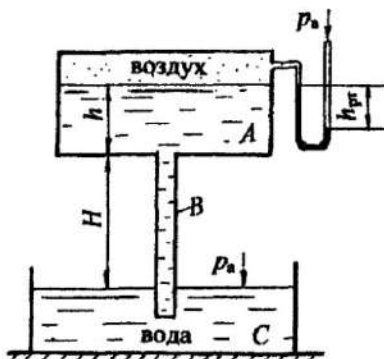


Рис. 1.13

Задача 1.6.10

Определить избыточное давление p_x (в бар) в центре сосуда с бензином, если показание манометра, включённого на уровне центра сосуда с водой $p_{ман} = 0,12$ ат, высоты уровней жидкостей: $h_1 = 400$ мм; $h_2 = 200$ мм.

Центры резервуаров находятся на одном уровне. Принять плотность бензина $\rho_{бенз} = 720$ кг/м³; ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.14).

Ответ: $p_x = p_{изб} = 0,354$ бар.

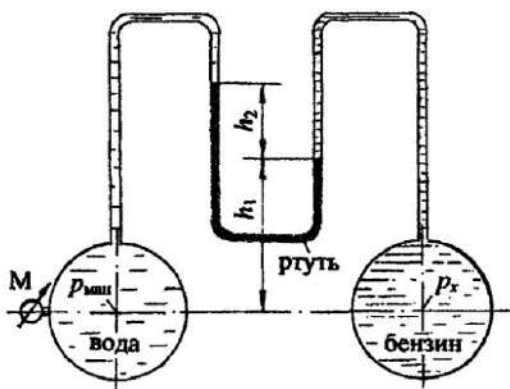


Рис. 1.14

Задача 1.6.11

Определить показание манометра $p_{\text{ман}}$ (в ат), установленного на маслопроводе диаметром $d = 200$ мм, если абсолютное давление в воздушном резервуаре $p_{\text{вбс}} = 0,9$ ат. Между воздушным резервуаром и маслопроводом подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 200$ мм. Высота столба масла от оси маслопровода до уровня ртути в U-образном манометре $h_{\text{м}} = 600$ мм. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.15).

Ответ: $p_{\text{ман}} = 0,11$ ат.

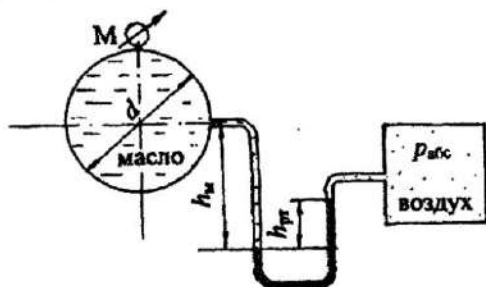


Рис. 1.15

Задача 1.6.12

В закрытом резервуаре A , заполненном маслом, давление на поверхности жидкости p_0 . На глубине $h = 0,6$ м подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 40$ мм, понижение уровня ртути в правом колене $a = 0,2$ м. Определить давление p_0 (в бар) на поверхности масла, а также высоту подъёма воды ($h_{\text{в}}$) в стеклянной трубке, опущенной в открытый резервуар B , заполненный водой (рис. 1.16).

Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Ответ: $p_0 = p_{\text{вак}} = 0,124$ бар; $h_{\text{в}} = 1,264$ м.

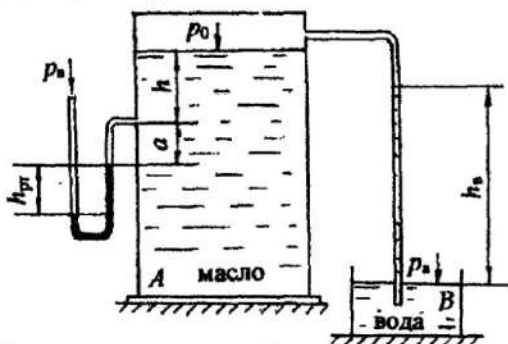


Рис. 1.16

Задача 1.6.13

Определить, на какой высоте Z находится уровень ртути в левом колене U -образного ртутного манометра, если при манометрическом давлении по центру маслопровода $p_{\text{ман}} = 0,24$ бар и показании ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 110$ мм система находится в равновесии. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.17).

Ответ: $Z = 1,06$ м.

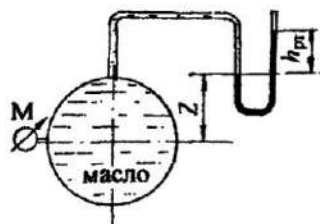


Рис. 1.17

Задача 1.6.14

Два резервуара A и B , линии центров которых совпадают, соединены двухколенным ртутным манометром. Определить, каким прибором следует измерять давление воздуха p_x в резервуаре B , если давление на поверхности воды в резервуаре A $p_{\text{ман}} = 0,18$ ат, а разности уровней ртути в дифференциальном манометре: $h_1 = 100$ мм; $h_2 = 120$ мм. Уровень ртути в левом колене расположен ниже уровня воды в резервуаре A на величину $h = 0,5$ м. Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 880 \text{ кг/м}^3$. Принять плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Плотностью воздуха при расчётах можно пренебречь (рис. 1.18).

Ответ: давление измеряется вакуумметром: $p_x = p_{\text{вак}} = 5,9 \text{ кПа} = 0,06$ ат.

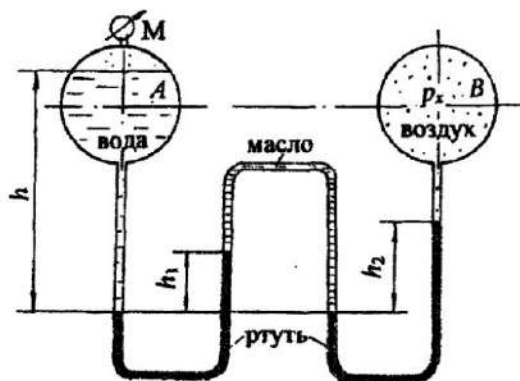


Рис. 1.18

СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

В практике гидравлических расчётов часто приходится определять величину и точку приложения силы давления жидкости на плоские стенки различной конфигурации. Такими плоскими стенками, воспринимающими давление жидкости, являются стенки резервуаров, плоские затворы, крышки, грани плотин, элементы гидротехнических сооружений и др.

Для определения силы давления жидкости на плоские стенки пользуются двумя методами - *аналитическим и графо-аналитическим*. Аналитический метод применим для плоских стенок любой формы, графо-аналитический - только для прямоугольных стенок.

2.1. Аналитический метод определения силы давления жидкости

Для расчёта силы полного или абсолютного давления жидкости на плоскую поверхность пользуются аналитической расчётной зависимостью:

$$R_{\text{полн}} = p_C A. \quad (2.1)$$

Сила полного давления жидкости на плоскую стенку равна произведению площади стенки (A) на полное давление на глубине погружения центра тяжести стенки в жидкость (p_C).

Согласно *основному уравнению гидростатики* (1.1), давление на глубине погружения центра тяжести стенки (p_C)

$$p_C = p_0 + \rho g h_C, \quad (2.2)$$

где h_C - глубина погружения центра тяжести стенки в жидкость, отсчитанная от *свободной* поверхности;

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения.

В формуле (2.2) давление на поверхности жидкости (p_0) может быть атмосферным, манометрическим (избыточным), вакуумметрическим. Формулу (2.1) с учётом формулы (2.2) можно записать:

$$R_{\text{полн}} = p_0 A + \rho g h_C A. \quad (2.3)$$

Таким образом, сила полного давления может быть представлена в виде двух составляющих:

сила *внешнего, или поверхностного*, давления

$$R_0 = p_0 A; \quad (2.4)$$

сила *весового* давления жидкости

$$R_{\text{ж}} = \rho g h_C A. \quad (2.5)$$

Сила полного давления $R_{\text{полн}}$ находится как геометрическая сумма двух параллельных сил R_0 и $R_{\text{ж}}$:

$$\vec{R}_{\text{полн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{\text{ж}}.$$

Давление на поверхности жидкости, согласно закону Паскаля, передаётся внутрь жидкости всем точкам без изменения. Это значит, что эпюра внешнего давления (p_0) представляет равномерно распределённую прямоугольную нагрузку, а равнодействующая такой нагрузки (R_0) **приложена в центре тяжести поверхности стенки**, т. е. на глубине h_C .

Составляющая от весового давления жидкости $R_{\text{ж}}$ приложена в точке, называемой **центром давления**.

Центр давления силы $R_{\text{ж}}$ всегда располагается ниже центра тяжести стенки. Глубина погружения центра давления (h_D) рассчитывается по формуле

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}, \quad (2.6)$$

где $\frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A} = e$ — эксцентриситет центра давления, его величина соответствует смещению центра давления относительно центра тяжести;

I_C — центральный момент инерции плоской стенки относительно **горизонтальной** оси;

α — угол наклона плоской стенки к горизонту.

В приложении (табл. 3) для некоторых плоских симметричных фигур приведены формулы **для определения центральных моментов инерции относительно горизонтальной оси, площадей и координат их центров тяжести**.

Для определения точки приложения силы полного давления $R_{\text{полн}}$ нужно воспользоваться **теоремой о моменте равнодействующей**: момент равнодействующей относительно какой-либо оси равен сумме моментов её составляющих относительно той же оси. Применение этой теоремы будет рассмотрено далее при разборе решения задачи 2.3.2.

2.2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления и центра давления на прямоугольные поверхности

Графо-аналитический метод расчёта силы давления основан на построении эпюр гидростатического давления. Эпюры давления представляют собой равномерно распределённую нагрузку по ширине (или длине) плоской прямоугольной поверхности. Для поверхностей в виде круга, эллипса, треугольника и им подобных эпюра давления в объёмном представлении является довольно сложной фигурой, так как изменение давления следует учитывать при переменной глубине по всей плоской поверхности. Для таких поверхностей графо-аналитический метод не применяется.

Определим силу давления жидкости на прямоугольную стенку AB высотой H и длиной (l), перпендикулярной плоскости чертежа. Удерживаемый напор равен высоте стенки (рис. 2.1). Совместим прямоугольную стенку с плоскостью чертежа и покажем положение центра тяжести стенки точку - C .

Рассчитаем силу давления жидкости $R_{ж}$ *аналитически и графически*.

Аналитический метод расчёта. Согласно формуле (2.5), сила давления жидкости

$$R_{ж} = \rho g h_c A = \frac{\rho g H^2}{2} l, \quad (2.7)$$

где $h_c = H/2$; $A = Hl$.

Положение центра давления рассчитываем по формуле (2.6)

$$h_D = h_c + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_c A},$$

где $I_C = \frac{H^3}{12}$ – центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для прямоугольника (см. приложение табл. 3); $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1,0$.

Таким образом,
$$h_D = \frac{H}{2} + \frac{H^3 \cdot 2}{12 H^2 l} = \frac{H}{2} + \frac{H}{6} = \frac{2}{3} H. \quad (2.8)$$

А теперь перейдём к *графо-аналитическому* методу расчёта силы давления и центра давления. Построим эпюру гидростатического давления. Давление жидкости в точке A $p_A = 0$, в точке B - $p_B = \rho g H$.

Эпора давления в плоскости чертежа представляет равномерную нагрузку в виде треугольника, в объёмном представлении – это треугольная призма. Равнодействующая такой равномерной нагрузки равна объёму треугольной призмы и проходит через центр тяжести этой призмы, т. е. через центр тяжести эпюры гидростатического давления.

Проверим:

$$R_{ж} = V_{\text{приз.}} = S_{\text{эп}} l = \frac{\rho g H^2}{2} l, \quad (2.9)$$

где $S_{\text{эп}}$ – площадь эпюры давления в виде треугольника.

Центр тяжести эпюры располагается на расстоянии $2/3 H$ (центр тяжести треугольника):

$$h_{\text{ц.т.эп.}} = 2/3 H. \quad (2.10)$$

Сравнивая формулы (2.7) и (2.9), а также (2.8) и (2.10), приходим к выводу: *графо-аналитически сила давления жидкости на прямоугольные поверхности равна произведению площади эпюры гидростатического давления на длину (или ширину) плоской стенки и проходит через центр тяжести эпюры давления:*

$$R_{\text{ж}} = S_{\text{эп}} l; \quad h_D = h_{\text{ц.т.эп.}} \quad (2.11)$$

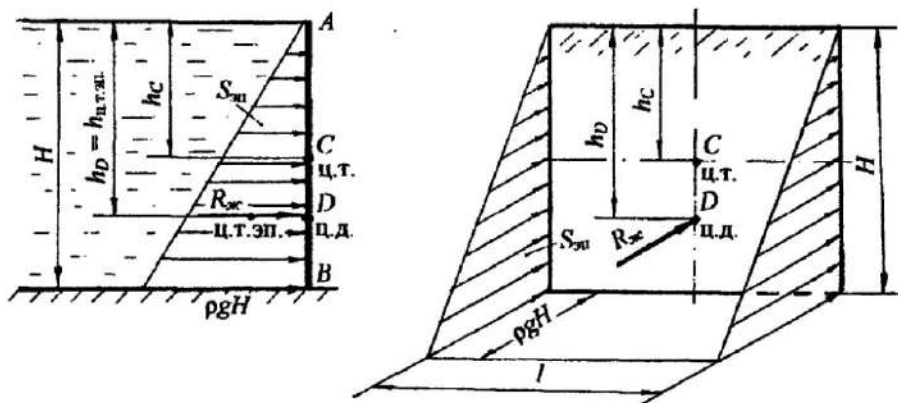


Рис. 2.1

Используя выше изложенные теоретические положения, рассмотрим примеры определения силы давления на плоские поверхности.

2.3. Примеры решения задач по теме:

“Расчёт силы давления жидкости на плоские поверхности”

Задача 2.3.1. Прямоугольная крышка AB (рис. 2.2), расположенная под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, перекрывает патрубок закрытого резервуара с водой. Высота патрубка $h = 600$ мм, ширина $b = 400$ мм. Крышка может поворачиваться вокруг шарнира A . Высота уровня воды над шарниром $a = 200$ мм. Давление на поверхности воды соответствует показанию U -образного ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 80$ мм.

Определить силу натяжения троса T для удержания крышки AB в закрытом положении. Угол натяжения троса $\beta = 45^\circ$. Принять плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³.

Решение. Чтобы определить силу натяжения троса T для удержания крышки AB в закрытом положении, нужно определить силу от внешнего давления R_0 и силу давления воды $R_{\text{ж}}$.

Рассмотрим *аналитический способ* расчёта силы давления и центра давления.

Методика расчёта силы давления включает следующую последовательность:

- рассчитывается сила давления жидкости и сила от внешнего давления, при этом на чертеже обозначаются центральные оси плоской стенки и глубина погружения центра тяжести стенки от свободной поверхности (h_C);

- определяются точки приложения сил, на чертеже обозначается точка приложения силы давления жидкости, т. е. центр давления, и глубина погружения центра давления h_D ;

- показывается направление действия сил. Следует помнить, что сила давления всегда направлена *по нормали* к поверхности.

1. Определим *силу от внешнего давления* R_0 . Значение давления p_0 по показанию U-образного манометра получим из условия равновесия жидкости относительно плоскости уровня 0-0. Давление p_0 является избыточным:

$$p_0 = \rho_{рт} g h_{рт}; \quad p_0 = 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,08 = 10,66 \cdot 10^3 \text{ Па} \quad 10,7 \text{ кПа.}$$

Значение p_0 можно получить другим способом, а именно перевести показание манометра 80 мм рт. ст. в Па:

$$p_0 = 80 \cdot 133,3 = 10,66 \cdot 10^3 \text{ Па} = 10,7 \text{ кПа.}$$

Сила от внешнего давления, согласно формуле (2.4), $R_0 = p_0 A$, где A – площадь крышки, м^2 .

Для наглядности крышку совместим с плоскостью чертежа, тогда ширина крышки равна b , а высота $h/\sin \alpha = h/\sin 60^\circ = 0,693 \text{ м}$.

Площадь крышки $A = bh/\sin 60^\circ$.

Сила от внешнего давления

$$R_0 = 10,7 \cdot 0,4 \cdot 0,693 = 2,97 \text{ кН.}$$

Покажем *линию действия и точку приложения* силы R_0 . Согласно пояснениям в разделе 2.1, эпюра давления p_0 представляет равномерно распределённую прямоугольную нагрузку, равнодействующая от такой нагрузки (R_0) *проходит* через центр тяжести эпюры и *приложена* в центре тяжести стенки на глубине h_C (рис. 2.2,б). Сила R_0 направлена *по нормали* из жидкости на стенку, как сила внешнего, *избыточного* давления.

2. Определим *силу давления жидкости* $R_{ж}$ согласно формуле (2.5):

$$R_{ж} = \rho g h_C A,$$

где $h_C = (a + h/2) = 0,5 \text{ м}$; глубину погружения центра тяжести стенки в жидкость h_C отсчитываем от *свободной* поверхности (см. рис. 2.2, а).

Подставим значения:

$$R_{ж} = \rho g (a + h/2) h b/\sin \alpha;$$

$$R_{ж} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,693 \cdot 0,4 = 1,36 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,36 \text{ кН.}$$

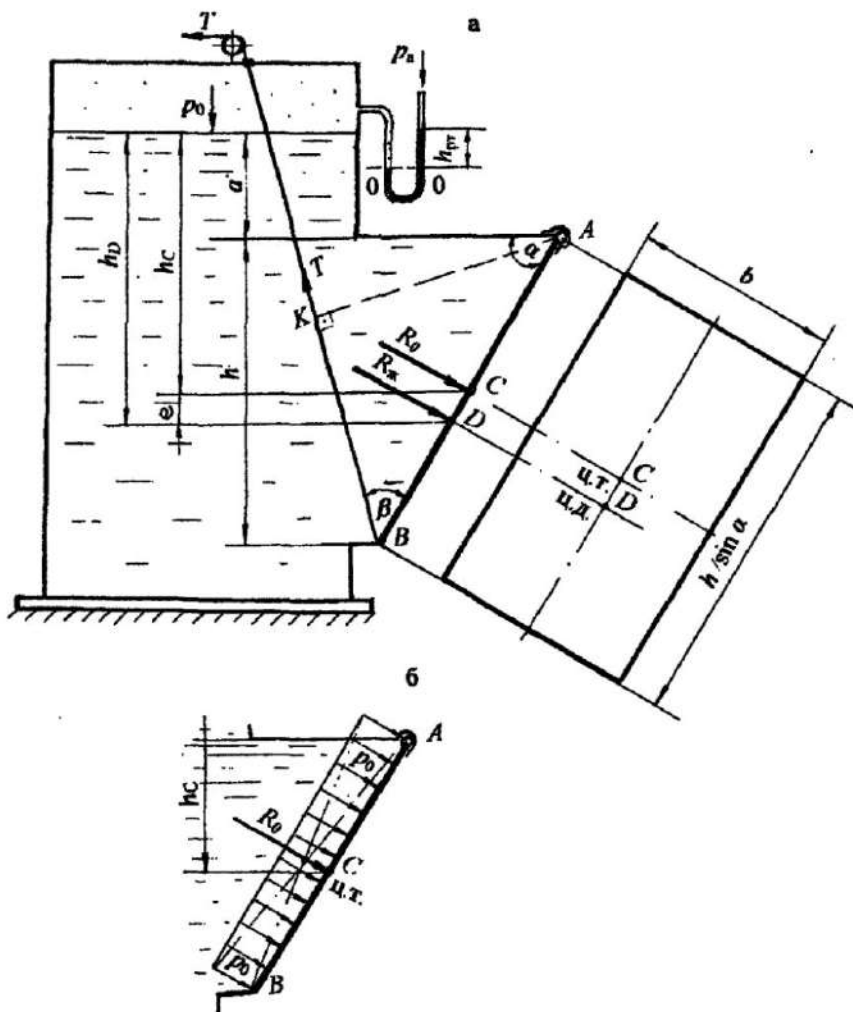


Рис. 2.2

Чтобы показать геометрическое положение силы давления жидкости $R_{ж}$, рассчитаем глубину погружения центра давления h_D , т.е. точки приложения силы $R_{ж}$ по формуле (2.6):

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где $I_C = \frac{bh^3}{12 \sin^3 \alpha}$ – центральный момент инерции прямоугольной крышки относительно горизонтальной оси (т. е. проходящей через центр тяжести крышки).

Подставив все параметры в буквенном выражении, чтобы сделать возможные сокращения, получим глубину погружения центра давления h_D :

$$h_D = h_C + k^2/12h_C = 0,5 + 0,06 = 0,56 \text{ м.}$$

Эксцентриситет $e = k^2/12h_C$, т. е. понижение центра давления относительно центра тяжести $e = 0,06 \text{ м} = 60 \text{ мм}$.

Покажем на чертеже (рис. 2.2,а) h_D и e . Сила давления жидкости R_x приложена в центре давления (точка D) по нормали из жидкости на крышку.

3. Рассчитаем силу натяжения троса T . При решении этой задачи можно не находить равнодействующую сил давления. Составим уравнение механики: сумма моментов сил относительно шарнира A равна нулю: $\Sigma M_A = 0$. От каждой силы R_0 , R_x и T берётся момент относительно точки A :

$$R_0 \cdot AC + R_x \cdot AD - T \cdot AK = 0;$$

$$\frac{R_0 h}{2 \sin 60^\circ} + \frac{R_x (h_D - a)}{\sin 60^\circ} - \frac{T h \sin 45^\circ}{\sin 60^\circ} = 0.$$

После сокращения на $\sin 60^\circ$ и преобразований получим $T = 3,25 \text{ кН}$.

Ответ: для удержания крышки AB в закрытом положении необходима сила натяжения троса $T \geq 3,25 \text{ кН}$.

Рассмотрим другой вариант в условии задачи 2.3.1, когда показание U -образного манометра будет представлено так, что уровень ртути в левом колене U -образного манометра будет выше на величину $h_{рт}$ (рис. 2.3).

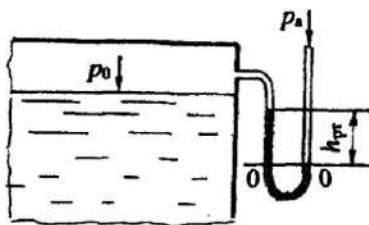


Рис. 2.3

Из условия равенства давления относительно плоскости уровня 0-0 (см. рис. 2.3) запишем:

$$p_{0\text{абс}} + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} = p_a \text{ или } p_a - p_{0\text{абс}} = \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}};$$

$$p_a - p_{0\text{абс}} = p_{\text{вак}}, \text{ значит, } p_{\text{вак}} = \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}}.$$

На поверхности воды действует вакуумметрическое давление. Это значит, что сила от *внешнего вакуумметрического давления* будет приложена в центре тяжести стенки, но направлена по нормали *внутри* жидкости (рис. 2.4).

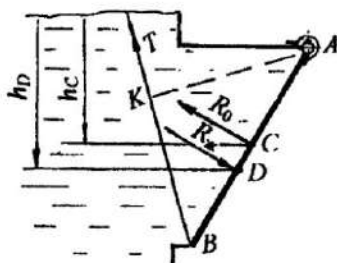


Рис. 2.4

В уравнении моментов сил относительно точки A момент от силы R_0 нужно учитывать со знаком минус, как и момент от силы T :

$$R_x \cdot AD - R_0 \cdot AC - T \cdot AK = 0.$$

Возможно, получится такой случай, когда не потребуются трос, а момент от силы давления жидкости будет равен или меньше момента от внешней вакуумметрической силы. Под действием вакуумметрического давления на поверхности воды крышка будет в закрытом положении:

$$R_x \cdot AD = R_0 \cdot AC.$$

Можно рассчитать предельный вакуум для удержания крышки в закрытом положении. Из приведённого равенства следует: $R_0 = 1,632 \text{ кН}$.

Зная, что $R_0 = p_{\text{вак}} A$, определим $p_{\text{вак}}$:

$$p_{\text{вак}} = R_0/A; \quad A = bh/\sin 60^\circ = 0,2772 \text{ м}^2; \quad \text{тогда } p_{\text{вак}} = 5,89 \text{ кПа}.$$

Рассчитаем высоту столба ртути $h_{рт}$ в U-образном манометре (см. рис. 2.3), при котором крышка будет в закрытом положении под действием вакуума на поверхности воды:

$$p_{\text{вак}} = \rho_{рт} g h_{рт} \quad \text{отсюда } h_{рт} = 0,044 \text{ м} = 44 \text{ мм.}$$

Задача 2.3.2. В торцевой стенке цистерны, заполненной бензином, предусмотрена плоская круглая крышка диаметром $d = 1,6$ м, укрепленная при помощи болтов. Определить силу давления бензина на крышку и точку приложения силы, если высота уровня бензина над нижней кромкой крышки $H = 2,0$ м. На поверхности бензина действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,2$ ат.

Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.5).

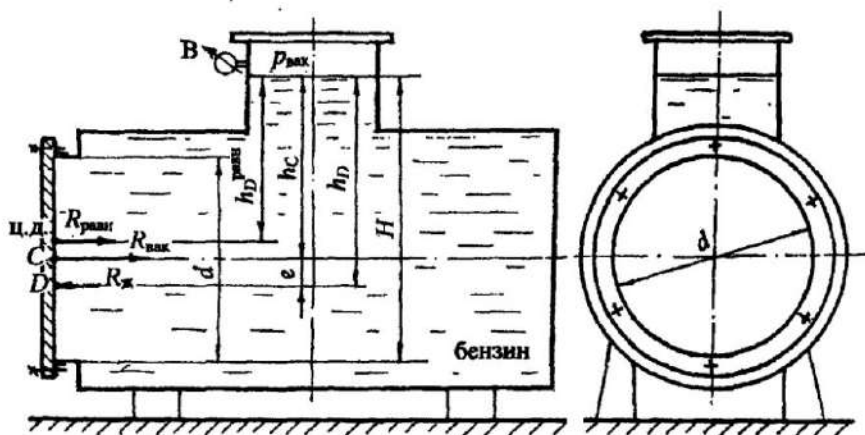


Рис. 2.5

Решение. Для определения *равнодействующей* давления воспользуемся аналитическим методом. Согласно формуле (2.3), равнодействующая, или сила полного давления:

$$R_{\text{равн}} = p_0 A + \rho g h_C A \quad \text{или} \quad \vec{R}_{\text{равн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_ж.$$

1. Определим силу от внешнего, *вакуумметрического* давления:

$$R_0 = R_{\text{вак}} = p_{\text{вак}} A,$$

где A – площадь крышки; $A = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 1,6^2/4 = 2,0 \text{ м}^2$.

$$R_{\text{вак}} = 0,2 \cdot 98 \cdot 10^3 \cdot 2,0 = 39,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 39,4 \text{ кН.}$$

Показываем линию действия $R_{\text{ж.к}}$. Эта сила приложена в центре тяжести крышки (т. С) и направлена *по нормали внутрь* жидкости, как сила отрицательного, вакуумметрического давления.

2. Рассчитаем силу давления *бензина* на круглую крышку по формуле (2.5)

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{бен}} g h_C A,$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки в жидкость, отсчитанная от свободной поверхности. Определяем h_C по чертежу (см. рис. 2.5): $h_C = H - d/2 = 1,2$ м.

$$R_{\text{ж}} = 720 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 2,0 = 16,9 \cdot 10^3 \text{ Н} = 16,9 \text{ кН.}$$

Показываем линию действия силы давления бензина. Сила давления жидкости ($R_{\text{ж}}$) приложена *в центре давления* на глубине h_D и направлена по нормали из жидкости. По формуле (2.6) глубина погружения центра давления

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1,0$ для вертикальной крышки;

I_C – центральный момент инерции круглой крышки относительно

горизонтальной оси: $I_C = \frac{\pi d^4}{64}$ (см. приложение, табл. 3).

После подстановки данных в буквенное выражение h_D получим:

$$h_D = h_C + \frac{d^2}{16h_C}; \quad h_D = 1,2 + 0,13 = 1,33 \text{ м.}$$

Эксцентриситет $e = 0,13$ м.

Покажем на чертеже h_D и e .

3. Определим величину и положение *равнодействующей* $R_{\text{равн}}$ (или силы полного давления) путём векторного сложения сил R_0 и $R_{\text{ж}}$:

$$\vec{R}_{\text{равн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{\text{ж}};$$

$$R_{\text{равн}} = R_0 - R_{\text{ж}} = 22,5 \text{ кН.}$$

Положение равнодействующей можно определить, пользуясь теоремой Вариньона: момент от равнодействующей равен сумме моментов составляющих.

Составим сумму моментов сил относительно оси, проходящей по свободной поверхности бензина. Введём обозначение: пусть $h_D^{\text{равн}}$ – глубина погружения центра давления для равнодействующей, тогда

$$M_{R_{\text{равн}}} = M_{R_0} + M_{R_{\text{ж}}};$$

$$R_{\text{равн}} h_D^{\text{равн}} = R_0 h_C - R_x h_D,$$

отсюда

$$h_D^{\text{равн}} = (R_0 h_C - R_x h_D) / R_{\text{равн}}.$$

После подстановки численных значений $h_D^{\text{равн}} = 1,1$ м. Покажем на чертеже $h_D^{\text{равн}}$, центр давления для равнодействующей и линию действия равнодействующей $R_{\text{равн}}$, по нормали внутрь жидкости.

Ответ: $R_{\text{равн}} = 22,5$ кН; $h_D^{\text{равн}} = 1,1$ м.

Задача 2.3.3. Квадратный затвор AB со стороной $a = 1,2$ м, перекрывающий выход воды из зумпфа, укреплен шарнирно и может поворачиваться относительно оси, проходящей через центр затвора (рис. 2.6).

Определить силу F , которую нужно приложить на расстоянии $0,1a$ от нижнего края затвора, чтобы удерживать затвор в закрытом положении при глубине воды перед затвором $h = 1,5$ м.

Решение. Слева от затвора имеем открытую свободную поверхность с атмосферным давлением, справа щит также находится под действием атмосферного давления, поэтому при определении силы давления будем учитывать только силу давления жидкости, силу от атмосферного давления в таком случае не учитывают.

Решение задачи проведём *аналитическим и графо-аналитическим* методами.

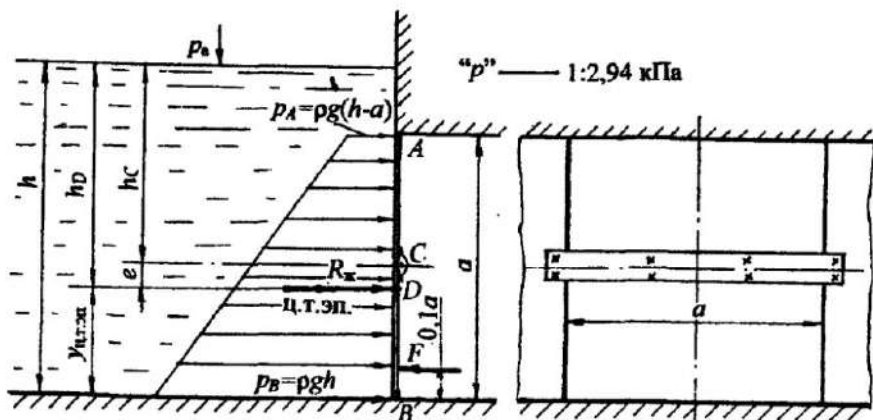


Рис. 2.6

1. Аналитический метод расчёта.

а) Рассчитаем силу давления воды по формуле (2.5)

$$R_{\text{ж}} = \rho g h_{\text{с}} A,$$

где A – площадь затвора: $A = a^2 = 1,44 \text{ м}^2$;

$h_{\text{с}}$ – глубина погружения центра тяжести затвора: $h_{\text{с}} = h - a/2 = 0,9 \text{ м}$;
покажем $h_{\text{с}}$ на чертеже.

$$R_{\text{ж}} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,9 \cdot 1,44 = 12,7 \cdot 10^3 \text{ Н} = 12,7 \text{ кН}.$$

б) Определим глубину погружения центра давления h_{D} , т. е. точки приложения силы давления $R_{\text{ж}}$ по формуле (2.6)

$$h_{\text{D}} = h_{\text{с}} + \frac{I_{\text{с}} \sin^2 \alpha}{h_{\text{с}} A},$$

где $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1,0$; центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для квадратного затвора $I_{\text{с}} = a^4/12$.

После подстановки всех значений в буквенное выражение h_{D} и соответствующих сокращений получим:

$$h_{\text{D}} = h_{\text{с}} + \frac{a^2}{12h_{\text{с}}}; \quad h_{\text{D}} = 0,9 + 0,13 = 1,03 \text{ м}.$$

Эксцентриситет $e = 0,13 \text{ м}$.

Покажем на чертеже h_{D} , e и силу $R_{\text{ж}}$, приложенную в центре давления (т. D)

в) Определим силу F для удержания затвора в закрытом положении, т. е. в состоянии равновесия, составив уравнение механики: сумма моментов сил относительно шарнира C равна нулю:

$$\Sigma M_{\text{с}} = 0; \quad R_{\text{ж}} e - F \cdot 0,4a = 0, \quad \text{отсюда } F = 3,44 \text{ кН}.$$

2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления воды $R_{\text{ж}}$ и глубины погружения центра давления h_{D} .

а) Определим давление воды в точках A и B :

$$p_{\text{A}} = \rho g (h-a); \quad p_{\text{A}} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,3 = 2,94 \cdot 10^3 \text{ Па} = 2,94 \text{ кПа};$$

$$p_{\text{B}} = \rho g h; \quad p_{\text{B}} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,5 = 14,7 \text{ кПа}.$$

б) Строим *эпюру гидростатического давления* воды: в *любом* выбранном масштабе по нормали к стенке откладываем величину давления p_{A} и p_{B} , соединяем полученные значения наклонной прямой, так как закон изменения давления по глубине линейный (см. раздел 1.3), и заштриховываем горизонтальными штриховыми линиями, стрелками обозначив направление

давления. Получим эпюру давления воды в виде трапеции в вертикальной плоскости.

в) Рассчитаем силу давления воды $R_{ж}$. Согласно формуле (2.11):

$$R_{ж} = S_{эп} \alpha;$$

$$S_{эп} = S_{травн} = \frac{p_A + p_B}{2} \alpha = \frac{\rho g(h-a) + \rho g h}{2} \alpha.$$

После подстановки данных получим: $S_{эп} = 10,6 \text{ кПа}\cdot\text{м}$; $R_{ж} = 12,7 \text{ кН}$.

г) Определим положение центра давления. Согласно графо-аналитическому методу сила давления жидкости *проходит через центр тяжести эпюры гидростатического давления*: $h_D = h_{ц.т.эп}$. Положение центра тяжести эпюры в виде трапеции определяется по табл. 3 (см. приложение):

$$y_{ц.т.эп} = \frac{\alpha(2p_A + p_B)}{3(p_A + p_B)} = 0,47 \text{ м}.$$

Согласно чертежу, глубина погружения центра давления h_D

$$h_D = h - y_{ц.т.эп} = 1,5 - 0,47 = 1,03 \text{ м}.$$

Таким образом, *аналитический и графо-аналитический* методы расчёта силы давления $R_{ж}$ и глубины погружения центра давления h_D дают одинаковые значения.

Ответ: сила $F = 3,44 \text{ кН}$.

Задача 2.3.4. Определить равнодействующую давления воды и положение центра давления на грани напорной грани плотины ABC , удерживающей напоры: $H_1 = 3,0 \text{ м}$; $H_2 = 2,0 \text{ м}$. Угол наклона наклонной грани плотины $\alpha = 60^\circ$. Длина плотины в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $l = 10 \text{ м}$ (рис. 2.7). Решение выполнить *графо-аналитическим* методом.

Решение. Графо-аналитический метод решения предусматривает выполнение чертежа в масштабе. Представим в удобном выбранном масштабе сечение плотины и действующие напоры. Равнодействующая давления воды на грани плотины определится путём векторного сложения сил, действующих на наклонную (R_{AB}) и вертикальную (R_{BC}) грани плотины:

$$\vec{R} = \vec{R}_{AB} + \vec{R}_{BC}.$$

Расчёт силы давления на плоские поверхности *графо-аналитическим методом* проводим *по следующей методике*.

1. Определяем давление воды в характерных точках плотины *A, B* и *C* :

$$p_A = 0; \quad p_B = \rho g H_1; \quad p_C = \rho g (H_1 + H_2);$$

$$p_B = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 3,0 = 29,4 \cdot 10^3 \text{ Па} = 29,4 \text{ кПа};$$

$$p_C = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 5,0 = 49,0 \cdot 10^3 \text{ Па} = 49,0 \text{ кПа}.$$

2. Строим эпюры гидростатического давления воды.

В выбранном масштабе откладываем величину давления в точках *A, B* и *C*, помня, что давление действует нормально к плоской поверхности (см. рис. 2.7).

Эпюра давления на наклонную грань плотины представляет равномерную нагрузку в виде треугольника. Основание треугольника соответствует величине давления $p_B = \rho g H_1$, т. е. давлению в точке *B*, отложенному *по нормали к наклонной грани*.

При построении эпюры давления на вертикальную грань то же самое давление в точке *B* откладываем *нормально к вертикальной грани* плотины. В точке *C* откладываем давление $p_C = \rho g (H_1 + H_2)$ также по нормали к вертикальной грани плотины. Для вертикальной грани эпюра давления представляет равномерную нагрузку в виде трапеции (см. рис. 2.7).

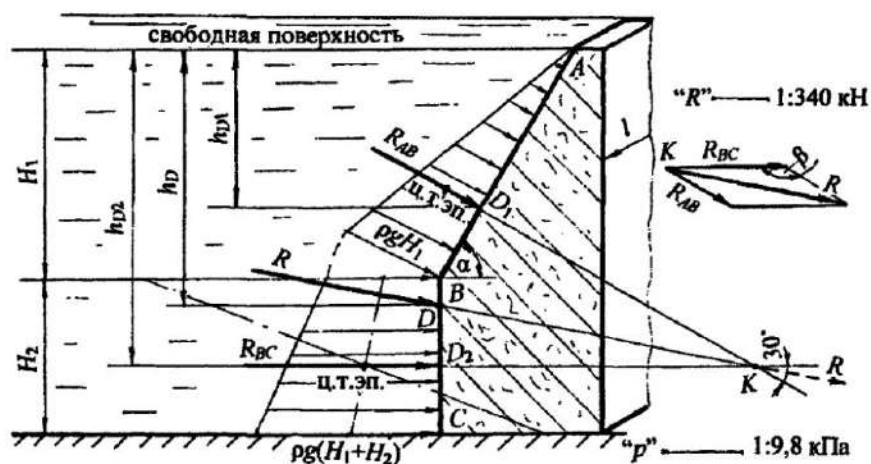


Рис. 2.7

3. Рассчитываем силы давления воды на грани плотины согласно формуле (2.11):

$$R_{AB} = S_{эп1} l = S_{треуг} l = \frac{\rho g H_1^2}{2 \cdot \sin 60^\circ} l; \quad R_{AB} = 509,2 \text{ кН};$$

$$R_{BC} = S_{эп2} l = S_{трап} l = \frac{\rho g H_1 + \rho g (H_1 + H_2)}{2} H_2 l; \quad R_{BC} = 784,0 \text{ кН}.$$

4. Показываем линию действия сил R_{AB} и R_{BC} .

Согласно формуле (2.11), графически сила давления жидкости *проходит* через центр тяжести эпюры гидростатического давления. Центр тяжести эпюры в виде треугольной нагрузки расположен на расстоянии $2/3$ высоты треугольника, т. е. $2/3 AB = 2/3 \cdot H_1 / \sin 60^\circ$. Находим в масштабе центр тяжести треугольника и показываем линию действия силы R_{AB} . Сила *приложена нормально* к наклонной грани плотины в центре давления (точка D_1). Показываем на чертеже глубину погружения центра давления $h_{D1} = 2/3 H_1$.

Для определения положения центра тяжести эпюры в виде трапеции можно воспользоваться табл. 3 (см. приложение), как было отмечено в задаче 2.3.3. Поскольку метод решения задачи графо-аналитический, рассмотрим *геометрический* способ определения центра тяжести трапеции:

а) к меньшему основанию трапеции на его продолжении в любую сторону прибавляем большее основание трапеции;

б) к большему основанию трапеции в противоположную сторону прибавляем меньшее основание;

в) соединяем полученные две точки прямой линией;

г) через середины оснований трапеции проводим вторую линию;

д) точка пересечения двух линий построения является центром тяжести эпюры давления в виде трапеции.

Показываем центр тяжести трапеции и через эту точку проводим силу R_{BC} по нормали к вертикальной грани. Учитывая масштаб действующих напоров, находим величину $h_{D2} = 4,1$ м.

5. Определяем величину и линию действия *равнодействующей* сил давления R путём *векторного сложения* сил R_{AB} и R_{BC} . Продолжаем силы по линии действия до взаимного пересечения в точке K . По линии действия откладываем величины сил в удобном принятом масштабе и складываем их

“по правилу треугольника” или “по правилу параллелограмма”. Может быть вариант, когда точка пересечения составляющих сил расположена так, что её следует вынести за пределы чертежа, как представлено в данном решении, и произвести сложение векторов сил, затем по линии действия равнодействующую R параллельно перенести в точку пересечения составляющих и определить точку пересечения равнодействующей с плоской поверхностью.

В данной задаче (см. рис. 2.7) силу R , найденную путём векторного сложения, переносим параллельно в точку пересечения составляющих - K , по линии действия силу R продолжаем до пересечения её с гранью плотины в точке D . Точка D является центром давления для равнодействующей R . Глубину погружения центра давления h_D следует определить по масштабу. Величину равнодействующей силы определим по принятому масштабу при сложении сил. По масштабу глубина погружения центра давления $h_D = 3,5$ м.

Проверим значение силы R аналитическим расчётом, пользуясь теоремой косинусов. Угол между силами R_{AB} и R_{BC} при их сложении “по правилу треугольника” $\beta = 150^\circ$ (см. рис. 2.7). Равнодействующая сила давления воды:

$$R = \sqrt{R_{AB}^2 - 2R_{AB} R_{BC} \cos 150^\circ + R_{BC}^2};$$

$$\cos 150^\circ = -\cos 30^\circ = -0,866;$$

$$R = \sqrt{509,2^2 + 2 \cdot 509,2 \cdot 784,0 \cdot 0,866 + 784^2} = 1251,2 \text{ кН.}$$

Проверив значение силы R по масштабу, получим с допустимой точностью то же самое значение.

Ответ. Сила давления воды на напорную грань плотины $R = 1251,2$ кН. Глубина погружения центра давления $h_D = 3,5$ м.

Задача 2.3.5. Определить величину, направление и точку приложения силы давления воды на наклонную стенку AB , удерживающую напоры: слева $H = 4,5$ м, справа - $h = 1,5$ м. Длина стенки в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $l = 5,0$ м. Угол наклона стенки к горизонту $\alpha = 45^\circ$ (рис. 2.8). Представить графо-аналитический метод решения.

Решение. Методика расчёта силы давления на плоские прямоугольные поверхности графо-аналитическим методом подробно рассмотрена в задаче 2.3.4. Решение данной задачи будет представлено более кратко.

Равнодействующую силу давления воды определим путём построения результирующей эпюры гидростатического давления.

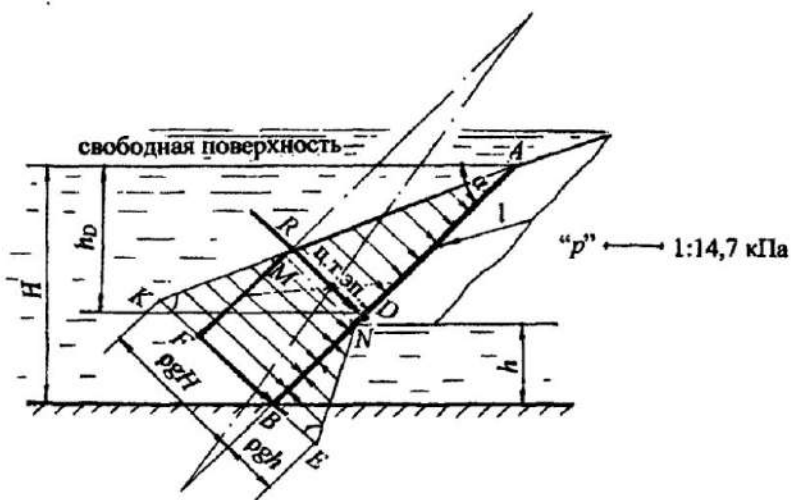


Рис. 2.8

1. Давление воды в характерных точках:

слева $p_A = 0$; $p_B^{\text{сп}} = \rho g H = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 4,5 = 44,1 \cdot 10^3 \text{ Па} = 44,1 \text{ кПа}$;

справа $p_N = 0$; $p_B^{\text{спр}} = \rho g h = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,5 = 14,7 \cdot 10^3 \text{ Па} = 14,7 \text{ кПа}$.

2. Строим эпюры давления воды слева и справа.

Слева эпюра давления представляет равномерную нагрузку в виде прямоугольного треугольника ABK с основанием $KB = p_B^{\text{сп}} = \rho g H$. Это давление откладываем в масштабе по нормали к стенке AB , стрелками показываем направление давления из жидкости на стенку. Справа эпюра давления также представляет равномерную нагрузку в виде треугольника NBE с основанием $BE = p_B^{\text{спр}} = \rho g h$. Давление справа является *противодавлением*, поэтому направление давления соответственно показано стрелками навстречу давлению слева, по аналогии из жидкости на плоскость. Углы наклона эпюр одинаковы, так как слева и справа жидкости одинаковой плотности - вода (см. раздел 1.3).

Из построения эпюр следует, что из эпюры давления слева (из треугольника ABK) можно вычестть эпюру давления справа (треугольник NBE). Результирующая эпюра давления представляет трапецию $FMAVB$ (см. рис. 2.8).

3. Рассчитываем равнодействующую силу давления воды:

$$R = S_{\text{зн}} l = S_{\text{трап}} l = \frac{FM + AB}{2} FB \cdot l.$$

Из построения эпюр (см. рис. 2.8) находим:

$$AB = H/\sin \alpha = H/\sin 45^\circ = 6,36 \text{ м};$$

$$FM = NB = h/\sin \alpha = h/\sin 45^\circ = 2,15 \text{ м};$$

$$FB = p_B^{\text{сн}} - p_B^{\text{ср}} = \rho g (H-h) = 29,4 \text{ кПа.}$$

$$R = \frac{2,15 + 6,36}{2} \cdot 29,4 \cdot 5,0 = 625,5 \text{ кН.}$$

4. Показываем линию действия равнодействующей R .

Сила проходит через центр тяжести эпюры в виде трапеции. В задаче 2.3.4 рассмотрено *геометрическое* определение центра тяжести трапеции. Путём геометрических построений покажем центр тяжести трапеции и через него проведём равнодействующую R по нормали к стенке AB . Точка пересечения линии действия равнодействующей с плоской стенкой является центром давления т. D .

Глубину погружения центра давления $h_D = 2,87$ м можно определить по *масштабу, вычислить* по формуле (см. приложение, табл. 3) или через координаты центров тяжести сложной фигуры, состоящей из прямоугольника и треугольника. Этот метод рассматривается в курсе сопротивления материалов. В данном учебном пособии такой метод будет представлен при определении силы давления на криволинейные поверхности.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 625,5$ кН, глубина погружения центра давления $h_D = 2,87$ м.

При расчёте силы давления жидкости на плоские, а в дальнейшем и на криволинейные поверхности могут быть случаи, когда резервуар закрыт, находится под некоторым напором, отсутствует свободная поверхность жидкости, но известно показание прибора для измерения давления на определённом уровне. Такими приборами могут быть пьезометр, манометр механический или жидкостный, вакуумметр, мановакуумметр.

В этом случае рациональным считается метод расчёта силы давления, при котором производится *перевод давления из ат, бар, мм рт. ст. и т. п. в давление столба жидкости по пьезометру.*

Задача 2.3.6. Определить силу давления масла на плоскую круглую крышку диаметром $d = 600$ мм закрытого резервуара и положение центра давления, если показание манометра, установленного на расстоянии $a = 200$ мм от нижней кромки крышки $p_{\text{ман}} = 0,11$ ат, плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 900$ кг/м³ (рис. 2.9).

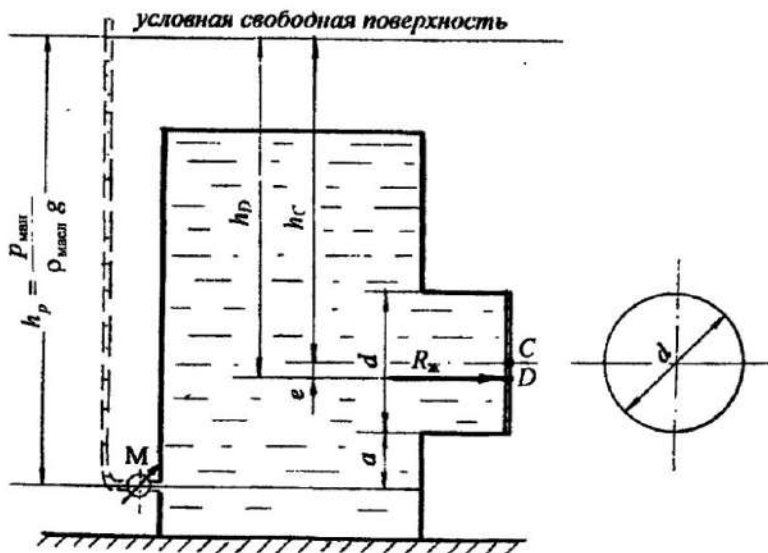


Рис. 2.9

Решение. Силу давления на плоскую круглую крышку следует рассчитывать *аналитическим* методом, графо-аналитический метод не применим.

Рассмотрим два варианта решения.

1. *Первый вариант.* Силу давления жидкости определяем по известной формуле (2.1):

$$R_{\text{ж}} = p_{\text{с}} A,$$

где $p_{\text{с}}$ – давление масла на уровне центра тяжести круглой крышки:

$$p_{\text{с}} = p_{\text{ман}} - \rho_{\text{масл}} g (a + d/2);$$

A – площадь крышки:
$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0,2826 \text{ м}^2.$$

Значит, сила давления масла

$$R_{\text{ж}} = \left[p_{\text{ман}} - \rho_{\text{масл}} g \left(a + \frac{d}{2} \right) \right] \frac{\pi d^2}{4};$$

$$R = (0,11 \cdot 98 \cdot 10^3 - 900 \cdot 9,8 \cdot 0,5) \cdot 0,2826 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,8 \text{ кН.}$$

Для определения положения силы $R_{\text{ж}}$ находим эксцентриситет из формулы (2.6)

$$e = \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}; \quad \text{где } \alpha = 90^\circ; \quad \sin \alpha = 1,0; \quad I_C = \frac{\pi d^4}{64}.$$

После подстановки параметров в буквенном выражении получаем:

$$e = \frac{d^2}{16h_C},$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки или напор на уровне центра тяжести, который можно рассчитать по формуле

$$h_C = \frac{P_C}{\rho_{\text{масл}} g} = \frac{P_{\text{ман}}}{\rho_{\text{масл}} g} - \left(a + \frac{d}{2} \right);$$

$$h_C = \frac{0,11 \cdot 98 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} - 0,5 = 0,72 \text{ м};$$

$$e = \frac{0,6^2}{16 \cdot 0,72} = 0,031 \text{ м} = 31 \text{ мм.}$$

Отмечаем на чертеже эксцентриситет $e = 31$ мм. Эту величину откладываем ниже центра тяжести стенки и на этом уровне показываем положение силы давления масла $R_{\text{ж}}$ (см. рис. 2.9). Сила приложена по нормали к крышке в центре давления (т. D).

2. **Второй вариант.** Давление $P_{\text{ман}}$ на уровне установки манометра можно перевести в давление столба жидкости, условно заменив манометр пьезометром. На рис. 2.9 пьезометр представлен пунктирной линией.

Рассчитываем высоту уровня масла в пьезометре по формуле (1.5)

$$h_p = \frac{P_{\text{ман}}}{\rho_{\text{масл}} g}; \quad h_p = \frac{0,11 \cdot 98 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} = 1,22 \text{ м.}$$

Так как пьезометр – это *открытая* стеклянная трубка, то таким образом можно показать *условную свободную поверхность, или пьезометрическую плоскость* (П П). От условной свободной поверхности отсчитывается глубина погружения центра тяжести крышки (ц.т.) и глубина погружения центра давления (ц.д.).

Силу давления масла рассчитываем по формуле (2.5)

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{масл}} g h_C A,$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки, отсчитанная от условной свободной поверхности:

$$h_C = h_p - (a + d/2); \quad h_C = 1,22 - 0,5 = 0,72 \text{ м.}$$

Тогда сила давления масла

$$R_{\text{ж}} = 900 \cdot 9,8 \cdot 0,72 \cdot 0,2826 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,8 \text{ кН.}$$

Глубина погружения центра давления от условной свободной поверхности согласно формуле (2.6):

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A} = h_C + \frac{d^2}{16h_C};$$

$$h_D = 0,72 + 0,031 = 0,751 \text{ м.}$$

На глубине h_D показываем силу давления масла. Центр давления ниже центра тяжести крышки на величину второго слагаемого, т. е. эксцентриситета $e = 0,031 \text{ м} = 31 \text{ мм}$.

Таким образом, оба варианта расчётов совпадают.

Ответ. Сила давления масла $R_{\text{ж}} = 1,8 \text{ кН}$, глубина погружения центра давления $h_D = 0,751 \text{ м}$, эксцентриситет $e = 31 \text{ мм}$.

Рассмотрим ещё несколько случаев установки измерительных приборов давления, перевод давления по прибору в давление столба жидкости и определения положения свободной поверхности.

Задача 2.3.7. Определить величину силы давления бензина на прямоугольную крышку AB высотой $h = 600 \text{ мм}$ и шириной $b = 400 \text{ мм}$, если показания U -образного ртутного манометра: ртути $h_{\text{рт}} = 40 \text{ мм}$, масла $h_{\text{масл}} = 30 \text{ мм}$; расстояния: $a = 100 \text{ мм}$, $c = 200 \text{ мм}$ (рис. 2.10).

Найти геометрическое положение центра давления.

Принять плотности жидкостей: масла $\rho_{\text{масл}} = 900 \text{ кг/м}^3$, ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$.

Решение представить *аналитическим* и *графо-аналитическим* методами.

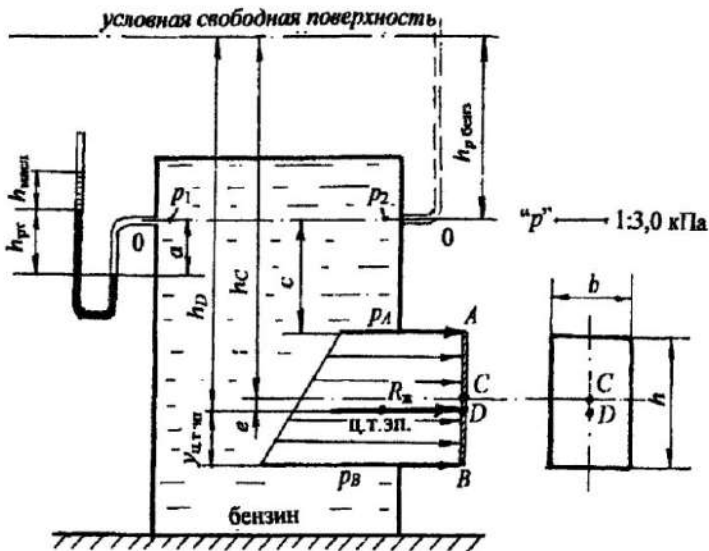


Рис. 2.10

Решение.

1. **Аналитический метод.** Силу давления бензина рассчитаем по формуле (2.5)

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{бенз}} g h_c A,$$

где A – площадь крышки, $A = bh$;

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{бенз}} g h_c b h.$$

Переведём показание U -образного манометра в давление столба жидкости по пьезометру.

Вспомним условие равенства давления относительно плоскости уровня 0-0 (см. главу 1; параграф 1.5), учитывая только избыточное давление (см. рис. 2.10):

$$p_1 = p_2;$$

$$p_1 = \rho_{\text{масл}} g h_{\text{масл}} + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бенз}} g a;$$

$$p_2 = \rho_{\text{бенз}} g h_{\text{р бенз}};$$

$$\rho_{\text{масл}} g h_{\text{масл}} + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бенз}} g a = \rho_{\text{бенз}} g h_{\text{р бенз}}.$$

Отсюда

$$h_{\text{р бенз}} = \frac{\rho_{\text{масл}} h_{\text{масл}} + \rho_{\text{рт}} h_{\text{рт}}}{\rho_{\text{бенз}}} - a;$$

$$h_{p_{\text{бенз}}} = \frac{900 \cdot 0,03 + 13,6 \cdot 10^3 \cdot 0,04}{720} - 0,1 = 0,693 \text{ м.}$$

Рассчитаем глубину погружения центра тяжести крышки от условной свободной поверхности:

$$h_C = h_{p_{\text{бенз}}} + c + h/2; \quad h_C = 1,193 \text{ м} = 1,2 \text{ м.}$$

Определим силу давления бензина:

$$R_{\text{ж}} = 720 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 0,4 \cdot 0,6 = 2,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 2,0 \text{ кН.}$$

Глубину погружения центра давления от условной свободной поверхности определяем по известной формуле (2.6)

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}; \quad \alpha = 90^\circ; \quad \sin \alpha = 1,0.$$

Подставив в формулу h_D значение центрального момента инерции для прямоугольника $I_C = bh^3/12$ (см. табл. 3, приложение), получим:

$$h_D = h_C + h^2/12h_C; \quad h_D = 1,2 + 0,025 \text{ м} = 1,225 \text{ м.}$$

Эксцентриситет соответствует второму слагаемому: $e = 0,025 \text{ м} = 25 \text{ мм.}$

2. *Графо-аналитический метод* определения силы давления бензина:

а) определяем давление в характерных точках A и B :

$$p_A = \rho_{\text{масл}}gh_{\text{масл}} + \rho_{\text{рт}}gh_{\text{рт}} + \rho_{\text{бенз}}g(c-a); \quad p_A = 6,3 \text{ кПа};$$

$$p_B = p_A + \rho_{\text{бенз}}gh; \quad p_B = 10,53 \text{ кПа.}$$

б) строим эпюры гидростатического давления в удобном масштабе. По нормали к стенке AB откладываем величину давления p_A и p_B (см. рис. 2.10).

в) рассчитываем силу давления бензина $R_{\text{ж}}$ по формуле (2.11)

$$R_{\text{ж}} = S_{\text{эп}} b;$$

$$R_{\text{ж}} = \frac{p_A + p_B}{2} hb; \quad R_{\text{ж}} = 2,0 \text{ кН.}$$

г) определяем положение центра тяжести эпюры, т. е. центра тяжести трапеции по табл. 3 (см. приложение):

$$y_{ц.т.эп.} = \frac{h(p_B + 2p_A)}{3(p_A + p_B)}; \quad y_{ц.т.эп.} = 0,275 \text{ м.}$$

д) через центр тяжести эпюры проводим силу давления бензина R_x .
Проверяем величину эксцентриситета e :

$$e = h/2 - y_{ц.т.эп.};$$

$$e = 0,3 - 0,275 = 0,025 \text{ м} = 25 \text{ мм.}$$

Результаты расчёта силы давления бензина и геометрического положения центра давления двумя методами совпадают.

Ответ: $R_x = 2,0 \text{ кН}$; $h_D = 1,225 \text{ м}$; $e = 25 \text{ мм}$.

Задача 2.3.8. Определить силу давления воды на наклонную прямоугольную стенку AB , перпендикулярную плоскости чертежа, наклонённую под углом α к горизонту, перекрывающую патрубок шириной b и высотой h . Давление на поверхности воды соответствует $p_{ман}$. Уровень воды над верхней кромкой крышки равен a (рис. 2.11).

Решение представить в буквенном выражении.

Решение. Схема расположения прямоугольной крышки AB аналогична схеме к задаче 2.3.1 (см. рис. 2.2). Покажем более рациональный подход к решению задачи.

Переведём показание манометра в давление столба воды. Покажем на чертеже (см. рис. 2.11) пунктиром пьезометр от свободной поверхности воды, получим высоту (напор) $h_{ман} = \frac{p_{ман}}{\rho g}$.

Условно можно представить, что над свободной поверхностью *взамен манометрического давления действует давление столба воды $h_{ман}$* . Покажем пунктиром эту жидкость и *условную свободную поверхность*.

Теперь от условной свободной поверхности будем отсчитывать глубину погружения центра тяжести плоской стенки (h_C) и глубину погружения центра давления (h_D).

Рассчитываем силу давления жидкости R_x по формуле (2.5)

$$R_x = \rho g h_C A,$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести стенки:

$$h_C = h_{ман} + a + h/2;$$

A – площадь стенки: $A = bh/\sin \alpha$.

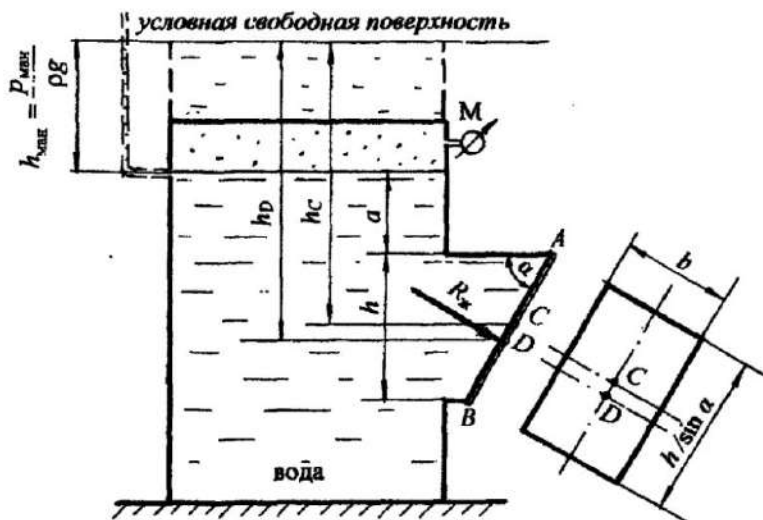


Рис. 2.11

Покажем на рис. 2.11 глубину погружения центра тяжести стенки h_C .
Получим выражение для силы давления воды:

$$R_{ж} = \rho g (h_{\text{мин}} + a + h/2) bh / \sin \alpha.$$

Покажем линию действия силы давления воды. Сила $R_{ж}$ приложена по нормали из жидкости на стенку AB на глубине h_D , согласно формуле (2.6)

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где I_C - центральный момент инерции стенки AB относительно горизонтальной оси для прямоугольника (см. табл. 3 в приложении):

$$I_C = \frac{bh^3}{12 \sin^3 \alpha}.$$

После подстановки данных и соответствующих сокращений получим:

$$h_D = h_C + \frac{h^2}{12h_C}.$$

Покажем на рис. 2.11 глубину погружения центра давления h_D и силу давления воды $R_{ж}$: сила приложена в центре давления по нормали к наклонной поверхности.

Таким образом, этот метод решения следует признать более простым и рациональным и применять при расчёте силы давления жидкости как на плоские, так и на криволинейные поверхности.

Рассмотрим случай, когда известно *вакуумметрическое* давление на определённом уровне закрытого резервуара. В этом случае можно не показывать пьезометр и условную свободную поверхность, а представить решение путём *логических рассуждений* (см. задачу 2.3.9).

Задача 2.3.9. Определить силу давления воды на круглую крышку диаметром d закрытого резервуара, если известно показание вакуумметра $p_{\text{вак}}$ на высоте h от центра тяжести крышки (рис. 2.12).

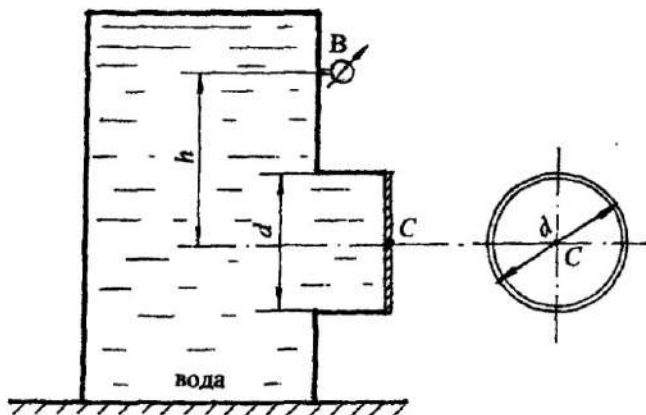


Рис. 2.12

Силу давления воды рассчитаем по известной формуле (2.1)

$$R_{ж} = p_C A,$$

где A = площадь крышки: $A = \pi d^2/4$;

p_C – давление на уровне центра тяжести крышки.

Здесь следует помнить, что при решении задачи *манометрическое* давление учитывается со знаком “+”, а *вакуумметрическое* - со знаком “-“ (см. раздел 1.2):

$$p_C = (-p_{\text{вак}} + \rho gh),$$

тогда

$$R_{ж} = (\rho gh - p_{\text{вак}}) \pi d^2 / 4. \quad (2.12)$$

Пересчитаем пьезометрический напор на уровне центра тяжести крышки AB :

$$h_c = \frac{p_c}{\rho g} = h - \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g}.$$

Центр давления находится на расстоянии эксцентриситета e от центра тяжести крышки, из формулы (2.6) имеем:

$$e = \frac{I_c \sin^2 \alpha}{h_c A}, \quad \text{где } \alpha = 90^\circ; \quad \sin \alpha = 1,0; \quad I_c = \frac{\pi d^4}{64}.$$

После подстановки параметров получим:

$$e = \frac{d^2}{16h_c}.$$

Рассмотрим три возможных варианта значения силы давления $R_{ж}$ и положения центра давления (рис. 2.13).

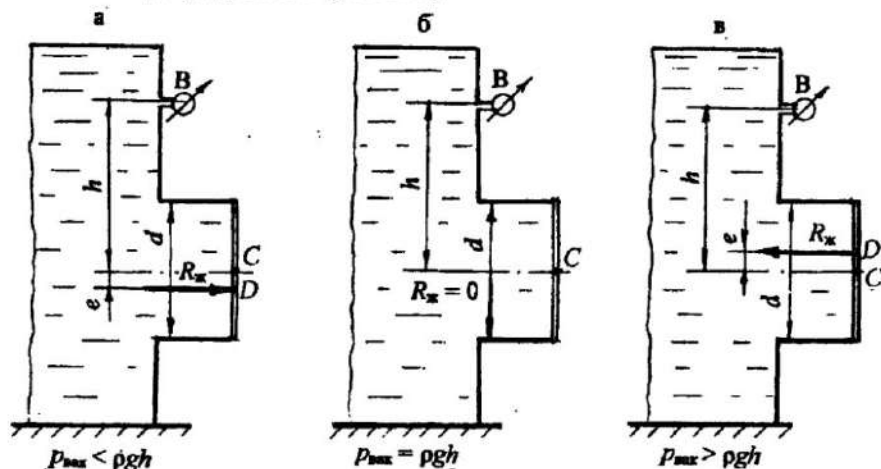


Рис. 2.13

1. Вакуумметрическое давление *меньше* давления воды от уровня установки вакуумметра до центра тяжести крышки, т. е. $\rho gh > p_{\text{вак}}$. Согласно формуле (2.12), получим положительное значение силы давления жидкости $R_{ж}$.

Сила направлена из жидкости на стенку. Значение эксцентриситета e также величина положительная. Сила давления приложена ниже центра тяжести на величину эксцентриситета (e) (см. рис. 2.13, а).

2. Вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = \rho gh$. Из расчётной формулы (2.12) получим $R_{\text{ж}} = 0$. Это значит, что сила давления воды уравнивается силой вакуумметрического давления (см. рис. 2.13, б).

3. Вакуумметрическое давление *больше* давления воды на уровне центра тяжести крышки: $p_{\text{вак}} > \rho gh$. При подстановке в расчётную формулу (2.12) получим отрицательное значение силы $R_{\text{ж}}$. Это значит, что сила будет направлена *внутрь* жидкости за счёт вакуумметрического давления.

Значение эксцентриситета e также получается *отрицательным*, значит, центр давления расположен *выше* центра тяжести крышки (см. рис. 2.13, в).

Ниже предлагаются задачи для самостоятельной работы с использованием теоретических положений по определению силы давления жидкости на плоские поверхности.

2.4. Задачи для самостоятельной работы по теме: “Сила давления жидкости на плоские поверхности”

Задача 2.4.1

Выход из резервуара, заполненного водой, представляет патрубок, который закрывается круглой крышкой диаметром $D = 600$ мм. Крышка может поворачиваться вокруг шарнира A .

Определить силу T для удержания крышки в закрытом положении, если показание ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 120$ мм, высота уровня масла над ртутью $h_{\text{м}} = 50$ мм. Принять $a = 500$ мм, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³ (рис. 2.14).

Ответ: $T \geq 3,53$ кН.

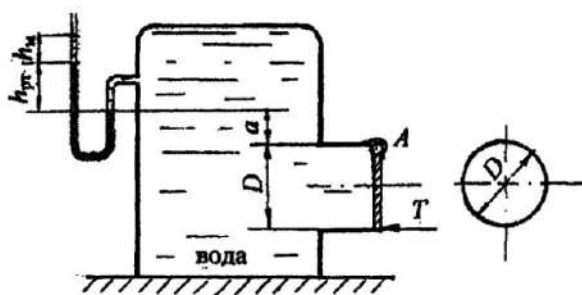


Рис. 2.14

Задача 2.4.2

Патрубок резервуара с маслом перекрывается круглой крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира A . Определить, каким должно быть показание U-образной трубки, заполненной ртутью ($h_{рт}$), установленной на поверхности масла, чтобы крышка находилась в закрытом положении за счёт вакуума.

Принять: диаметр крышки $D = 600$ мм, глубину масла до шарнира A равной $h = 200$ мм, плотность масла $\rho_{мас} = 900$ кг/м³, плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 2.15). Ответ: $h_{рт} = 38$ мм.

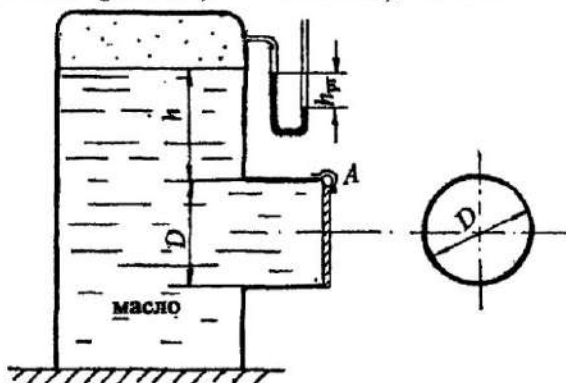


Рис. 2.15

Задача 2.4.3

В вертикальной перегородке отстойника, состоящего из двух резервуаров - A и B , сделано квадратное отверстие со стороной $a = 600$ мм, которое перекрывается крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира O .

Определить, какой наименьший вакуум нужно создать на поверхности воды в закрытом резервуаре A , чтобы крышка оставалась в закрытом положении. Резервуар B открыт. Принять $H_1 = 1,5$ м; $H_2 = 0,8$ м (рис. 2.16).

Ответ: $p_{вак} = 6,86$ кПа.

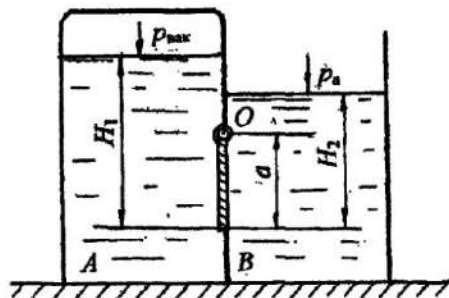


Рис. 2.16

Задача 2.4.4

Отстойник для воды разделён вертикальной перегородкой, в которой сделано круглое отверстие диаметром $D = 0,6$ м с крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира O . Закрытое положение крышки обеспечивается избыточным давлением на поверхности воды в закрытом резервуаре B . Резервуар A открыт.

Определить, при каком показании манометра в резервуаре B крышка останется в закрытом положении. Принять $H_1 = 2,3$ м; $H_2 = 0,8$ м (рис. 2.17).

Ответ: $p_{\text{ман}} = 0,15$ ат.

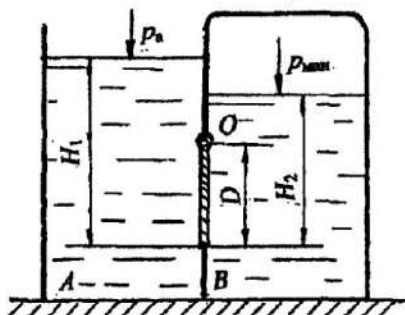


Рис. 2.17

Задача 2.4.5

Определить величину и направление силы N , приложенной к штоку гидроцилиндра для удержания его на месте, если показание мановакуумметра $p_{\text{мв}}$: а) $p_{\text{мв}} = p_{\text{ман}} = 0,12$ ат, б) $p_{\text{мв}} = p_{\text{вак}} = 0,11$ ат. Гидроцилиндр заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³, диаметр поршня $d = 100$ мм, высота уровня масла на уровне оси поршня $H = 0,8$ м (рис. 2.18).

Ответ: а) $N = 147,7$ Н (направлена влево), б) $N = 29,2$ Н (направлена вправо).

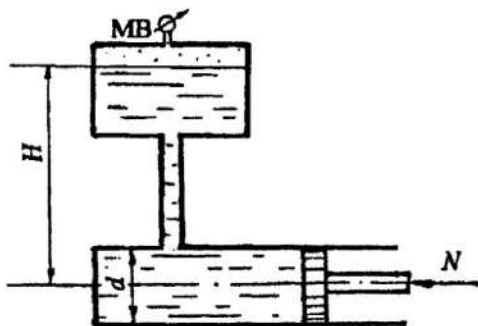


Рис. 2.18

Задача 2.4.6

Определить силу давления бензина на треугольный затвор шириной $b = 600$ мм и высотой $h = 800$ мм, а также положение центра давления, если показание манометра, установленного на расстоянии $a = 300$ мм от верхней кромки затвора $p_{\text{ман}} = 0,11$ ат (рис. 2.19).

Плотность бензина принять $\rho_{\text{бенз}} = 720$ кг/м³.

Ответ: $R_{\text{ж}} = 4,0$ кН, эксцентриситет $e = 15,0$ мм.

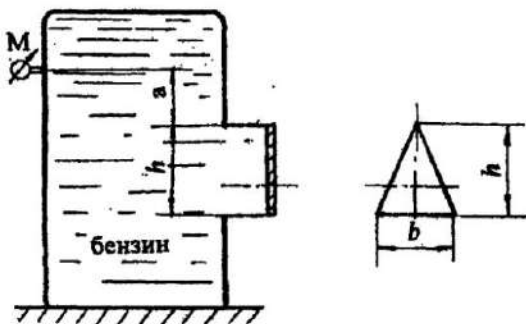


Рис. 2.19

Задача 2.4.7

Определить величину и положение равнодействующей сил давления воды на плоскую ломаную стенку ABC , удерживающую слева напор воды $H = 5,0$ м, справа $h = 2,0$ м. Длина стенки в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $L = 6,0$ м. Верхняя часть стенки наклонена под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Расчёт выполнить графо-аналитическим методом (рис. 2.20).

Ответ: $R = 636$ кН.

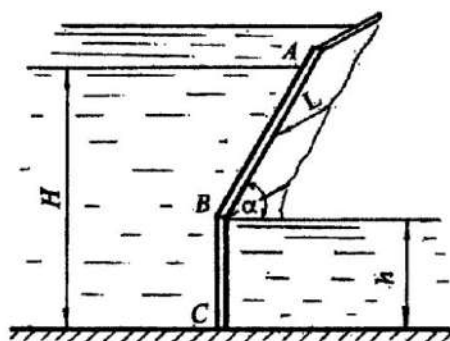


Рис. 2.20

Задача 2.4.8

Определить величину и положение равнодействующей сил давления воды на плоскую ломаную стенку ABC , удерживающую напоры $H_1 = 3,0$ м и $H_2 = 1,5$ м, если длина стенки $L = 5,0$ м, угол наклона нижней части стенки к горизонту $\alpha = 45^\circ$. Расчёты выполнить графо-аналитическим методом, показать положение центра давления (рис. 2.21).

Ответ: $R = 568$ кН.

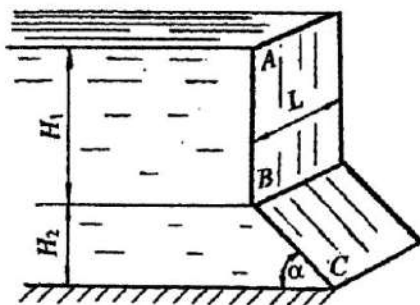


Рис. 2.21

Задача 2.4.9

Определить нормальное усилие F , приложенное к наклонной крышке AB для удержания крышки в закрытом положении. Крышка расположена под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, укреплена с помощью шарнира B и перекрывает патрубок квадратного сечения со стороной $a = 200$ мм. Патрубок заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{масл}} = 900$ кг/м³.

К дну патрубка присоединён пьезометр, показание которого $H = 300$ мм. Сила F приложена на расстоянии $b = 50$ мм от стенки патрубка (рис. 2.22).

Ответ: $F_{\text{min}} = 27,9$ Н.

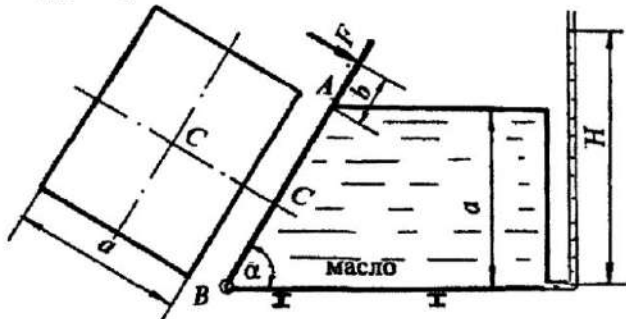


Рис. 2.22

Задача 2.4.10

Патрубок маслобака квадратного сечения со стороной $a = 150$ мм перекрывается крышкой AB , перемещающейся в вертикальных пазах. Определить силу F для открытия крышки, если показание манометра, установленного на верхней стенке патрубка, $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³, коэффициент трения скольжения в пазах $f = 0,5$. Масса крышки $M = 2,0$ кг (рис. 2.23).

Ответ: $F = 159,0$ Н.

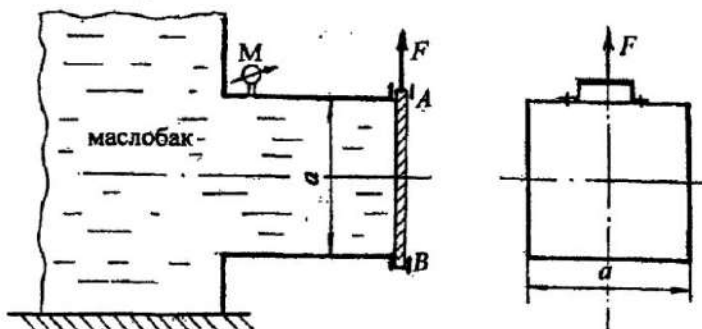


Рис. 2.23

Задача 2.4.11

В закрытом резервуаре с водой круглое донное отверстие закрывается крышкой $D = 300$ мм, шарнирно укрепленной в точке A .

Определить наименьшую силу натяжения троса T для открытия крышки. Трос укреплен под углом $\alpha = 60^\circ$. Принять показание манометра на поверхности воды $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат; глубину заполнения резервуара $H = 1,5$ м; массу крышки $M = 2,0$ кг. Трением в шарнире и направляющих троса пренебречь (рис. 2.24).

Ответ: $T_{\text{min}} = 1,09$ кН.

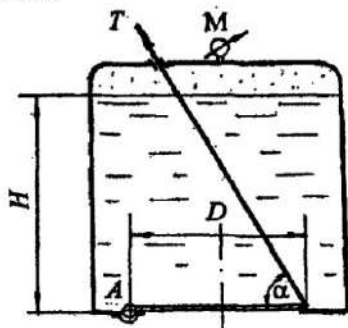


Рис. 2.24

Задача 2.4.12

Закрытый резервуар, заполненный водой, находится под давлением. В резервуаре донное круглое отверстие диаметром $d = 300$ мм закрывается крышкой $D = 380$ мм, закреплённой шарниром в точке A . Определить силу F , удерживающую крышку в закрытом положении, если масса крышки $M = 3,0$ кг. Показание манометра на расстоянии $h = 1,5$ м от дна $p_{\text{ман}} = 0,25$ ат (рис. 2.25).

Ответ: $F = 1,4$ кН.

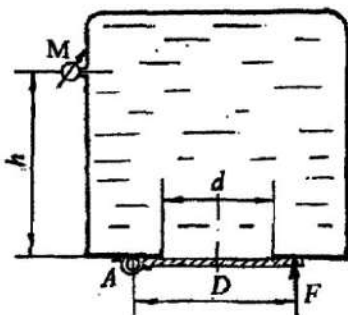


Рис. 2.25

Задача 2.4.13

Определить давление p в правой части гидроцилиндра диаметром $D = 200$ мм, заполненного маслом "Индустриальное 20". Сила, действующая на шток $d = 50$ мм при равновесном состоянии поршня, $F = 2,0$ кН. Принять избыточное давление на поверхности масла $p_0 = 0,8$ ат, напор масла на уровне оси поршня $H = 1,5$ м, плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 890$ кг/м³ (рис. 2.26).

Ответ: $p = 29,55$ кПа.

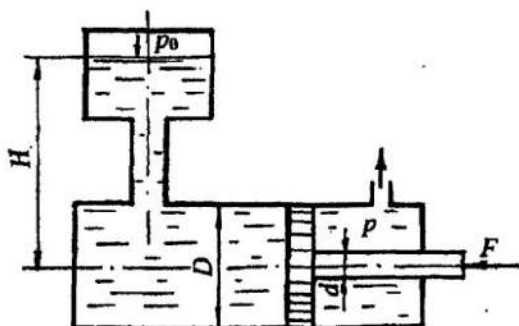


Рис. 2.26

Задача 2.4.14

Прямоугольный плоский щит, перекрывающий канал шириной $B = 2,0$ м, сверху поддерживается двумя крюками, а внизу соединён шарнирно с дном канала. Слева щит удерживает напор воды $h_1 = 2,1$ м, справа - $h_2 = 0,9$ м. Крюки укреплены на расстоянии $a = 0,5$ м от верхнего уровня воды. Определить реакции крюков $R_{кр}$ от действия воды на щит (рис. 2.27).

Ответ: $R_{кр} = 5,36$ кН.

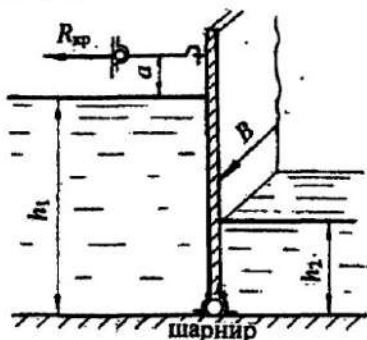


Рис. 2.27

Задача 2.4.15

Определить усилие T , которое нужно приложить к вертикальному тросу для открытия щита, перекрывающего канал прямоугольного сечения. Щит расположен под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту и закреплён шарнирно в т. O к опоре. Ширина щита в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $B = 3,0$ м. Глубина воды перед щитом $H_1 = 2,0$ м, за щитом $H_2 = 0,7$ м. Уровень воды над шарниром $h = 0,5$ м. Масса щита $M = 400$ кг (рис. 2.28).

Представить аналитическое и графо-аналитическое решение.

Ответ: $T = 64,4$ кН.

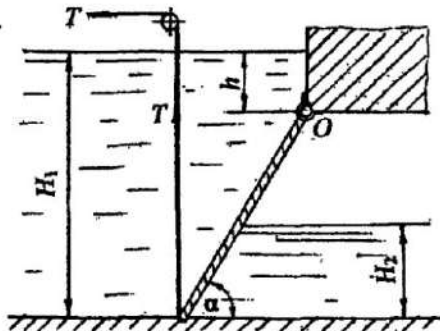


Рис. 2.28

СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

3.1. Основные понятия и теоретические положения

Примерами криволинейных поверхностей, испытывающих давление покоящейся жидкости, являются сферические и цилиндрические стенки резервуаров, секторные, сферические и цилиндрические затворы, клапаны насосов, поверхности трубопроводов и т. п.

В практике инженерных расчётов ставятся задачи определения силы давления на криволинейные поверхности, необходимые усилия для открытия клапанов и затворов или удержания их в закрытом положении.

Сложность определения силы давления на криволинейные поверхности заключается в том, что каждое элементарное усилие, действующее на криволинейную поверхность, направлено по нормали к элементарной площадке и имеет угол наклона по отношению к другому элементарному усилию.

Это значит, что при определении силы давления жидкости придётся интегрировать зависимость элементарной силы dR по площади криволинейной поверхности. Для инженерных расчётов это затруднительно.

В связи с этим принят *метод*, согласно которому равнодействующая давления на криволинейную поверхность определяется как геометрическая сумма составляющих по двум или трём выбранным направлениям:

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y + \vec{R}_z. \quad (3.1)$$

Чаще всего криволинейные поверхности, используемые в технике, имеют ось симметрии или ось вращения. Для таких поверхностей при определении силы давления жидкости достаточно двух составляющих горизонтальной и вертикальной:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}. \quad (3.2)$$

Горизонтальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность равна силе давления жидкости на плоскую вертикальную проекцию криволинейной поверхности:

$$R_x = \rho g y_c A_y, \quad (3.3)$$

где ρ — плотность жидкости;

A_y — площадь вертикальной проекции криволинейной поверхности;

y_C - координата центра тяжести вертикальной проекции, отсчитанная от свободной поверхности.

Глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции h_C совпадает с координатой центра тяжести y_C , поэтому в дальнейшем y_C можно называть глубиной погружения центра тяжести или напором на уровне центра тяжести вертикальной проекции криволинейной поверхности.

Другими словами, чтобы найти горизонтальную составляющую, нужно криволинейную поверхность спроектировать внутрь жидкости на вертикальную плоскость и найти силу давления на полученную проекцию.

Сравнивая формулу (3.3) с формулой силы давления жидкости на плоскую стенку (2.5), видим аналогию расчётных зависимостей. Значит, координату y_D или глубину погружения точки приложения горизонтальной составляющей, т. е. центра давления, определяем по формуле для *вертикальной плоской* поверхности:

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y}, \quad (3.4)$$

где I_C - центральный момент инерции вертикальной проекции относительно горизонтальной оси.

Вертикальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность равна силе тяжести жидкости в объёме "тела давления":

$$R_y = \rho g V_{т.д.}, \quad (3.5)$$

где $V_{т.д.}$ - объём тела давления.

Рассмотрим понятие "*тело давления*".

Тело давления - это криволинейный объём, ограниченный:

- самой криволинейной поверхностью;*
- поверхностью, образованной *вертикальными проектирующими линиями*, проведёнными из контура криволинейной поверхности до свободной поверхности или её продолжения;
- горизонтальной проекцией криволинейной поверхности на *свободную поверхность жидкости* или её продолжение.

Различают два вида тела давления.

1. Реальное, действительное или положительное тело давления.

Это случай, когда тело давления построено на *смоченной* части криволинейной поверхности, заполнено жидкостью, т. е. сила тяжести жидкости реально действует на криволинейную поверхность. Вертикальная составляющая силы давления R_y *из центра тяжести* объёма тела давления направлена *вниз* и также считается *положительной*.

Примеры *положительного* тела давления и *вертикальной составляющей* для криволинейной поверхности *AB* представлены на рис. 3.1.



Рис. 3.1

2. Фиктивное, мнимое или отрицательное тело давления.

Это случай, когда жидкость находится вне криволинейной поверхности, тело давления построено на *несмоченной* части криволинейной поверхности. Жидкость в объеме тела давления отсутствует. Вертикальная составляющая R_y из центра тяжести объема тела давления направлена *вверх* и считается *отрицательной*.

Примеры *отрицательного* тела давления и *вертикальной составляющей* для криволинейной поверхности *CD* приведены на рис.3.2.



Рис. 3.2

Из определения понятия тела давления и примеров построения тела давления можно представить *методику* построения тела давления.

Чтобы определить объем тела давления и его вид (положительное или отрицательное), нужно из контура криволинейной поверхности, т. е. из всех точек криволинейной поверхности, провести вертикальные линии до

свободной поверхности жидкости или её продолжения. Если очерченный вертикальными линиями объём *заполнен* жидкостью, тело давления построено на *смоченной* части криволинейной поверхности, оно считается *положительным*. Стрелками, направленными *вниз*, показываем, что жидкость давит на криволинейную поверхность (см. рис. 3.1).

Таким образом, выделенный объём можно назвать *эпюрой тела давления*. Определяем положение центра тяжести тела давления. Из центра тяжести объёма вертикальную составляющую R , направляем *вниз*.

В противном случае, если очерченный вертикальными линиями объём тела давления построен на *несмоченной* поверхности и *не заполнен* жидкостью, тело давления считается *отрицательным*. Стрелками, направленными *вверх*, показываем, что жидкость как бы вытеснена за счёт конфигурации криволинейной поверхности. Из центра тяжести отрицательного тела давления вертикальная составляющая R , направлена также *вверх* (см. рис. 3.2).

Рассмотрим случай, когда при построении может получиться не одно, а два тела давления (рис. 3.3).

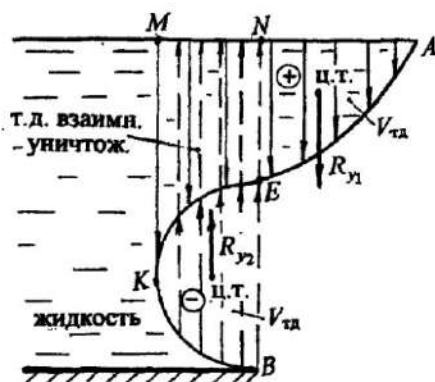


Рис. 3.3

Имеем криволинейную поверхность AKB , удерживающую некоторый напор жидкости. Криволинейную поверхность можно разделить на две части - AK и KB .

Для части AK строим тело давления по приведённой методике. Получаем *положительное* тело давления объёмом AKM , построенным на смоченной поверхности AK .

Для части криволинейной поверхности KB тело давления объёмом $KBNM$, построенное на *несмоченной* поверхности KB , *отрицательное*.

В объёме $KMNE$ происходит наложение отрицательного тела давления на положительное, два тела давления *взаимно уничтожаются* (компенсируются, сокращаются).

После построений имеем два тела давления: *положительное* объёмом ANE , сила R_{y1} из центра тяжести тела давления направлена *вниз*; *отрицательное* объёмом EKB , сила R_{y2} направлена *вверх*.

В приведённых примерах “тела давления” эпюру *положительного* тела давления заштриховываем *сплошными* линиями, *отрицательного* – *пунктирными*. Таковую же штриховку будем показывать в приведённых примерах и задачах.

Предлагается рассмотреть примеры расчёта силы давления жидкости на криволинейные поверхности различной сложности.

3.2. Примеры решения задач по теме:

“Расчёт силы давления жидкости на криволинейные поверхности”

Задача 3.2.1. Цилиндрический затвор диаметром $D = 0,6$ м перекрывает прямоугольное отверстие в вертикальной стенке, удерживающей напор воды. Высота отверстия равна диаметру затвора, длина отверстия $L = 2,0$ м. Уровень воды над верхней кромкой затвора $h = 0,2$ м. Затвор может поворачиваться относительно горизонтальной оси и, перемещаясь, открывать отверстие (рис. 3.4).

Определить величину и угол наклона к горизонту силы давления воды на цилиндрический затвор.

Решение. На рис. 3.4,а показан общий вид затвора. Решение представим в плоском чертеже для вертикального сечения затвора, при этом длина затвора L перпендикулярна плоскости чертежа (рис. 3.4,б). Для наглядности и лучшего понимания чертёж выполнен в *масштабе*.

На примере решения этой задачи представлена *методика* расчёта силы давления жидкости на криволинейные поверхности.

1. Выбираем два направления x и y , по которым определяем составляющие силы давления жидкости. Сила полного давления R :

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

Для данной цилиндрической поверхности достаточно двух направлений, так как поверхность имеет ось симметрии.

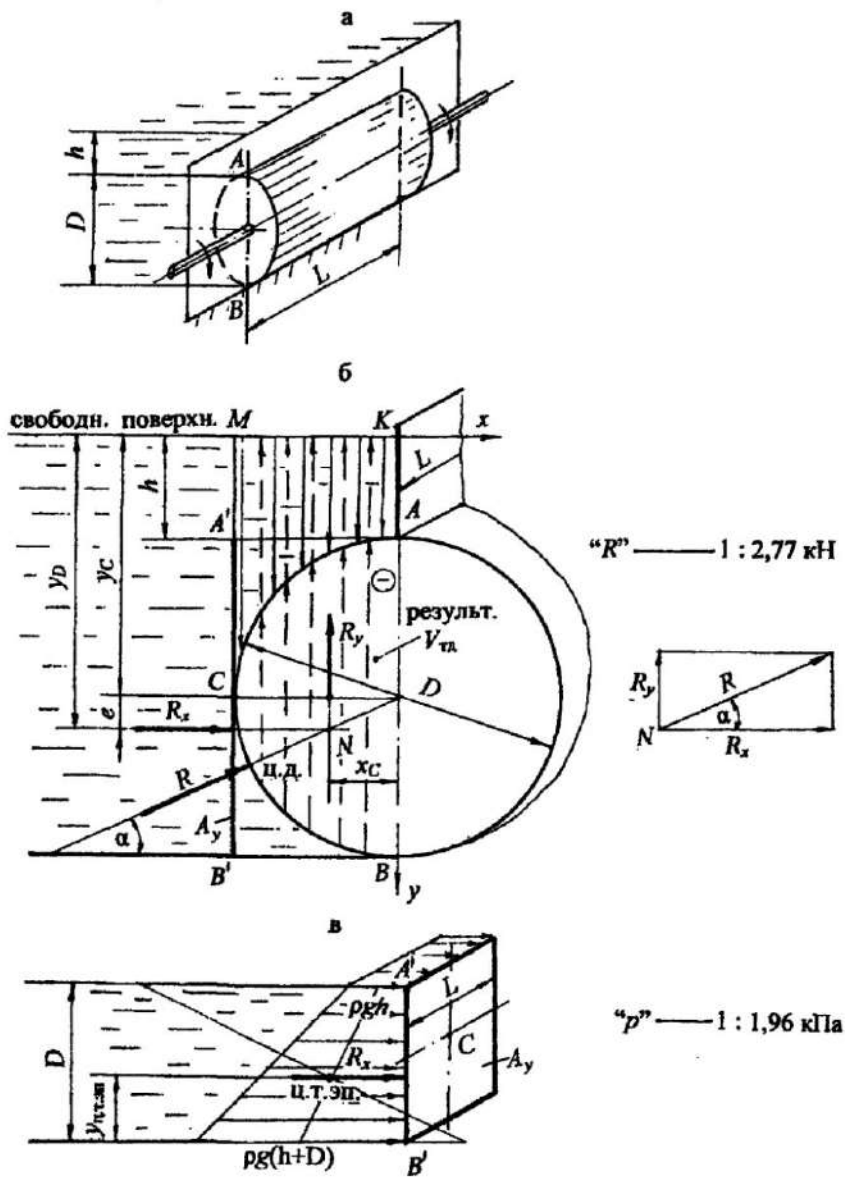


Рис. 3.4

Начало координат выбираем на свободной поверхности. Ось y направляем вертикально вниз, так как положительное значение глубины

отсчитывается от свободной поверхности вниз. Ось x направляем по свободной поверхности вправо по направлению действия жидкости (см. рис. 3.4, б).

2. Определяем горизонтальную составляющую R_x по формуле (3.3):

$$R_x = \rho g y_C A_y.$$

Криволинейную поверхность AB спроектируем *внутрь* жидкости на вертикальную плоскость. Получим вертикальную проекцию $A'B'$, представляющую прямоугольник высотой D и шириной (длиной) L (см. рис. 3.4, в). Рассчитаем силу давления воды на эту вертикальную проекцию.

Площадь вертикальной проекции $A_y = DL$.

Координата, или глубина погружения центра тяжести C этой проекции

$$y_C = h + D/2 = 0,5 \text{ м.}$$

Покажем на чертеже y_C . Рассчитаем горизонтальную составляющую:

$$R_x = \rho g (h + D/2)DL; \quad (3.6)$$

$$R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 2,0 = 5,88 \cdot 10^3 \text{ Н} = 5,88 \text{ кН.}$$

Определяем глубину погружения центра давления y_D для горизонтальной составляющей, т. е. глубину точки приложения силы R_x по формуле (3.4):

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y};$$

где I_C - центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для вертикальной проекции криволинейной поверхности. Момент инерции для прямоугольника, согласно табл. 3 (см. приложение):

$$I_C = \frac{LD^3}{12}.$$

После подстановки данных получим:

$$y_D = y_C + \frac{LD^3}{12 y_C DL} = y_C + \frac{D^2}{12 y_C}; \text{ эксцентриситет } e = \frac{D^2}{12 y_C};$$

$$y_D = 0,5 + \frac{0,6^2}{12 \cdot 0,5} = 0,5 + 0,06 = 0,56 \text{ м}; \quad e = 0,06 \text{ м} = 6 \text{ см.}$$

Покажем на чертеже y_D , эксцентриситет e и положение силы R_x .

Горизонтальную составляющую R_x можно определить также графо-аналитическим методом, согласно формуле (2.11):

$$R_x = S_{\text{эл}} L.$$

Определим давление воды в точках A' и B' :

$$p_{A'} = \rho g h; \quad p_{A'} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,2 = 1,96 \cdot 10^3 \text{ Па} = 1,96 \text{ кПа}.$$

$$p_{B'} = \rho g(h + D); \quad p_{B'} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,8 = 7,84 \cdot 10^3 \text{ Па} = 7,84 \text{ кПа}.$$

Построим эпюру гидростатического давления (см. рис. 3.4, в). Эпюра представляет призму с основанием в виде трапеции и высотой L , тогда

$$R_x = S_{\text{трап}} L = \frac{\rho g h + \rho g(h + D)}{2} DL = \rho g(h + D/2)DL.$$

Получили формулу, соответствующую формуле (3.6).

Находим графически положение центра давления. Можно воспользоваться данными табл. 3 (см. приложение). Глубина погружения центра давления, согласно формуле (2.11), совпадает с положением центра тяжести эпюры в виде трапеции (см. рис. 3.4, в). Находим координату центра тяжести эпюры:

$$y_{\text{ц.т.эл.}} = \frac{D(2p_{A'} + p_{B'})}{3(p_{A'} + p_{B'})} = 0,24 \text{ м}.$$

Центр тяжести трапеции можно определить геометрическим построением (см. задачу 2.3.4).

На рис. 3.4, в покажем $y_{\text{ц.т.эл.}}$, получим $y_D = h + D - y_{\text{ц.т.эл.}} = 0,56 \text{ м}$. Расчёты горизонтальной составляющей R_x и глубины погружения центра давления y_D аналитическим и графо-аналитическим методами совпали.

3. Определяем вертикальную составляющую R_y силы давления воды на цилиндрическую поверхность по формуле (3.5):

$$R_y = \rho g V_{\text{т.д.}}$$

Криволинейная поверхность имеет две части - AC и CB .

Строим тело давления для части AC . Из контура криволинейной части AC проводим вертикальные линии до *свободной поверхности* жидкости, получим *реальное* (положительное) тело давления в виде криволинейной призмы с основанием $AKMC$, построенное на смоченной поверхности AC и заполненное водой. В эпюре тела давления стрелки направляем *вниз*.

Для части криволинейной поверхности CB снова проводим вертикальные линии до *свободной поверхности*, получим *отрицательное* тело давления в виде криволинейной призмы с основанием $BCMK$, так как оно построено на несмоченной поверхности и не заполнено жидкостью. Стрелки в эпюре тела давления покажем пунктиром и направим *вверх*.

Анализ построения двух тел давления показывает, что в объёме $AKMC$ два тела давления взаимно уничтожаются (сокращаются, компенсируются).

Результирующее тело давления *отрицательное* в виде полуцилиндра объёмом:

$$V_{\text{т.д.}} = \frac{\pi D^2}{8} L.$$

Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho g \frac{\pi D^2}{8} L; \quad R_y = 10^3 \cdot 9,8 \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{8} \cdot 2,0 = 2,77 \cdot 10^3 \text{ Н} = 2,77 \text{ кН}.$$

Показываем линию действия и точку приложения R_y . Вертикальная составляющая приложена в *центре тяжести* тела давления и направлена *вверх*. Центр тяжести полуцилиндра (см. приложение, табл. 3) находится на расстоянии $x_C = 4r/3\pi = 0,13$ м от оси цилиндра.

Показываем на чертеже (см. рис. 3.4, б) расстояние x_C , центр тяжести полуцилиндра и направление силы R_y .

4. Определяем величину равнодействующей давления воды на цилиндрический затвор:

$$R = \sqrt{5,88^2 + 2,77^2} = 6,5 \text{ кН}.$$

Чтобы найти линию действия, направление и точку приложения равнодействующей R , по линии действия продолжим R_x и R_y до взаимного пересечения, получим точку N . Геометрическое сложение сил проведём вне чертежа. Вынесем точку N и покажем сложение сил в масштабе.

Параллельно по линии действия силу R перенесём в точку N на основном чертеже и продолжим её до пересечения с криволинейной поверхностью. Равнодействующая R должна пройти через точку пересечения составляющих и центр криволинейной поверхности.

Точка пересечения равнодействующей с цилиндрической поверхностью является *центром давления*.

Угол α наклона равнодействующей R найдём через $\text{tg } \alpha$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_y}{R_x} = \frac{2,77}{5,88} = 0,47; \quad \alpha = 25^\circ.$$

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 6,5$ кН направлена радиально под углом $\alpha = 25^\circ$.

В практике решения задач могут быть случаи определения силы давления на криволинейную поверхность, когда жидкость действует с двух сторон. Такое решение рассмотрим на примере задачи 3.2.2.

Задача 3.2.2. Определить силу давления нефти на цилиндрическую поверхность AB , а также угол наклона силы к горизонту, если слева уровень нефти $H_1 = D = 1,2$ м, справа $H_2 = D/2 = 0,6$ м. Длина цилиндрической поверхности $L = 4,0$ м. Принять плотность нефти $\rho_n = 900$ кг/м³ (рис. 3.5).

Решение. На рис. 3.5,а представлен общий вид цилиндрической поверхности длиной L , воспринимающей давление нефти с двух сторон.

В случае действия жидкости с двух сторон целесообразно определить составляющую R_x , как геометрическую сумму горизонтальных сил слева R_{x_1} и справа R_{x_2} , и вертикальную составляющую R_y через объём результирующего тела давления, затем геометрически сложить R_x и R_y и получить результирующую силу давления R и её положение.

Рассчитать силу давления жидкости на криволинейную поверхность сначала слева, затем справа, геометрически сложить эти составляющие для определения равнодействующей и её положения более трудоёмко, как аналитически, так и геометрически.

1. Покажем два направления - x и y (см. рис. 3.5,б), по которым определим составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

2. Определим величину и положение горизонтальной составляющей R_x .

Расчёт проведём *графо-аналитическим* методом:

а) Определим силу давления нефти слева R_{x_1} .

Криволинейную поверхность AB спроектируем внутрь жидкости на вертикальную плоскость и получим вертикальную проекцию $A'B'$ в виде прямоугольника высотой H_1 и длиной (шириной) L (см. рис. 3.5,б).

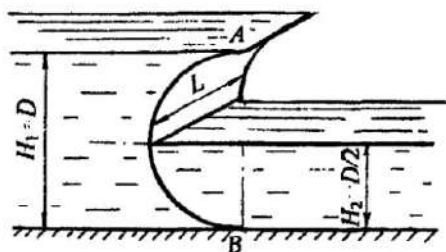
Давление нефти в точках A' и B' :

$$p_{A'} = 0; \quad p_{B'} = \rho_n g H_1. \quad p_{B'} = 900 \cdot 9,8 \cdot 1,2 = 10,6 \cdot 10^3 \text{ Па} = 10,6 \text{ кПа}.$$

Строим эпюру давления. Откладываем по нормали к вертикальной проекции величину давления в характерных точках в удобном масштабе, соединяем полученные точки наклонной прямой. Эпюра давления представляет треугольную призму с основанием в виде треугольника и

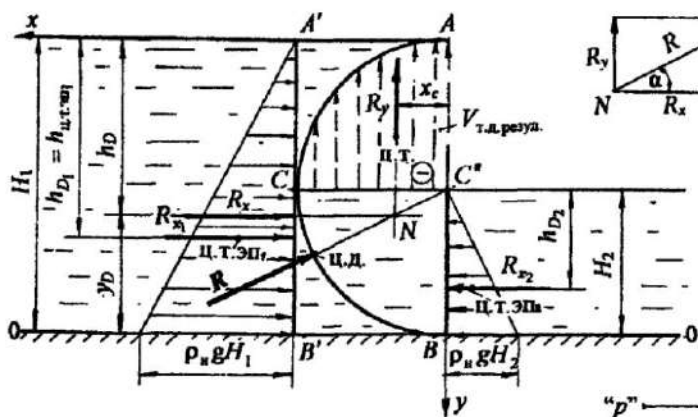
высотой, равной L . Заптриховываем эпору, стрелками показываем направление давления нефти слева направо (см. рис. 3.5,б)

а



б

"R" — 1 : 10 кН



"p" — 1 : 5,3 кПа

в

т.д. взаимн. уничтож

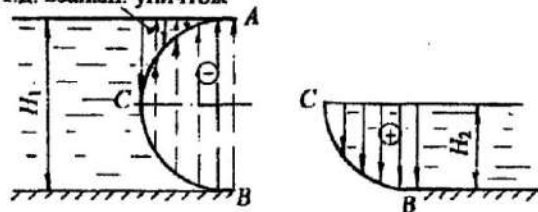


Рис. 3.5

Силу R_{x_1} рассчитаем по формуле (2.11):

$$R_{x_1} = S_{\text{эл}1} L = \frac{\rho_n g H_1^2}{2} L; \quad R_{x_1} = \frac{900 \cdot 9,8 \cdot 1,2^2}{2} \cdot 4,0 = 25,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 25,4 \text{ кН.}$$

Покажем линию действия силы R_{x_1} . Сила проходит через центр тяжести эпюры, т. е. через центр тяжести треугольника (см. формулу (2.11)). Глубина погружения центра давления для силы R_{x_1} :

$$h_{D_1} = h_{\text{ц.т.эл}1} = \frac{2}{3} H_1.$$

На чертеже (см. рис. 3.5,б) покажем h_{D_1} и линию действия силы R_{x_1} .

Сила направлена по нормали к вертикальной проекции $A'B'$ слева направо (из жидкости на вертикальную проекцию).

б) Определим силу давления нефти справа R_{x_2} .

Криволинейную поверхность CB спроектируем внутрь жидкости на вертикальную плоскость, получим вертикальную проекцию $C'B$ в виде прямоугольника высотой H_2 и длиной L .

Рассчитаем силу R_{x_2} . Давление в характерных точках:

$$p_C = 0; \quad p_B = \rho_n g H_2. \quad p_B = 900 \cdot 9,8 \cdot 0,6 = 5,3 \cdot 10^3 \text{ Па} = 5,3 \text{ кПа.}$$

По аналогии строим эпюру давления нефти справа. Эпюра давления в вертикальной плоскости также представляет равномерную нагрузку в виде треугольника. Стрелками покажем направление действия нефти на вертикальную проекцию справа налево. Рассчитаем силу R_{x_2} :

$$R_{x_2} = S_{\text{эл}2} L = \frac{\rho_n g H_2^2}{2} L; \quad R_{x_2} = \frac{900 \cdot 9,8 \cdot 0,6^2}{2} \cdot 4,0 = 6,35 \cdot 10^3 \text{ Н} = 6,35 \text{ кН.}$$

Покажем линию действия силы R_{x_2} . Сила проходит через центр тяжести второй эпюры на глубине $h_{D_2} = h_{\text{ц.т.эл}2} = 2/3 H_2$ и направлена по нормали к вертикальной проекции $C'B$ справа налево (см. рис. 3.5, б).

в) Определим горизонтальную составляющую R_x путём геометрического сложения составляющих R_{x_1} и R_{x_2} :

$$\vec{R}_x = \vec{R}_{x_1} + \vec{R}_{x_2};$$

$$R_x = R_{x_1} - R_{x_2}; \quad R_x = 19,05 \text{ кН.}$$

Положение силы R_x определим, пользуясь теоремой Вариньона: момент от равнодействующей R_x равен сумме моментов составляющих сил R_{x_1} и R_{x_2} относительно той же оси, например 0-0, совмещённой с дном. Обозначим через y_D расстояние от оси 0-0, на котором приложена сила R_x :

$$R_x y_D = R_{x_1} \cdot 1/3H_1 - R_{x_2} \cdot 1/3H_2; \text{ отсюда } y_D = 0,47 \text{ м.}$$

На расстоянии y_D от дна покажем линию действия и точку приложения горизонтальной силы R_x (см. рис. 3.5,6). Глубина погружения центра давления для горизонтальной составляющей $h_D = H_1 - y_D = 1,2 - 0,47 = 0,73$ м. Сила R_x направлена по нормали слева направо на вертикальную проекцию $A'B'$ криволинейной поверхности.

3. Определим *величину, направление и точку приложения* вертикальной составляющей R_y . Согласно формуле (3.5):

$$R_y = \rho g V_{т.д.}$$

Найдём положение результирующего тела давления. На рис. 3.5,в представлено построение тела давления для левой и правой части криволинейной поверхности согласно принятой методике (см. глава 3; 3.1).

Для левой части получаем *отрицательное* тело давления объёмом в виде полуцилиндра:

$$V_{т.д.1} = \frac{\pi H_1^2}{8} L.$$

Для правой части тело давления *положительное* объёмом в виде четверти цилиндра:

$$V_{т.д.2} = \frac{\pi H_2^2}{4} L.$$

При геометрическом сложении объёмов двух тел давления положительного и отрицательного, т. е. при наложении объёмов тела давления, получим *результатирующее тело давления отрицательное* в виде четверти цилиндра (см. рис. 3.5,6). Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho_n g V_{т.д.резул.} = \rho_n g \frac{\pi H_1^2}{16} L; \quad R_y = 9,97 \text{ кН.}$$

Из центра тяжести результирующего тела давления, т. е. из центра тяжести четверти цилиндра, вертикальная составляющая R_y *направлена*

сверху. Центр тяжести четверти цилиндра так же, как центр тяжести полуцилиндра, находится на расстоянии $x_c = 4r/3\pi$ (см. приложение, табл. 3):

$$x_c = \frac{4H_2}{3\pi}; \quad x_c = \frac{4 \cdot 0,6}{3 \cdot 3,14} = 0,25 \text{ м.}$$

На рис. 3.5,6 покажем x_c и положение вертикальной составляющей R_y .

4. Находим величину равнодействующей R :

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}; \quad R = \sqrt{19,05^2 + 9,97^2} = 21,5 \text{ кН.}$$

Чтобы найти положение и точку приложения равнодействующей сил давления нефти R , продолжим составляющие R_x и R_y до взаимного пересечения, получим точку N (см. рис. 3.5,6). Вынесем точку N вне чертежа и проведём геометрическое сложение сил.

По линии действия равнодействующую R параллельно перенесём в точку пересечения составляющих на основном чертеже и найдём точку пересечения силы R с криволинейной поверхностью. Эта точка является центром давления для результирующей сил давления нефти.

Равнодействующая R должна быть направлена радиально к криволинейной поверхности. Проверим, действительно сила R проходит через центр цилиндрической поверхности, построение верно.

Угол α наклона равнодействующей найдём через $\text{tg } \alpha$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_y}{R_x} = \frac{9,97}{19,05} = 0,523; \quad \alpha = 27^\circ 40'.$$

Ответ: сила давления нефти на цилиндрическую поверхность $R = 21,5$ кН, сила действует радиально под углом $\alpha = 27^\circ 40'$.

В задачах 3.2.1 и 3.2.2 представлены аналитический и графо-аналитический методы определения горизонтальной составляющей силы давления жидкости на криволинейную поверхность, расчёт вертикальной составляющей через объём результирующего тела давления. В этих задачах объём тела давления представлен простыми геометрическими фигурами, положение центра тяжести которых определяется по таблице.

Наряду с простыми геометрическими фигурами тела давления при решении задач могут быть случаи, когда тело давления представляет криволинейную призму с основанием, состоящим из нескольких геометрических фигур.

На примере решения задачи 3.2.3 рассмотрим определение положения центра тяжести тела давления, как сложной геометрической фигуры.

Задача 3.2.3. Определить силу давления воды на четверть цилиндрической поверхности AB открытого резервуара, угол наклона силы к горизонту и глубину погружения центра давления, если глубина заполнения резервуара $H = 1,6$ м, радиус цилиндрической поверхности $r = 0,8$ м, длина резервуара $L = 5,0$ м (рис. 3.6).

Решение. На рис. 3.6,а дан общий вид резервуара с цилиндрической поверхностью в изометрии. На рис. 3.6,б представлено среднее сечение резервуара нормальной плоскостью в соответствующем *масштабе*.

Согласно принятой *методике*, проводим следующие расчёты.

1. Выбираем направления x и y , по которым определяем составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

Начало координат выбираем на свободной поверхности. Ось x направляем вправо по направлению действия жидкости, ось y - вертикально вниз.

2. Определяем горизонтальную составляющую R_x по формуле (3.3):

$$R_x = \rho g y_C A_y.$$

Спроектируем цилиндрическую поверхность AB на вертикальную плоскость. Получаем в проекции прямоугольник высотой $AB' = r$ и шириной, равной длине резервуара L . Площадь вертикальной проекции четверти цилиндра $A_y = rL$.

Находим координату (глубину погружения) центра тяжести вертикальной проекции y_C , которая отсчитывается от *свободной поверхности* жидкости:

$$y_C = H - \frac{r}{2}.$$

Показываем y_C на чертеже (см. рис. 3.6,б).

Расчитываем горизонтальную составляющую R_x :

$$R_x = \rho g \left(H - \frac{r}{2} \right) rL;$$

$$R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 5,0 = 47,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 47,0 \text{ кН}.$$

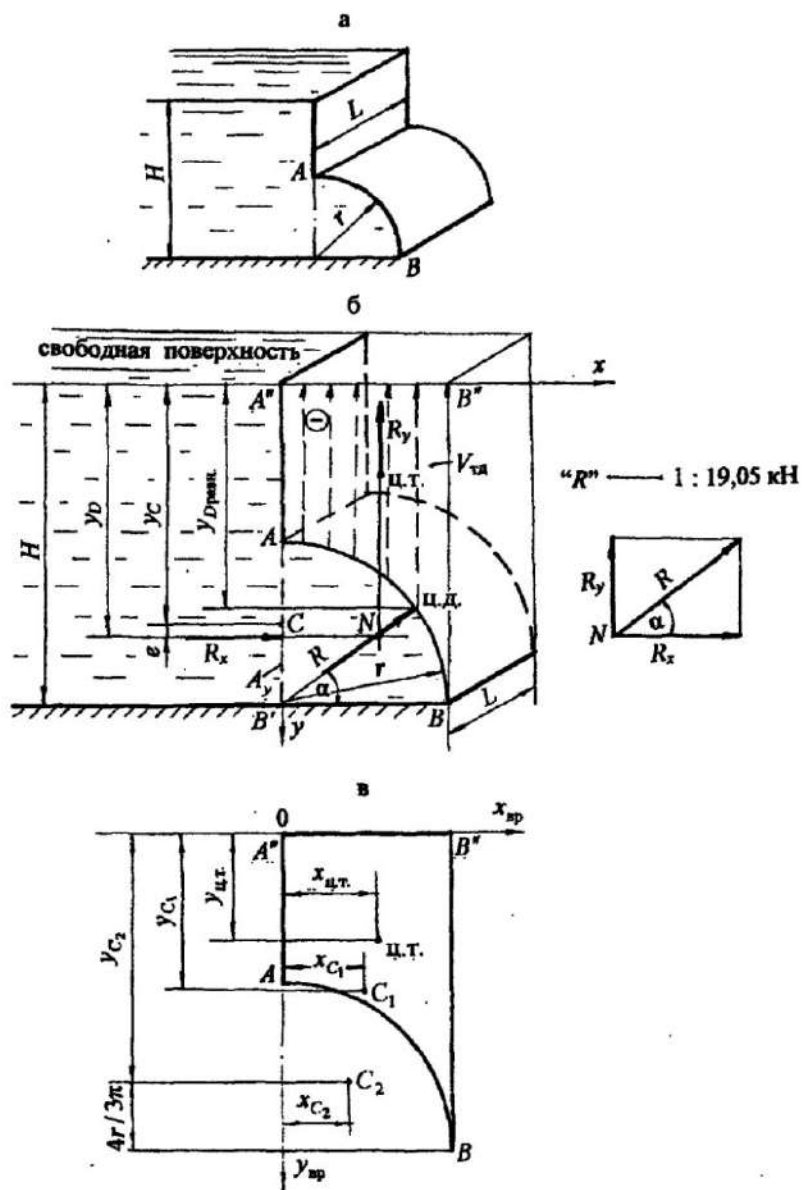


Рис. 3.6

Показываем направление и точку приложения силы R_x . Сила приложена в *центре давления* по нормали к вертикальной проекции AB' на глубине y_D . По формуле (3.4)

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y},$$

где I_C – центральный момент инерции вертикальной проекции криволинейной поверхности относительно горизонтальной оси, т. е. момент инерции прямоугольника, согласно табл. 3 (см. приложение):

$$I_C = \frac{Lr^3}{12}.$$

Подставим значения всех параметров:

$$y_D = y_C + \frac{Lr^3}{12 y_C r L} = y_C + \frac{r^2}{12 y_C};$$

$$y_D = 1,2 + \frac{0,64}{12 \cdot 1,2} = 1,2 + 0,044 = 1,244 \text{ м.}$$

Эксцентриситет e , т. е. понижение центра давления относительно центра тяжести вертикальной проекции:

$$e = \frac{r^2}{12 y_C}; \quad e = 0,044 \text{ м} = 44 \text{ мм.}$$

На чертеже (см. рис. 3.6,б) показываем координату центра давления y_D , эксцентриситет e , направление и точку приложения силы R_x .

3. Определяем вертикальную составляющую R_y по формуле (3.5):

$$R_y = \rho g V_{т.д.}$$

Вертикальная составляющая равна силе тяжести жидкости в объёме тела давления. Чтобы найти объём тела давления, построим эпюру тела давления. Из контура цилиндрической поверхности проведём вертикальные линии до *продолжения свободной поверхности*. Тело давления ограничено самой криволинейной поверхностью AB , вертикальными проектирующими плоскостями и горизонтальной проекцией криволинейной поверхности AB на продолжение горизонта свободной поверхности.

Очерченное тело давления построено на несмоченной части криволинейной поверхности AB , не заполнено жидкостью, поэтому оно считается *отрицательным*. Стрелки в эпюре тела давления направлены вверх (сила R_y будет также направлена вверх). Тело давления представляет *криволинейную призму* с основанием $AA''B''B$ и высотой, равной L .

Площадь основания тела давления можно рассматривать как разность площадей двух фигур: прямоугольника $S_1 = S_{\text{прям.}B'A''B''B}$ и четверти круга $S_2 = S_{1/4\text{кр}}$. Тогда объём тела давления:

$$V_{\text{т.д.}} = (S_{\text{прям.}B'A''B''B} - S_{1/4\text{кр}})L = (rH - \frac{\pi r^2}{4})L.$$

Вертикальная составляющая R_y

$$R_y = \rho g (rH - \frac{\pi r^2}{4})L;$$

$$R_y = 10^3 \cdot 9,8 (0,8 \cdot 1,6 - \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4}) \cdot 5,0 = 38,1 \cdot 10^3 \text{ Н} = 38,1 \text{ кН}.$$

Переходим к определению направления и точки приложения вертикальной составляющей R_y . Сила R_y из *центра тяжести тела давления* будет направлена *вверх*, так как тело давления *отрицательное*.

Нужно найти положение *центра тяжести* тела давления, т. е. центра тяжести основания тела давления.

Положение центра тяжести составной фигуры определим, пользуясь понятием статического момента площади. Согласно формулам, изучаемым в курсе сопротивления материалов, в данной задаче координаты центра тяжести сложной фигуры рассчитаем по формулам:

$$x_{\text{ц.т.}} = \frac{S_1 x_{C1} - S_2 x_{C2}}{S_1 - S_2}; \quad y_{\text{ц.т.}} = \frac{S_1 y_{C1} - S_2 y_{C2}}{S_1 - S_2},$$

где S_1 – площадь прямоугольника $B'A''B''B$;

S_2 – площадь четверти круга;

x_1 и x_2 ; y_1 и y_2 – координаты центров тяжести прямоугольника и четверти круга относительно временных осей $x_{\text{вр}}$; $y_{\text{вр}}$.

На рис. 3.6,в представлено основание тела давления $AA''B''B$. Временные оси $x_{\text{вр}}$ и $y_{\text{вр}}$ для удобства расчётов совпадают с направлением осей x и y на основном чертеже (см. рис. 3.6,б).

Для расчёта координат центра тяжести $x_{\text{ц.т.}}$ и $y_{\text{ц.т.}}$ фигуры $AA''B''B$ имеем:

$$S_1 = rH = 1,28 \text{ м}^2; \quad x_{C_1} = \frac{r}{2} = 0,4 \text{ м}; \quad y_{C_1} = \frac{H}{2} = 0,8 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{\pi r^2}{4} = 0,50 \text{ м}^2; \quad x_{C_2} = \frac{4r}{3\pi} = 0,34 \text{ м}; \quad y_{C_2} = H - \frac{4r}{3\pi} = 1,26 \text{ м};$$

$$x_{\text{ц.т.}} = \frac{1,28 \cdot 0,4 - 0,50 \cdot 0,34}{1,28 - 0,50} = \frac{0,342}{0,78} = 0,44 \text{ м};$$

$$y_{\text{ц.т.}} = \frac{1,28 \cdot 0,8 - 0,50 \cdot 1,26}{1,28 - 0,50} = 0,51 \text{ м}.$$

Откладываем значения координат центра тяжести тела давления $x_{\text{ц.т.}}$ и $y_{\text{ц.т.}}$ на рис. 3.6,в, показываем положение центра тяжести тела давления. В соответствующем масштабе переносим положение центра тяжести тела давления на основной чертёж и показываем линию действия и точку приложения вертикальной составляющей R_y . Как было указано выше, эта сила приложена в центре тяжести тела давления и направлена вертикально вверх.

4. Определяем величину равнодействующей сил давления воды R на цилиндрическую поверхность AB по формуле (3.2):

$$R = \sqrt{47,0^2 + 38,1^2} = 60,5 \text{ кН}.$$

Находим положение силы R . Геометрически сложим составляющие силы R_x и R_y : продолжим силы по линии действия до взаимного пересечения, получим точку N , через которую пройдёт равнодействующая R .

Для удобства построения точку N вынесем за пределы чертежа и покажем сложение сил. Чтобы найти положение центра давления для равнодействующей R , силу R по линии действия параллельно перенесём в точку N на основной чертеж (см. рис. 3.6,б) и продолжим её до пересечения с криволинейной поверхностью AB . Итак, центр давления – это точка пересечения линии действия силы R с цилиндрической поверхностью AB .

Равнодействующая R должна быть направлена радиально и проходить через точку N пересечения составляющих R_x и R_y , так как сила давления всегда действует по нормали или радиально к поверхности. Проверим построение в масштабе. Построение верно.

Определим угол α наклона равнодействующей к горизонту через $\text{tg } \alpha$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_y}{R_x} = 0,81; \quad \alpha = 39^\circ.$$

Глубину погружения центра давления для равнодействующей R рассчитаем по формуле:

$$y_{D_{\text{равн}}} = H - r \sin 39^\circ; \quad y_{D_{\text{равн}}} = 1,6 - 0,8 \cdot 0,63 = 1,1 \text{ м.}$$

Показываем глубину погружения центра давления для равнодействующей ($y_{D_{\text{равн}}}$) на основном чертеже (см. рис. 3.6,б).

Ответ: сила давления воды на цилиндрическую поверхность $R = 60,5 \text{ кН}$ радиально направлена под углом $\alpha = 39^\circ$, приложена на глубине $y_{D_{\text{равн}}} = 1,1 \text{ м}$.

При решении задач по определению силы давления жидкости на криволинейную поверхность могут быть случаи расчёта объёма тела давления в виде криволинейной призмы, основанием которой является криволинейный треугольник, сегмент, полусегмент и им подобные. На рис. 3.7 представлены некоторые геометрические фигуры и показано положение их центров тяжести.

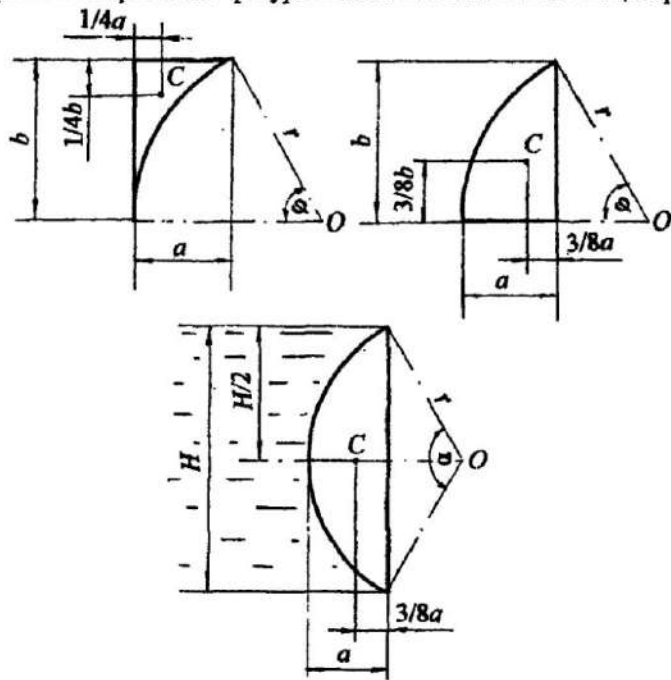


Рис. 3.7

Рассмотрим ещё один типовой случай определения силы давления жидкости на криволинейную поверхность в виде полусферы на примере решения задачи 3.2.4.

Задача 3.2.4. Определить силу давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара. На поверхности бензина действует избыточное давление паров бензина $p_{\text{ман}} = 0,03$ ат. Крышка перекрывает круглое донное отверстие радиусом $r = 0,3$ м. Глубина заполнения резервуара $H = 0,9$ м. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 750 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3.8).

Решение. На рис. 3.8,а представлен общий вид резервуара с бензином в вертикальном разрезе.

Прежде чем приступать к решению задачи, следует определиться с методикой учёта избыточного давления на поверхности при расчёте силы давления на полусферическую поверхность. Здесь могут быть выбраны два варианта.

Во-первых, рассчитывать отдельно составляющую силу от внешнего, манометрического давления, а затем суммировать её с силой давления жидкости и находить равнодействующую сил давления.

Во-вторых, манометрическое давление на поверхности жидкости можно перевести в давление столба бензина, условно заменив манометр пьезометром, найти пьезометрическую высоту и положение *условной свободной поверхности*.

Такая методика расчёта рассмотрена в главе 2, в задачах 2.3.6; 2.3.7; 2.3.8. Эта методика расчёта позволит сразу определить равнодействующую сил давления жидкости и манометрического давления.

Выберем второй вариант решения. Рассчитаем пьезометрический напор по показанию манометра, пользуясь формулой (1.5):

$$h_{p \text{ бенз}} = \frac{P_{\text{ман}}}{\rho_{\text{бенз}} g}; \quad h_{p \text{ бенз}} = \frac{0,03 \cdot 98 \cdot 10^3}{750 \cdot 9,8} = 0,4 \text{ м.}$$

На уровне свободной поверхности в резервуаре (см. рис. 3.8,б) пунктиром покажем пьезометр, высота столба жидкости в котором соответствует $h_{p \text{ бенз}}$. По уровню жидкости в пьезометре покажем *условную свободную поверхность*, от которой будем отсчитывать координаты центров тяжести фигур и центра давления.

Дальнейший расчёт силы давления бензина на полусферическую поверхность проводим по принятой *методике*:

1. Выберем два направления - x и y (рис. 3.8,б), по которым определим составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением.

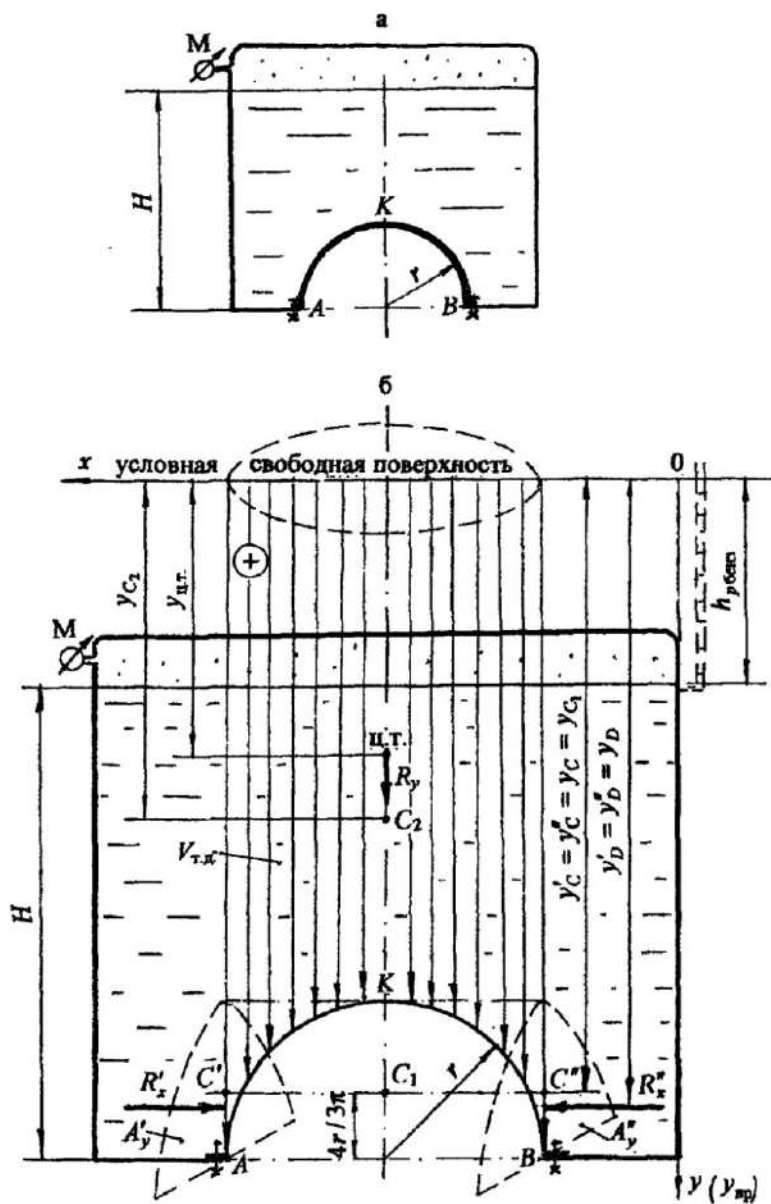


Рис. 3.8

2. Определим *горизонтальную* составляющую R_x по формуле (3.3):

$$R_x = \rho_{\text{бенз.}} g y_C A_y.$$

Полусферическая поверхность AKB имеет две части: AK , на которую бензин действует слева, и KB с действием бензина справа.

Чтобы определить горизонтальную силу на левую часть полусферы, спроектируем часть AK *внутрь* жидкости на вертикальную плоскость. В проекции получим полуокруг площадью $A'_y = \frac{\pi r^2}{2}$. Проекция показана пунктирными линиями.

Затем спроектируем правую часть полусферы *внутрь* жидкости и получим точно такую же проекцию в виде полуокруга площадью $A''_y = \frac{\pi r^2}{2}$.

Находим координаты центров тяжести этих проекций:

$$y'_C = y''_C = y_C = H + h_{p \text{ бенз.}} - \frac{4r}{3\pi}.$$

Покажем координаты центров тяжести проекций на чертеже (см. рис. 3.8,б).

Получим формулы для горизонтальных сил слева и справа:

$$R'_x = \rho_{\text{бенз.}} g y'_C A'_y;$$

$$R''_x = \rho_{\text{бенз.}} g y''_C A''_y.$$

Силы R'_x и R''_x равны по величине, но противоположно направлены. Поскольку равны координаты центров тяжести проекций, то равны и координаты центров давления слева и справа:

$$y'_D = y''_D = y_D.$$

На глубине y_D покажем силы R'_x и R''_x противоположно направленными. Таким образом, при геометрическом сложении сил R'_x и R''_x получим:

$$\bar{R}_x = \bar{R}'_x + \bar{R}''_x; \quad R_x = 0.$$

Горизонтальная составляющая силы давления жидкости на полусферическую поверхность равна нулю.

3. Определим вертикальную составляющую силы давления на полусферическую поверхность R_y по формуле (3.5):

$$R_y = \rho_{\text{бенз}} g V_{\text{т.д.}}$$

Чтобы построить тело давления, из контура полусферы проведём вертикальные линии до *условной свободной поверхности*. Получим эпюру тела давления. Тело давления построено на смоченной части полусферы, заполнено жидкостью, значит, оно действительное, или положительное. Стрелками, направленными вниз, покажем действие бензина на полусферическую крышку (сила R_y также будет направлена вниз).

Горизонтальная проекция полусферы на условную свободную поверхность представляет круг.

Таким образом, объём тела давления – это объём цилиндра высотой $(H + h_{p \text{ бенз.}})$, за вычетом объёма полусферы:

$$V_{\text{т.д.}} = V_{\text{цил.}} - V_{\text{полусф.}}$$

$$V_{\text{т.д.}} = \pi r^2 (H + h_{p \text{ бенз.}}) - \frac{4\pi r^3}{3 \cdot 2} = \pi r^2 (H + h_{p \text{ бенз.}} - \frac{2}{3} r).$$

Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho_{\text{бенз.}} g \pi r^2 (H + h_{p \text{ бенз.}} - \frac{2}{3} r);$$

$$R_y = 750 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 1,1 = 2284,8 \text{ Н} = 2,29 \text{ кН}.$$

Следует показать *линию действия и точку приложения* вертикальной силы R_y . Линия действия силы совпадает с геометрической осью полусферической поверхности и цилиндра. Необязательно находить точку приложения силы R_y , т. е. центр тяжести тела давления, в котором она приложена, так как силу по линии действия можно перемещать. Но по правилам методики расчёта определим положение центра тяжести тела давления. Нужно определить только координату центра тяжести тела давления - $y_{\text{ц.т.}}$ (см. задачу 3.2.3).

Временную ось $y_{\text{вр.}}$ совместим с осью y , тогда

$$y_{\text{ц.т.}} = \frac{S_2 y_{C_2} - S_1 y_{C_1}}{S_2 - S_1},$$

где $S_1 = \frac{\pi r^2}{2}$ - площадь полукруга (вертикальное сечение полусферы);

$S_2 = 2r(H + h_{p \text{ бенз.}})$ - площадь прямоугольника;

$y_{C_1} = (H + h_{p \text{ бенз.}} - \frac{4r}{3\pi})$ - координата центра тяжести C_1 полукруга;

$y_{C_2} = \frac{H + h_{p \text{ бенз.}}}{2}$ - координата центра тяжести C_2 прямоугольника.

Для расчётов: $S_1 = 0,14 \text{ м}^2$; $S_2 = 0,78 \text{ м}^2$; $y_{C_1} = 1,17 \text{ м}$; $y_{C_2} = 0,65 \text{ м}$.

Получим $y_{ц.т.} = 0,54 \text{ м}$. Покажем на чертеже $y_{ц.т.}$ и положение центра тяжести тела давления.

Из центра тяжести тела давления вертикальную силу R_y направим *вниз*. Поскольку горизонтальная сила равна нулю, на полусферическую поверхность действует только вертикальная сила.

Ответ: на полусферическую крышку резервуара по оси полусферы действует сила $R = R_y = 2,29 \text{ кН}$.

В задаче 3.2.4 представлен случай, когда на поверхности жидкости закрытого резервуара действует манометрическое давление. В практике расчётов силы давления на криволинейную поверхность может быть условие, когда на поверхности жидкости или на определённом уровне в закрытом резервуаре известно вакуумметрическое давление ($p_{\text{вак.}}$). В этом случае методика расчёта силы давления не меняется.

При определении горизонтальной составляющей можно воспользоваться принципом расчёта силы давления, изложенным в задаче 2.3.9.

При определении вертикальной силы следует помнить, что вертикальная составляющая от вакуумметрического давления отрицательная и направлена вверх.

По аналогии с манометрическим давлением можно найти вакуумметрический напор $h_{\text{вак.}} = \frac{p_{\text{вак.}}}{\rho g}$, который учитывается со знаком *минус*,

поэтому объём тела давления будет отрицательным, значит, и *вертикальная составляющая силы от вакуумметрического давления отрицательная, направленная вверх*.

В представленных примерах решения задач рассмотрены различные случаи действия жидкости на криволинейные поверхности. Предлагается проверить свои знания и умение пользоваться методикой расчёта силы давления на криволинейные поверхности при решении задач для самостоятельной работы.

3.3. Задачи для самостоятельной работы по теме “Сила давления жидкости на криволинейные поверхности”

Задача 3.3.1

Определить величину и угол наклона силы давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара (рис. 3.9), если радиус полусферы $r = 0,2$ м, показание пьезометра, выведенного на уровне нижней кромки крышки $H = 0,8$ м, плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 800 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: сила давления бензина $R = 605,2 \text{ Н}$, угол наклона силы к горизонту $\alpha = 12^\circ$; глубина погружения центра давления $y_{D \text{ равн.}} = 0,643 \text{ м}$.

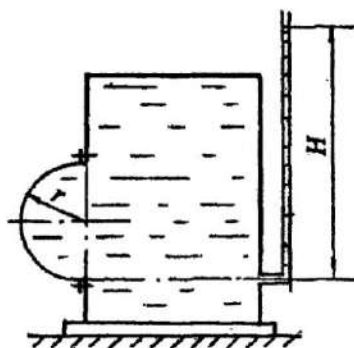


Рис. 3.9

Задача 3.3.2

Определить силу давления масла на цилиндрическую стенку резервуара AB (рис. 3.10), угол наклона силы и глубину погружения центра давления, если глубина заполнения резервуара $H = 0,8$ м; радиус цилиндрической части $r = 0,6$ м; секторный угол равен 90° ; длина образующей цилиндрической поверхности $L = 1,2$ м. Принять плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 860 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: сила давления масла $R = 3,64 \text{ кН}$; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 33^\circ$; глубина погружения центра давления $y_{D \text{ равн.}} = 0,47 \text{ м}$.

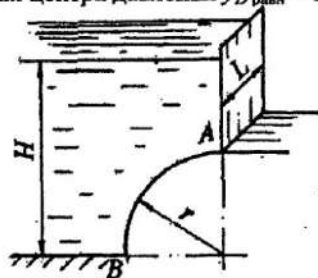


Рис. 3.10

Задача 3.3.3

Определить величину, угол наклона и глубину центра давления для равнодействующей давления воды на криволинейную стенку AB (рис. 3.11) длиной $L = 10$ м. Действующий напор $H = 4,0$ м. Криволинейная стенка представляет часть цилиндрической поверхности с секторным углом $\varphi = 60^\circ$.

Ответ: равнодействующая сила давления воды $R = 1013$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 39^\circ$; глубина центра давления $y_{D \text{ равн.}} = 2,93$ м.

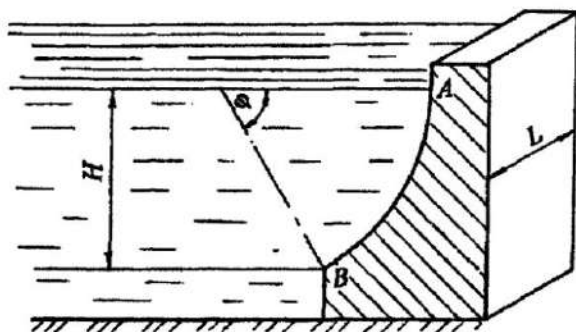


Рис. 3.11

Задача 3.3.4

Определить величину и угол наклона к горизонту равнодействующей давления воды на криволинейную стенку AB резервуара (рис. 3.12), если ширина резервуара $B = 3,0$ м, напоры воды соответственно $H_1 = 2,0$ м, $H_2 = 1,0$ м.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 155,6$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 31^\circ$.

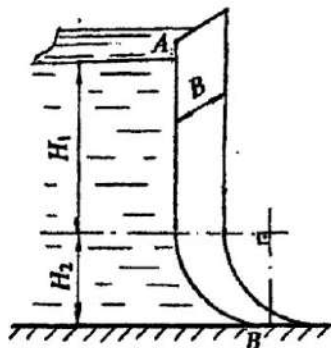


Рис. 3.12

Задача 3.3.5

Определить величину, угол наклона к горизонту и глубину центра давления для силы давления воды на секторный затвор AB (рис. 3.13), удерживающий напор $H = 1,5$ м, если ширина затвора $B = 2,0$ м, секторный угол затвора $\varphi = 60^\circ$.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 28,5$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 39^\circ$; глубина центра давления $y_{D \text{ равн.}} = 1,1$ м.

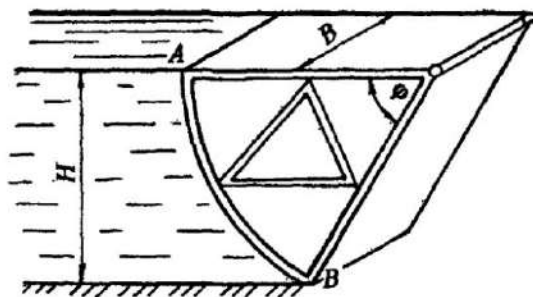


Рис. 3.13

Задача 3.3.6

Определить величину, угол наклона к горизонту и глубину центра давления для силы давления воды на криволинейную стенку AB (рис. 3.14) длиной $L = 3,0$ м, удерживающую напор $H = 1,5$ м. Криволинейная стенка представляет часть цилиндрической поверхности с секторным углом $\varphi = 60^\circ$.

Ответ: равнодействующая сила давления воды $R = 35,0$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 18^\circ$; глубина центра давления $y_{D \text{ равн.}} = 0,95$ м.

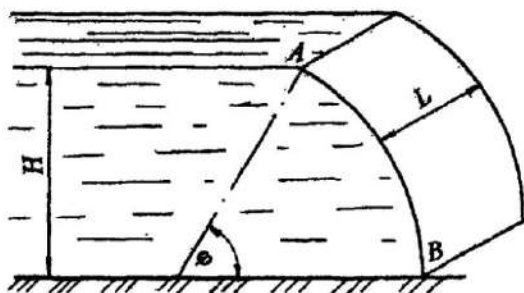


Рис. 3.14

Задача 3.3.7

Определить силу давления бензина на полусферическое дно цилиндрического резервуара (рис. 3.15) радиусом $r = 0,4$ м, если показание манометра, установленного на расстоянии $h = 0,8$ м от дна резервуара, $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз.}} = 720$ кг/м³.

Ответ: сила давления бензина $R = 7,81$ кН.

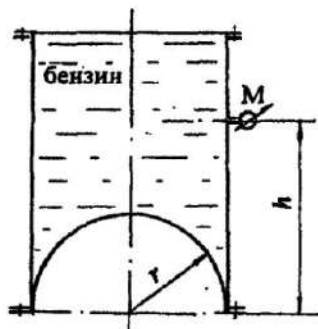


Рис. 3.15

Задача 3.3.8

Определить усилие F , которое нужно приложить к полусферической крышке резервуара с водой (рис. 3.16) для удержания её в закрытом положении, если радиус полусферы $r = 0,2$ м. Крышка поворачивается вокруг шарнира в точке A . Показание пьезометра, установленного на уровне шарнира, $h = 0,6$ м.

Ответ: усилие $F \geq 287$ Н.

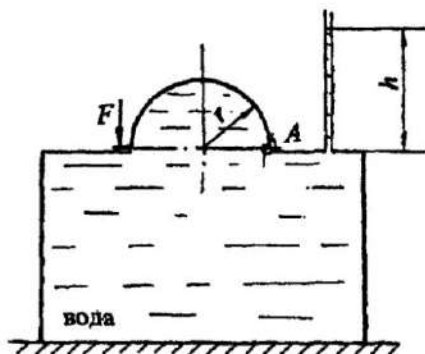


Рис. 3.16

Задача 3.3.9

Определить равнодействующую сил давления воды, угол наклона её к горизонту и глубину погружения центра давления для цилиндрической поверхности AB с секторным углом $\varphi = 120^\circ$. Длина поверхности $L = 3,0$ м. Действующий напор воды слева $H = 1,5$ м, справа $h = H/2 = 0,75$ м (рис. 3.17). При решении представить чертёж в виде вертикального сечения криволинейной поверхности.

Ответ: равнодействующая сил давления воды $R = 25,73$ кН действует под углом $\alpha = 15^\circ$ к горизонту, глубина погружения центра давления $y_{D \text{ равн.}} = 0,98$ м.

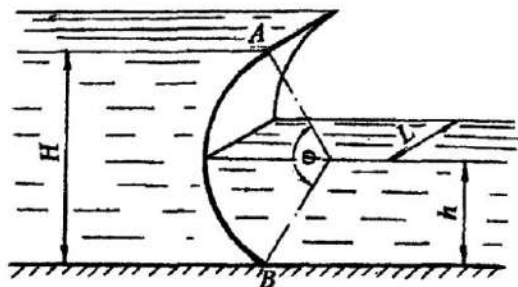


Рис. 3.17

Задача 3.3.10

Определить величину и угол наклона к горизонту равнодействующей сил давления воды на устройство в виде цилиндрического затвора (рис. 3.18), если диаметр цилиндра $D = 0,9$ м, действующий напор слева $H = 1,2$ м, справа $h = D/2$. Длина цилиндрического затвора $L = 4,0$ м.

Ответ: равнодействующая сил давления воды $R = 29,24$ кН действует под углом $\alpha = 39^\circ$ к горизонту.

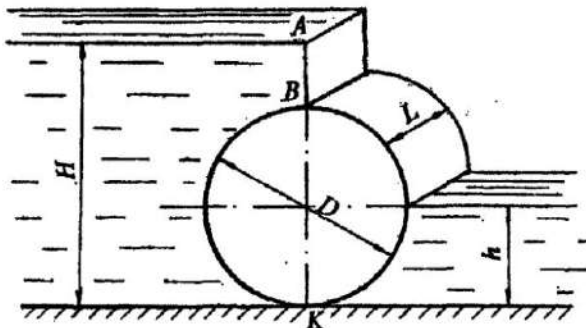


Рис. 3.18

Задача 3.3.11

В закрытом резервуаре, заполненном бензином, в боковой стенке сделано круглое отверстие, которое закрывается полусферической крышкой радиусом $r = 0,6$ м (рис. 3.19). Крышка укреплена с помощью шарнира в точке A . На расстоянии $h = 1,2$ м от шарнира на свободной поверхности бензина действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,05$ ат. Определить усилие F для удержания крышки в закрытом положении. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз.}} = 710$ кг/м³.

Ответ: усилие для удержания крышки $F \geq 4,25$ кН.

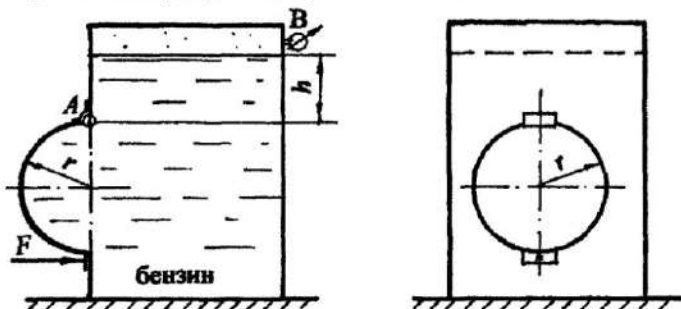


Рис. 3.19

Задача 3.3.12

Закрытый резервуар с полуцилиндрическим дном радиусом $r = 0,6$ м и длиной $L = 1,5$ м заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{масл.}} = 900$ кг/м³ (рис. 3.20). Сила давления масла на дно резервуара $R = 15,4$ кН. Определить на какой высоте H от оси цилиндрической части установлен вакуумметр, показание которого $p_{\text{вак.}} = 0,063$ ат.

Ответ: высота установки вакуумметра $H = 1,2$ м.

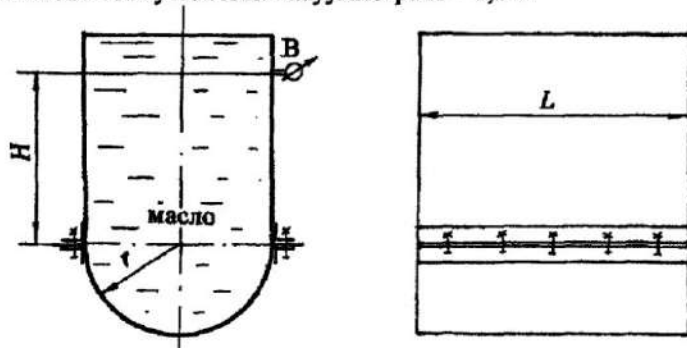


Рис. 3.20

Задача 3.3.13

Определить силу давления воды на верхнюю и нижнюю половины сферического резервуара радиусом $r = 0,3$ м, полностью заполненного водой, а также растягивающее усилие в болтах фланцевого соединения (6 болтов), если показание манометра, установленного под углом $\alpha = 45^\circ$ в нижней части резервуара $p_{\text{ман.}} = 0,1$ ат. (рис. 3.21).

Ответ: $R_{\text{верх}} = 1,63$ кН; $R_{\text{нижн}} = 2,74$ кН; $R_{\text{болт}} = 0,73$ кН.

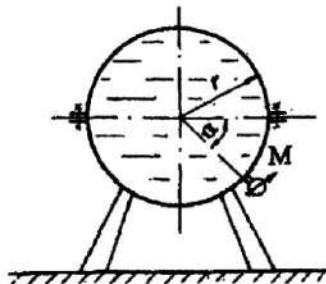


Рис. 3.21

Задача 3.3.14

Определить величину равнодействующей давления воды на полуцилиндрическую крышку AB закрытого резервуара и угол наклона силы к горизонту. Диаметр цилиндрической части $D = 600$ мм, длина образующей цилиндрической поверхности $L = 800$ мм, показание манометра, установленного на расстоянии $h = 100$ мм от дна резервуара, $p_{\text{ман.}} = 0,07$ ат (рис. 3.22). Рассчитать растягивающее и сдвигающее усилие, воспринимаемое болтами крышки.

Ответ: равнодействующая $R = 2,6$ кН, угол наклона силы к горизонту $\alpha = 25^\circ$; $R_{\text{рост.}} = 2,35$ кН; $R_{\text{срез.}} = 1,12$ кН.

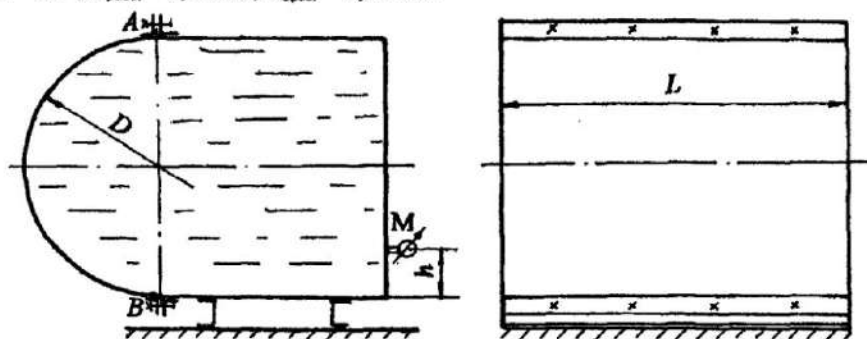


Рис. 3.22

ГИДРОДИНАМИКА

Гидродинамика – раздел гидромеханики, в котором изучаются законы движения жидкости, взаимодействие жидкости с твёрдыми поверхностями и движущимися твёрдыми телами.

Раздел гидродинамики является основой для решения теоретических и инженерных задач по расчёту трубопроводных систем, открытых русел, истечения жидкости через отверстия и насадки.

Глава 4

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

4.1. Основные понятия о параметрах движения жидкости

К гидродинамическим характеристикам потока относятся: *давление, скорость и ускорение*, т. е. изменение скорости во времени.

При установившемся движении жидкости распределение давления по сечению движущегося потока подчиняется гидростатическому закону, т. е. давление не является функцией времени.

Что касается скорости, то она изменяется во времени и в пространстве. Математически такую зависимость трудно записать, поэтому гидродинамические законы имеют достаточно общий характер с некоторыми допущениями.

Скорость в точке потока или скорость в сечении элементарной струйки (понятие струйки будет приведено ниже) обозначается буквой *u*. Средняя скорость потока обозначается \bar{u} .

В зависимости от того, являются ли основные параметры движения функцией времени, различают два вида движения жидкости: *неустановившееся и установившееся*.

Неустановившееся – это движение жидкости, при котором скорость является функцией времени. В качестве примера неустановившегося движения можно привести истечение жидкости при переменном напоре (опорожнение резервуара).

Установившееся – это движение жидкости, при котором все параметры движения в одной и той же точке пространства не меняются во времени, т. е. приращения скорости во времени (ускорение) равно нулю.

В зависимости от характера изменения скорости по длине пространства, заполненного жидкостью, установившееся движение может быть:

а) *равномерным*, при котором скорость по длине струйки, потока остаётся постоянной (движение в трубах постоянного диаметра);

б) *неравномерным*, если скорость по длине потока резко изменяется по величине или (и) по направлению (внезапное сужение или расширение потока, резкий поворот и другие);

в) *плавно изменяющимся*, если изменение скорости происходит достаточно плавно (конические переходники сужающиеся и расширяющиеся). В этом случае с достаточной для практики точностью применимы законы равномерного движения.

В программу данного курса входит изучение законов *установившегося* движения и применение этих законов для решения инженерных задач.

4.2. Понятие идеальной жидкости и потока жидкости

В разделе “Общие сведения о жидкостях” рассмотрены физические свойства жидкостей. В разделе “Гидродинамика” при выводе законов движения необходимо учитывать плотность, удельный вес и все физические свойства жидкостей. Учесть влияние всех этих параметров на условия движения жидкости невозможно, поэтому для облегчения решения задач гидродинамики введено понятие *идеальной жидкости*.

Идеальная жидкость – это *условно* принятая жидкость, не сжимаемая при изменении давления и не расширяющаяся при изменении температуры, обладающая абсолютной подвижностью, т. е. вязкость жидкости равна нулю; не сопротивляющаяся деформации разрыва.

Таким образом, законы и уравнения гидродинамики выводятся для идеальной жидкости, затем в них вносятся дополнительные члены, коэффициенты, поправки с учетом физических свойств и условий движения реальной, вязкой жидкости.

В гидродинамике *поток жидкости* рассматривается как совокупность элементарных струек (рис. 4.1,а).

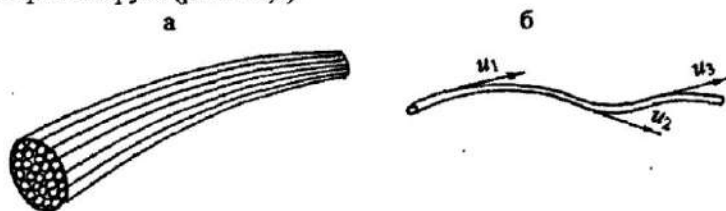


Рис. 4.1

Элементарная струйка – бесконечно малый замкнутый объём жидкости, поверхность которого образована линиями тока (рис. 4.1,а).

Линия тока – линия, в каждой точке которой в данное мгновение вектор скорости жидкости совпадает с касательной к этой линии. При

установившемся движении линия тока совпадает с траекторией движения материальной точки жидкости.

Для элементарной струйки приняты свойства, которые используются в теоретических выводах:

- форма струйки не изменяется с течением времени;
- поверхность струйки непроницаема со стороны окружающей жидкости, жидкость не входит в струйку и не выходит из неё;
- в силу малости нормального сечения струйки скорость в пределах сечения считается постоянной.

Различают два вида потоков.

Напорные потоки – это потоки жидкости, ограниченные со всех сторон твёрдыми стенками. Примерами служат движение воды, масла, нефти в трубопроводах, воздуха в вентиляционных системах и им подобные.

Безнапорные потоки – это потоки жидкости, ограниченные твёрдыми поверхностями не со всех сторон и имеющие по всей длине свободную поверхность. Примерами таких потоков являются движение жидкости в реках, каналах, лотках, желобах и других открытых руслах.

4.3. Гидравлические элементы потока

Живое сечение (ω) – сечение струйки или потока плоскостью, нормальной в каждой своей точке к проходящей через неё линии тока. Для равномерного и плавно изменяющегося движения живое сечение является плоским.

На рис. 4.2 представлено живое сечение для круглой трубы диаметром d , полностью заполненной жидкостью (рис. 4.2,а), и для открытого русла шириной b и глубиной наполнения h (рис. 4.2,б).

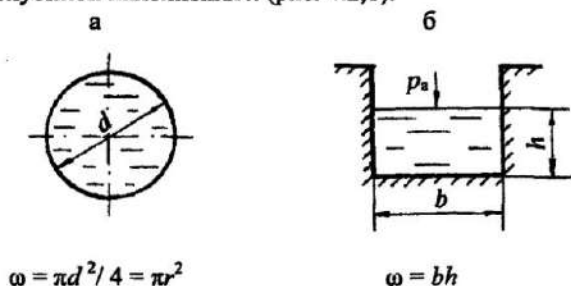


Рис. 4.2

Смоченный периметр (χ) – длина контура живого сечения по твёрдым стенкам русла. На рис. 4.2,а для круглой трубы $\chi = \pi d = 2\pi r$ (длина окружности круглой трубы); для открытого потока (см. рис. 4.2,б) $\chi = 2h + b$.

Гидравлический радиус (R) – отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (4.1)$$

Для напорного потока в круглой трубе (см. рис. 4.2,а) гидравлический радиус

$$R = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4} = \frac{r}{2}; \quad \text{откуда } d = 4R, \quad (4.2)$$

для открытого потока (см. рис. 4.2,б)

$$R = \frac{bh}{2h + b}.$$

Гидравлический радиус (R) является универсальной геометрической характеристикой потока, которая может быть использована в теоретических выводах для потоков любой формы с различной степенью заполнения жидкостью.

4.4. Расход жидкости. Средняя скорость потока.

Уравнение неразрывности потока

Расходом называется количество жидкости, проходящее через живое сечение в единицу времени.

В зависимости от того, в чём выражают количество жидкости, различают:

- объёмный расход (Q);
- массовый расход (M);
- весовой расход (G).

Для вывода расчётной формулы объёмного расхода рассмотрим элементарную струйку в установившемся движении, выделим в ней живое сечение $d\omega$, которое за время dt переместится из положения 1 в положение 2, пройдя путь dl (рис. 4.3).

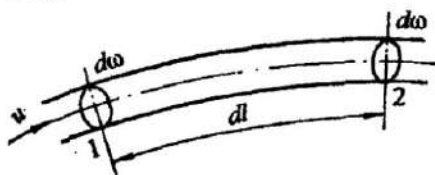


Рис. 4.3

Допустимо считать, что на расстоянии dl площадь живого сечения $d\omega$ остаётся постоянной и скорость u в живом сечении также постоянна согласно свойствам элементарной струйки.

При перемещении живого сечения из положения 1 в положение 2 за время dt жидкость заполнит отсек 1-2 объёмом $dV = d\omega \cdot dl$. Согласно определению объёмный расход для элементарной струйки

$$dQ = \frac{dV}{dt} = d\omega \frac{dl}{dt}$$

При установившемся движении $\frac{dl}{dt} = u$, где u – скорость струйки в живом сечении, таким образом, расход для элементарной струйки:

$$dQ = u \, d\omega.$$

Переходя к целому потоку жидкости, следует учесть, что скорости струек в пределах живого сечения потока изменяются по величине и по направлению. Чтобы найти расход жидкости для целого потока, следует просуммировать расходы струек по всему живому сечению, т.е. проинтегрировать зависимость dQ по площади живого сечения потока ω :

$$Q = \int_{\omega} u \, d\omega.$$

Для инженерных расчётов вводится понятие средней, условной скорости потока (v).

Средняя скорость – это такая одинаковая для всех струек скорость, при которой расход жидкости равен суммарному расходу элементарных струек с действительными скоростями, тогда

$$v = \frac{\int u \, d\omega}{\omega} = \frac{Q}{\omega},$$

отсюда

$$Q = v \, \omega. \quad (4.3)$$

Единица измерения объёмного расхода Q : $\text{м}^3/\text{с}$; $\text{л}/\text{с}$.

Массовый расход $M = \rho Q$, $\text{кг}/\text{с}$.

Весовой расход $G = \rho g Q$, $\text{Н}/\text{с}$.

Экспериментальное определение объёмного расхода (Q) проводится объёмным методом, а именно определяется время наполнения (t) определённого объёма жидкости (W) в мерной ёмкости, тогда

$$Q = \frac{W}{t}. \quad (4.4)$$

Объём протекающей жидкости (W) можно также определить по водомёру, счётчику воды или любому прибору для измерения скорости и расхода (примеры таких приборов будут рассмотрены ниже).

Важным уравнением в гидродинамике является *уравнение неразрывности потока* (приводится без вывода).

В случае, если плотность жидкости - величина постоянная ($\rho = \text{const}$), что имеет место при движении капельных жидкостей, уравнение неразрывности имеет вид:

$$Q_1 = Q_2 = Q = \text{const}$$

или для двух сечений

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2.$$

Как следствие можно записать $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$; (4.5)

для круглой трубы:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

Для сплошного неразрывного потока расход жидкости постоянный, скорости в живых сечениях обратно пропорциональны площадям живых сечений.

4.5. Основное уравнение гидродинамики.

Уравнение Даниила Бернулли

Уравнение Бернулли является основным уравнением гидромеханики, с помощью которого решаются теоретические вопросы и инженерные задачи. Принципы действия многих приборов, в том числе для измерения скорости и расхода жидкости, основаны на уравнении Бернулли.

В уравнении Бернулли установлена связь между основными параметрами движения: давлением, скоростью в живом сечении струйки или потока и геометрическим положением живого сечения струйки или потока жидкости.

В данном разделе рассматривается уравнение Бернулли для *установившегося* движения жидкости, находящейся в поле действия сил тяжести, т. е. действует только ускорение свободного падения g .

Уравнение Бернулли выводится в три этапа:

- 1) для элементарной струйки идеальной жидкости (см. понятие идеальной жидкости и элементарной струйки в разделе 4.2);
- 2) для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости;
- 3) для целого потока реальной жидкости.

Каждое из последующих уравнений выводится на основе предыдущего.

Вместе с тем каждое уравнение имеет своё назначение и круг решаемых задач.

Рассмотрим последовательно все уравнения Д. Бернулли.

4.5.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости

Идеальная жидкость – это условная жидкость, в которой отсутствует такое физическое свойство, как вязкость. Идеальная жидкость обладает абсолютной текучестью и движется без возникновения сопротивлений, поэтому энергия струйки остаётся постоянной по ходу движения. Уравнение имеет вид:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{const.} \quad (4.6)$$

Для двух и более сечений по направлению движения струйки уравнение принимает вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} = \dots = \text{const} \quad (4.7)$$

Рассмотрим смысл всех слагаемых, входящих в уравнение (4.7).

4.5.2. Интерпретация уравнения Бернулли

Все члены уравнения имеют линейную размерность, поэтому могут характеризоваться с геометрической точки зрения как высоты или напоры, а с энергетической точки зрения как удельная энергия.

Геометрический смысл уравнения Бернулли:

$z = h_{\text{геом}}$ – геометрическая высота, или геометрический напор, отсчитывается от произвольной горизонтальной плоскости сравнения;

$\frac{p}{\rho g} = h_p$ – пьезометрический напор, или пьезометрическая высота (см.

раздел 1.3). Пьезометрический напор соответствует показанию пьезометра в заданном сечении струйки;

$\frac{u^2}{2g} = h_{\text{ск}}$ – скоростной напор в живом сечении струйки.

Уравнение (4.6) с геометрической точки зрения может быть записано:

$$h_{\text{геом.}} + h_p + h_{\text{кр.}} = H_{\text{полн.}} = \text{const}, \quad (4.8)$$

где $H_{\text{полн.}}$ – *полный напор* в заданном сечении струйки.

Сумма геометрического и пьезометрического напоров называется *статическим напором*, обозначается $H_{\text{ст.}}$:

$$h_{\text{геом.}} + h_p = H_{\text{ст.}} \quad \text{или} \quad z + \frac{p}{\rho g} = H_{\text{ст.}} \quad (4.9)$$

Графическое представление уравнения Бернулли называется диаграммой уравнения.

Для построения диаграммы рассмотрим элементарную струйку идеальной жидкости в установившемся плавно изменяющемся движении, выделим в ней два живых сечения 1-1 и 2-2 с площадями $d\omega_1$ и $d\omega_2$, со скоростями u_1 и u_2 и давлениями в этих сечениях p_1 и p_2 .

Представим графически уравнение (4.7).

Выбираем произвольно ориентированную *горизонтальную плоскость сравнения* 0-0 (рис. 4.4). Отсчёты геометрических высот сечений z_1 и z_2 от плоскости сравнения по вертикали вверх считаются положительными.

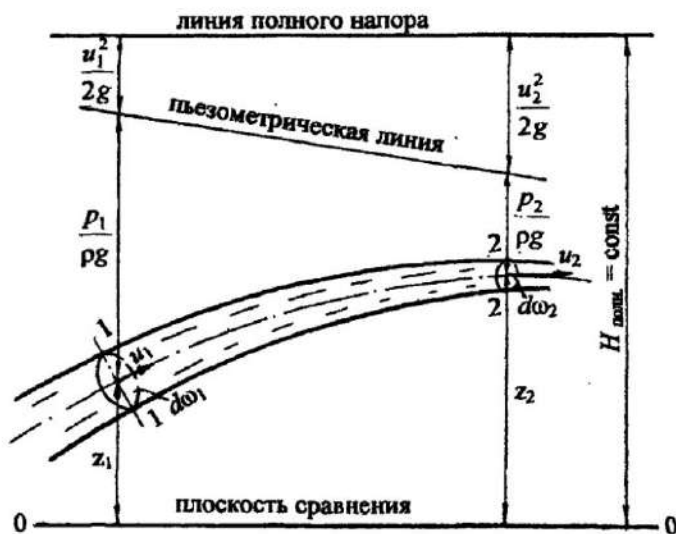


Рис. 4.4

Показываем z_1 и z_2 для выделенных сечений. В каждом сечении по вертикали прибавляем пьезометрические напоры $\frac{p_1}{\rho g}$ и $\frac{p_2}{\rho g}$, затем скоростные напоры $\frac{u_1^2}{2g}$ и $\frac{u_2^2}{2g}$.

При построении диаграммы следует учесть, что для изображённой струйки площадь второго живого сечения $d\omega_2$ меньше площади первого живого сечения $d\omega_1$, значит, согласно уравнению неразрывности (см. формулу 4.5), скорость и скоростной напор во втором сечении больше, чем в первом: $\frac{u_2^2}{2g} > \frac{u_1^2}{2g}$.

Сумма трёх напоров для элементарной струйки идеальной жидкости величина постоянная, равная полному напору H . Показываем на диаграмме $H_{\text{полн.}} = \text{const}$.

Линия, соответствующая полному напору, называется линией полного напора. Для идеальной жидкости линии полного напора располагаются на одной горизонтальной плоскости.

Линия, соответствующая пьезометрическим напорам, называется пьезометрической линией.

Очертание пьезометрической линии соответствует форме элементарной струйки. Для струйки цилиндрической или плавно изменяющейся формы пьезометрическая линия является наклонной прямой. Анализ диаграммы показывает, что при сужении струйки скоростной напор возрастает, а статический напор падает.

Энергетический смысл уравнения Бернулли

Все слагаемые уравнения представляют *удельную энергию*, т. е. отнесённую к единице веса:

$z = e_{\text{полож.}}$ - удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{p}{\rho g} = e_{\text{давл.}}$ - удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{u^2}{2g} = e_{\text{кин.}}$ - удельная кинетическая энергия.

С энергетической точки зрения уравнение имеет вид:

$$e_{\text{полож.}} + e_{\text{давл.}} + e_{\text{кин.}} = E = \text{const}, \quad (4.10)$$

где E - полная удельная энергия струйки.

Для идеальной жидкости полная удельная энергия струйки остаётся постоянной для всех сечений по длине движущейся струйки. Таким образом, уравнение Бернулли согласуется с *законом сохранения энергии*.

Закон сохранения энергии можно проследить на диаграмме (см. рис.4.4): во втором сечении удельная кинетическая энергия $(\frac{u_2^2}{2g})$ увеличивается, значит, удельная потенциальная энергия $(z_2 + \frac{p_2}{\rho g})$ уменьшается.

4.5.3. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости

Реальная жидкость считается несжимаемой, обладающей важным физическим свойством - вязкостью (см. раздел "Общие сведения о жидкостях"). Вязкость противодействует относительному перемещению слоёв жидкости, в связи с чем возникают силы трения. На преодоление сил трения затрачивается энергия (напор) движущейся жидкости. Это значит, что полный напор (H) или полная удельная энергия (E) струйки не остаются постоянными по длине движущейся струйки, часть напора (энергии) затрачивается на преодоление сил трения.

В уравнение Бернулли вводится дополнительный член h'_{w} , называемый потерями напора. Таким образом, если H_1 – полный напор в первом сечении струйки, то ко второму сечению останется полный напор H_2 , а часть напора $h'_{w_{1-2}}$ израсходуется на преодоление гидравлических сопротивлений между первым и вторым сечениями:

$$H_1 = H_2 + h'_{w_{1-2}}. \quad (4.11)$$

Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости принимает вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h'_{w_{1-2}}. \quad (4.12)$$

Геометрический и энергетический смысл каждого слагаемого уравнения остаётся таким же, как для идеальной жидкости.

Представим диаграмму уравнения для элементарной струйки реальной жидкости на рис. 4.5.

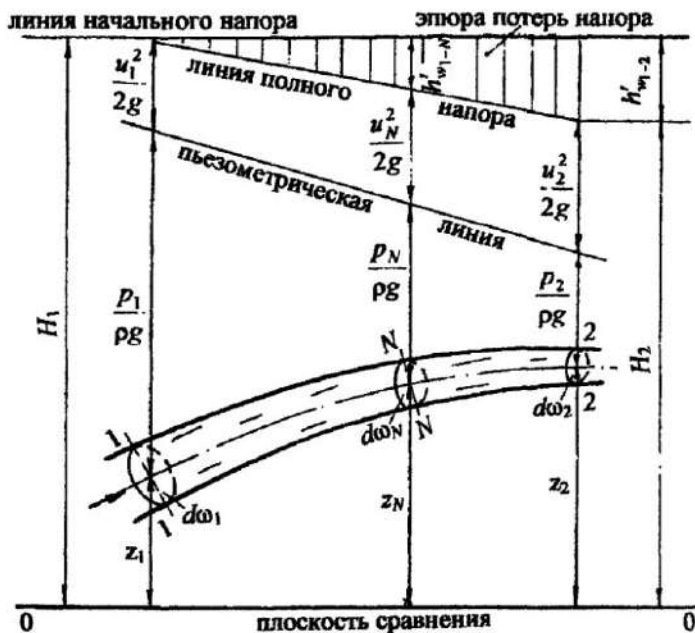


Рис. 4.5

Чтобы проследить подобие построения диаграммы, примем элементарную струйку примерно той же формы, что для идеальной жидкости (см. рис. 4.4). Выделим два живых сечения 1-1 и 2-2 с площадями $d\omega_1$ и $d\omega_2$, покажем три напора (геометрический, пьезометрический, скоростной) в первом сечении и полный напор в первом сечении — H_1 . Для второго сечения аналогично отложим три напора так, чтобы полный напор во втором сечении H_2 был меньше полного напора в первом сечении на величину h'_{w1-2} .

Величина h'_{w1-2} — это потери напора между сечениями 1-1 и 2-2. Обозначим на диаграмме *линию полного напора*, *пьезометрическую линию*, а также *линию начального напора* (см. рис. 4.5).

Если выбрать любое сечение $N-N$ по длине движущейся струйки, то для него можно показать потери напора h'_{w1-N} в виде вертикальной линии между линией начального напора и линией полного напора.

Таким образом, вертикальные штриховые линии между линией начального напора и линией полного напора будут соответствовать потерям напора по длине реальной струйки, а заштрихованная часть называется *эпорой потерь напора*.

4.5.4. Уравнение Бернулли для целого потока реальной, вязкой жидкости

Переходя к целому потоку, учитываем струйную модель потока. Это значит, чтобы записать уравнение для целого потока, нужно просуммировать энергии струек, составляющих поток, по всему живому сечению потока.

Подробный теоретический вывод уравнения следует изучить по учебнику или курсу лекций. Рассмотрим более упрощённо и кратко теоретические положения по уравнению Бернулли для потока реальной жидкости.

Два слагаемых уравнения $z + \frac{p}{\rho g}$ соответствуют статическому напору $H_{ст}$, согласно формуле (4.9). В гидродинамике принято считать: *распределение статического напора по живому сечению подчиняется гидростатическому закону:*

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const.} \quad (4.13)$$

Покажем этот закон графически на рис. 4.6. В заданном живом сечении потока (ω) выделим произвольно элементарные струйки 1, 2, 3, давления в которых p_1, p_2, p_3 соответственно. Проведём плоскость сравнения 0-0 и покажем геометрические высоты (z_1, z_2, z_3) живых сечений струек.

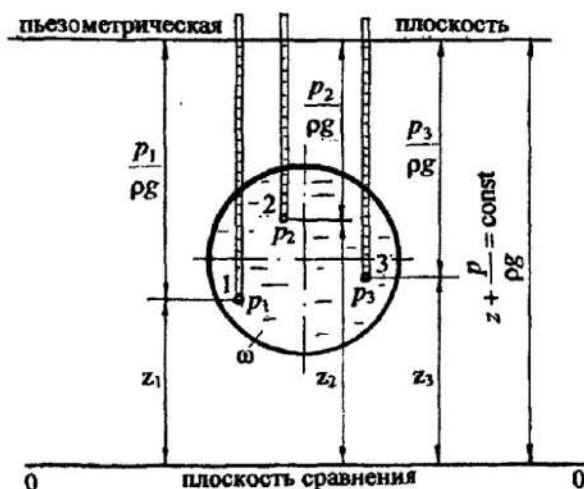


Рис. 4.6

На уровне выбранных струек покажем пьезометры и соответственно пьезометрические напоры $(\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}, \frac{P_3}{\rho g})$. Уровни жидкости во всех

пьезометрах будут на одном горизонте, а сумма $z + \frac{P}{\rho g} = \text{const}$. Такая

постоянная величина статического напора будет только в данном живом сечении, в другом сечении она будет также постоянной, но другой величины.

Следующая задача – просуммировать кинетические энергии струек, составляющих поток, по живому сечению потока. Скорости струек (u) в пределах живого сечения потока переменны, поэтому следует учесть неравномерность распределения скорости по живому сечению.

Для практических расчётов вводят *среднюю, или условную*, скорость потока (v) (см. раздел 4.4), одинаковую для всех струек. Теоретически рассчитывают *условную кинетическую энергию* ($E_{\text{усл.}}^{\text{кин.}}$) через среднюю скорость потока v .

Затем теоретически определяют *действительную кинетическую энергию* ($E_{\text{дейст.}}^{\text{кин.}}$) через действительные скорости (u) элементарных струек, составляющих поток.

Неравномерность распределения скорости по живому сечению учитывают коэффициентом корреляции кинетической энергии, или *коэффициентом неравномерности распределения скорости* – α :

$$\alpha = \frac{E_{\text{дейст.}}^{\text{кин.}}}{E_{\text{усл.}}^{\text{кин.}}} \quad (4.14)$$

Коэффициент α называется также *коэффициент Кориолиса*.

Значение коэффициента α зависит от режима движения жидкости. Режимы движения жидкости будут рассмотрены ниже. Пока следует учесть, что для ламинарного режима $\alpha = 2,0$; для турбулентного режима $\alpha = 1,0 \div 1,15$ (для практических расчётов при турбулентном режиме воды принимают $\alpha = 1,0$).

С учётом введённого коэффициента α скоростной напор ($h_{\text{ск.}}$) или удельная кинетическая энергия потока ($e_{\text{кин.}}$) представляется как $\frac{\alpha v^2}{2g}$.

Дополнительный член уравнения Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости h'_w учитывает потери напора в элементарной струйке.

Для целого потока вводится осреднённая величина потерь напора h_w . Аналогично средней скорости считается, что суммарные потери напора элементарных струек с действительными величинами условно равны полным потерям напора для потока h_w .

С учётом выше изложенных положений уравнение Бернулли для **целого потока реальной жидкости** принимает вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}} \quad (4.15)$$

Уравнение (4.15) является **основным уравнением гидродинамики**, которым пользуются для решения теоретических и инженерных задач.

Диаграмма уравнения для **целого потока реальной жидкости** аналогична диаграмме для элементарной струйки реальной жидкости (см. рис. 4.5). На диаграмме следует обозначить живые сечения ω_1 и ω_2 , а скоростные напоры соответственно - $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ и $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$.

Рассмотрим практическое применение уравнения Бернулли.

4.5.5. Экспериментальное определение статического и полного напоров. Расчёт скорости в точке потока

Рассмотрим наклонную трубу диаметром d , выделим живое сечение ω , в котором следует определить статический и полный напор по оси трубы (рис. 4.7).

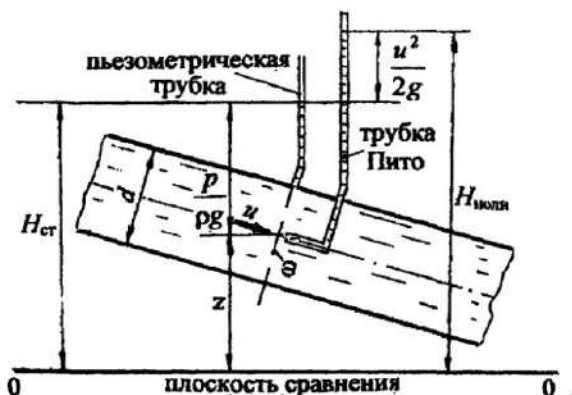


Рис. 4.7

Проведём произвольно плоскость сравнения 0-0 и отложим геометрический напор сечения (z) до оси живого сечения ω . Покажем пьезометр в живом сечении и отметим пьезометрический напор ($\frac{p}{\rho g}$) по уровню жидкости в пьезометре.

Таким образом, по показанию пьезометра определяем статический напор:

$$H_{ст.} = z + \frac{P}{\rho g}.$$

Для определения полного напора по оси потока пользуются трубкой Пито. Это трубка очень малого диаметра с загнутым под углом 90° и гладко обработанным концом. Трубка Пито устанавливается по оси трубы или в любой другой точке потока так, чтобы скорость u была направлена на входное отверстие трубки. Если бы не было движения жидкости ($u = 0$), уровни жидкости в пьезометре и трубке Пито были бы на одном горизонте. При действии скорости u на входе в трубку Пито уровень жидкости в трубке поднимется выше уровня в пьезометре на величину, соответствующую скоростному напору, $-\frac{u^2}{2g}$.

Таким образом, трубкой Пито определяется полный напор в заданной точке потока, в частности по оси потока.

Трубка Пито в сочетании с пьезометром является прибором для измерения скорости.

Действительно, разность показаний трубки Пито и пьезометра соответствует скоростному напору:

$$\frac{u^2}{2g} = H_{полн.} - H_{ст.},$$

отсюда скорость в точке потока: $u = \sqrt{2g(H_{полн.} - H_{ст.})}$.

Для практических расчётов скорости пользуются формулой

$$u = \varphi \sqrt{2g(H_{полн.} - H_{ст.})}, \quad (4.16)$$

где φ – поправочный коэффициент, который определяется путём тарирования трубки Пито.

Для определения скорости воздушных и газовых потоков пользуются пневмометрической трубкой Пито-Прандтля. В такой трубке совмещены пьезометр и трубка Пито. В корпусе трубки через прорезь в горизонтальной части снимается статический напор, а через открытый носик трубки определяется полный напор. Трубка подключается к U-образному манометру, микроманометру, дифференциальному манометру или подобным приборам для измерения разности давлений (напоров). По показанию прибора рассчитывается скоростной напор. С конструкцией трубки Пито-Прандтля следует ознакомиться в учебной литературе.

4.5.6. Диаграмма уравнения Бернулли для потока жидкости в трубе переменного сечения

Рассмотрим экспериментальное построение диаграммы уравнения Бернулли для потока жидкости в трубе переменного сечения диаметрами d_1 , d_2 , d_3 (рис. 4.8). Пусть $d_2 < d_1 < d_3$. Для построения диаграммы воспользуемся принятой методикой (см. разделы 4.5.2; 4.5.3).

По направлению движения жидкости выделим три живых сечения 1-1; 2-2; 3-3; выберем плоскость сравнения 0-0 и отложим геометрические высоты (напоры) выбранных сечений: z_1 , z_2 , z_3 .

В сечениях покажем пьезометрические трубки. Как было отмечено выше (см. раздел 4.5.2), при сужении трубы пьезометрический напор падает, а скоростной напор возрастает, и, наоборот, при расширении трубы пьезометрический напор повышается, а скоростной напор уменьшается.

Отметим уровни жидкости в пьезометрах ($\frac{P_1}{\rho g}$, $\frac{P_2}{\rho g}$, $\frac{P_3}{\rho g}$). К геометрическим напорам прибавим пьезометрические напоры. Проведём *пьезометрическую линию* по уровням жидкости в пьезометрах (см. рис. 4.8).

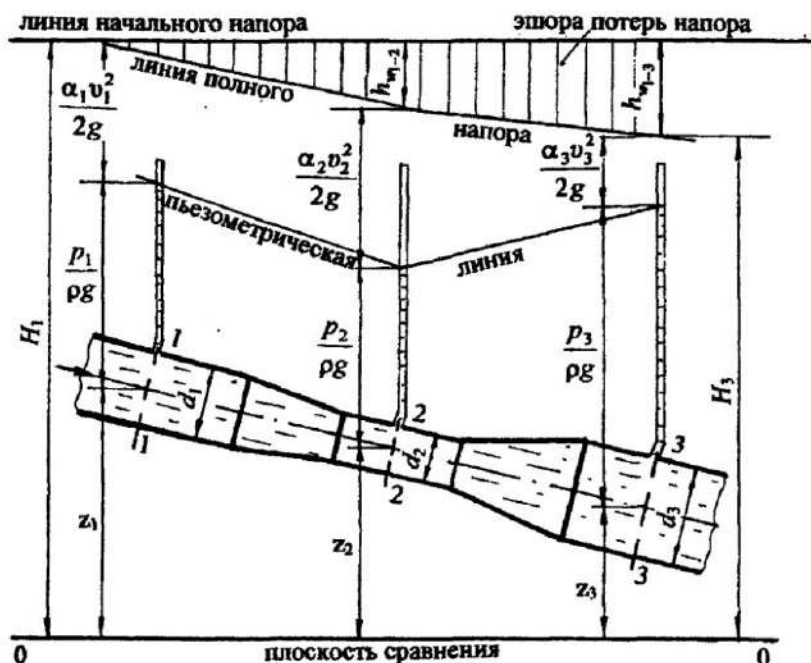


Рис. 4.8

Анализ построения пьезометрической линии показывает, что *пьезометрическая линия* очерчивается ломаной линией, которая *может повышаться* или *понижаться* в зависимости от геометрических размеров трубы.

К сумме геометрического и пьезометрического напоров прибавим скоростные напоры в сечениях: $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} > \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} > \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g}$.

В каждом сечении получаем полные напоры, причём следует учесть, что $H_1 > H_2 > H_3$, соединяем ломаной линией их значения. Это *линия полного напора*, показываем её на диаграмме (см. рис. 4.8).

Линия полного напора по ходу движения жидкости *понижается*. Понижение линии полного напора соответствует величине потерь напора между сечениями по ходу движения жидкости.

Вертикальными линиями заштриховываем эпюру потерь напора.

Методика построения пьезометрической линии, линии полного напора и эпюры потерь напора будет применена при расчёте трубопроводных систем.

Следует запомнить, что на участках трубы с *постоянным диаметром* линия полного напора проходит *параллельно* пьезометрической линии на расстоянии, равном скоростному напору.

4.5.7. Методика составления уравнения Бернулли для решения теоретических и инженерных задач

С помощью уравнения Бернулли решаются многие теоретические и практические задачи. Применение уравнения Бернулли предусмотрено для реальной, вязкой жидкости при установившемся движении для тех сечений, где движение не должно быть резко изменяющимся.

На использовании уравнения Бернулли основано создание приборов для измерения скорости и расхода потока жидкости.

При составлении уравнения Бернулли следует пользоваться следующей *методикой*.

1. *Выбираются два сечения*, в которых известно наибольшее количество параметров, входящих в уравнение, или их нужно определить. Такими сечениями служат свободная поверхность жидкости или места установки измерительных приборов (манометров, вакуумметров, пьезометров и им подобных). Сечения проводятся горизонтально по свободной поверхности (для практических расчётов скорость на свободной поверхности принимается равной нулю, $v = 0$) или нормально к направлению движения жидкости, т. е. по живому сечению.

2. Сечения нумеруются по направлению движения жидкости. Это обусловлено тем, что потери напора в гидравлических сопротивлениях увеличиваются по направлению движения жидкости, и дополнительный член уравнения h_v , учитывающий эти потери, должен быть со знаком плюс.

3. В уравнении Бернулли рекомендуется учитывать *абсолютное давление в выбранных сечениях*. Это позволит избежать ошибок при определении давления в сечениях.

4. *Выбирается плоскость сравнения 0-0*. Как правило, она совмещается с одним из сечений или проводится через его ось, тогда геометрическая высота этого сечения равна нулю ($z = 0$). Следует помнить, что плоскость сравнения всегда горизонтальная. Отсчёты геометрической высоты сечения z от плоскости сравнения вверх считаются положительными, вниз – отрицательными.

5. *Уравнение Бернулли записывается в общем виде*. Под уравнением представляются значения параметров. Производится подстановка всех величин в уравнение в буквенном выражении. Уравнение решается относительно неизвестного параметра.

Ниже рассмотрим применение уравнения Бернулли для приборов, служащих для измерения скорости и расхода потока жидкости. В этих приборах можно пренебречь потерями напора.

4.5.8. Приборы для измерения скорости и расхода, основанные на уравнении Бернулли

Расходомер Вентури - это труба с плавным переходом от большого диаметра к меньшему, небольшой цилиндрической вставки меньшего диаметра и плавного перехода от меньшего диаметра к большему. В широкой и узкой части расходомера подключены приборы для измерения давления, например пьезометры, по показаниям которых рассчитывается скорость и расход неразрывного потока. Как правило, соотношение диаметров принимается равным: $d_2 : d_1 = 1/2; 1/3$ и тому подобным.

Схема расходомера представлена на рис. 4.9. Для определения скорости и расхода жидкости воспользуемся уравнением Бернулли. Пусть представленный прибор является водомером. Согласно принятой *методике* (см. раздел 4.5.7), выполним все пункты составления уравнения.

1. Выберем два живых сечения в местах установки пьезометров. Сечения проведём нормально к направлению движения потока воды.

2. Сечения 1-1 и 2-2 пронумеруем по направлению движения воды.

3. В выбранных сечениях покажем пьезометрические напоры:

$\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$, обозначим разность показаний пьезометров через h .

4. Проведём произвольно горизонтальную плоскость сравнения 0-0 и покажем геометрические высоты выбранных сечений z_1 и z_2 (рис. 4.9).

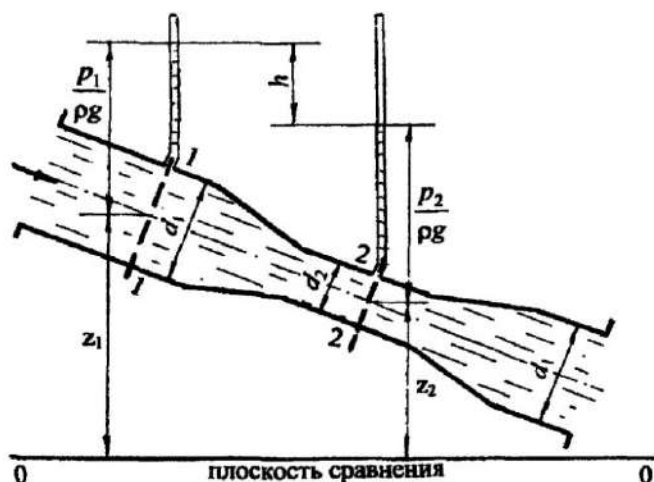


Рис. 4.9

5. Запишем уравнение Бернулли в общем виде:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{m-2}$$

Пренебрегаем потерями напора в водосре ($h_{m-2} = 0$), считая, что переходы от одного диаметра к другому сделаны плавно и хорошо механически обработаны, как этого требуют приборы.

Принимаем $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$ для движения воды в круглой трубе при турбулентном движении.

Группируя соответственно члены уравнения со статическим и скоростным напорами, получим:

$$\left(z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right) = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}$$

Из рис. 4.9 следует:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right) = h,$$

значит,

$$h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

В этом уравнении два неизвестных v_1 и v_2 , но из условия неразрывности потока (см. формулу (4.5)) следует, что $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$.

Определяем отсюда $v_2 = v_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}$, далее $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$. Для лучшего понимания дальнейшего решения, принимаем $d_2 : d_1 = 1/2$, тогда $v_2 = 4v_1$.

Разность показаний пьезометров h

$$h = \frac{16v_1^2 - v_1^2}{2g} = \frac{15v_1^2}{2g},$$

отсюда

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{15}}.$$

Расход воды

$$Q = v_1 \omega_1 = \omega_1 \sqrt{\frac{2gh}{15}} = K_{\text{приб.}} \omega_1 \sqrt{h},$$

где

$$K_{\text{приб.}} = \sqrt{\frac{2g}{15}}.$$

Значение поправочного коэффициента прибора ($K_{\text{приб.}}$) зависит от соотношения диаметров расходомера Вентури в широкой и узкой частях прибора. Как правило, в расчётную формулу расхода (Q) вводится также тарифовочный коэффициент φ , который учитывает потери напора в расходомере и определяется опытным путём.

$$\text{Формула расхода принимает вид: } Q = \varphi K_{\text{приб.}} \omega_1 \sqrt{h}. \quad (4.17)$$

Анализируя формулу (4.17), видим, что расход жидкости является функцией разности показаний пьезометров (h) или показания другого прибора для измерения разности напоров. Для удобства практических расчётов можно построить графическую зависимость $Q = f(h)$ или $v_1 = f(h)$; $v_2 = f(h)$. Это будет квадратичная зависимость, графически в виде параболы.

Расходомер Вентури используется не только для капельных жидкостей, но и для газообразных. В этом случае в широкой и узкой частях расходомера выводятся штуцера, к которым подсоединяется жидкостный прибор для измерения разности давлений, например U -образный манометр или микроманометр с наклонной трубкой. Конструкция и принцип действия таких приборов подробно изложены в учебниках и учебных пособиях.

Входной коллектор. Входной коллектор используется для определения скорости и расхода во всасывающих воздушных, газовых, вентиляционных, пневмотранспортных и других системах.

Входной коллектор устанавливается на входе в систему и представляет трубу с плавным входом, выполненным по какому-либо криволинейному закону, например по параболе (рис. 4.10), так, чтобы исключить потери напора на входе в коллектор.

На расстоянии 3-5 диаметров трубы от входа выводится штуцер, к которому подключается жидкостный прибор для измерения давления (U -образный манометр, микроманометр). Рабочей жидкостью в приборе может быть вода, спирт или другая капельная жидкость. По показанию прибора (h) рассчитывается средняя скорость потока газообразной жидкости в трубе и её расход.

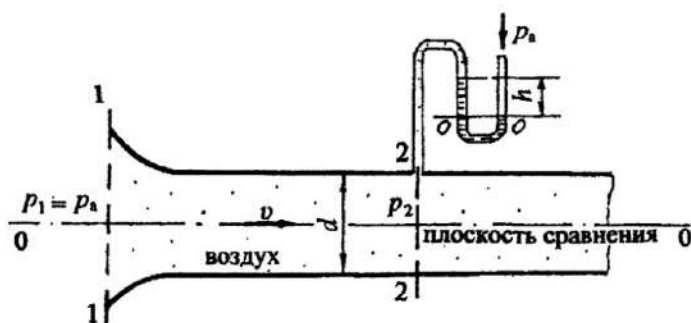


Рис. 4.10

Покажем расчёт скорости и расхода газообразной жидкости во всасывающей системе, пользуясь уравнением Бернулли.

1. **Выберем два сечения** по кромке входного сечения коллектора, где скорость ещё практически отсутствует, и в месте установки измерительного прибора. Сечения проведём нормально к направлению движения жидкости, например воздуха (см. рис. 4.10).

2. **Пронумеруем сечения 1-1 и 2-2 по направлению движения воздуха.**

3. Учтём *абсолютное давление в выбранных сечениях*. Абсолютное давление в первом сечении $p_1 = p_a$. Абсолютное давление во втором сечении будет меньше атмосферного, так как всасывание идёт за счёт создания вакуума. Пользуясь уравнениями гидростатики (см. разделы 1.3; 1.5), составим условие равенства давления относительно плоскости уровня $O - O$ в U -образном манометре, получим абсолютное давление во втором сечении $p_2 = p_a - \rho_{жидк.}gh$.

4. *Плоскость сравнения $0 - 0$ совместим с осью коллектора*, тогда геометрические высоты сечений $z_1 = 0$; $z_2 = 0$ (см. рис. 4.10).

5. Запишем уравнение Бернулли в общем виде, под уравнением представим значения всех параметров и сделаем подстановку данных. При подстановке слагаемых уравнения принимаем $\alpha_2 = 1,0$ (круглая труба), потерями напора на входе в коллектор и на участке в трубе между сечениями 1-1 и 2-2 пренебрегаем:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_2 &= 0; \\ p_1 &= p_a; & p_2 &= p_a - \rho_{жидк.}gh; \\ v_1 &= 0; & \alpha_2 &= 1,0; \quad v_2 = v; \quad h_{w_{1-2}} = 0. \end{aligned}$$

Принимаем движущуюся жидкость – воздух плотностью $\rho_{возд.}$. После подстановки слагаемых в уравнение Бернулли:

$$\frac{p_a}{\rho_{возд.}g} = \frac{p_a}{\rho_{возд.}g} - \frac{\rho_{жидк.}gh}{\rho_{возд.}g} + \frac{v^2}{2g}$$

После соответствующих сокращений и преобразований получим расчётную формулу для скорости движения воздуха в трубе:

$$v = \sqrt{\frac{2g\rho_{жидк.}h}{\rho_{возд.}}} = K_{колл.} \sqrt{h},$$

где $K_{колл.} = \sqrt{\frac{2g\rho_{жидк.}}{\rho_{возд.}}}$ - коэффициент прибора (коллектора), зависящий от вида транспортируемой жидкости (воздух, газ) и плотности жидкости в измерительном приборе давления.

Как правило, приборы для измерения скорости и расхода тарируются, т. е. проверяются расчёты по поверенным, стандартным приборам и вводится поправочный тарировочный коэффициент φ , тогда

$$v = \varphi K_{\text{колл.}} \sqrt{h}, \text{ соответственно } Q = \varphi K_{\text{колл.}} \omega \sqrt{h}, \quad (4.18)$$

где $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ - площадь живого сечения трубы.

Формула расхода для коллектора (4.18) аналогична формуле расхода для расходомера Вентури (4.17).

По аналогии с расходомером Вентури для входного коллектора можно построить графическую зависимость $v = f(h)$ и $Q = f(h)$, которой практически удобно пользоваться для определения скорости и расхода без проведения расчётов.

4.6. Режимы движения жидкости

Английский физик Осборн Рейнольдс на основе многочисленных опытов и обработки данных других учёных в 1883 году представил теоретические положения о двух режимах движения жидкости - ламинарном и турбулентном.

Ламинарный режим - это спокойное, прямолинейное, параллельно струйное, послойное движение жидкости.

Турбулентный режим - это неупорядоченное движение струек, с поперечными пульсациями скорости, колебаниями, завихрениями струек, а при больших скоростях с полным перемешиванием жидкости.

Классические опыты Рейнольдса и теоретические положения по изучению режимов движения жидкости подробно изложены во всех учебниках и учебных пособиях, поэтому рассмотрим основные расчётные формулы, необходимые для практических расчётов.

На опытной установке Рейнольдса экспериментально изучено, что при малых скоростях движения жидкости можно наблюдать ламинарный режим.

При дальнейшем увеличении скорости наблюдается разрушение параллельной струйности, колебания, разрыв струек, а при ещё большем увеличении скорости - завихрения струек и перемешивание потока, т. е. устанавливается турбулентный режим.

Скорость, соответствующая переходу одного режима в другой называется **критической**, обозначается $v_{\text{кр}}$. Как правило, учитывают два значения критической скорости: **верхнюю** $v_{\text{кр}}$ (переход от ламинарного режима к турбулентному) и **нижнюю** $v_{\text{кр}}$ (переход от турбулентного режима к ламинарному). Область движения, соответствующая переходу от одного режима к другому, считается **неустойчивым** движением или **переходной областью**.

Согласно теории Рейнольдса, критическая скорость ($v_{кр.}$) зависит от диаметра трубы (d) кинематического коэффициента вязкости жидкости (ν) и параметра $Re_{кр.}$, называемого критическим числом Рейнольдса, или *критерием Рейнольдса*:

$$v_{кр.} = Re_{кр.} \frac{\nu}{d}. \quad (4.19)$$

Критерий Рейнольдса (Re) – величина безразмерная.

Экспериментальные исследования показали, что для труб круглого сечения $Re_{кр.}$ может меняться от 1000 до 2300. Общепринятым для практических расчётов считается $Re_{кр.} = 2300$.

Если скорость движения жидкости будет меньше критической ($v < v_{кр.}$), то режим движения будет ламинарным и $Re < Re_{кр.}$, и, наоборот, при $v > v_{кр.}$ число Рейнольдса должно быть больше критического - $Re > Re_{кр.}$.

Таким образом, критерий Рейнольдса является гидродинамической характеристикой потока, по которому устанавливается режим движения.

В соответствии с формулой (4.19), расчётная формула Re для круглой трубы:

$$Re = \frac{v d}{\nu}, \quad (4.20)$$

для потоков другого профиля $Re = \frac{v l}{\nu}, \quad (4.21)$

где l – характерный геометрический размер, который может быть выражен через гидравлический радиус (R) (см. формулу 4.1), например, для круглой трубы $l = 4R$ (см. формулу 4.2).

Следует запомнить правило:

Если для потока жидкости $Re \leq Re_{кр.} = 2300$ – режим движения жидкости ламинарный.

Если для потока жидкости $Re > Re_{кр.} = 2300$ – режим движения жидкости турбулентный.

Ламинарный режим движения характерен для вязких жидкостей таких, как масла, нефть, а также при движении воды в трубках малого диаметра (капиллярах) и через поры грунта.

В турбулентном режиме движется вода в водопроводных трубах, желобах, каналах, реках.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

5.1. Потери напора в гидравлических сопротивлениях

Дополнительный член уравнения Бернулли h_w (см. формулу (4.15)) соответствует потерям напора в гидравлических сопротивлениях, которые складываются из суммарных потерь напора в местных сопротивлениях (Σh_r) и потерь напора по длине (h_l):

$$h_w = \Sigma h_r + h_l. \quad (5.1)$$

В гидродинамике принято считать, что потери напора в любом гидравлическом сопротивлении пропорциональны скоростному напору $\frac{v^2}{2g}$.

Местными сопротивлениями называются различного рода устройства, при прохождении через которые происходит деформация потока, изменение направления движения жидкости или величины скорости, или того и другого.

К местным сопротивлениям относятся краны, задвижки, отводы (колена), внезапное сужение, внезапное расширение, вход в трубу и прочие.

Знак суммы (Σ) в местных сопротивлениях показывает, что на одном трубопроводе может быть установлено несколько местных сопротивлений, потери напора в которых суммируются.

Теоретически потери напора в местном сопротивлении рассчитываются по формуле

$$h_r = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.2)$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления, значения которого, как правило, устанавливаются экспериментально, для некоторых видов местных сопротивлений коэффициент ζ рассчитан теоретически. На величину коэффициента ζ влияют геометрические размеры, конфигурация местного сопротивления и режим течения жидкости.

Значения коэффициентов местных сопротивлений ζ приводятся в справочниках и таблицах, в данном учебном пособии в табл. 4 (см. приложение).

Потери напора по длине — это потери напора, возникающие при движении жидкости вдоль стенок трубопровода, зависящие от диаметра (d), длины трубы (l), скоростного напора и состояния внутренней поверхности

трубы. Потери напора по длине называются также *линейными потерями* и рассчитываются по формуле

$$h_l = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (5.3)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления, или *коэффициент Дарси*

Значение коэффициента λ или выбор расчётной зависимости этого коэффициента *зависит от режима движения жидкости и шероховатости трубы* (или другого русла).

В гидродинамике введено *понятие единичных, или удельных, потерь напора по длине, называемых гидравлическим уклоном*. Гидравлический уклон $I = h_l/l$ и рассчитывается по формуле

$$I = \lambda \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (5.4)$$

Расчётные зависимости гидравлического уклона (I) для различных режимов движения выводятся теоретически или эмпирически, затем можно перейти к потерям напора по длине (h_l). Многими учёными проведены исследования движения жидкости при турбулентном режиме, как наиболее сложном, и даны эмпирические зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления (λ), который входит в расчётные формулы (5.3) и (5.4).

Иногда при расчётах потери напора в местных сопротивлениях заменяют потерями напора в прямолинейном участке трубы *эквивалентной длины*.

Эквивалентная длина (l_3) – это такая длина прямолинейного участка трубы, потери напора в котором равны (эквивалентны) потерям напора в местном сопротивлении при том же расходе жидкости:

$$\lambda \frac{l_3 v^2}{d 2g} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.5)$$

значит,

$$l_3 = \frac{\zeta d}{\lambda}. \quad (5.6)$$

Рассмотрим, от каких факторов и параметров зависят потери напора по длине при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.

5.2. Потери напора по длине при ламинарном режиме движения жидкости

Исследования Рейнольдса и других учёных показали, что при ламинарном режиме потери напора пропорциональны скорости в первой степени и зависят только от числа Рейнольдса (Re).

Аналитически выведена формула для гидравлического уклона (вывод этой зависимости приведён во всех учебниках и учебных пособиях) при ламинарном режиме:

$$I = \frac{64}{Re} \frac{l v^2}{d 2g}. \quad (5.7)$$

Сравнив формулу (5.7) с формулой (5.4), заключаем, что при ламинарном режиме коэффициент гидравлического сопротивления (λ):

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \text{ т.е. } \lambda = f(Re). \quad (5.8)$$

Потери напора по длине при ламинарном режиме соответственно рассчитываются по формуле

$$h_l = \frac{64}{Re} \frac{l v^2}{d 2g}. \quad (5.9)$$

Формула (5.9) носит имя автора доктора медицины *Пуазейля*, который исследовал движение жидкости, в частности крови, в капиллярных трубках, вывел эту формулу эмпирически, в гидродинамике формула доказана аналитически.

5.3. Потери напора по длине при турбулентном режиме

Турбулентное течение жидкости является наиболее распространённым в технике, но представляет в то же время одно из сложных гидравлических процессов. Многочисленные исследования учёных показали, что создать строгую теорию турбулентного режима не представляется возможным, поэтому для теоретических и инженерных расчётов пользуются экспериментальными данными, графическими зависимостями и эмпирическими формулами.

Как отмечено выше, при числах Рейнольдса $Re < Re_{кр}$ имеет место *ламинарный режим* движения. С возрастанием скорости потока и чисел Рейнольдса снижается устойчивость ламинарного режима, начинаются

колебательные движения струек, появляются пульсации скорости, т. е. кроме продольных составляющих скорости возникают поперечные составляющие, при дальнейшем увеличении скорости образуются завихрения, неупорядоченное движение, перемешивание потока, т. е. режим движения становится турбулентным.

Разрушение ламинарного течения начинается с оси потока, постепенно образуется турбулентное ядро потока, а у стенки трубы остаётся *пограничный (пристеночный) слой*, который состоит из *ламинарного (вязкого) подслоя и переходного слоя*.

Ламинарный подслой расположен непосредственно у стенки трубы, скорость в нём меняется от 0 у стенки (частицы жидкости просто прилипают к стенке и не двигаются) до некоторой величины. Изменение скорости в пределах вязкого слоя близко к линейному закону.

Толщина ламинарного подслоя (δ) имеет малую величину (от долей миллиметра до 1-2 мм) и рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (5.10)$$

Из формулы (5.10) следует, что с увеличением числа Рейнольдса (Re) толщина вязкого подслоя уменьшается.

5.3.1. Понятие о гидравлически гладких и шероховатых трубах

Рассмотрим, как влияет *шероховатость* труб на потери напора по длине при турбулентном режиме.

На внутренней поверхности трубы имеются неровности, выступы, которые называются *шероховатостью*.

Различают:

а) *абсолютную шероховатость*, которая соответствует высоте выступов, неровностей, обозначается Δ , измеряется в мм;

б) *относительную шероховатость*: $\frac{\Delta}{d}$ или $\frac{\Delta}{r}$;

в) *относительную гладкость* – величина, обратная относительной шероховатости: $\frac{d}{\Delta}$ или $\frac{r}{\Delta}$.

Форма и высота выступов и неровностей вдоль стенки трубы неодинаковы, поэтому измерить и учесть абсолютную шероховатость практически невозможно. С целью упрощения гидравлических расчётов введено понятие *эквивалентной шероховатости* (Δ_s), при которой потери напора в трубе равны (эквивалентны) потерям напора с фактической неоднородной шероховатостью.

В данном учебном пособии, как и во многих учебниках, в расчётных формулах эквивалентная шероховатость Δ_2 упрощённо может записываться, как абсолютная шероховатость Δ .

Значение эквивалентной шероховатости Δ_2 для некоторых видов труб приведено в табл. 6 (см. приложение).

Согласно данным большинства учёных и авторов учебников, при турбулентном режиме можно выделить *три зоны (области) сопротивления*.

1. *Движение вдоль гладких стенок*. Это случай, когда толщина вязкого слоя больше абсолютной шероховатости ($\delta > \Delta_2$). Турбулентное ядро скользит по ламинарному подслою. Выступы, неровности перекрыты вязким слоем, шероховатость не влияет на потери напора. Такие трубы называются *“гидравлически гладкими”*. Потери напора по длине пропорциональны скорости $v^{1,75}$. Коэффициент гидравлического сопротивления (λ) не зависит от шероховатости и является функцией только числа Рейнольдса (Re).

Для этой зоны сопротивления пользуются *эмпирической формулой Блазиуса*:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (5.11)$$

т. е. $\lambda = f(Re)$

2. *Зона доквадратичного сопротивления*. Это область сопротивления, в которой потери напора зависят как от числа Рейнольдса (Re), так и от шероховатости. Потери напора по длине пропорциональны скорости $v^{1,75-2,0}$, т. е. степенной коэффициент скорости до 2,0, отсюда и название – “зона доквадратичного сопротивления”.

В этой области происходит переход от *гидравлически гладкого* к вполне *шероховатому трению*.

А. Д. Альтшуль обобщил экспериментальные данные, графические зависимости и теоретические положения ряда учёных и для зоны доквадратичного сопротивления предложил эмпирическую формулу

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_2}{d} \right)^{0,25}, \quad (5.12)$$

т. е. $\lambda = f\left(Re; \frac{\Delta_2}{d}\right)$.

3. *Зона квадратичного сопротивления*. Это движение, при котором толщина вязкого слоя меньше абсолютной шероховатости ($\delta < \Delta_2$). Вязкий слой при больших числах Рейнольдса (Re) практически разрушен, турбулентное ядро касается неровностей, возникают дополнительные завихрения и связанные с ними потери напора. Потери напора по длине

пропорциональны скорости v^2 , отсюда и название – “зона квадратичного сопротивления”.

Коэффициент гидравлического сопротивления (λ) является функцией шероховатости. Другое название этой области сопротивления – “*движение вдоль шероховатых стенок*”, а трубы называются “*гидравлически шероховатыми*”.

Для этой области в соответствии с гидравлическими особенностями явлений турбулизации применимы эмпирические формулы многих учёных. Для практических расчётов рекомендуется пользоваться формулами:

$$\text{формула Никурадзе: } \lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \lg \frac{r}{\Delta}\right)^2}, \quad (5.13)$$

$$\text{т. е. } \lambda = f\left(\frac{r}{\Delta}\right);$$

$$\text{формула Шифринсона: } \lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_2}{d}\right)^{0,25}, \quad (5.14)$$

$$\text{т. е. } \lambda = f\left(\frac{\Delta_2}{d}\right).$$

Для турбулентного режима формула А. Д. Альтшуля (5.12) признана наиболее обобщённой и удобной для практических расчётов, так как вычисления по ней сводятся к элементарным алгебраическим действиям и дают надёжные результаты.

Согласно теории Альтшуля, при $2300 < Re < 20 \frac{d}{\Delta_2}$ второе слагаемое в формуле (5.12) значительно меньше первого, на потери напора влияет только число Рейнольдса (Re), и формула практически совпадает с формулой Блазиуса (5.11):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re}\right)^{0,25} = \frac{0,316}{Re^{0,25}}; \quad \lambda = f(Re). \quad (5.15)$$

Как правило, эта зона сопротивления соответствует числам Рейнольдса до $Re = 2 \cdot 10^4$.

При числах Рейнольдса $20 \frac{d}{\Delta_2} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_2}$ на потери напора оказывают влияние как число Re , так и относительная шероховатость $\frac{\Delta_2}{d}$, имеет место зона докватричного сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ следует рассчитывать по формуле (5.12)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$$

Границы изменения чисел Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$.

При числах Рейнольдса $Re > 500 \frac{d}{\Delta_3}$ имеет место зона квадратичного сопротивления, или движение вдоль шероховатых стенок. В формуле (5.12) первое слагаемое значительно меньше второго, им можно пренебречь. Потери напора по длине зависят только от относительной шероховатости $\frac{\Delta_3}{d}$, и формула (5.12) переходит в формулу Шифринсона (5.14):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$$

Согласно графической зависимости А. Д. Альтшуля, для этой области сопротивления значения чисел Рейнольдса находятся в пределах $Re = 5 \cdot 10^4 - 10^6$.

Из выше изложенного следует, что понятие “гидравлически гладкие” и “гидравлически шероховатые” трубы относительное. Так, одна и та же труба с определённой шероховатостью может считаться гидравлически гладкой или шероховатой в зависимости от скорости движения (или числа Re), тогда для коэффициента гидравлического сопротивления λ выбирается соответствующая расчётная формула.

В представленной методике выбора расчётной зависимости коэффициента λ следует учитывать, что в трубах с большой шероховатостью при движении воды даже при малых числах Рейнольдса ($Re < 2300$) ламинарный режим движения невозможен.

5.3.2. Потери напора по длине в трубах с описательной шероховатостью

В гидравлических расчётах трубопроводов и других русел часто приходится встречаться с такой внутренней поверхностью трубы (бетонные, асбестовые, загрязнённые, водосточные трубы и им подобные) или иного русла (канала, лотка, жёлоба), для которых невозможно определить абсолютную шероховатость. В этом случае предложено коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывать по формуле

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}, \quad (5.16)$$

где C – коэффициент Шези.

Коэффициент Шези (C) зависит от многих факторов, в том числе от геометрических размеров и состояния внутренней поверхности трубы или другого русла. В практике расчётов коэффициент C можно принимать по таблицам или рассчитывать по специальным формулам. Наиболее простой формулой для определения коэффициента Шези является *формула Маннинга*:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (5.17)$$

где n или $1/n$ – коэффициенты шероховатости стенок трубы или русла по описанию, приводятся в таблицах. В данном учебном пособии значения коэффициентов n и $1/n$ приведены в табл. 7 (см. приложение);

R – гидравлический радиус, м. Согласно формуле (4.2), для круглой трубы гидравлический радиус $R = d/4$.

5.3.3. Потери напора по длине, выраженные через обобщённые параметры

В практике расчётов гидравлических систем, в частности трубопроводных систем, часто приходится рассчитывать потери напора по длине не через скорость (v), а через расход (Q), который известен или его нужно определить.

Преобразуем формулу (5.3) потерь по длине:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

а) выразим скорость через расход: $v^2 = \frac{Q^2}{\omega^2}$;

б) введём гидравлический радиус: $d = 4R$;

в) коэффициент гидравлического сопротивления (λ) запишем по формуле (5.16): $\lambda = \frac{8g}{C^2}$.

$$\text{Получаем: } h_l = \frac{8g}{C^2} \frac{l}{4R} \frac{Q^2}{\omega^2 2g} = \frac{Q^2}{C^2 \omega^2 R} l. \quad (5.18)$$

В формуле (5.18) обозначим $C^2 \omega^2 R = K^2$,

Схема выбора теоретической формулы для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления λ

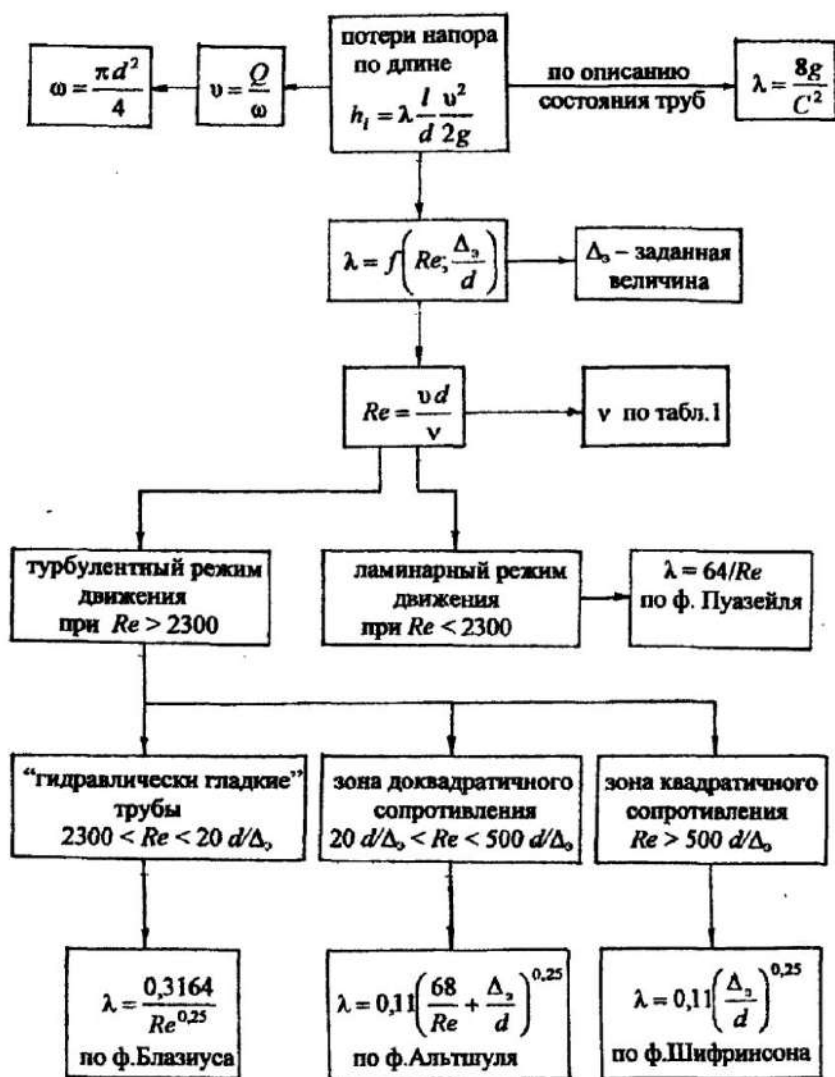


Рис. 5.1

где $K = C\omega\sqrt{R}$ называется модулем расхода, или расходной характеристикой, единица измерения $\text{м}^3/\text{с}$.

Формула (5.18) принимает вид:

$$h_l = \frac{Q^2}{K^2} l. \quad (5.19)$$

Для удобства практических расчётов величина $1/K^2$ обозначается через A :

$$A = \frac{1}{K^2}, \quad (5.20)$$

где A – удельное сопротивление (сопротивление единицы длины), единица измерения $\text{с}^2/\text{м}^6$.

Таким образом, потери напора по длине рассчитываются по формуле

$$h_l = A Q^2 l. \quad (5.21)$$

В приведённых формулах параметры K и A называются *обобщёнными параметрами*, значения которых приводятся в таблицах (см. приложение, табл. 8) для *нормальных водопроводных* труб, другое название – *водопроводные трубы в нормальных условиях*.

В табл. 9 (см. приложение) приведены значения удельного сопротивления A для расчёта трубопроводов при квадратичном законе сопротивления в соответствии с *абсолютной шероховатостью* (Δ) труб.

Обобщив все теоретические положения по расчёту потерь напора по длине (h_l), предлагаем схему для выбора теоретической расчётной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ (рис. 5.1).

ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА

Задача прикладной гидромеханики – применение основных законов гидростатики и гидродинамики для практических и инженерных расчётов.

Глава 6

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

По методике расчёта трубопроводные системы делятся на две группы – простые и сложные.

Простые системы состоят, как правило, из одной трубы, возможно соединение нескольких труб сравнительно небольшой длины (примерно до 100 м), в которых учитываются все виды гидравлических сопротивлений, но, главное, с *постоянным расходом*.

Сложные системы состоят из труб разной длины и разных диаметров, соединённых по определённой гидравлической схеме, причём *расход жидкости* на каждом участке *различный* в соответствии с расходами потребителей. Эти системы, как правило, большой длины. Главными гидравлическими сопротивлениями являются потери по длине. Потери напора в местных сопротивлениях принимаются равными $(5 + 10) \%$ от потерь напора по длине, т. е. $\Sigma h_r = (0,05 + 0,1) h_l$.

6.1. Расчёт простых трубопроводных систем

При расчёте простых трубопроводов в зависимости от поставленной задачи, известных и определяемых параметров выделяют *три типа расчётов*.

1. Определение *напора (H) или давления (p)* при известных: расходе жидкости (Q), геометрических размерах трубопровода (длине l , диаметре d), местных сопротивлениях на трубопроводе.

2. Определение *расхода (Q)*, или пропускной способности трубопровода, при известных: действующем напоре (H) или давлении (p) в системе; геометрических размерах и установленных местных сопротивлениях.

3. Определение *геометрических размеров* трубопроводов (l ; d), *характеристик местных сопротивлений* при известном расходе (Q), действующем напоре (H) или давлении (p). Наиболее трудоёмкой считается

задача по определению диаметра (d) трубопровода, так как такой расчёт проводится методом подбора и пересчёта нескольких вариантов.

Рассмотрим расчёт простого трубопровода. Здесь возможны *два случая: истечение жидкости в атмосферу и истечение под уровень.*

Расчёты простых трубопроводных систем основаны на использовании основного уравнения гидродинамики - уравнения Бернулли.

6.1.1. Расчёт простой трубопроводной системы с истечением жидкости в атмосферу

На рис. 6.1 представлена схема простого водопровода с водонапорной башней, создающей постоянный напор H . Известны длина трубопровода l , диаметр d , местные сопротивления в виде входа в трубу, вентиля и двух колен (отводов).

Давление на поверхности воды в баке атмосферное (p_a), выход воды в конце трубы также в атмосферу (p_a).

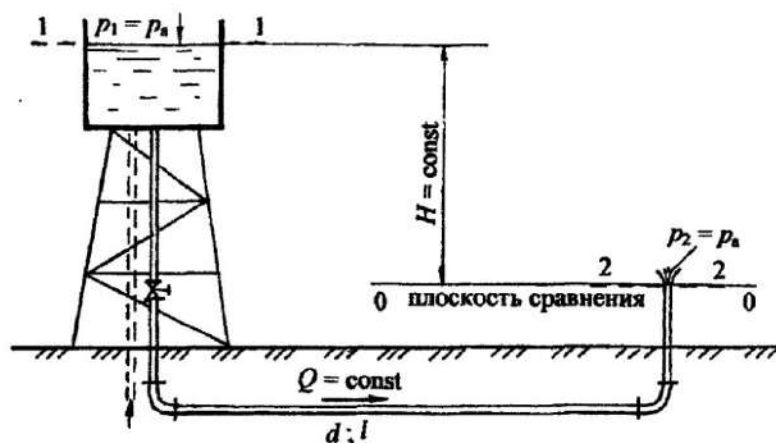


Рис. 6.1

В представленной схеме действующий напор H считается постоянным, уровень жидкости в напорном баке поддерживается на постоянном горизонте за счёт подачи воды (или другой жидкости) в бак, например, из скважины или от насосной установки, так, чтобы автоматически регулировался приток в бак, равным расходу жидкости в системе. Постоянная подача жидкости показана по трубопроводу, обозначенному пунктирной линией.

В дальнейших схемах трубопроводных систем приток жидкости в систему не обозначается, но всегда подразумевается *установившееся движение*, т. е. скорость движения жидкости в трубе не изменяется во времени.

Расчёт простой системы проведём путём применения уравнения Бернулли.

В разделе 4.5.7 представлена методика составления уравнения Бернулли, которая была использована при изучении приборов для измерения скорости и расхода жидкости (см. раздел 4.5.8). При составлении уравнения Бернулли для этих приборов не учитывались потери напора в гидравлических сопротивлениях. В приведённых расчётах трубопроводных систем будут учтены все виды гидравлических сопротивлений.

Итак, при расчёте простой системы с истечением в атмосферу воспользуемся уравнением Бернулли (4.15). Согласно методике составления уравнения, выполним следующие пункты.

1. Выбираем два сечения: *одно сечение проводим по свободной поверхности в напорном баке* (башне), где скорость допустимо считать равной нулю (уровень жидкости постоянный, движения нет), *другое – на выходе жидкости из трубы*, где существует определённая скорость движения.

2. Сечения 1-1 и 2-2 нумеруем по направлению движения жидкости.

3. В выбранных сечениях учитываем *абсолютное давление*, т. е. давление, рассчитанное с учётом атмосферного: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$.

4. *Плоскость сравнения 0 – 0 совместим с сечением 2 – 2*, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$. Если бы плоскость сравнения совместили с сечением 1 – 1, тогда $z_1 = 0$; $z_2 = -H$. Помним, что отсчёты от плоскости сравнения вверх считаются положительными, вниз – отрицательными.

5. Записываем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и расписываем значение всех параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\eta-2}$$

$$\begin{array}{ll} z_1 = H; & z_2 = 0; \\ p_1 = p_a; & p_2 = p_a; \\ v_1 = 0; & v_2 = v; \quad \alpha_2 = 1,0; \end{array}$$

для коэффициента α_2 предполагаем турбулентный режим в круглой трубе.

Получим:
$$H + \frac{p_a}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_w.$$

В этом уравнении у потерь напора в гидравлических сопротивлениях (h_w) индекс 1-2 опускаем, поскольку вся расчётная схема системы входит между выбранными сечениями.

После сокращений получим:

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_w. \quad (6.1)$$

Вывод: при истечении жидкости в атмосферу действующий напор затрачивается на создание скоростного напора и преодоление гидравлических сопротивлений.

Представим в уравнении (6.1) гидравлические сопротивления согласно формуле (5.1)

$$h_w = \Sigma h_r + h_l.$$

С учётом формул (5.2) и (5.3):

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \text{и} \quad h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Получим
$$H = \frac{v^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

или
$$H = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right). \quad (6.2)$$

Таким образом, по формуле (6.2) рассчитывается *действующий напор простой системы при истечении жидкости в атмосферу.*

Из формулы (6.2) можно получить расчётную формулу для расхода.

Скорость движения жидкости в трубе

$$v = \sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.3)$$

Расход $Q = v\omega$;

где ω – площадь живого сечения: $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$;

$$Q = \omega \sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.4)$$

В формуле (6.4) величина $\sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}}$ постоянная для заданной системы, влияет на величину расхода и называется “коэффициент расхода”, обозначается $\mu_{\text{смет.}}$:

$$Q = \mu_{\text{смет.}} \omega \sqrt{2gH}. \quad (6.5)$$

Формула (6.5) является обобщённой формулой для расхода жидкости в простых системах, а значение коэффициента μ рассчитывается для каждой системы.

6.1.2. Расчёт простой трубопроводной системы при истечении жидкости под уровень

Истечением под уровень считается случай, когда жидкость поступает в резервуар, заполненный жидкостью, т. е. под уровень жидкости. Схема трубопровода с истечением под уровень может быть получена из предыдущей схемы (см. рис. 6.1), но выход жидкости покажем в другой открытый резервуар (рис. 6.2).

Для расчёта простой системы с истечением под уровень воспользуемся также уравнением Бернулли (4.15):

1. Выберем *два сечения* по свободным поверхностям жидкости в резервуарах, где скорости жидкости равны нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 *прономеруем по направлению движения жидкости*.

3. Учтём *абсолютные давления* в выбранных сечениях: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$.

4. *Плоскость сравнения 0-0* совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. *Запишем уравнение Бернулли* в общем виде и покажем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{м-2}};$$

$$\begin{array}{ll} z_1 = H; & z_2 = 0; \\ p_1 = p_a; & p_2 = p_a; \\ v_1 = 0; & v_2 = 0. \end{array}$$

После подстановки параметров и сокращений получим:

$$H = h_w. \quad (6.6)$$

Вывод: в простой трубопроводной системе при истечении жидкости под уровень действующий напор затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений.

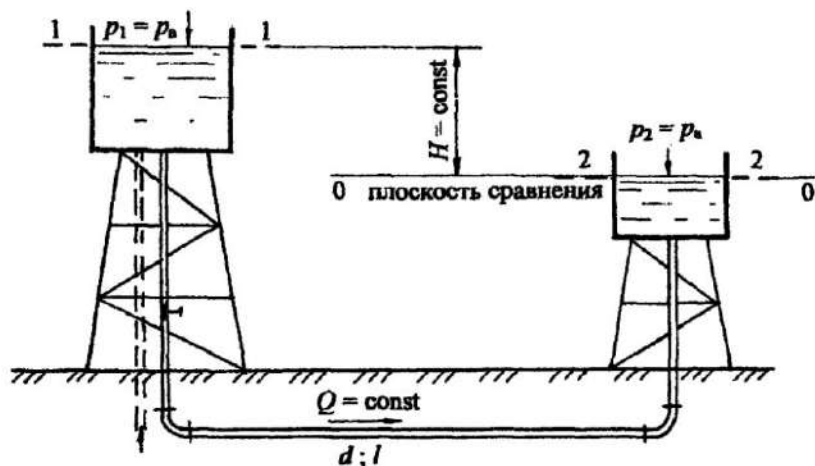


Рис. 6.2

С учётом формул (5.1); (5.2) и (5.3) формула (6.6) принимает вид:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right). \quad (6.7)$$

Гидравлический расчёт двух рассмотренных систем аналогичен, а формулы (6.2) и (6.7) тождественны. Различие в формулах состоит в том, что при истечении в атмосферу единица в скобках учитывает единичную кинетическую энергию на выходе (или скоростной напор $v^2/2g$).

При истечении под уровень единица в скобках входит в сумму коэффициентов местных сопротивлений, а именно $\zeta_{\text{всех}} = 1,0$.

По аналогии с предыдущим выводом получим формулу для расхода:

$$Q = \omega \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.8)$$

Обозначим:

$$\sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} = \mu_{\text{сист. под ур.}},$$

тогда
$$Q = \mu_{\text{сист. под ур.}} \omega \sqrt{2gH}. \quad (6.9)$$

Формула (6.9) подтверждает обобщённость применения формулы (6.5).

На рис. 6.1 и 6.2 представлены схемы простых систем в самом общем виде. В технике имеют место различные схемы трубопроводных систем в виде водопроводов, нефтепроводов, газопроводов и им подобные. Движение жидкости происходит не только за счёт напорного бака (башни), разности напоров в резервуарах, но и за счёт давления, создаваемого насосом.

6.1.3. Методика расчёта простых трубопроводных систем

Расчёт простых систем *первого типа* по определению *напора (H)* или *давления (p)* включает следующие этапы.

1. Составляется уравнение Бернулли для характерных сечений.
2. Производится подстановка всех параметров *в буквенном выражении для определения неизвестного напора или давления.*
3. Определяется *скорость движения* жидкости в трубе при известном расходе.
4. Рассчитываются потери напора *в местных сопротивлениях* (Σh_r).
5. Определяются потери напора *по длине* (h_l) по схеме, представленной на рис. 5.1.
6. Производится *численный расчёт* напора или давления.

Простые системы *второго типа* по определению *расхода (Q)* рассчитываются в следующей последовательности:

1. Составляется уравнение Бернулли для выбранных сечений.
2. Производится подстановка входящих параметров и уравнение решается *в буквенном выражении относительно скорости движения жидкости.*

3. В расчётную формулу скорости входит коэффициент гидравлического сопротивления (λ), формула для которого выбирается в соответствии со значением числа Рейнольдса (Re). Но в формулу (4.20) для (Re) также входит неизвестная скорость, поэтому при заданной шероховатости трубы (Δ_s) при движении воды предполагается турбулентный режим, зона квадратичного сопротивления, для которой λ не зависит от числа Рейнольдса Re . Коэффициент λ рассчитывается по формуле Шифринсона (5.14), а затем определяется скорость движения жидкости.

4. Проверяется режим движения жидкости и зона сопротивления (см. схему на рис. 5.1). Если подтверждается квадратичная зона сопротивления, рассчитывается расход жидкости (Q).

Если режим движения и зона сопротивления не подтвердится, проводится повторный расчёт коэффициента λ в соответствии с числом Re по схеме (рис. 5.1).

5. После окончательного уточнения режима движения и области сопротивления определяется коэффициент λ и рассчитывается расход Q .

Как правило, при движении воды в шероховатых трубах имеет место турбулентный режим, зона квадратичного сопротивления.

Расчёт простых систем *третьего типа* по определению длины или значений *коэффициентов местных сопротивлений* различных устройств (кранов, задвижек, диафрагм и им подобных) не представляет трудности.

Составляется уравнение Бернулли для характерных сечений, затем оно преобразуется в буквенное выражение для расчёта предельной длины трубопровода или для определения коэффициента местного сопротивления какого-либо устройства. В буквенное выражение подставляется значение заданных или рассчитанных параметров.

Трудной представляется задача по *определению диаметра трубопровода (d)* при заданных расходе, напоре и длине (Q ; H и l).

Наиболее просто такую задачу решить графически. Расчёт проводим путём нескольких приближённых решений.

Как и ранее, предполагаем квадратичную область сопротивления, рассчитывая коэффициент λ по формуле (5.14) при заданной шероховатости Δ_s , задаём ряд значений диаметра (d_1 ; d_2 ; d_n).

Пользуясь формулой для расхода в буквенном выражении, например формулой (6.4):

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH},$$

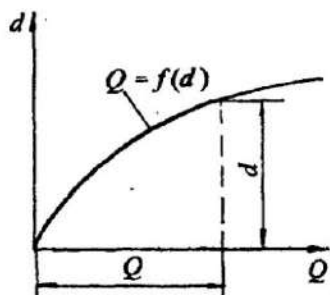


Рис. 6.3

Для ориентировочного определения наиболее выгодного диаметра трубопровода (d) при заданном расходе (Q) можно пользоваться также формулой В. Г. Лобачёва:

$$d = (0,8 - 1,2) Q^{0,42}.$$

На практике для расчёта диаметра трубопровода пользуются **оптимальными** значениями скоростей: при движении в водопроводных системах скорость $v = (0,8 - 1,2)$ м/с, реже до 1,5 м/с; для шахтных водоотливных трубопроводов $v = (2,0 - 2,5)$ м/с.

Следует отметить, что для технико-экономических расчётов по определению оптимальных значений диаметров трубопроводов следует пользоваться специальной литературой и таблицами.

Ниже представлены примеры расчётов различного вида простых систем. Расчёты включают определение основных параметров движения, построения пьезометрической линии и графическое определение потерь напора в системе.

просчитываем несколько вариантов значений расхода ($Q_1; Q_2; \dots Q_n$) для принятых диаметров и строим графическую зависимость $Q = f(d)$. Эта зависимость квадратичная и в общем виде представлена на рис. 6.3.

По графику для заданного значения расхода Q определяется диаметр трубопровода d .

6.2. Примеры решения задач по теме: “Расчёт простых трубопроводных систем”

Задача 6.2.1 С помощью насоса по трубе диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 70$ м нефть подаётся в закрытый резервуар на высоту $H = 15$ м. Считать $H = \text{const}$.

Определить показание мановакуумметра ($p_{\text{ман}}$), установленного на поверхности нефти в закрытом резервуаре, если показание манометра после насоса $p_{\text{ман}} = 1,3$ ат. Расход нефти $Q = 1,2$ л/с, плотность нефти $\rho_n = 900$ кг/м³, относительная вязкость по Энглеру $\eta = 4,0$. В системе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$ и два колена с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{кол}} = 0,8$ (рис. 6.4).

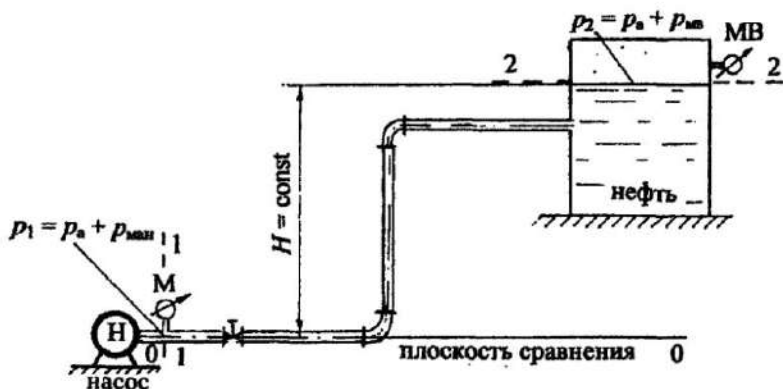


Рис. 6.4

Решение. Представленная трубопроводная система относится к *первому типу* простых систем.

Следует вспомнить из главы 1 (задача 1.5.3), что *мановакуумметр* – это прибор, который может измерять, как манометрическое (избыточное) давление, так и вакуум. При решении задачи давление на поверхности нефти будем обозначать $p_{\text{ман}}$. Если при решении задачи значение давления получится положительным, значит, мановакуумметр работает, как манометр; отрицательное значение давления означает, что мановакуумметр работает, как вакуумметр.

Для определения показания мановакуумметра воспользуемся уравнением Бернулли. Согласно методике составления уравнения (см. раздел 4.5.7):

1. Выбираем *два сечения*: *одно* - в месте установки манометра, это сечение проводим нормально к направлению движения жидкости, где скорость равна скорости движения нефти в трубе - v ; *другое* - по свободной поверхности в резервуаре, где давление определяется по мановакуумметру, а скорость равна нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 нумеруем по направлению движения жидкости, чтобы в уравнении потери напора в гидравлических сопротивлениях учитывались со знаком "+".

3. В выбранных сечениях принимаем абсолютное давление, т. е. с учётом атмосферного: $p_1 = p_a + p_{ман}$; $p_2 = p_a + p_{мв}$.

4. Плоскость сравнения 0-0 проводим через ось первого сечения: $z_1 = 0$; $z_2 = H$.

5. Записываем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и производим подстановку всех параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_2 &= H, \\ p_1 &= p_a + p_{ман}; & p_2 &= p_a + p_{мв}; \\ v_{1\text{ сеч.}} &= v; \alpha_1 = 2,0; & v_{2\text{ сеч.}} &= 0. \end{aligned}$$

Движущаяся жидкость - нефть относится к вязким жидкостям, поэтому предполагаем ламинарный режим (коэффициент $\alpha_1 = 2,0$). В процессе решения задачи режим движения нефти будет проверен.

Подставляем все параметры в уравнение Бернулли:

$$\frac{p_a}{\rho_n g} + \frac{p_{ман}}{\rho_n g} + \frac{2v^2}{2g} = H + \frac{p_a}{\rho_n g} + \frac{p_{мв}}{\rho_n g} + h_w.$$

После сокращений и преобразования уравнения Бернулли получим:

$$\frac{p_{мв}}{\rho_n g} = \frac{p_{ман}}{\rho_n g} + \frac{2v^2}{2g} - H - h_w. \quad (6.10)$$

Рассчитаем все слагаемые в уравнении (6.10):

$$\frac{p_{ман}}{\rho_n g} = \frac{1,3 \cdot 98 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} = 14,44 \text{ м.}$$

Скорость движения нефти в трубе (v) рассчитываем через расход (Q):

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2};$$

расход Q и диаметр d переводим: $Q = 1,2 \text{ л/с} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $d = 0,05 \text{ м}$;

$$v = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,05^2} = 0,61 \text{ м/с};$$

скоростной напор $\frac{v^2}{2g} = \frac{0,61^2}{2 \cdot 9,8} = 0,019 \text{ м}$ (достаточно малая величина).

Рассчитаем потери напора в гидравлических сопротивлениях по формуле (5.1)

$$h_w = \Sigma h_r + h_l;$$

потери напора в местных сопротивлениях по формуле (5.2)

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g},$$

где $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений. Учитываем потери напора в двух коленах и в пробковом кране:

$$\Sigma \zeta = 2 \zeta_{\text{кол.}} + \zeta_{\text{кр.}} + \zeta_{\text{вык.}};$$

по табл. 4 (см. приложение): $\zeta_{\text{кр.}} = 17,3$ при угле закрытия $\alpha = 40^\circ$, $\zeta_{\text{вык.}} = 1,0$, тогда:

$$\Sigma \zeta = 2 \cdot 0,8 + 17,3 + 1,0 = 19,9;$$

получим

$$\Sigma h_r = 19,9 \cdot 0,019 = 0,38 \text{ м.}$$

Потери напора по длине определяем согласно формуле (5.3):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Для выбора расчётной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ (см. схему, рис. 5.1) определим режим движения жидкости по критерию Рейнольдса (см. формулу 4.20):

$$Re = \frac{v d}{\nu}$$

В формулу (4.20) входит коэффициент кинематической вязкости ν . Для расчёта этого коэффициента воспользуемся значением относительной вязкости в градусах Энглера ($^{\circ}E$) (см. физические свойства жидкости). По формуле Уббеллоде:

$$\nu = \left(0,0731^{\circ}E - \frac{0,0631}{^{\circ}E} \right) \cdot 10^{-4};$$

$$\nu = \left(0,0731 \cdot 4,0 - \frac{0,0631}{4,0} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad \nu = 0,277 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Получим:
$$Re = \frac{0,61 \cdot 0,05}{0,277 \cdot 10^{-4}} = 1101 < Re_{кр} = 2300.$$

Так как число Re меньше критического значения, заключаем, что имеет место *ламинарный режим движения нефти*. Принятое значение коэффициента $\alpha_1 = 2,0$ верно.

Для ламинарного режима коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывается по формуле (5.8)

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Рассчитаем потери напора по длине:

$$h_l = \frac{64 l v^2}{Re d 2g}; \quad h_l = \frac{64}{1101} \cdot \frac{70}{0,05} \cdot 0,019 = 1,54 \text{ м}.$$

Потери напора в гидравлических сопротивлениях:

$$h_w = 0,38 + 1,54 = 1,92 \text{ м}.$$

Подставим значение всех слагаемых в преобразованное уравнение Бернулли (6.10):

$$\frac{p_{\text{мв}}}{\rho_{\text{H}} g} = 14,44 + 0,019 \cdot 2 - 15,0 - 1,92 = -2,44 \text{ м.}$$

Получили отрицательное значение, значит, мановакуумметр работает как вакуумметр. Величина вакуума

$$p_{\text{мв}} = p_{\text{вак.}} = 2,44 \cdot \rho_{\text{H}} g = 2,44 \cdot 900 \cdot 9,8 = 21521 \text{ Па или } p_{\text{вак.}} = 0,22 \text{ ат.}$$

Ответ. Показание мановакуумметра соответствует вакуумметрическому давлению: $p_{\text{мв}} = p_{\text{вак.}} = 0,22 \text{ ат.}$

Задача 6.2.2. Вода из закрытого резервуара *A* поступает в открытый резервуар *B* при пропускной способности системы $Q = 15 \text{ л/с}$ по трубам: $d_1 = 75 \text{ мм}$; $l_1 = 8 \text{ м}$ и $l_2 = 12 \text{ м}$; $d_2 = 100 \text{ мм}$ и $l_3 = 15 \text{ м}$. Напоры воды в резервуарах постоянны относительно оси трубы: $H_1 = 1,5 \text{ м}$; $H_2 = 3,5 \text{ м}$ (рис. 6.5).

Определить показание манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в закрытом резервуаре, а также соответствующий манометрический напор ($H_{\text{ман}}$).

Принять абсолютную шероховатость труб: $\Delta_1 = 0,5 \text{ мм}$; $\Delta_2 = 0,2 \text{ мм}$. Учесть местные сопротивления в системе: на входе в первую трубу; в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$; при внезапном расширении и на выходе из второй трубы.

Движение воды в системе считать установившемся, т.е. $Q = \text{const}$. Построить линию полного напора (напорную линию), пьезометрическую линию, показать эпюру потерь напора.

Решение. Представленная схема (см. рис. 6.5) относится к простым трубопроводным системам *первого типа с истечением под уровень*.

Для определения избыточного (манометрического) давления ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в резервуаре *A* воспользуемся уравнением Бернулли (см. методику в разделе 4.5.7):

1. Выберем **два сечения** по свободным поверхностям в резервуарах, где скорость допустимо считать равной нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 пронумеруем по направлению движения воды.

3. В выбранных сечениях учтём абсолютное давление: $p_1 = p_{\text{a}} + p_{\text{ман}}$;
 $p_2 = p_{\text{a}}$.

4. Плоскость сравнения совместим с осью трубы, тогда $z_1 = H_1$; $z_2 = H_2$.

5. Запишем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и решим его:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= H_1; & z_2 &= H_2; \\ p_1 &= p_a + p_{\max}; & p_2 &= p_a; \\ v_{1 \text{ сеч.}} &= 0; & v_{2 \text{ сеч.}} &= 0; \end{aligned}$$

после подстановки параметров и сокращений получим:

$$H_1 + \frac{p_{\max}}{\rho g} = H_2 + h_w, \text{ откуда } \frac{p_{\max}}{\rho g} = H_2 - H_1 + h_w. \quad (6.11)$$

В формуле (6.11) следует определить величину потерь напора в гидравлических сопротивлениях (h_w). Ввиду того, что по условию задачи необходимо *представить графически* распределение напора по длине системы, запишем потери напора по порядку по направлению движения воды:

$$h_w = h_{\text{вх}} + h_{l_1} + h_{\text{кр.}} + h_{l_2} + h_{\text{в.р.}} + h_{l_3} + h_{\text{вых.}} \quad (6.12)$$

Все потери напора в гидравлических сопротивлениях пропорциональны скоростному напору, поэтому потери напора в трубе диаметром d_1 определим с учётом скоростного напора $\frac{v_1^2}{2g}$, а в трубе диаметром d_2 - $\frac{v_2^2}{2g}$.

Скорости v_1 и v_2 рассчитаем через расход Q по формулам:

$$v_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} \text{ и } v_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2};$$

при подстановке данных учитываем: $Q = 15 \text{ л/с} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
 $d_1 = 75 \text{ мм} = 0,075 \text{ м}$; $d_2 = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$.

После вычислений получим скорости: $v_1 = 3,4 \text{ м/с}$; $v_2 = 1,9 \text{ м/с}$;

соответственно скоростные напоры: $\frac{v_1^2}{2g} = 0,6 \text{ м}$; $\frac{v_2^2}{2g} = 0,2 \text{ м}$.

Рассчитаем потери напора *в местных сопротивлениях*.

Потери напора *на входе в трубу* диаметром d_1 :

$$h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{v_1^2}{2g}, \text{ принимая } \zeta_{\text{вх}} = 0,5 \text{ по табл. 4 (см. приложение),}$$

получим $h_{\text{вх}} = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ м}$.

Потери напора в пробковом кране:

$$h_{\text{кр.}} = \zeta_{\text{кр.}} \frac{v_1^2}{2g}, \text{ принимая } \zeta_{\text{кр.}} = 5,47 \text{ при } \alpha = 30^\circ \text{ по табл. 4 (см. приложение),}$$

получим $h_{\text{кр.}} = 5,37 \cdot 0,6 = 3,3 \text{ м.}$

Потери напора при внезапном расширении:

$$h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.}} \frac{v_2^2}{2g}, \text{ где } \zeta_{\text{в.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 = 0,6 \text{ согласно табл. 4 (см. приложение),}$$

тогда $h_{\text{в.р.}} = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12 \text{ м.}$

Потери напора на выходе из трубы в резервуар В:

$$h_{\text{вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{v_2^2}{2g}, \text{ принимая } \zeta_{\text{вых}} = 1,0 \text{ по табл. 4 (см. приложение),}$$

получим $h_{\text{вых}} = 0,2 \text{ м.}$

Переходим к определению *потерь напора по длине* по формуле (5.3):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Для труб с диаметрами d_1 и d_2 следует рассчитать коэффициенты гидравлического сопротивления λ_1 и λ_2 .

Выбор расчётной зависимости коэффициента λ зависит от режима движения жидкости и шероховатости труб (см. схему на рис. 5.1).

Рассчитаем числа Рейнольдса для каждой трубы по формуле (4.20):

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu}; \quad Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu},$$

значение коэффициента кинематической вязкости воды (ν) принимаем по табл.1 (см. приложение), для воды $\nu = 1,008 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с.}$

Получим $Re_1 = 255000$; $Re_2 = 190000$, следовательно, режим движения воды турбулентный, так как Re_1 и Re_2 больше $Re_{\text{кр.}} = 2300$.

Рассчитаем граничные значения для чисел Re , чтобы установить область сопротивления для обеих труб при турбулентном режиме:

$$20 \frac{d_1}{\Delta_1} = 20 \frac{75}{0,5} = 3000; \quad 20 \frac{d_2}{\Delta_2} = 20 \frac{100}{0,2} = 10000;$$

$$500 \frac{d_1}{\Delta_1} = 500 \frac{75}{0,5} = 75000; \quad 500 \frac{d_2}{\Delta_2} = 500 \frac{100}{0,2} = 250000.$$

Для *первой трубы* $Re_1 = 255000 > 500 \frac{d_1}{\Delta_1}$, значит имеет место зона *квадратичного сопротивления*, коэффициент λ рассчитывается по формуле Шифринсона (5.14):

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{\Delta_1}{d_1} \right)^{0,25}; \quad \lambda_1 = 0,11 \left(\frac{0,5}{75} \right)^{0,25} = 0,032.$$

Потери напора по длине на первом и втором участках согласно формуле (5.3):

$$h_{l_1} = 0,032 \frac{8,0}{0,075} 0,6 = 2,0 \text{ м}; \quad h_{l_2} = 0,032 \frac{12,0}{0,075} 0,6 = 3,0 \text{ м}.$$

Для *второй трубы* $20 \frac{d_2}{\Delta_2} < Re = 190000 < 500 \frac{d_2}{\Delta_2}$, имеет место зона *доквадратичного сопротивления*, коэффициент λ рассчитываем по формуле Альтшуля (5.12) (см. схему рис. 5.1):

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{68}{Re_2} + \frac{\Delta_2}{d_2} \right)^{0,25}; \quad \lambda_2 = 0,024.$$

Потери напора по длине на третьем участке:

$$h_{l_3} = \lambda_2 \frac{l_3}{d_2} \frac{v_2^2}{2g}; \quad h_{l_3} = 0,024 \frac{15,0}{0,1} 0,2 = 0,7 \text{ м}.$$

Подставим значение всех потерь напора в формулу (6.12):

$$h_w = 0,3 + 2,0 + 3,3 + 3,0 + 0,12 + 0,7 + 0,2 = 9,62 \text{ м}.$$

После подстановки слагаемых в формулу (6.11) получим:

$$\frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} = 3,5 - 1,5 + 9,62 = 11,62 \text{ м},$$

значит соответствующий манометрический напор $H_{\text{ман}} = 11,62 \text{ м}$.

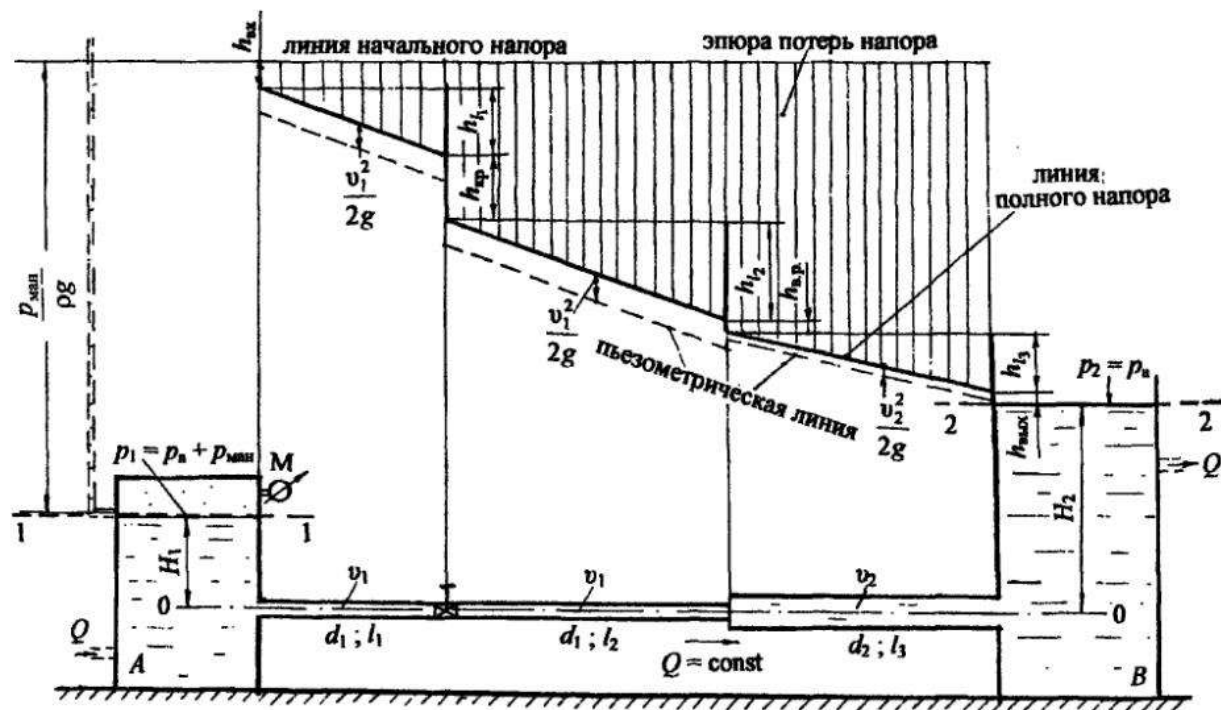


Рис. 6.5

Представим манометрическое давление ($p_{\text{ман}}$) в кПа:

$$p_{\text{ман}} = 11,62 \cdot \rho g = 11,62 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 113,9 \cdot 10^3 \text{ Па} = 113,9 \text{ кПа.}$$

Манометрическое давление в атмосферах $p_{\text{ман}} = 1,16 \text{ ат.}$

Переходим к построению линии полного напора.

От уровня жидкости в резервуаре *A* пунктиром покажем пьезометр, показание которого соответствует величине $p_{\text{ман}}/(\rho g)$ (см. главу 2, задачи 2.3.6; 2.3.8). По уровню жидкости в пьезометре проведём *горизонтальную линию начального напора*. До линии начального напора проводим *вертикальные линии* по характерным сечениям трубопровода: входа в трубу; крана; внезапного расширения; выхода из трубы (рис. 6.5).

Откладываем по порядку, начиная от линии начального напора, по вертикали потери напора:

- на входе в виде скачка $h_{\text{вх}} = 0,3 \text{ м}$;
- по длине первого участка в виде наклонной прямой $h_1 = 2,0 \text{ м}$;
- в кране в виде скачка $h_{\text{кр.}} = 3,3 \text{ м}$;
- по длине второго участка в виде наклонной прямой $h_2 = 3,0 \text{ м}$;
- при внезапном расширении в виде скачка $h_{\text{в.р.}} = 0,12 \text{ м}$;
- по длине третьего участка $h_3 = 0,7 \text{ м}$;
- на выходе в резервуар *B* также в виде скачка $h_{\text{вых}} = 0,2 \text{ м}$.

Линия полного напора должна закончиться на свободной поверхности в резервуаре *B* (на рис. 6.5 масштаб не выдержан).

Пьезометрическую линию проводим ниже линии полного напора на величину $\frac{v_1^2}{2g} = 0,6 \text{ м}$ для трубы диаметром d_1 и на величину $\frac{v_2^2}{2g} = 0,2 \text{ м}$ для трубы диаметром d_2 . Пьезометрическая линия показана пунктиром.

Следует обратить внимание, что при внезапном расширении полный напор падает, а пьезометрический напор повышается.

Строим эпюру потерь напора. Показываем *вертикальные штриховые линии* от линии начального напора до линии полного напора. Каждая вертикальная штриховая линия соответствует потерям напора от начала трубопровода до выбранного сечения. Графическое представление распределения напоров закончено.

Ответ: показание манометра $p_{\text{ман}} = 1,16 \text{ ат.}$, манометрический напор, соответствующий показанию манометра $H_{\text{ман}} = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = 11,6 \text{ м.}$

На примерах задач 6.2.1 и 6.2.2 рассмотрен расчёт простых трубопроводных систем первого типа: в задаче 6.2.1 определялось давление, а в задаче 6.2.2 – действующий напор и построение пьезометрической линии.

Ниже предлагается расчёт простой трубопроводной системы *второго типа* с определением пропускной способности (расхода жидкости) системы с истечением в атмосферу.

Задача 6.2.3. С помощью насоса вода поднимается на высоту $H = 15$ м с истечением в атмосферу. Определить пропускную способность (расход) системы, если показание манометра, установленного после насоса, $p_{\text{ман}} = 1,6$ ат; длина трубы $l = 80$ м; диаметр трубы $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм. На трубопроводе установлены: задвижка Лудло со степенью закрытия $a/d = 3/4$ и три колена.

Принять плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³, кинематический коэффициент вязкости $\nu = 1,008 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Движение воды считать установившимся, т. е. $Q = \text{const}$ (рис. 6.6).

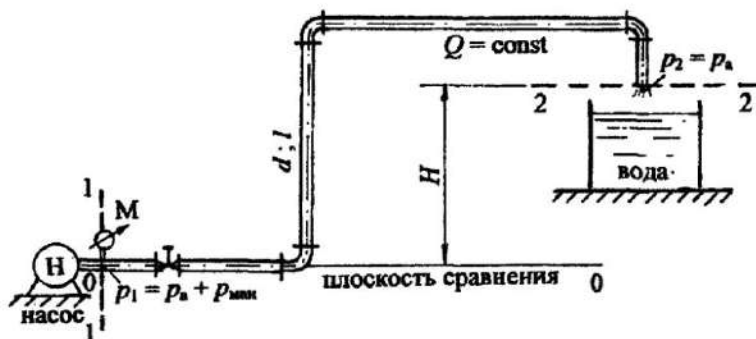


Рис. 6.6

Решение. Для определения расхода (Q) воспользуемся уравнением Бернулли (4.15) по принятой методике (см. раздел 4.5.7):

1. **Выбираем два сечения**, где известны давления, т. е. в месте установки манометра и на выходе воды в атмосферу. В этих сечениях скорости одинаковы ($v = \text{const}$), так как не изменяется диаметр трубопровода и пропускная способность. Сечения проводим нормально к направлению движения жидкости, т. е. трубу рассекаем нормальной плоскостью.

2. **Сечения нумеруем по направлению движения жидкости**: 1-1 - в месте установки манометра, 2-2 - на выходе воды в атмосферу.

3. В выбранных сечениях *учитываем абсолютное давление*, т. е. давление, рассчитанное с учётом атмосферного: $p_1 = p_a + p_{\text{ман}}$; $p_2 = p_a$.

4. *Плоскость сравнения 0-0* проводим через ось первого сечения, тогда $z_1 = 0$; $z_2 = H$.

5. Записываем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и делаем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{отр. 2}};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_2 &= H; \\ p_1 &= p_a + p_{\text{ман}}; & p_2 &= p_a; \\ v_1 &= v_2 = v = \text{const.} \end{aligned}$$

После преобразований и сокращений получим:

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = H + h_w. \quad (6.13)$$

Прочитаем преобразованное уравнение Бернулли: напор, создаваемый насосом, идёт на подъём воды на высоту H и преодоление гидравлических сопротивлений h_w .

Согласно формулам (5.1), (5.2) и (5.3), представляем гидравлические сопротивления:

$$h_w = \Sigma h_r + h_i;$$

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \text{и} \quad h_i = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Из формулы (6.13) запишем потери напора в гидравлических сопротивлениях:

$$h_w = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} - H$$

или

$$\frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} - H,$$

отсюда скорость движения воды в трубе:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2g \left(\frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} - H \right)}. \quad (6.14)$$

Рассчитав скорость по формуле (6.14), определим расход: $Q = v\omega$.

Для расчёта скорости в формуле (6.14) нужно определить сумму коэффициентов местных сопротивлений для задвижки и трёх колен ($\Sigma \zeta$) и коэффициент гидравлического сопротивления (λ).

Сумма коэффициентов местных сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = \zeta_{\text{зав.}} + 3\zeta_{\text{кол.}}$$

По табл. 4, 5 (см. приложение): $\zeta_{\text{зав.}} = 17,0$; $\zeta_{\text{кол.}} = 0,39$ при диаметре $d = 100$ мм, получим $\Sigma \zeta = 18,17$.

Для выбора расчётной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ кроме абсолютной шероховатости трубы (Δ) необходимо определить режим движения жидкости по критерию Рейнольдса (Re) (см. формулу (4.20)).

В формулу (4.20) также входит неизвестная скорость (v), поэтому при заданной шероховатости (Δ) предполагаем турбулентный режим, зону квадратичного сопротивления, для которой λ не зависит от Re , и рассчитываем коэффициент λ по формуле Шифринсона (5.14), затем определяем скорость движения воды.

После расчёта скорости нужно проверить режим движения. Если подтвердится квадратичная зона сопротивления, рассчитаем расход. Если режим движения и зона сопротивления не подтвердится, проводим повторный расчёт коэффициента λ в соответствии с числом Re .

Итак, *предполагаем* для трубы диаметром $d = 100$ мм с шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм *турбулентный режим, зону квадратичного сопротивления*. Коэффициент λ рассчитаем по формуле (5.14):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}; \quad \lambda = 0,11 \left(\frac{0,5}{100} \right)^{0,25} = 0,029.$$

Подставляем все данные в формулу (6.14).

Для удобства расчётов:

$$\frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} = \frac{1,6 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} = 16 \text{ м.}$$

Рассчитаем скорость движения воды по формуле (6.14):

$$v = \sqrt{\frac{1}{18,17 + 0,029 \frac{80}{0,1}}} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1} = 0,69 \text{ м/с.}$$

Рассчитаем критерий Re по формуле (4.20):

$$Re = \frac{vd}{\nu}; \quad Re = \frac{0,69 \cdot 0,1}{1,008 \cdot 10^{-6}} = 68452.$$

Сравнивая число Рейнольдса (Re) для потока воды с критическим ($Re_{кр.}$), заключаем, что $Re = 68452 > Re_{кр.} = 2300$, значит, режим движения турбулентный.

По схеме (см. рис. 5.1) определим граничные значения чисел Re для установления зоны сопротивления при турбулентном режиме:

$$20 \frac{d}{\Delta} = 20 \frac{100}{0,5} = 4000;$$

$$500 \frac{d}{\Delta} = 500 \frac{100}{0,5} = 100000.$$

Значение числа Рейнольдса (Re) входит в интервал:

$$20 \frac{d}{\Delta} < Re = 68452 < 500 \frac{d}{\Delta},$$

значит, *квадратичная зона сопротивления не подтвердилась*, имеет место турбулентный режим, *зона доквадратичного сопротивления*, для которой коэффициент λ рассчитываем по формуле А. Д. Альтшуля (5.12):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25};$$

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{68452} + \frac{0,5}{100} \right)^{0,25} = 0,031.$$

Снова рассчитаем скорость (v) при значении $\lambda = 0,031$:

$$v = \sqrt{\frac{1}{18,17 + 0,031 \frac{80}{0,1}}} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1} = 0,676 \text{ м/с};$$

далее $Re = \frac{0,676 \cdot 0,1}{1,008 \cdot 10^{-6}} = 67044;$

теперь $20 \frac{d}{\Delta} < Re = 67044 < 500 \frac{d}{\Delta}.$

Доквадратичная зона сопротивления подтвердилась.

Рассчитаем расход

$$Q = v \omega = \frac{\pi d^2}{4} v;$$

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 0,676 = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 5,3 \text{ л/с}.$$

Ответ: пропускная способность системы $Q = 5,3 \text{ л/с}.$

Особыми случаями простого трубопровода являются *расчёт высоты установки насоса и расчёт сифона.*

В задаче 6.2.4 приводится *расчёт высоты установки центробежного насоса* (рис. 6.7). Центробежный насос имеет всасывающий трубопровод, по которому насос засасывает жидкость из водохранилища, бассейна, зумпфа и им подобных ёмкостей, и нагнетательный трубопровод, по которому жидкость под действием избыточного давления, создаваемого насосом, транспортируется по трубопроводу и поднимается на определённую высоту. Примеры расчёта нагнетательных систем приведены в задачах 6.2.1 и 6.2.3.

Движение жидкости во всасывающем трубопроводе происходит под действием вакуума. Наибольшая величина вакуума имеет место непосредственно у входа в насос перед рабочим колесом.

Задача 6.2.4. Определить высоту установки центробежного насоса ($H_{\text{нас.}}$), который отсасывает воду из зумпфа больших размеров, если диаметр всасывающего трубопровода $d = 100$ мм, длина $l = 25$ м; вакуумметрическое давление на входе в насос $p_{\text{вак.}} = 0,6$ ат. Труба водопроводная несколько загрязнённая имеет водозаборную сетку с обратным клапаном и одно колено с углом поворота $\alpha = 90^\circ$. Насос должен обеспечить постоянную подачу воды $Q = 9,0$ л/с (см. рис. 6.7).

Решение. За высоту установки центробежного насоса ($H_{\text{нас.}}$) принимается удаление вала центробежного насоса от свободной поверхности воды в зумпфе.



Рис. 6.7

Для определения $H_{\text{нас.}}$ воспользуемся уравнением Бернулли (4.15).

1. Выберем **два сечения**: одно по свободной поверхности в зумпфе, **другое** – на входе в насос, где установлен вакуумметр, причём нормально к направлению движения потока воды.

2. Сечения **пронумеруем по направлению движения жидкости**: 1-1 – по свободной поверхности воды в зумпфе, 2-2 – в месте установки вакуумметра.

3. В выбранных сечениях **учтём абсолютное давление**: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a - p_{\text{вак.}}$

4. **Плоскость сравнения 0-0** совместим с сечением 1-1, тогда $z_1 = 0$; $z_2 = H_{\text{нас.}}$

5. Запишем уравнение Бернулли (4.15) и произведём преобразования:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2};$$

$$z_1 = 0;$$

$$z_2 = H_{\text{нас.}};$$

$$P_1 = P_a;$$

$$P_2 = P_a - P_{\text{вак.}};$$

$$v_1 = 0;$$

$$v_2 = v_{\text{вс.}}; \alpha_2 = 1,0 \text{ (турбулентный режим в круглой трубе).}$$

После подстановки параметров и сокращений:

$$\frac{P_{\text{вак.}}}{\rho g} = H_{\text{нас.}} + \frac{v_{\text{вс.}}^2}{2g} + h_w. \quad (6.15)$$

Прочитаем преобразованное уравнение Бернулли: вакуумметрический напор на входе в насос должен быть таким, чтобы обеспечить подъём воды на высоту $H_{\text{нас.}}$, создать скоростной напор $\frac{v_{\text{вс.}}^2}{2g}$ и преодолеть гидравлические сопротивления h_w .

Из формулы (6.15) представим высоту установки центробежного насоса:

$$H_{\text{нас.}} = \frac{P_{\text{вак.}}}{\rho g} - \frac{v_{\text{вс.}}^2}{2g} - h_w. \quad (6.16)$$

Определим потери напора в гидравлических сопротивлениях (h_w), пользуясь формулами (5.1), (5.2) и (5.3):

$$h_w = \Sigma h_r + h_i;$$

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \text{и} \quad h_i = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Рассчитаем скорость всасывания и скоростной напор через расход (Q):

$$Q = v_{\text{вс.}} \omega = \frac{\pi d^2}{4} v_{\text{вс.}}, \text{ откуда } v_{\text{вс.}} = \frac{4Q}{\pi d^2},$$

получим

$$v_{\text{вс.}} = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 1,15 \text{ м/с};$$

скоростной напор: $\frac{v_{вс.}^2}{2g} = \frac{1,15^2}{2 \cdot 9,8} = 0,067 \text{ м}$ (достаточно малая величина).

Потери напора в местных сопротивлениях Σh_r :

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v_{вс.}^2}{2g},$$

где

$$\Sigma \zeta = \zeta_{сетк.} + \zeta_{жол.},$$

по табл. 4 и табл. 5 (см. приложение) находим:

$$\zeta_{сетк.} = 10,0; \zeta_{жол.} = 0,39 \text{ (для } d=100 \text{ мм); значит } \Sigma \zeta = 10,37,$$

тогда

$$\Sigma h_r = 10,37 \cdot 0,067 = 0,7 \text{ м.}$$

Чтобы рассчитать потери напора по длине (h_l), необходимо выбрать расчётную формулу коэффициента гидравлического сопротивления (λ). Проанализируем схему выбора расчётной формулы λ (см. рис. 5.1). По условию задачи дано *описание состояния внутренней поверхности трубы: водопроводная труба несколько загрязнённая*, значит, коэффициент λ определяем по формуле (5.16):

$$\lambda = \frac{8g}{C^2},$$

где коэффициент Шези (C) рассчитываем по формуле Маннинга (5.17):

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6},$$

по табл. 7 (см. приложение) для несколько загрязнённых труб принимаем $n=0,013$ или $1/n=76,9$.

Гидравлический радиус (R) для круглой трубы, согласно формуле (4.2): $R = d/4 = 0,025 \text{ м}$.

Получим $C = 76,9 \cdot 0,025^{1/6} = 41,53$.

Рассчитаем значение коэффициента гидравлического сопротивления λ по формуле (5.16):

$$\lambda = \frac{8 \cdot 9,8}{41,53^2} = 0,045.$$

Потери напора по длине по формуле (5.3):

$$h_l = 0,045 \frac{25}{0,1} 0,067 = 0,75 \text{ м.}$$

Все потери напора в гидравлических сопротивлениях по формуле (5.1):

$$h_w = 0,7 + 0,75 = 1,45 \text{ м.}$$

Рассчитаем вакуумметрический напор, входящий в формулы (6.15) и (6.16):

$$H_{\text{вак}} = \frac{P_{\text{вак}}}{\rho g} = \frac{0,6 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} = 6 \text{ м.}$$

Подставим все данные в формулу (6.16):

$$H_{\text{нас.}} = 6,0 - 0,067 - 1,45 = 4,5 \text{ м.}$$

Анализ проведённого решения показывает, что высота установки центробежного насоса зависит от величины вакуума на входе в насос. Обычно вакуум перед рабочим колесом насоса должен быть в пределах $H_{\text{вак.}} \leq 4,0 \div 7,0$ м вод.ст.

Пример расчёта насосной установки с построением напорной характеристики водоотливного трубопровода хорошо представлен в учебнике "Гидравлика и гидропривод". Авторы: В. Г. Гейер, В. С. Дулин и др. М.: Недра, 1981.

Ответ: высота установки насоса $H_{\text{нас.}} = 4,5$ м.

Рассмотрим расчёт сифона. Сифоном называется короткий трубопровод, расположенный выше горизонта жидкости в питающем резервуаре, способный перемещать жидкость в другой резервуар, уровень жидкости в котором ниже уровня в питающем резервуаре (см. рис. 6.8), т. е. должна быть *постоянная разность уровней в резервуарах*.

Принцип действия сифона основан на создании вакуума в верхней точке сифона, для этого сифонную трубу каким-либо способом заполняют жидкостью до верхней точки, например, устанавливают подпитывающий трубопровод. На входе в сифонную трубу, как правило, устанавливают сетку с обратным клапаном, который закрывается при заполнении трубы жидкостью, а при работе сифона обратный клапан поднимается (открывается).

Расчёт сифона включает определение двух параметров - пропускной способности (расхода) и высоты сифона.

В задаче 6.2.5 представлен расчёт сифона с истечением жидкости под уровень.

Задача 6.2.5. Рассчитать максимальную пропускную способность и высоту сифона, откачивающего воду из верхнего зумпфа в нижний, при неизменной разности уровней воды в зумпфах $H = 2,0$ м. Труба водопроводная нормальная диаметром $d = 150$ мм длиной $l_1 = 10$ м (до верхней точки сифона) и $l_2 = 20$ м. На входе в трубу установлена водозаборная сетка с обратным клапаном. Система имеет вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент.}} = 7,0$, одно колено с углом поворота $\alpha = 90^\circ$ и два поворота трубы с углами $\alpha_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 60^\circ$. Величина предельного вакуума в верхней точке сифона $p_{\text{вак.}} = 0,55$ ат (рис. 6.8).

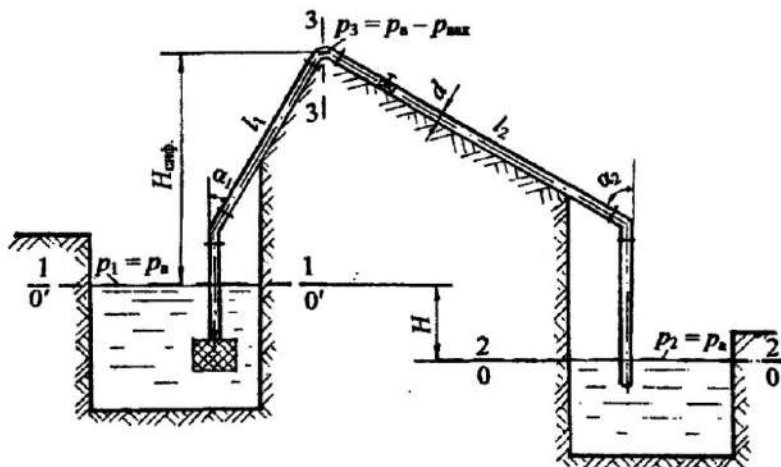


Рис. 6.8

Решение. Как и в предыдущих задачах, при расчёте сифона пользуемся уравнением Бернулли, методика составления которого уже отработана.

1. Определим пропускную способность сифона (Q).

Следует провести расчёт простой трубопроводной системы с истечением под уровень (см. раздел 6.1.2).

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, проведённых по свободным поверхностям воды в зумпфах, где скорости можно считать равными нулю ($v_{1 \text{ сеч.}} = v_{2 \text{ сеч.}} = 0$), а абсолютное давление - равным

атмосферному ($p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$), так как резервуары открыты. Плоскость сравнения совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

Запишем уравнение Бернулли (4.15) и сделаем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= H; & z_2 &= 0; \\ p_1 &= p_a; & p_2 &= p_a; \\ v_{1 \text{ сеч.}} &= 0; & v_{2 \text{ сеч.}} &= 0. \end{aligned}$$

После подстановки данных и сокращений получим:

$$H = h_{w \text{ сиф.}} \quad (6.17)$$

Прочитаем формулу (6.17): разность уровней жидкости H (напор) в резервуарах должна быть такой, чтобы преодолеть гидравлические сопротивления в трубопроводе — $h_{w \text{ сиф.}}$.

Представим потери напора в гидравлических сопротивлениях с учётом формул (5.1), (5.2) и 5.3):

$$h_{w \text{ сиф.}} = \Sigma h_r + h_l = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \frac{v^2}{2g}$$

или

$$h_{w \text{ сиф.}} = \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \right).$$

Формулу (6.17) представим в следующем виде:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \right). \quad (6.18)$$

Формула (6.18) аналогична формуле (6.7). Найдём скорость движения воды в трубе (v):

$$v = \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} \sqrt{2gH},$$

расход $Q = \omega v$:
$$Q = \omega \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.19)$$

Формула (6.19) аналогична формуле (6.8).

Обозначим:
$$\sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} = \mu_{\text{сиф}}, \quad (6.20)$$

где $\mu_{\text{сиф}}$ – коэффициент расхода сифона. Рассчитаем этот коэффициент.
Сумма коэффициентов местных сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = \zeta_{\text{сстк.}} + \zeta_{\text{кол}_1} + \zeta_{\text{кол}_2} + \zeta_{\text{кол}_3} + \zeta_{\text{вент.}} + \zeta_{\text{вых.}}$$

Пользуясь табл. 4 и табл. 5 (см. приложение), рассчитаем $\Sigma \zeta$:

$$\Sigma \zeta = 10,0 + 0,2 + 0,37 + 0,55 + 7,0 + 1,0 = 19,12.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициент Дарси) для нормальных водопроводных труб принимаем $\lambda = 0,0286$ для $d = 150$ мм по табл. 8 (см. приложение).

Получим значение коэффициента расхода сифона:

$$\mu_{\text{сиф}} = \sqrt{\frac{1}{19,12 + 0,0286 \frac{30}{0,15}}} = 0,2.$$

Подставляя все параметры в формулу (6.19), учитывая, что площадь живого сечения трубы $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$, значит:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \mu_{\text{сиф}} \sqrt{2gH}. \quad (6.21)$$

После подстановки численных значений:

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,0} = 0,022 \text{ м}^3 / \text{с} = 22 \text{ л/с.}$$

2. **Определим высоту сифона.** За высоту сифона ($H_{\text{сиф.}}$) принимается превышение верхней точки сифона над уровнем жидкости в питающем резервуаре (см. рис. 6.8).

Для расчёта высоты сифона воспользуемся уравнением Бернулли (4.15) для сечений 1-1 по свободной поверхности в питающем резервуаре и 3-3 - в верхней точке сифона. Сечение 3-3 проводим нормально к направлению движения потока воды, где скорость равна v , а абсолютное давление $p_3 = p_a - p_{\text{вак.}}$. Плоскость сравнения $0' - 0'$ совместим с сечением 1-1, тогда $z_1 = 0$; $z_3 = H_{\text{сиф.}}$.

Рассуждения по составлению уравнения Бернулли для определения высоты сифона свидетельствуют о том, что расчёт высоты сифона аналогичен расчёту высоты установки центробежного насоса (см. задачу 6.2.4).

Итак, уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 3-3:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + h_{w_{1-3}};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_3 &= H_{\text{сиф.}}; \\ p_1 &= p_a; & p_3 &= p_a - p_{\text{вак.}}; \\ v_1 &= 0; & v_3 &= v; \alpha_3 = 1,0 \text{ (для круглой} \\ & & & \text{водопроводной трубы)}. \end{aligned}$$

Потери напора в гидравлических сопротивлениях учитываются между сечениями 1-1 и 3-3:

$$h_{w_{1-3}} = \Sigma h_{r_{1-3}} + h_{l_{1-3}} = \Sigma \zeta_{1-3} \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l_1}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

После подстановки данных в уравнение Бернулли получим:

$$H_{\text{сиф.}} = \frac{p_{\text{вак.}}}{\rho g} - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \Sigma \zeta_{1-3} + \lambda \frac{l_1}{d} \right). \quad (6.22)$$

Скорость движения воды в трубе рассчитаем, зная величину расхода:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2}; \quad v = \frac{4 \cdot 0,022}{3,14 \cdot 0,15^2} = 1,25 \text{ м/с.}$$

Сумму коэффициентов местных сопротивлений учтём между сечениями 1-1 и 3-3:

$$\Sigma \zeta_{1-3} = \zeta_{\text{отк.}} + \zeta_{\text{кол}_1} + \zeta_{\text{кол}_2}; \quad \Sigma \zeta_{1-3} = 10,57.$$

$$\text{Вакуумметрический напор } H_{\text{вак.}} = \frac{P_{\text{вак.}}}{\rho g} = \frac{0,55 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} = 5,5 \text{ м.}$$

Вакуумметрический напор можно также записать путём перевода (т. в м вод. ст. (см. табл. 2, приложение): 1 ат = 10 м вод. ст., значит, $P_{\text{вак.}} = 0,55 \text{ ат} = 5,5 \text{ м вод. ст.}$, т.е. $H_{\text{вак.}} = 5,5 \text{ м}$.

Значение коэффициента Дарси (λ) возьмём из предыдущего расчёта: $\lambda = 0,0286$.

После подстановки численных значений параметров в формулу (6.22) получим *высоту сифона*:

$$H_{\text{сиф.}} = 5,5 - \frac{1,25^2}{2 \cdot 9,8} \left(1 + 10,57 + 0,0286 \frac{10}{0,15} \right) = 4,4 \text{ м.}$$

Из формулы (6.22) следует, что максимальная высота сифона определяется максимальным вакуумметрическим напором в верхней точке сифона. Считается, что допустимый вакуум без образования разрыва турбулентности струи $H_{\text{вак. доп.}} = (6 + 7) \text{ м}$. Значит, предельная высота сифона $H_{\text{сиф. max}} = (5 + 6) \text{ м}$.

Ответ: пропускная способность сифона $Q = 22 \text{ л/с}$; высота сифона $H_{\text{сиф.}} = 4,4 \text{ м}$.

Итак, в разделах 6.1 и 6.2 рассмотрены теория и примеры расчёта простых трубопроводных систем. Методика расчёта таких систем основана на уравнении Бернулли. Важно уметь применить эту методику для расчёта трубопроводных систем различных типов.

В разделе 6.3 предлагаются задачи для самостоятельной работы, которые позволяют студентам проверить знания и умение использовать вышеизложенную теорию и методику расчёта простых систем. К задачам даны ответы, однако они могут несколько отличаться от полученных Вами, в зависимости от того, какими таблицами, из каких учебников и учебных пособий Вы пользуетесь.

6.3. Задачи для самостоятельной работы по теме "Расчёт простых трубопроводных систем"

Задача 6.3.1

При закрытом кране на трубопроводе диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 10$ м показание манометра перед краном $p_{\text{ман}} = 0,18$ ат.

Определить показание манометра при открытом кране, если слив воды происходит в мерную ёмкость. За время $t = 30$ с наполняется объём $W = 70,5$ л. Труба водопроводная с абсолютной шероховатостью $\Delta = 1,0$ мм. Учесть потери напора на входе в трубу с острыми кромками. Принять коэффициент вязкости воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 6.9).

Ответ: при открытом кране показание манометра $p_{\text{ман. (откр.)}} = 0,116$ ат.

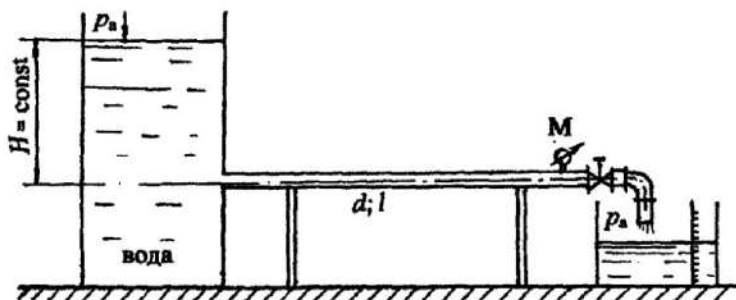


Рис. 6.9

Задача 6.3.2

Из напорного бака с постоянным напором $H = 3,0$ м вода подаётся в зумпф по двум трубам $d_1 = 100$ мм длиной $l_1 = 5,0$ м и $d_2 = 50$ мм длиной $l_2 = 8,0$ м. Определить расход воды в трубопроводе и скорости движения воды в каждой трубе. На трубе диаметром d_1 установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$. Учесть потери напора на входе в трубу с острыми кромками, а также при внезапном сужении ($\zeta_{\text{в.с.}} = 0,38$). Трубы водопроводные нормальные (рис. 6.10).

Ответ: расход $Q = 5,1$ л/с.

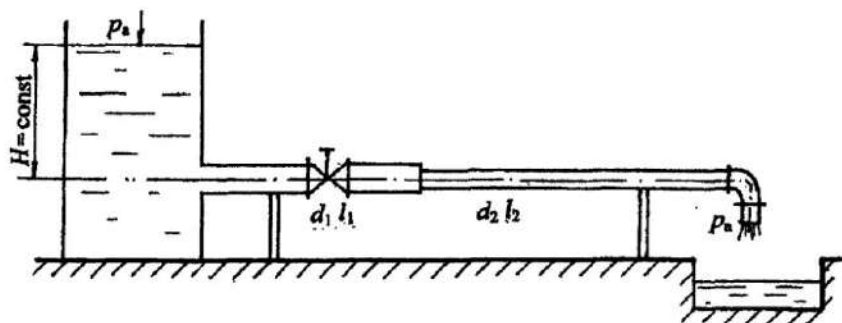


Рис. 6.10

Задача 6.3.3

Из резервуара A в резервуар B вода подаётся по трубопроводу диаметром $d = 50$ мм, состоящему из трёх участков длиной $l_1 = 5,0$ м; $l_2 = 4,0$ м; $l_3 = 6,0$ м. Расход воды в системе $Q = 2,5$ л/с. На входе в трубу установлена решётка без обратного клапана, на первом участке стоит вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент}} = 5,0$ (рис. 6.11).

Напор воды в резервуаре A $H_1 = 1,5$ м, в резервуаре B - $H_2 = 2,5$ м. Определить показание манометра ($p_{\text{ман}_2}$) на поверхности воды в резервуаре B , если показание манометра на поверхности воды в резервуаре A $p_{\text{ман}_1} = 0,45$ ат. Принять абсолютную шероховатость трубы $\Delta = 0,5$ мм; кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Ответ: показание второго манометра $p_{\text{ман}_2} = 0,15$ ат.

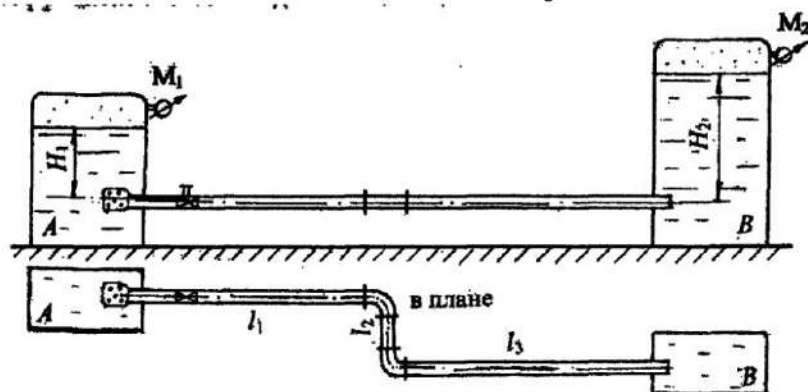


Рис. 6.11

Задача 6.3.4

Определить расход воды из дозаторного резервуара A в резервуар B при постоянном напоре $H = 2,5$ м по трубам $d_1 = 50$ мм; $l_1 = 5,0$ м и $d_2 = 100$ мм; $l_2 = 8,0$ м. Трубы водопроводные нормальные. На трубе $d_2 = 100$ мм установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$.

Учесть потери напора на входе и выходе трубопроводной системы, а также при внезапном расширении трубопровода. Построить напорную и пьезометрическую линии, показать эпюру потерь напора (рис. 6.12).

Ответ: расход воды $Q = 5,5$ л/с.

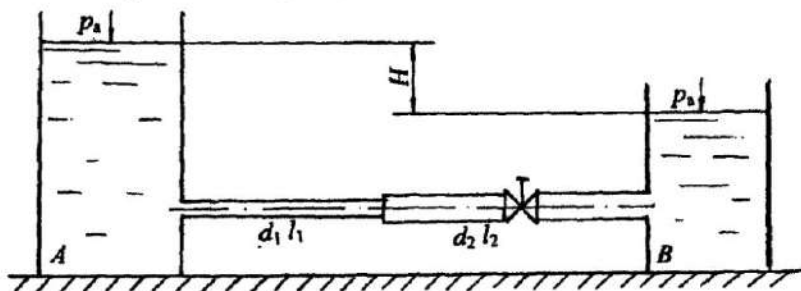


Рис. 6.12

Задача 6.3.5

С помощью насоса вода подается в напорный бак на высоту $H = 6,0$ м, диаметр трубы $d = 100$ мм, длина $l = 80$ м. Показание манометра в начале трубопровода $p_{ман1} = 1,5$ ат, в конце $p_{ман2} = 0,75$ ат. Определить, при каком коэффициенте сопротивления пробкового крана будет обеспечен расход $Q = 6,0$ л/с. Принять абсолютную шероховатость трубы $\Delta = 0,5$ мм, коэффициент кинематической вязкости воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с (рис. 6.13).

Ответ: коэффициент сопротивления пробкового крана $\zeta_{кр} = 25,6$.

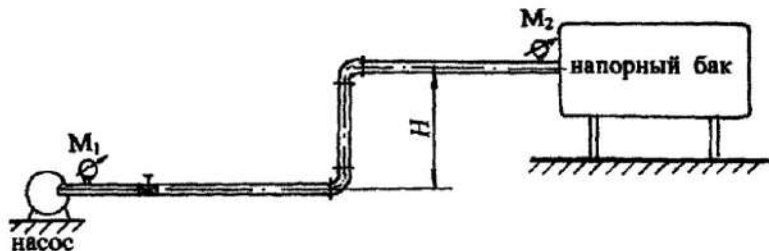


Рис. 6.13

Задача 6.3.6

Бензин из бензохранилища с помощью насоса подаётся в бензобак на высоту $H = 3,0$ м. На поверхности бензина в бензобаке поддерживается вакуум $p_{\text{вак}} = 0,16$ ат. Определить, каким должно быть манометрическое давление ($p_{\text{ман}}$ в ат) на выходе из насоса при подаче $Q = 2,4$ л/с, если транспортирование бензина происходит по новой стальной трубе с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,05$ мм, диаметром $d = 50$ мм, длиной $l = 30$ м, на трубе установлена задвижка Лудло со степенью закрытия $a/d = 5/8$, учесть потери напора в двух коленах и на выходе из трубы в бензобак. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз.}} = 720$ кг/м³; коэффициент кинематической вязкости бензина $\nu_{\text{бенз.}} = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м²/с (рис. 6.14).

Ответ: манометрическое давление $p_{\text{ман}} = 0,3$ ат.

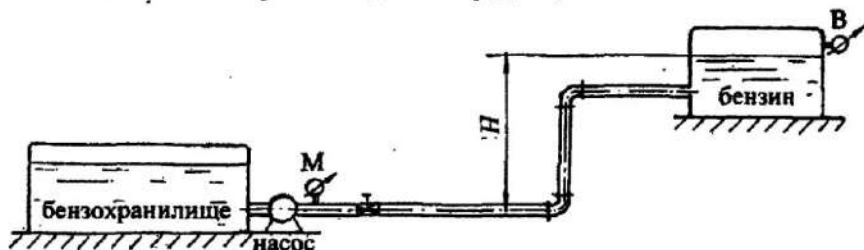


Рис. 6.14

Задача 6.3.7

В пневмотранспортной системе регулирование скорости и расхода воздуха осуществляется с помощью задвижки и контролируется по U-образному спиртовому мановакуумметру, установленному на входном участке коллектора. Определить, каким должно быть показание мановакуумметра ($h_{\text{сп}}$) на трубе диаметром $d = 100$ мм при расходе воздуха $Q = 180$ л/с. Принять коэффициент сопротивления на входе в коллектор $\zeta_{\text{вх}} = 0,2$; плотность воздуха $\rho_{\text{возд.}} = 1,22$ кг/м³; плотность спирта $\rho_{\text{сп}} = 880$ кг/м³ (рис. 6.15).

Ответ: показание U-образного мановакуумметра $h_{\text{сп}} = 45$ мм.

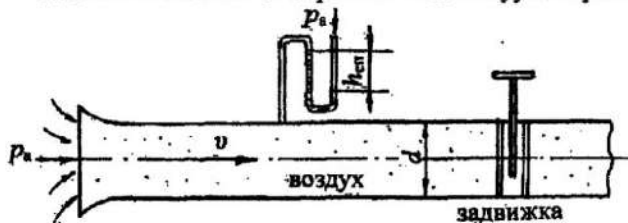


Рис. 6.15

Задача 6.3.8

В плотине сделан водоспуск в виде железобетонной трубы с весьма хорошей бетонировкой диаметром $d = 800$ мм и длиной $l = 5,0$ м. Напор над водоспуском при истечении в атмосферу $H = 4,0$ м. Определить пропускную способность трубы (Q , м³/с), если она имеет водозаборную сетку без обратного клапана.

Как изменится пропускная способность трубы, если за водосливом напор поднимется до $h = 2,5$ м (рис. 6.16).

Ответ: в первом случае $Q_1 = 1,44$ м³/с; во втором — $Q_2 = 1,02$ м³/с.

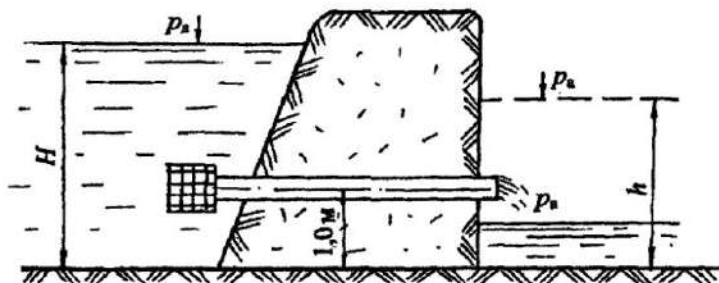


Рис. 6.16

Задача 6.3.9

Определить показание U-образного спиртового манометра, установленного на трубе Вентури в вентиляционном трубопроводе при значении диаметров $d_1 = 100$ мм и $d_2 = 50$ мм, если расход воздуха $Q = 78,5$ л/с. Принять плотность воздуха $\rho_{\text{возд.}} = 1,23$ кг/м³; плотность спирта $\rho_{\text{сп.}} = 820$ кг/м³. Коэффициент сопротивления трубы Вентури принять равным $\zeta_{\text{вент.}} = 0,2$ (рис. 6.17).

Ответ: показание U-образного манометра $h_{\text{сп.}} = 140$ мм.

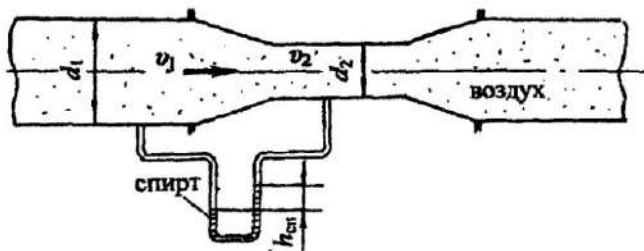


Рис. 6.17

Задача 6.3.10

Для измерения расхода воды в трубопроводе диаметром $d_1 = 100$ мм установлен расходомер Вентури с диаметром цилиндрической части $d_2 = 50$ мм. К широкой и узкой части расходомера подсоединены пьезометры в виде U-образной трубки, расстояние между которыми равно z .

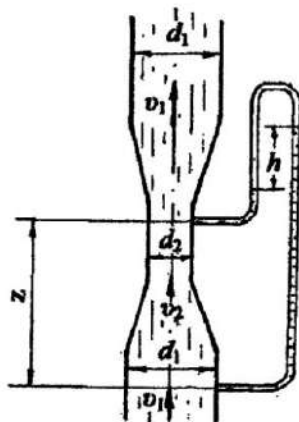


Рис. 6.18

Пренебрегая потерями напора в расходомере, определить скорости в широкой и узкой части трубы Вентури, а также расход воды в трубопроводе, если разность показаний пьезометров $h = 40$ см. При расчёте давлением столба воздуха в пьезометре пренебречь. Коэффициент Кориолиса принять равным единице ($\alpha = 1,0$) (рис. 6.18).

Ответ: скорость $v_1 = 0,72$ м/с;
 $v_2 = 2,9$ м/с; расход воды в трубопроводе
 $Q = 5,7$ л/с.

Задача 6.3.11

Для определения коэффициента кинематической вязкости (ν) масла "Турбинное 30" производится прокачка его через трубку диаметром $d = 12,5$ мм. На расстоянии $l = 1,5$ м подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{рт.} = 50$ мм. Расход масла $Q = 0,1$ л/с, плотность масла $\rho_{масл.} = 900$ кг/м³, плотность ртути $\rho_{рт.} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Предположить режим движения масла ламинарным. По окончании расчёта проверить режим движения (рис. 6.19).

Ответ: коэффициент кинематической вязкости масла $\nu = 0,3 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

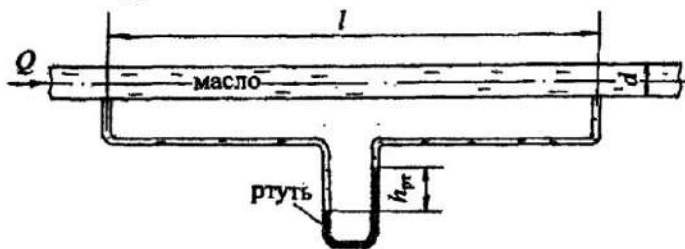


Рис. 6.19

Задача 6.3.12

Определить, на какой высоте (h) следует установить шестерёнчатый насос системы смазки, подающий масло “Турбинное 22” при расходе $Q = 0,6$ л/с по стальной трубе диаметром $d = 35$ мм и длиной $l = 2,0$ м. Показание вакуумметра на входе в насос $p_{\text{вак}} = 0,15$ ат.

В системе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$. Учесть потери напора в двух коленах при $\zeta_{\text{кол.}} = 0,86$ и на входе в трубу из бензобака $\zeta_{\text{вх.}} = 0,5$. Принять плотность масла $\rho_{\text{масл.}} = 900$ кг/м³, коэффициент кинематической вязкости масла $\nu_{\text{масл.}} = 22 \cdot 10^{-6}$ м²/с (рис. 6.20).

Ответ: высота установки насоса $h = 1,18$ м.

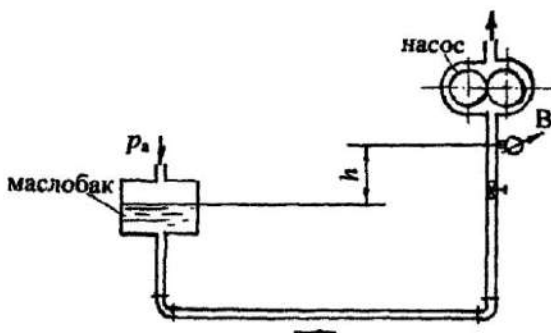


Рис. 6.20

Задача 6.3.13

Сифонный водосброс диаметром $d = 200$ мм и длиной $l = 10$ м сбрасывает воду из водохранилища в водоём, уровень которого на $H = 2,5$ м ниже уровня воды в водохранилище.

Определить пропускную способность сифона (Q , л/с), если труба водопроводная загрязнённая имеет водозаборную сетку с обратным клапаном, два колена: одно с углом закругления $\alpha_1 = 90^\circ$ и отношением $r/R = 0,5$; второе без закругления с углом $\alpha_2 = 60^\circ$; вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент.}} = 5,0$ и выход из трубы в резервуар больших размеров. Рассчитать, каким должен быть вакуум ($p_{\text{вак}}$, в ат.) в конце горизонтального участка сифона, если длина трубы до этого сечения $l_1 = 4,0$ м, высота сифона $h_{\text{сиф.}} = 1,5$ м (рис. 6.21).

Ответ: пропускная способность сифона $Q = 51,8$ л/с, вакуум в конце горизонтального участка $p_{\text{вак.}} = 0,37$ ат.

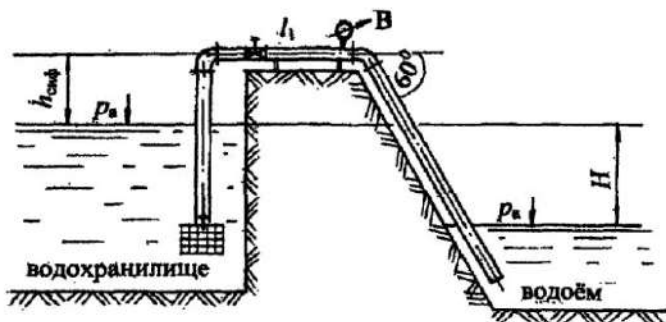


Рис. 6.21

Задача 6.3.14

Определить предельную длину трубопровода диаметром $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,1$ мм, с помощью которого бензин плотностью $\rho_{\text{бенз.}} = 720$ кг/м³ и коэффициентом кинематической вязкости $\nu_{\text{бенз.}} = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м²/с может быть поднят на высоту $H = 15,5$ м при пропускной способности $Q = 8,0$ л/с, если показание манометра после насоса $p_{\text{ман}} = 1,2$ ат. Истечение бензина происходит под уровень. Учтёте потери напора в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$, трёх коленах и на выходе из трубы в резервуар больших размеров (рис. 6.22).

Ответ: предельная длина трубопровода $l = 70$ м.

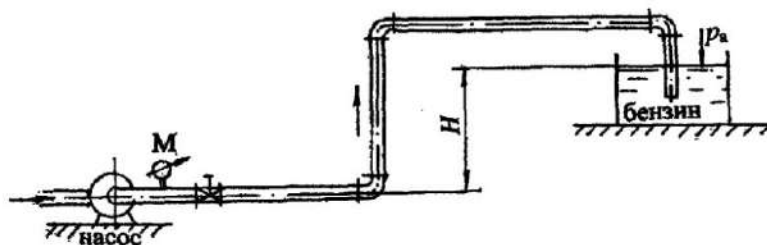


Рис. 6.22

Задача 6.3.15

Из водоёма с помощью центробежного насоса вода подаётся на горное предприятие. Определить высоту расположения оси центробежного насоса над уровнем воды в водоёме ($h_{\text{нас}}$), если расход воды $Q = 30$ л/с, диаметр трубы $d = 200$ мм, длина $l = 25$ м, вакуумметрическое давление на входе в насос $p_{\text{вак}} = 0,5$ ат. На входе в трубу установлена сетка с обратным клапаном. Учесть потери напора в трёх коленах при угле $\alpha = 90^\circ$ и в задвижке Лудло со степенью закрытия $a/d = 5/8$. Считать трубу водопродонной загрязнённой (рис. 6.23).

Ответ: высота установки насоса $h_{\text{нас}} = 3,9$ м.

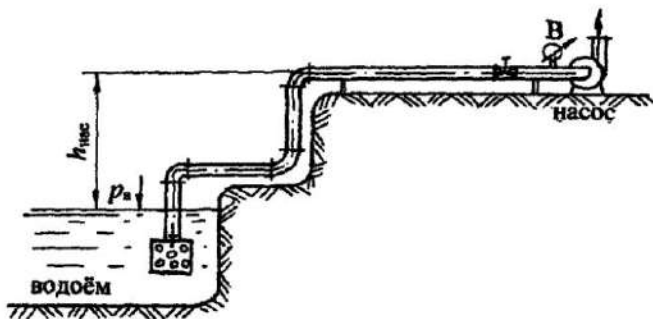


Рис. 6.23

Задача 6.3.16

Поршень диаметром $D = 200$ мм движется равномерно вверх в цилиндре, засасывая воду из открытого водоёма с постоянным уровнем по трубопроводу диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 12$ м. Труба водопродонная нормальная имеет два колена, вход в трубу с острыми кромками и выход воды под уровень. Когда поршень находится выше уровня воды в водоёме на высоте $h = 2$ м, необходимая сила для его перемещения $F = 2,4$ кН.

Определить скорость подъёма поршня ($v_{\text{п}}$) и найти, до какой высоты h_{max} его можно поднимать с такой скоростью без опасности отрыва от него жидкости, если давление насыщенных паров $p_{\text{н.п.}} = 4,25$ кПа. Давление насыщенных паров учитывать как абсолютное давление под поршнем. Массой поршня, трением его о стенки и потерями напора в цилиндре можно пренебречь (рис. 6.24).

Ответ: скорость движения поршня $v_{\text{п}} = 0,19$ м/с; максимальная высота подъёма поршня $h_{\text{max}} = 3,72$ м.

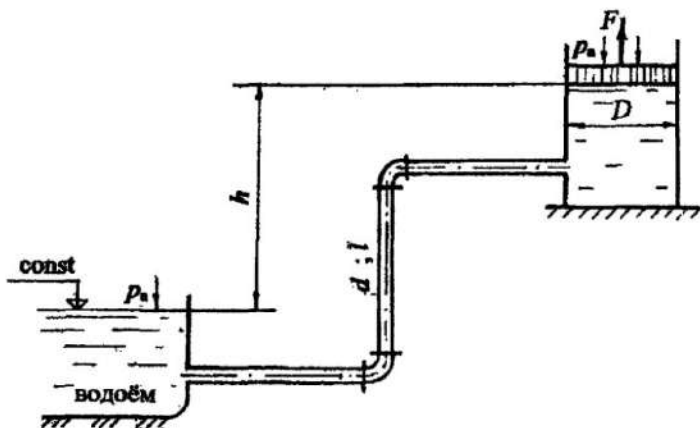


Рис. 6.24

Задача 6.3.17

На водопроводной трубе диаметром $d_1 = 50$ мм установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha_{кр.} = 20^\circ$, разность показаний пьезометров, соответствующая потерям напора в кране, $h_{кр.} = 45$ см.

Определить разность показаний пьезометров (h) при внезапном расширении трубы до диаметра $d_2 = 100$ мм. Потерями напора по длине между краном и внезапным расширением можно пренебречь (рис. 6.25).

Ответ: разность показаний пьезометров $h = 11$ см.

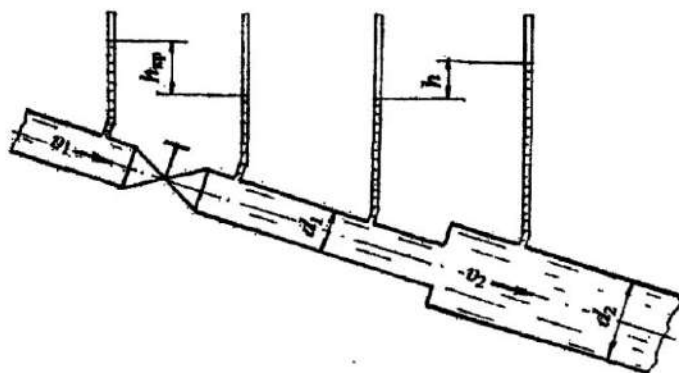


Рис. 6.25

6.4. Расчёт сложных трубопроводных систем

Сложные трубопроводы имеют разветвлённые участки, состоящие из нескольких труб, по которым распределяется жидкость в соответствии с расходами потребителей.

В зависимости от *гидравлической схемы соединения трубопроводов* различают:

1. Системы с *последовательным соединением труб* с одним конечным потребителем или с потребителями по ходу движения жидкости и также с одним конечным потребителем.

2. Системы с *параллельным соединением труб*, или *кольцевые*, также с одним или несколькими потребителями.

3. *Распределительные сети*, или *тупиковые системы*. Это системы с несколькими конечными потребителями.

4. Системы *комбинированного типа*, включающие участки трубопроводных систем первых трёх видов.

5. Системы с *непрерывной раздачей* жидкости, их также называют системами с *путевым расходом*.

Как и при расчёте простых трубопроводных систем (см. раздел 6.1), для сложных систем можно выделить три основных типа расчётов:

- определение *действующего напора (H)*; *давления (p)* в системе; *разности напоров* в питающем резервуаре и у потребителя при известном расходе (Q), длинах и диаметрах трубопроводов отдельных участков;

- определение *расходов* жидкости на отдельных участках и в целом в системе при известных геометрических размерах трубопроводов и напоре (или давлении);

- определение *геометрических размеров* труб по заданным для них расходе и перепадах напора (давления).

Встречаются также расчёты, включающие указанные три типа в определённой комбинации для решения инженерных задач.

При расчёте сложных трубопроводных систем по аналогии с простыми системами следует пользоваться уравнением Бернулли. Так, при истечении жидкости у потребителя в атмосферу (см. рис. 6.26) получаем формулу (6.1)

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_w.$$

Как правило, в сложных системах скоростным напором ($v^2/2g$) как малой величиной можно пренебречь. Действительно, эксплуатационная скорость в водопроводных системах $v_{\text{экс.}} = (1 \div 1,5)$ м/с, реже до 2,0 м/с, значит, скоростной напор $v^2/2g \leq 0,12$ м (очень малая величина по сравнению с действующим напором).

Таким образом, *полный напор* в любом расчётном сечении сложной системы практически *равен гидростатическому напору*, который выражается путём построения *пъезометрической линии*.

В сложных трубопроводных системах потери напора в местных сопротивлениях составляют (5 + 10) % от потерь напора по длине:

$$\Sigma h_r = (0,05 + 0,1) h_l.$$

Тогда, согласно формуле (5.1):

$$h_w = \Sigma h_r + h_l = (1,05 + 1,1) h_l.$$

Формула (6.1) для действующего напора принимает вид:

$$H = (1,05 + 1,1) h_{\text{снот.}}, \quad (6.23)$$

где (1,05 + 1,1) – поправочный коэффициент на местные сопротивления;

$h_{\text{снот.}}$ – потери напора по длине в сложной системе, они представляются в соответствии с гидравлической схемой системы.

Потери напора по длине (h_l) на любом участке для сложных систем рассчитываются через расход (Q) (см. раздел 5.3.3) по формулам (5.19) или (5.21):

$$h_l = \frac{Q^2}{K^2} l \quad \text{или} \quad h_l = A Q^2 l,$$

где K, K^2, A – обобщённые параметры, которые принимаются по табл. 9 (см. приложение) в зависимости от диаметра трубопровода.

При решении задач по расчёту сложных трубопроводных систем рекомендуется пользоваться следующей *методикой*:

1. Рассматривается распределение расхода в системе. На каждом участке обозначается расход (Q_i) с индексом, соответствующим индексу диаметра трубопровода.

2. Представляются потери напора в системе, согласно схеме соединения труб.

3. По условию поставленной задачи определяются действующий напор, давление, разность напоров в питателе и у потребителя и подобные условия.

4. Дополнительно могут рассчитываться диаметр трубы при заданном расходе, свободный (остаточный) напор у потребителя, геодезическая отметка водонапорной башни или потребителя и тому подобное.

Рассмотрим особенности расчёта сложных трубопроводных систем с различными гидравлическими схемами.

Ниже приведены гидравлические схемы сложных систем от более простых к усложнённым и даны примеры решения задач по расчёту систем.

6.4.1. Системы с последовательным соединением труб

Вначале рассмотрим простой случай сложной системы, состоящей из напорной башни с напором H и трёх последовательно соединённых труб разного диаметра и разной длины с истечением жидкости в атмосферу (число участков может быть любым) (рис. 6.26).

Как отмечалось выше в разделе 6.4, расчёт такой системы можно провести, пользуясь уравнением Бернулли для двух сечений: по свободной поверхности жидкости в напорной башне и на выходе жидкости в атмосферу (см. раздел 6.1.1). Путём рассуждений, приведённых в разделе 6.4, получим формулу (6.23) для действующего напора.

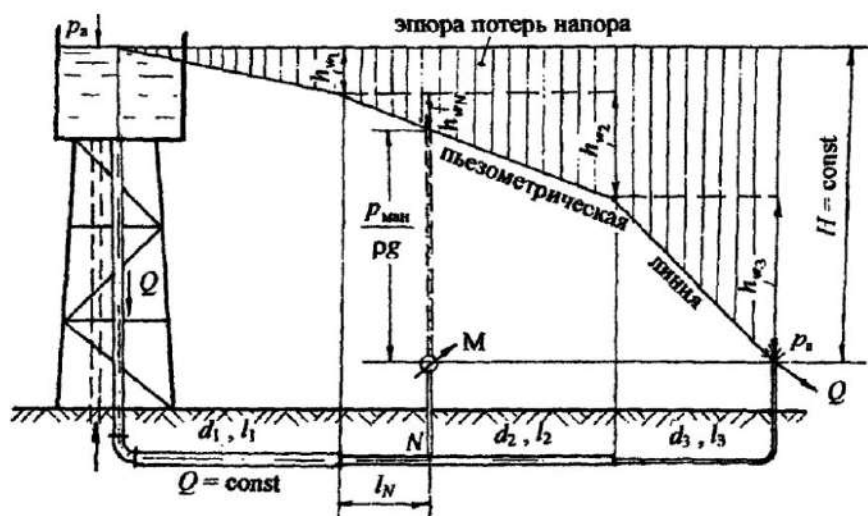


Рис. 6.26

Особенности расчёта системы

Пусть трубопроводная система не имеет путевых потребителей. Пользуемся принятой методикой расчёта сложных систем (см. раздел 6.4).

1. **Распределение расхода.** Ввиду отсутствия потребителей по ходу движения жидкости, расход остаётся величиной постоянной, т. е. какое количество воды поступает из напорной ёмкости, такое же количество истекает в атмосферу у потребителя, следовательно, $Q = \text{const}$.

2. **Потери напора по длине** при последовательном соединении труб рассчитываются, как сумма потерь напора на отдельных участках:

$$h_{\text{пот.}} = h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3}.$$

3. **Действующий напор** определяется по формуле (6.23)

$$H = (1,05 + 1,1)h_{\text{пот.}} = (1,05 + 1,1)(h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3}) \quad (6.24)$$

или с учётом формулы (5.21): $h_l = A Q^2 l$ при постоянном расходе:

$$H = (1,05 + 1,1) Q^2 (A_1 l_1 + A_2 l_2 + A_3 l_3), \quad (6.25)$$

где A_1, A_2, A_3 - удельное сопротивление трубопровода, принимается по табл. 9 (см. приложение) в соответствии с диаметрами d_1, d_2, d_3 ;

l_1, l_2, l_3 - длины участков трубопроводов.

4. **Строится пьезометрическая линия** на основном чертеже (рис. 6.26) аналогично построению пьезометрической и напорной линии для простой системы (см. рис. 6.5). При построении пьезометрической линии нужно учитывать не только потери напора по длине, но и потери в местных сопротивлениях, поэтому на каждом участке покажем $h_{w_i} = (1,05 + 1,1) A_i Q_i^2 l_i$.

Проектируем начало трубопровода на свободную поверхность в башне, из конца каждого участка трубопровода проводим вертикальные линии. Откладываем потери напора на первом участке (h_{w_1}), изменение потерь напора подчиняется линейному закону, так как длина трубы входит в формулу потерь напора (5.21) в первой степени. К потерям напора на первом участке прибавляем потери напора на втором (h_{w_2}) и потери на третьем (h_{w_3}) участках. В сумме потери напора равны действующему напору, т. е. весь действующий напор (H) идет только на преодоление сопротивлений в системе, затратой напора на создание скорости при истечении в атмосферу пренебрегаем (см. раздел 6.4).

Вертикальными штриховыми линиями показываем эпюру потерь напора.

5. Пусть **дополнительно** требуется определить показание манометра ($P_{\text{ман.}}$), установленного на расстоянии l_N от начала второй трубы.

Покажем *геометрическое* определение потерь напора до точки N . Из точки N проводим вертикальную линию. На *эпюре потерь напора* находим потери напора до точки N (h_{wN}). В месте установки манометра можно показать пьезометр (пунктирная линия). Показание пьезометра соответствует $\frac{P_{\text{ман.}}}{\rho g}$. Такая методика перевода манометрического давления в пьезометрический напор была рассмотрена в задачах 2.3.6; 2.3.8; 6.2.2.

Рассмотрим *аналитический расчёт* манометрического давления в точке N :

$$\frac{P_{\text{ман.}}}{\rho g} = H - (1,05 + 1,1)(h_{i_1} + h_{i_N}), \quad (6.26)$$

далее

$$\frac{P_{\text{ман.}}}{\rho g} = H - (1,05 + 1,1)Q^2(A_1 l_1 + A_2 l_N), \quad (6.27)$$

из формулы (6.27) определяется показание манометра в точке N .

6.4.2. Системы с параллельным соединением труб

Это системы, в которых магистральный трубопровод в некоторой точке разветвляется на несколько труб разных длин и разных диаметров, затем трубы вновь объединяются в магистральный трубопровод того же или другого диаметра. Эти системы называются также *кольцевыми*, т. е. закольцовано несколько труб. Преимущество таких систем состоит в том, что обеспечивается надёжность и бесперебойность работы системы (например, одна из ветвей может быть резервной), а также включение труб меньшего диаметра при той же пропускной способности системы.

Рассмотрим кольцевую систему, представленную в плане. Известно манометрическое давление в начале магистрального участка, длины и диаметры всех участков (рис. 6.27).

Параллельно проложенные трубы разветвляются в точке A и соединяются в точке B , лежат на одном горизонте. Для наглядности параллельное соединение труб показано в изометрии. Пусть отсутствуют путевые потребители, а у конечного потребителя C должен быть остаточный (или свободный) напор $h_{\text{ост.}}$.

Следуя принятой методике расчёта сложных систем (см. раздел 6.4), рассмотрим *особенности расчёта систем с параллельным соединением труб*.

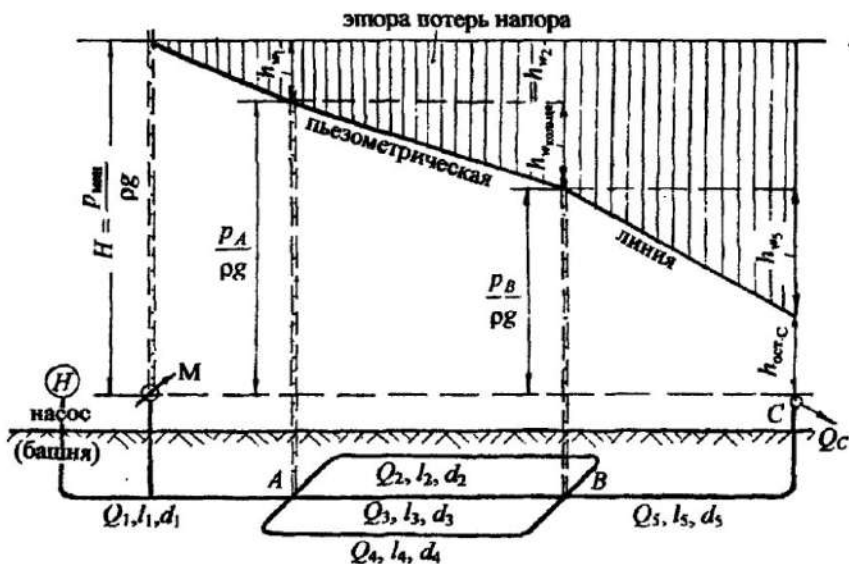


Рис. 6.27

1. **Распределение расхода.** На каждом участке введём обозначение расхода с индексом, соответствующим диаметру: Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 . При отсутствии потребителей по длине системы и наличии только одного конечного потребителя с расходом Q_C расход на магистральном участке равен сумме расходов в параллельных ветвях трубопроводов:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (6.28)$$

На пятом магистральном участке $Q_5 = Q_1$, а также $Q_5 = Q_C$.

2. **Потери напора в системе.** При параллельном соединении труб давление, а следовательно, и **пьезометрический напор** в точках разветвления A и B **одинаковы для любого из параллельных участков.**

На рис. 6.27 пунктирными линиями показаны пьезометры в точках A и B , а также пьезометрические напоры $\frac{p_A}{\rho g}$ и $\frac{p_B}{\rho g}$.

В главе 5 отмечалось, что потери напора в гидравлических сопротивлениях определяются, как разность показаний пьезометров в начале и в конце участков сопротивлений, следовательно, **потери напора в кольце равны потерям напора по любому из параллельных участков:**

$$\frac{P_A}{\rho g} - \frac{P_B}{\rho g} = h_{\text{вкольца}},$$

$$h_{\text{вкольца}} = h_{w_2} = h_{w_3} = h_{w_4}. \quad (6.29)$$

Из равенства потерь напора в параллельных участках трубопроводов можно найти распределение расходов по ветвям в кольце. Приравняем потери по длине, т. е. в формуле (6.29) не учитываем поправочный коэффициент на местные сопротивления:

$$h_{l_2} = h_{l_3} = h_{l_4}, \quad (6.30)$$

$$\text{или с учётом формулы (5.21): } A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3 = A_4 Q_4^2 l_4. \quad (6.31)$$

Имеем *два уравнения* (6.28) и (6.31) *с тремя неизвестными*. Решим их.

В формуле (6.31) выразим Q_3 через Q_2 , затем Q_4 через Q_2 , подставим значения Q_3 и Q_4 в формулу (6.28), получим уравнение с одним неизвестным Q_2 (при условии, что Q_1 задано). Определим Q_2 , затем Q_3 и Q_4 .

$$\text{Итак, приравняем: } A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3,$$

$$\text{выразим } Q_3 \text{ через } Q_2: \quad Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}; \quad (6.32)$$

$$\text{приравняем: } A_2 Q_2^2 l_2 = A_4 Q_4^2 l_4,$$

$$\text{выразим } Q_4 \text{ через } Q_2: \quad Q_4 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}}. \quad (6.33)$$

Подставим значения Q_3 и Q_4 в формулу (6.28):

$$Q_1 = Q_2 \left(1 + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}} + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}} \right), \quad (6.34)$$

получим Q_2 , выраженное через Q_1 :

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\left(1 + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}} + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}} \right)}, \quad (6.35)$$

затем по формулам (6.32) и (6.33) определим Q_3 и Q_4 .

При расчётах формула (6.35) математически становится очень простой, так как $\sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}$ и $\sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}}$ представляют собой простые числа: длины участков заданы, значения коэффициентов A в соответствии с диаметром трубы принимаются по табл. 9 (см. приложение).

Таким образом, рассмотрены два самых важных момента при расчёте кольцевых систем: *расход на магистральном участке равен сумме расходов в параллельных ветвях; потери напора в параллельных участках равны.*

3. *Действующий напор* для представленной кольцевой системы (см. рис. 6.27) с учётом формулы (6.23):

$$H = (1,05 \div 1,1)h_{i_{\text{сст.}}} + h_{\text{ост.С}} = (1,05 \div 1,1)(h_{i_1} + h_{i_{\text{кольца}}} + h_{i_5}) + h_{\text{ост.С}}. \quad (6.36)$$

Прочитаем формулу (6.36): действующий напор должен быть таким, чтобы преодолеть сопротивление в системе и обеспечить остаточный напор у потребителя C .

Учтём потери напора в кольце, например, по второму участку кольца, введём в формулу (6.36) расходы:

$$H = (1,05 \div 1,1) \left(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_5 Q_5^2 l_5 \right) + h_{\text{ост.С}}. \quad (6.37)$$

Следует помнить, что $H = \frac{P_{\text{ман}}}{\rho g}$.

4. На схеме установки (см. рис. 6.27) *строим пьезометрическую линию и эпюру потерь напора* по аналогии с системой последовательно соединённых труб (см. рис. 6.26).

6.4.3. Распределительные сети, или туликовые системы

Это сложные системы, состоящие из разветвлённой сети трубопроводов, имеющие несколько конечных потребителей. Как правило, известно, какими расходами следует обеспечить потребителей, а также какой должен быть остаточный (свободный) напор у потребителя или на какую отметку следует поднять воду у потребителя. При известном расходе ставится также задача подобрать диаметры трубопроводов.

Тупиковые системы принято представлять в плане. Рассмотрим принцип расчёта тупиковой водопроводной системы на примере системы, представленной на рис. 6.28. Система имеет четыре конечных потребителя (A, B, C, D) и один потребитель в точке N по пути движения воды. Остаточные напоры (или высота подъёма) воды у конечных потребителей различные ($h_{\text{ост.}A}, h_{\text{ост.}B}, h_{\text{ост.}C}, h_{\text{ост.}D}$).

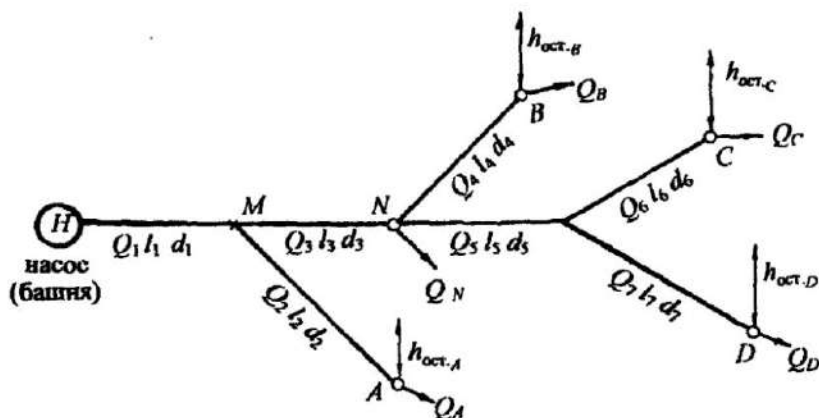


Рис. 6.28

Согласно принятой *методике* расчёта сложных систем (см. раздел 6.4), покажем *особенности расчёта тупиковых систем*.

1. *Распределение расхода*. Расход на каждом участке представим через расходы потребителей. Помним, что на магистральном участке расход равен сумме расходов потребителей. Первый участок является магистральным для всех потребителей:

$$Q_1 = Q_A + Q_N + Q_B + Q_C + Q_D, \text{ а также } Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

На третьем участке:

$$Q_3 = Q_N + Q_B + Q_C + Q_D; \text{ а также } Q_3 = Q_N + Q_4 + Q_5.$$

На пятом участке:

$$Q_5 = Q_C + Q_D; \text{ а также } Q_5 = Q_6 + Q_7.$$

На отдельных участках, ведущих к потребителю, расход равен расходу потребителя:

$$Q_2 = Q_A; Q_4 = Q_B; Q_5 = Q_C; Q_7 = Q_D.$$

2. Потери напора по длине любого из направлений рассчитываются из условия последовательного соединения труб, т. е. суммируются. Для рассматриваемой схемы (см. рис. 6.28) потери напора до потребителя *A*:

$$h_{lA} = h_{l_{1-2}} = h_{l_1} + h_{l_2},$$

до потребителя *B*:
$$h_B = h_{l_{1-3-4}} = h_{l_1} + h_{l_3} + h_{l_4},$$

до потребителей *C* и *D* соответственно:

$$h_{lC} = h_{l_{1-3-5-6}} = h_{l_1} + h_{l_3} + h_{l_5} + h_{l_6};$$

$$h_{lD} = h_{l_{1-3-5-7}} = h_{l_1} + h_{l_3} + h_{l_5} + h_{l_7}.$$

Потери напора с учётом местных сопротивлений по любому направлению

$$h_{w_{напр}} = (1,05 + 1,1)h_{l_{напр}}. \quad (6.38)$$

Поправочный коэффициент на местные сопротивления (1,05+1,1) принимается согласно поставленному условию в задаче.

3. Потребный действующий напор (*H*), или высота водонапорной башни, определяется по максимальной величине суммы потерь напора и остаточного напора по одному из направлений. В частности, для представленной схемы (см. рис. 6.28) действующий напор:

$$H = (h_{w_{напр.}} + h_{ост.})_{\max}, \quad (6.39)$$

где
$$\left. \begin{array}{l} h_{wA} + h_{ост.A} \\ h_{wB} + h_{ост.B} \\ h_{wC} + h_{ост.C} \\ h_{wD} + h_{ост.D} \end{array} \right\} \text{сравниваем, из них выбираем максимальную величину:}$$

т. е.
$$(h_{w_{напр.}} + h_{ост.})_{\max}.$$

4. Дополнительным условием в задаче может быть расчёт *диаметра трубопровода* по заданному расходу потребителя, при этом рекомендуется эксплуатационная скорость в пределах $v_{\text{эк}} = (1,0 \div 1,5)$ м/с.

Диаметр трубопровода на любом участке рассчитывается через расход:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{\text{эк}}}}. \quad (6.40)$$

По окончании расчёта, как правило, строится пьезометрическая линия.

6.4.4. Системы с путевым расходом жидкости

Эти системы включают трубопровод, в котором жидкость раздается в ряде пунктов по его длине. При большом количестве таких пунктов с достаточной точностью можно считать, что расход жидкости распределяется равномерно по длине l с интенсивностью $q = Q_{\text{пут.}}/l$. Такие трубопроводы называются также трубопроводами с равномерной раздачей жидкости.

Наиболее характерным является случай, когда в трубопроводе кроме равномерного путевого расхода $Q_{\text{пут.}} = ql$ имеется транзитный расход $Q_{\text{тр.}}$, проходящий по трубе и забираемый в конце трубопровода (рис. 6.29). При этом общий расход жидкости, поступающий в трубопровод:

$$Q = Q_{\text{тр.}} + Q_{\text{пут.}} = Q_{\text{тр.}} + ql.$$

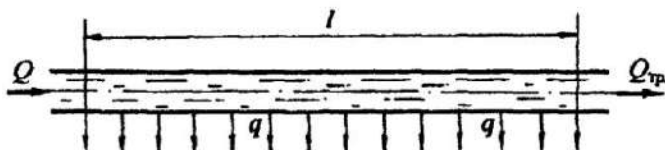


Рис. 6.29

Основным вопросом для систем с путевым расходом является определение величины потеряннного напора. Общие потери по длине трубопровода с учётом путевого и транзитного расходов можно определить по формуле

$$h_l = Al \left(Q_{\text{тр.}}^2 + Q_{\text{тр.}} Q_{\text{пут.}} + \frac{Q_{\text{пут.}}^2}{3} \right), \quad (6.41)$$

где A – удельное сопротивление для заданного диаметра трубы, принимается по табл. 9 (см. приложение).

Основные теоретические положения по расчёту сложных систем рассмотрены. Ниже предлагаются примеры решения задач с построением пьезометрических (напорных) линий.

6.5. Примеры решения задач по теме: “Расчёт сложных трубопроводных систем”

Задача 6.5.1. Сложная система с водонапорной башней включает кольцевое соединение труб и доставляет воду двум потребителям (рис. 6.30).

Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, питающей два потребителя: A с расходом $Q_A = 18$ л/с и C с расходом $Q_C = 32$ л/с.

Система включает магистральный трубопровод $d_1 = 250$ мм; $l_1 = 600$ м; два параллельно проложенных трубопровода: $d_2 = 150$ мм; $l_2 = 550$ м; $d_3 = 100$ мм; $l_3 = 400$ м и трубопровод $d_4 = 200$ мм; $l_4 = 720$ м, подающий воду потребителю C . Остаточный напор у потребителя C должен быть не менее 10 м ($h_{\text{ост.с}} \geq 10$ м).

Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

Решение. Руководствуемся *методикой* расчёта сложных систем с параллельным соединением труб (см. раздел 6.4.2).

1. *Распределение расхода* (пропускной способности). На каждом участке вводим обозначение расхода с индексом, соответствующим индексу диаметра трубы (см. рис. 6.30).

Расход на первом участке равен сумме расходов потребителей:

$$Q_1 = Q_A + Q_C; \quad Q_1 = 50 \text{ л/с} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Сумма расходов в параллельных трубопроводах равна расходу потребителя C :

$$Q_2 + Q_3 = Q_C; \quad Q_2 + Q_3 = 32 \text{ л/с} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6.42)$$

Пропускная способность четвёртого участка равна расходу потребителя C : $Q_4 = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}$.

2. *Приравниваем потери напора по длине в параллельных трубопроводах кольца*, чтобы найти распределение расхода в параллельных участках (см. раздел 6.4.2):

$$h_{i_2} = h_{i_3}, \text{ с учётом формулы (5.21): } A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3.$$

$$\text{Выразим } Q_3 \text{ через } Q_2: Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}.$$

Согласно данным табл. 9 (см. приложение), для $d_2 = 150$ мм удельное сопротивление $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; для $d_3 = 100$ мм значение $A_3 = 265 \text{ с}^2/\text{м}^6$, тогда

$$Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{31,18 \cdot 550}{265 \cdot 400}} = 0,4 Q_2.$$

Подставим Q_3 , выраженное через Q_2 , в формулу (6.42):

$$Q_2 + 0,4 Q_2 = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}, \text{ отсюда } Q_2 = 0,023 \text{ м}^3/\text{с}; \text{ значит } Q_3 = 0,009 \text{ м}^3/\text{с}.$$

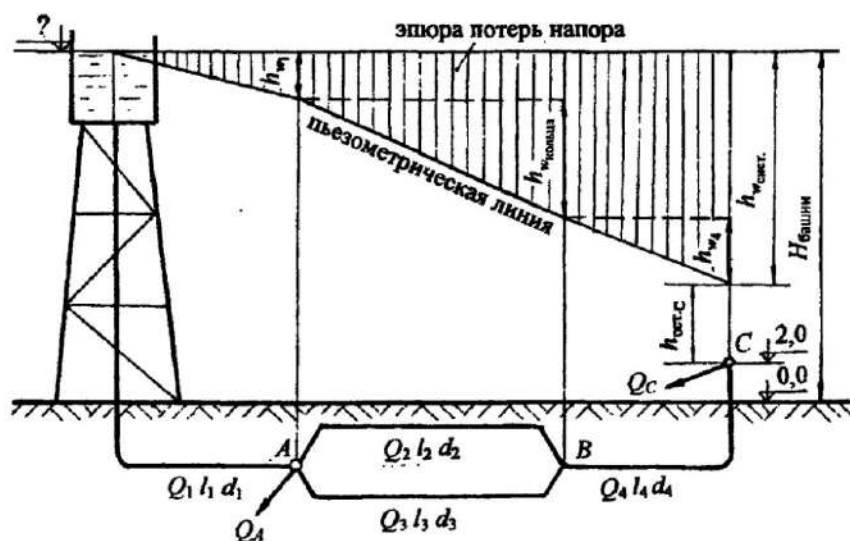


Рис. 6.30

3. Геодезическая высота, или отметка уровня воды в водонапорной башне относительно нулевой отметки (см. рис. 6.30):

$$H_{\text{башни}} = 2,0 + h_{\text{пот.с.}} + h_{\text{в.сист.}}$$

Рассчитаем потери напора в системе:

$$h_{\text{всист.}} = 1,1(h_1 + h_{l_{\text{кольца}}} + h_{l_4}),$$

где 1,1 – поправочный коэффициент на местные сопротивления, так как по условию задачи потери напора в местных сопротивлениях составляют 10 % от потерь по длине,

$h_{l_{\text{кольца}}}$ – потери напора по длине в кольце, их учтём по одной из ветвей, например, по второй: $h_{l_{\text{кольца}}} = h_{l_2}$.

Потери напора в системе с учётом формулы (5.21):

$$h_{\text{всист.}} = 1,1(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_4 Q_4^2 l_4).$$

Рассчитаем потери напора в системе, принимая $A_1 = 2,11 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_4 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$ по табл. 9 (см. приложение):

$$\begin{aligned} h_{\text{всист.}} &= 1,1(2,11 \cdot 0,05^2 \cdot 600 + 31,18 \cdot 0,023^2 \cdot 550 + 6,78 \cdot 0,032^2 \cdot 720) = \\ &= 3,5 + 10,0 + 5,5 = 19,0 \text{ м.} \end{aligned}$$

Для построения пьезометрической линии имеем потери напора на каждом участке:

$$h_{w_1} = 3,5 \text{ м}; \quad h_{w_{\text{кольца}}} = h_{w_2} = h_{w_3} = 10,0 \text{ м}; \quad h_{w_4} = 5,5 \text{ м}.$$

На рис. 6.30 откладываем в масштабе потери напора на каждом участке и строим пьезометрическую (напорную) линию, как показано в разделе 6.4.2.

Находим отметку уровня воды в водонапорной башне:

$$H_{\text{башни}} = 2,0 + 19,0 + 10,0 = 31,0 \text{ м}.$$

Ответ: отметка уровня воды в водонапорной башне равна 31,0 м.

Задача 6.5.2. Тупиковая водопроводная система имеет пять участков труб, длины и диаметры которых указаны на рис. 6.31. В системе четыре потребителя с расходами: $Q_A = 10 \text{ л/с}$; $Q_B = 18 \text{ л/с}$; $Q_C = 12 \text{ л/с}$; $Q_D = 8 \text{ л/с}$; на пятом участке равномерная раздача воды с путевым расходом $Q_{\text{пут.}} = 15 \text{ л/с}$.

Определить высоту водонапорной башни (H), рассчитать диаметры труб на первом и третьем участках системы при условии, что эксплуатационная скорость $v_{\text{экс.}} \leq 1,4 \text{ м/с}$.

Принять $l_1 = 500$ м; $l_3 = 450$ м; $d_2 = 150$ мм; $l_2 = 550$ м; $d_4 = 125$ мм; $l_4 = 600$ м; $d_5 = 150$ мм; $l_5 = 700$ м. Потери напора в местных сопротивлениях составляют 5 % от потерь по длине.

Построить пьезометрическую линию.

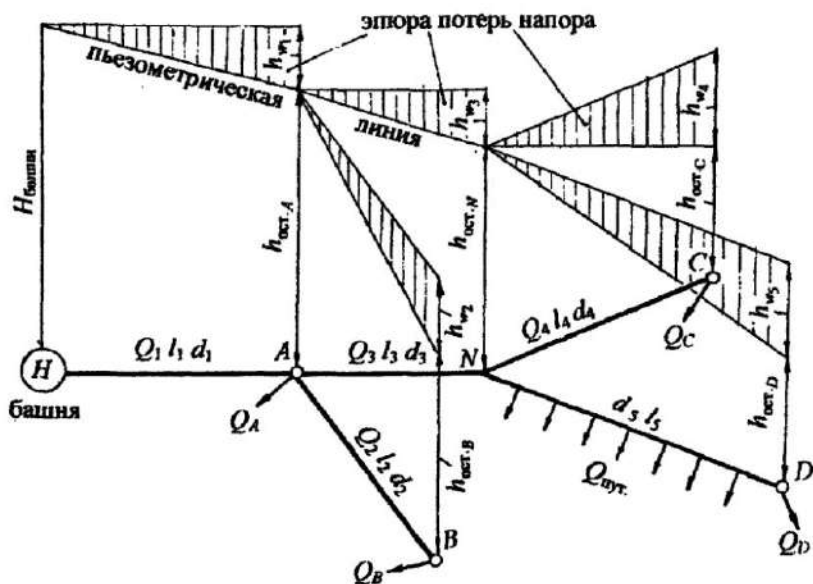


Рис. 6.31

Решение. Воспользуемся *методикой* расчёта тупиковых систем и систем с путевым расходом (см. разделы 6.4.3 и 6.4.4).

1. **Обозначим на схеме** (рис. 6.31) **расходы** на каждом участке с соответствующими индексами и найдём их значение, при этом переводим л/с в м³/с.

Первый участок является магистральным для всех потребителей:

$$Q_1 = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_{\text{пут.}} = 0,063 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Третий участок магистральный для потребителей *С* и *D* и путевого расхода:

$$Q_3 = Q_C + Q_D + Q_{\text{пут.}} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Для второго и четвёртого участков:

$$Q_2 = Q_B = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_4 = Q_C = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Рассчитаем *диаметры труб* на первом и третьем участках, пользуясь формулой (6.40):

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{\text{экс}}}}.$$

Получим:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,063}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,239 \text{ м, принимаем } d_1 = 250 \text{ мм};$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,035}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,178 \text{ м, принимаем } d_3 = 200 \text{ мм}.$$

3. Определим *потери напора на участках 1-4* с учётом местных сопротивлений по формуле:

$$h_w = 1,05 h_l = 1,05 A Q^2 l.$$

Для всех диаметров труб выбираем значения коэффициентов удельного сопротивления по табл. 9 (см. приложение): $A_1 = 2,11 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_4 = 81,6 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_5 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$.

$$\text{Получим } h_{w1} = 1,05 \cdot 2,11 \cdot 0,063^2 \cdot 500 = 4,4 \text{ м,}$$

по аналогии: $h_{w2} = 5,8 \text{ м}$; $h_{w3} = 3,9 \text{ м}$; $h_{w4} = 7,4 \text{ м}$.

Потери напора на пятом участке с учётом путевого расхода ($Q_{\text{пут.}}$) и транзитного расхода в виде расхода потребителя D (Q_D), согласно формуле (6.41):

$$h_{w5} = 1,05 A_5 l_5 \left(Q_D^2 + Q_D Q_{\text{пут.}} + \frac{Q_{\text{пут.}}^2}{3} \right),$$

после подстановки численных значений: $h_{w5} = 5,9 \text{ м}$.

Рассчитаем потери напора по трём направлениям к потребителям B ; C и D , принимая последовательное соединение труб:

$$h_{wB} = h_{w_{1-2}} = h_{w_1} + h_{w_2} = 10,2 \text{ м};$$

$$h_{wC} = h_{w_{1-3-4}} = h_{w_1} + h_{w_3} + h_{w_4} = 15,7 \text{ м};$$

$$h_{wD} = h_{w_{1-3-5}} = h_{w_1} + h_{w_3} + h_{w_5} = 14,2 \text{ м}.$$

4. По формуле (6.39) определим *высоту водонапорной башни*:

$$H = (h_{w_{\text{напр.}}} + h_{\text{ост.}})_{\text{max}},$$

в данной задаче остаточный напор у всех конечных потребителей принимаем равным 10 м, поэтому сравниваем потери напора по всем направлениям и выбираем максимальные, такими являются потери напора до потребителя С:

$$h_{wC} = h_{w_{\text{max}}} = 15,7 \text{ м}.$$

Таким образом, высота водонапорной башни

$$H = h_{wC} + h_{\text{ост.С}} = 15,7 + 10,0 = 25,7 \text{ м}.$$

5. Строим *пьезометрическую линию*. Для первого и третьего участков пьезометрическую линию построим в вертикальной плоскости, для других участков пьезометрическую линию представим в изометрии путём параллельного переноса направления трубопровода (см. рис. 6.31).

Построение можно несколько упростить. Чтобы на чертеже не было наложения эпюр потерь напора, можно от остаточного напора в точках А и N откладывать потери напора на участках втором, четвёртом и пятом, как представлено на рис. 6.31.

Из построения пьезометрической линии следует, что остаточные напоры у всех потребителей, кроме потребителя С, больше 10,0 м.

Вертикальной штриховкой показана *эпюра потерь напора*.

В примерах решения задач 6.5.1 и 6.5.2 расчёты сложных систем проведены без составления уравнения Бернулли, т.к. эти расчёты аналогичны расчётам простых систем (см. раздел 6.2). На примере решения задачи 6.5.3 представим расчёт сложной системы путём составления уравнения Бернулли.

Задача 6.5.3. Из водонапорной башни A , на поверхности воды в которой действует избыточное давление ($p_{\text{ман}}$), по трём последовательно соединённым трубам подаётся вода трём потребителям с расходами:

$Q_B = 15 \text{ л/с}$; $Q_C = 8 \text{ л/с}$; $Q_D = 12 \text{ л/с}$. Диаметры и длины участков системы принять: $d_1 = 200 \text{ мм}$, $l_1 = 700 \text{ м}$; $d_2 = 150 \text{ мм}$, $l_2 = 600 \text{ м}$; $d_3 = 125 \text{ мм}$, $l_3 = 500 \text{ м}$. Остаточный (свободный) напор у потребителя D должен быть не менее 10 м ($h_{\text{ост.}D} \geq 10 \text{ м}$). Действующий напор водонапорной башни $H = 15 \text{ м}$ считать постоянным (рис. 6.32).

Определить, каким должно быть показание манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в башне для обеспечения водой потребителей при условии, что местные сопротивления составляют 10% от потерь по длине. Трубы водопроводные нормальные. Построить пьезометрическую линию.

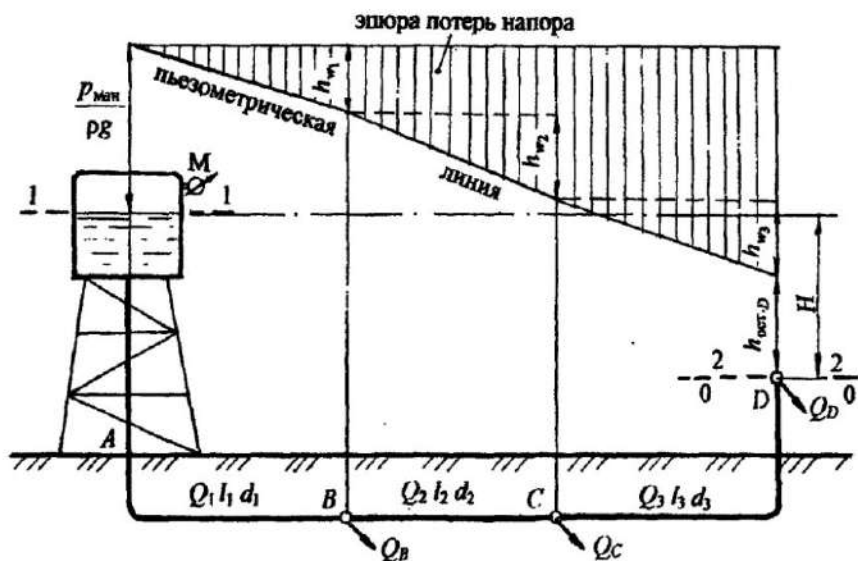


Рис. 6.32

Решение. Для расчёта системы (см. рис. 6.32) воспользуемся уравнением Бернулли по принятой методике (см. раздел 4.5.7).

1. **Выбираем два сечения** по свободной поверхности воды в башне, где скорость воды можно считать равной нулю, и у потребителя D .

2. **Сечения нумеруем по направлению движения воды:** 1-1 по свободной поверхности воды, где установлен манометр, 2-2 по трубопроводу у потребителя D .

3. В выбранных сечениях *учитываем абсолютное давление:*

$$P_1 = P_a + P_{\text{ман}}; \quad P_2 = P_a + \rho g h_{\text{ост } D}.$$

4. *Плоскость сравнения 0-0 совместим с сечением 2-2*, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. Записываем уравнение Бернулли в общем виде и производим подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= H; & z_2 &= 0; \\ P_1 &= P_a + P_{\text{ман}}; & P_2 &= P_a + \rho g h_{\text{ост } D}; \\ v_1 &= 0; & v_2 &= v; \quad \alpha_2 = 1,0; \quad h_{w1-2} = h_{w_{\text{сст}}}. \end{aligned}$$

После подстановки параметров получаем:

$$H + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{\rho g h_{\text{ост } D}}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_{w_{\text{сст}}}.$$

Как указано в разделе 6.4, скоростным напором $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$, как малой величиной, можно пренебречь, поэтому после соответствующих сокращений уравнение Бернулли принимает вид:

$$H + \frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} = h_{\text{ост } D} + h_{w_{\text{сст}}}. \quad (6.43)$$

Прочитаем уравнение (6.43): за счёт избыточного напора $\left(\frac{P_{\text{ман}}}{\rho g}\right)$ на поверхности воды в башне и действующего напора (H) происходит преодоление всех сопротивлений в системе ($h_{w_{\text{сст}}}$) и обеспечение остаточного напора у потребителя D ($h_{\text{ост } D}$).

Чтобы рассчитать показание манометра ($P_{\text{ман}}$) в формуле (6.43), следует определить потери напора в системе ($h_{w_{\text{сст}}}$).

Воспользуемся методикой расчёта сложных систем (см. раздел 6.4).

1. Распределение расхода. На каждом участке вводим обозначение расхода с индексом, соответствующим индексу диаметра трубы: Q_1 ; Q_2 ; Q_3 .

Рассчитаем расход на каждом участке через расходы потребителей:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_B + Q_C + Q_D; & Q_1 &= 35 \text{ л/с} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}; \\ Q_2 &= Q_C + Q_D; & Q_2 &= 20 \text{ л/с} = 0,020 \text{ м}^3/\text{с}; \\ Q_3 &= Q_D; & Q_3 &= 12 \text{ л/с} = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

2. Определим потери напора в системе - $h_{w_{\text{снст}}}$. При последовательном соединении труб потери напора на всех участках суммируются (см. раздел 6.4.1). С учётом поправочного коэффициента на местные сопротивления получим:

$$h_{w_{\text{снст}}} = 1,1(h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3}),$$

затем с учётом формулы (5.21):

$$h_{w_{\text{снст}}} = 1,1(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_3 Q_3^2 l_3). \quad (6.44)$$

Рассчитаем потери напора в системе, принимая $A_1 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 81,60 \text{ с}^2/\text{м}^6$ (см. приложение табл. 8).

Для построения пьезометрической (напорной) линии нужно знать потери напора на каждом участке трубопровода, поэтому формулу (6.44) представим в виде трёх слагаемых:

$$\begin{aligned} h_{w_1} &= 1,1 A_1 Q_1^2 l_1; & h_{w_1} &= 1,1 \cdot 6,78 \cdot 0,035^2 \cdot 700 = 6,4 \text{ м}; \\ h_{w_2} &= 1,1 A_2 Q_2^2 l_2; & h_{w_2} &= 1,1 \cdot 31,18 \cdot 0,020^2 \cdot 600 = 8,2 \text{ м}; \\ h_{w_3} &= 1,1 A_3 Q_3^2 l_3; & h_{w_3} &= 1,1 \cdot 81,60 \cdot 0,012^2 \cdot 500 = 6,5 \text{ м}. \\ h_{w_{\text{снст}}} &= 6,4 + 8,2 + 6,5 = 21,1 \text{ м}. \end{aligned}$$

Обратимся к формуле (6.43) для определения показания манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в водонапорной башне:

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = h_{w_{\text{снст}}} + h_{\text{ост}D} - H;$$

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = 21,1 + 10 - 15 = 16,1 \text{ м},$$

отсюда $p_{\text{ман}} = 16,1 \rho g = 16,1 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 157 \cdot 10^3 \text{ Па} = 157 \text{ кПа}$.

Показание манометра можно представить в атмосферах, помня, что $1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.}$, получим: $\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = 16,1 \text{ м}$ соответствует манометрическому давлению $p_{\text{ман}} = 1,61 \text{ ат}$.

Ответ: показание манометра $p_{\text{ман}} = 157 \text{ кПа}$ или $p_{\text{ман}} = 1,61 \text{ ат}$.

Ниже в разделе 6.6 предлагаются задачи для самостоятельной работы, чтобы проверить знания по расчёту сложных трубопроводных систем.

**6.6. Задачи для самостоятельной работы по теме:
“Расчёт сложных трубопроводных систем”**

Задача 6.6.1

Водонапорная башня *A* с отметкой 22,0 м питает два потребителя - *B* и *C* - через систему двух последовательно соединённых труб. Пьезометрический напор в конце первого участка $h_p = 15,0$ м. Определить расход воды на первом участке (Q_1) и расход потребителя *C* (Q_C), а также отметку потребителя *C*. Принять расход потребителя *B* $Q_B = 10$ л/с. Диаметры и длины участков водопроводной системы соответственно: $d_1 = 150$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 125$ мм, $l_2 = 500$ м. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 5 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 6.33).

Ответ: $Q_1 = 19$ л/с; $Q_C = 9$ л/с; отметка потребителя *C* равна 11,5 м.

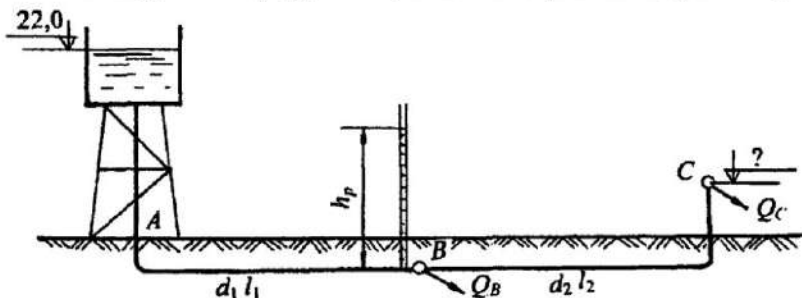


Рис. 6.33

Задача 6.6.2

Из водонапорной башни *A* обеспечиваются водой три потребителя в точках *B*, *C* и *D*. Пропускная способность первого участка $Q_1 = 30$ л/с; расходы потребителей: $Q_B = 12$ л/с; $Q_C = 10$ л/с. Определить расход потребителя *D* (Q_D , л/с), а также отметку свободной поверхности воды в водонапорной башне, если остаточный напор у потребителя *D* ($h_{ост.D}$) должен быть не менее 10 м. Принять диаметры и длины участков труб: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Трубы водопроводные нормальные, местные сопротивления составляют 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 6.34).

Ответ: $Q_D = 8$ л/с; отметка свободной поверхности воды в башне 24 м.

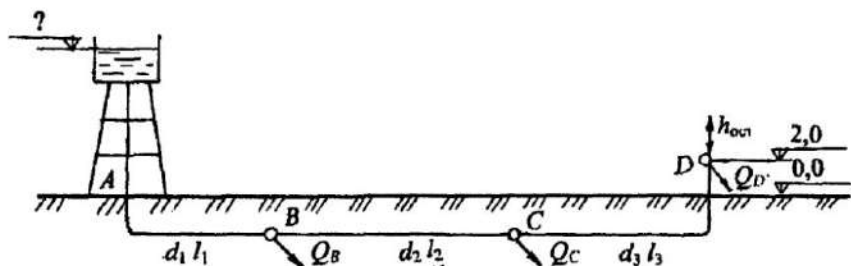


Рис. 6.34

Задача 6.6.3

Из водонапорного бака A с избыточным давлением на поверхности $P_{\text{ман}} = 19,6$ кПа по трём последовательно соединённым трубам вода подаётся потребителям B , C и D с одинаковыми расходами: $Q_B = Q_C = Q_D = Q$. У потребителя D - выход воды в атмосферу. Определить расход воды на каждом участке трубы, диаметры и длины участков соответственно: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Действующий напор $H = 15$ м считать постоянным. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери принять равными 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 6.35).

Ответ: $Q_1 = 32,4$ л/с; $Q_2 = 21,6$ л/с; $Q_3 = 10,8$ л/с.

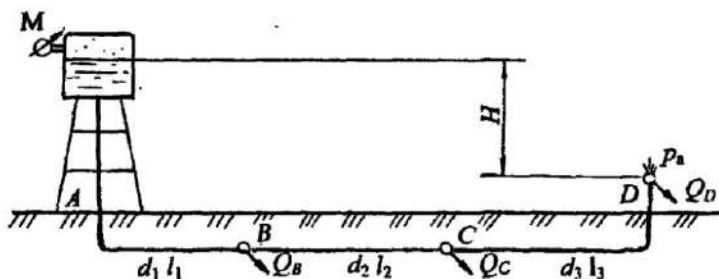


Рис. 6.35

Задача 6.6.4

От насосной установки по трубопроводной системе с параллельным соединением труб вода подаётся двум потребителям - *A* и *B* - с расходами $Q_A = 10$ л/с; $Q_B = 12$ л/с. Длины и диаметры участков системы: $d_1 = 100$ мм, $l_1 = 500$ м; $d_2 = 125$ мм, $l_2 = 700$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 600$ м. Высота подъёма воды у потребителя *B* - $H_B = 8$ м. Определить распределение расходов в параллельных участках труб, а также показание манометра, установленного после насоса ($p_{\text{ман}}$). Местные сопротивления принять равными 5 % от потерь по длине. Считать, что трубы водопроводные нормальные уложены на одном горизонте (рис. 6.36).

Ответ: $q_1 = 0,009$ м³/с; $q_2 = 0,013$ м³/с; $p_{\text{ман}} = 2,55$ ат.

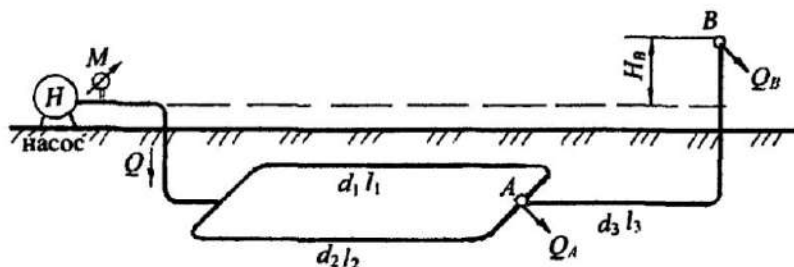


Рис. 6.36

Задача 6.6.5

Тупиковая система, представленная в плане, предназначена для снабжения водой четырех потребителей - *A*, *B*, *C* и *D*. Расходы потребителей: $Q_A = 16$ л/с; $Q_B = 14$ л/с; $Q_C = 12$ л/с; $Q_D = 8$ л/с.

Расчитать диаметры труб на каждом участке при условии, что средняя скорость в трубах не должна превышать $v_{\text{ср.}} = 1,2$ м/с. Определить высоту водонапорной башни *H*, если остаточный напор ($h_{\text{ост}}$) у потребителей должен быть не менее 10 м. Длины участков сети: $l_1 = 700$ м; $l_2 = 400$ м; $l_3 = 600$ м; $l_4 = 350$ м. Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь по длине. Построить в аксонометрии пьезометрическую линию (рис. 6.37).

Ответ: высота водонапорной башни $H_{\text{башни}} = 28,7$ м.

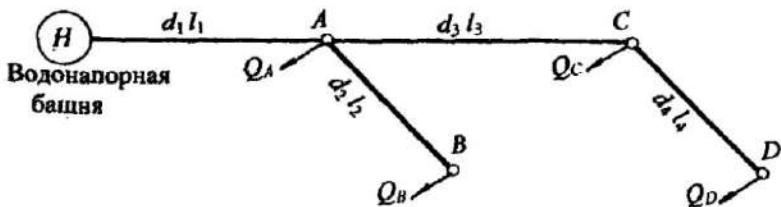


Рис. 6.37

Задача 6.6.6

Два цеха обогатительной фабрики B и C с расходами $Q_B = 20$ л/с и $Q_C = 15$ л/с питаются от насосной установки. Отметки, на которые надо поднять воду у потребителей: $h_B = 12,0$ м; $h_C = 10,0$ м; диаметры и длины трубопроводов: $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Определить расход воды на магистральном участке (Q_1), рассчитать диаметр трубы первого участка (d_1) при условии, что эксплуатационная скорость не должна превышать $v_{\text{эксп.}} = 1,2$ м/с, длина первого участка $l_1 = 600$ м. Рассчитать показание манометра ($p_{\text{ман.}}$), установленного после насоса. Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь по длине (рис. 6.38).

Ответ: $Q_1 = 35$ л/с; $d_1 = 200$ мм; $p_{\text{ман.}} = 2,44$ ат.

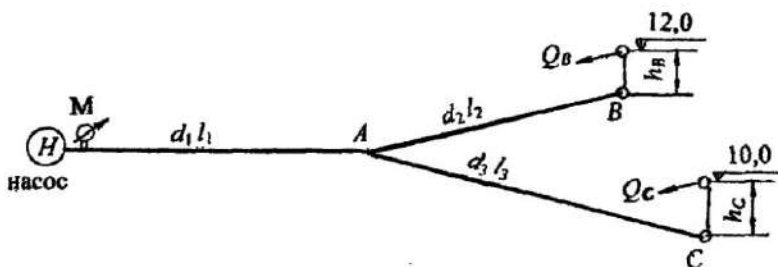


Рис. 6.38

Задача 6.6.7

Система водоснабжения, представленная в плане, имеет три потребителя - A , B и C . Определить расходы воды у потребителей (Q_A , Q_B , Q_C в л/с), если свободные (или остаточные) напоры у потребителей: $h_A = 20$ м; $h_B = 14$ м; $h_C = 15$ м. Показание манометра, установленного после насоса, $p_{ман} = 2,7$ ат. Потребители расположены на одном горизонте. Диаметры и длины участков сети: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь по длине. Построить в аксонометрии пьезометрическую линию (рис. 6.39).

Ответ: расходы потребителей: $Q_A = 9,0$ л/с; $Q_B = 19,0$ л/с; $Q_C = 12$ л/с.

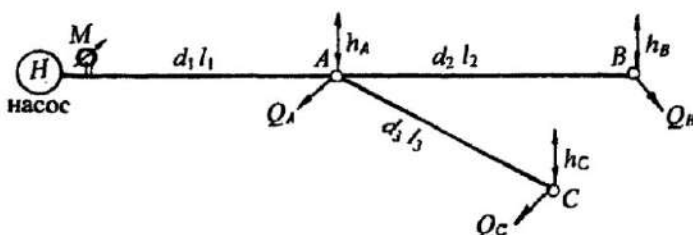


Рис. 6.39

Задача 6.6.8

Определить, каким должно быть давление на поверхности воды в закрытом резервуаре ($p_{ман1}$), из которого по системе труб с кольцевым соединением вода поступает в другой закрытый резервуар с давлением на поверхности $p_{ман2} = 0,2$ ат. Общий расход воды в системе $Q = 45,0$ л/с.

Длины и диаметры водопроводной сети: $d_1 = 250$ мм, $l_1 = 500$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 300$ м; $d_3 = 100$ мм, $l_3 = 250$ м; $d_4 = 200$ мм, $l_4 = 400$ м. Разность уровней воды в резервуарах $H = 4$ м. Трубы водопроводные нормальные. Местные сопротивления принять равными 10 % от потерь по длине.

Построить пьезометрическую линию (рис. 6.40).

Ответ: показание манометра в питающем резервуаре $p_{ман1} = 1,76$ ат.

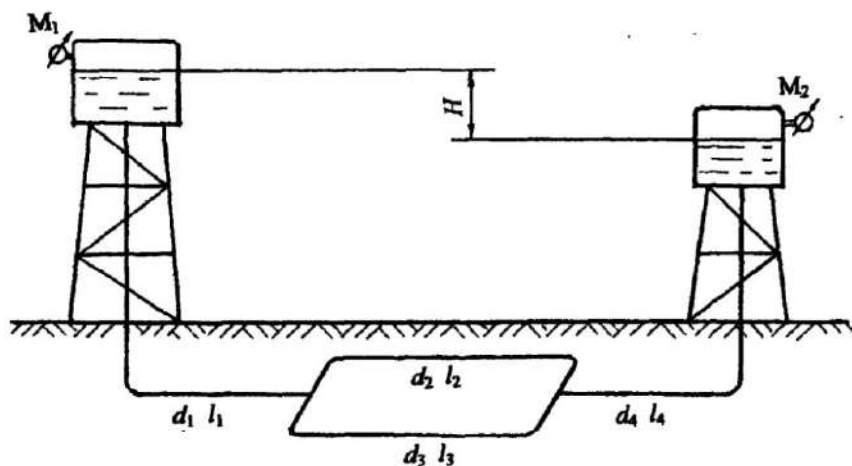


Рис. 6.40

Задача 6.6.9

От насосной установки по двум трубам $d_1 = 250$ мм, $l_1 = 600$ м и $d_2 = 200$ мм, $l_2 = 400$ м вода подаётся двум потребителям A и B с расходами $Q_A = 30$ л/с; $Q_B = 10$ л/с. На втором участке предусмотрена равномерная раздача воды с путевым расходом $Q_{\text{пут.}} = 20$ л/с (рис. 6.41).

Определить остаточные напоры у потребителей A и B , если показание манометра, установленного после насоса, $p_{\text{ман}} = 2,0$ ат.

Трубы водопроводные нормальные. Местные сопротивления принять равными 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

Ответ: $h_{\text{ост.}A} = 15,0$ м; $h_{\text{ост.}B} = 13,7$ м.

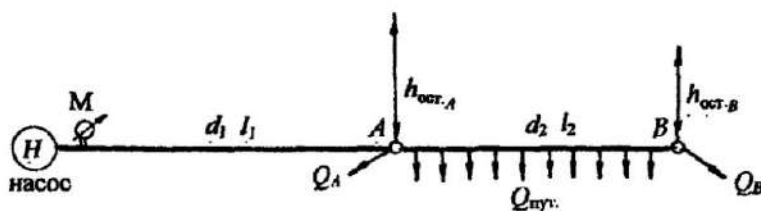


Рис. 6.41

Задача 6.6.10

Из двух напорных резервуаров - *A* и *C* - вода подаётся потребителю *B* с расходом $Q_B = 10$ л/с. Определить расходы воды из резервуаров Q_A и Q_C , построить пьезометрическую линию, если длины и диаметры участков сети: $d_1 = 100$ мм, $l_1 = 400$ м; $d_2 = 125$ мм, $l_2 = 250$ м. Отметка резервуара *A* равна 17,8 м, резервуара *C* - 12,0 м. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери принять равными 5 % от потерь по длине (рис. 6. 42).

Ответ: расходы из резервуаров: $Q_A = 7,31$ л/с; $Q_C = 2,69$ л/с.

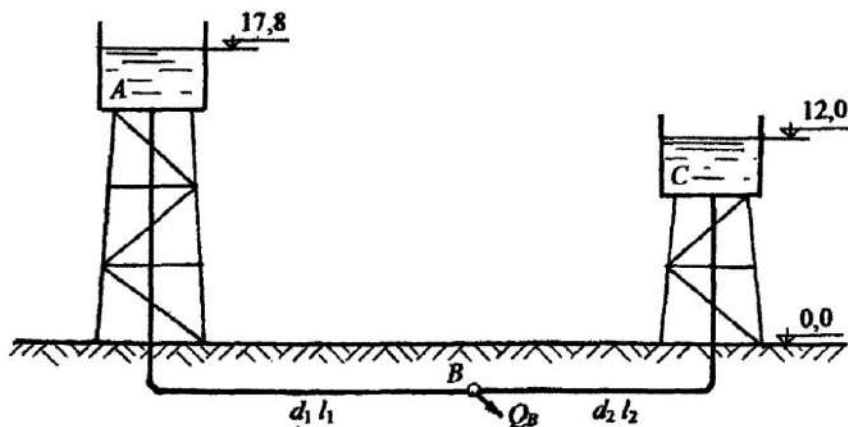


Рис. 6.42

Задача 6.6.11

Насос, дающий подачу $Q = 20$ л/с, перекачивает воду в резервуар по трём параллельным трубам под уровень $H = 3,0$ м. Определить показание манометра ($p_{\text{ман}}$), установленного на линии нагнетания, а также расходы воды в каждой трубе. Принять диаметры и длины параллельных участков сети: $d_1 = 150$ мм, $l_1 = 450$ м; $d_2 = 100$ мм, $l_2 = 400$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 450$ м. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери составляют 10 % от потерь по длине (рис. 6.43).

Оценить, как изменится показание манометра, если один или два из параллельных трубопроводов будут отключены.

Ответ: $Q_1 = 10$ л/с; $Q_2 = 3,7$ л/с; $Q_3 = 6,3$ л/с; $p_{\text{ман}} = 0,46$ ат.

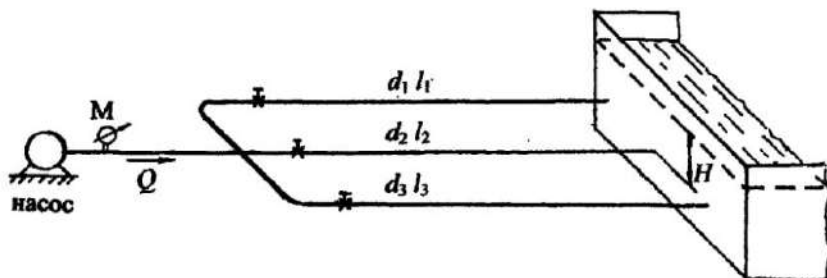


Рис. 6.43

Задача 6.6.12

Из напорного бака *A* вода подаётся двум потребителям - *B* и *C* (рис. 6.44) на отметку 3,0 м при необходимых расходах $Q_B = 10$ л/с; $Q_C = 25$ л/с по трубам: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 500$ м; $d_2 = 200$ мм, $l_2 = 650$ м. На первом трубопроводе предусмотрена непрерывная раздача воды в виде путевого расхода $Q_{\text{пут.}} = 20$ л/с.

Определить отметку уровня воды в напорном баке *A*. Трубы водопроводные нормальные, потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь напора по длине.

Ответ: отметка уровня воды в напорном баке равна 6,0 м.

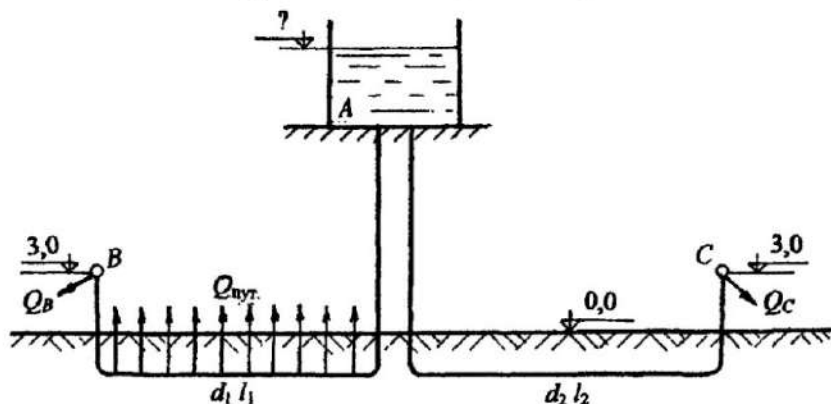


Рис. 6.44

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

В инженерной практике часто встречаются случаи истечения жидкости через отверстия и насадки, представляющие собой короткие патрубки различной конфигурации. Путём расчёта истечения жидкости из отверстий и насадков решаются такие технические задачи, как измерение количества проходящей жидкости, создание сильной дальнобойной и компактной струи, распространение свободной струи, конструирование сопел и форсунок и др.

Истечение может происходить при *постоянном* или *переменном напоре*. В первом случае движение жидкости считается установившимся.

Истечение жидкости может происходить в атмосферу и называется *свободным* истечением, а также в другой резервуар, заполненный жидкостью. Такое истечение называется *истечением под уровень* или *истечением через затопленное отверстие*.

Классификация отверстий

1. Малое отверстие в тонкой стенке (незатопленное и затопленное).
2. Малое отверстие в толстой стенке. Аналогом является короткий патрубок длиной $l = (3 + 5)d_{\text{отв}}$ ($d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия), присоединённый к малому отверстию.
3. Большое отверстие в тонкой стенке.

Малым считается отверстие, если разность напоров над верхней и нижней кромками отверстия не превышает 10 % вертикального размера отверстия. *Действующий напор принимается по оси отверстия*.

В противном случае, если разность напоров над верхней и нижней кромками отверстия превышает 10 %, отверстие считается *большим*. При расчёте такого отверстия учитываются напоры над верхней и нижней кромками отверстия.

Тонкой считается стенка, если толщина её (δ) не превышает трёх линейных размеров отверстия. Например, для круглого отверстия $\delta \leq 3 d_{\text{отв}}$; для квадратного отверстия $\delta \leq 3a$ (a – сторона квадрата).

Толстой считается стенка, толщина которой $\delta = (3 + 5)d_{\text{отв}}$. Если толстую стенку убрать, оставить только ограничение, например, в виде патрубка, то такой патрубок называется *гидравлическим насадком*.

Итак, *гидравлический насадок* – это короткий патрубок длиной $l = (3 + 5)d$, присоединённый к малому отверстию в тонкой стенке.

Если длина патрубка $l > 5d$, то такое движение жидкости следует рассматривать как движение в короткой трубе.

Рассмотрим *теоретические основы* расчёта истечения жидкости через отверстия и насадки.

7.1. Истечение жидкости из малого незатопленного и затопленного отверстий в тонкой стенке

Под расчётом отверстия понимается определение пропускной способности отверстия, или расхода (Q).

Рассмотрим малое отверстие в тонкой стенке закрытого резервуара, на поверхности жидкости в котором действует абсолютное давление p_0 , в общем случае не равное атмосферному (рис. 7.1, а). Площадь живого сечения отверстия ω , действующий напор по оси отверстия H , уровень воды в резервуаре постоянный.

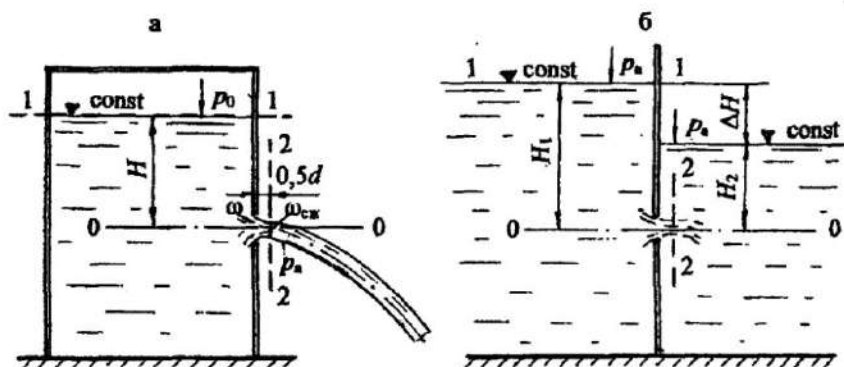


Рис. 7.1

При истечении жидкости через малое отверстие на расстоянии $0,5d$ происходит *сжатие* (инверсия) струи. Это явление объясняется инерцией частиц жидкости, параболической траекторией струек в потоке, которые пересекаются, уменьшая при этом сечение. В сжатом сечении (площадь $\omega_{сж}$) движение жидкости можно считать установившимся и применить для него уравнение Бернулли.

Для определения расхода жидкости через малое незатопленное отверстие, т. е. свободное истечение в атмосферу, используем уравнение Бернулли, согласно принятой методике (см. раздел 4.5.7).

1. **Выберем два сечения:** по свободной поверхности жидкости в резервуаре, проведём его горизонтально, здесь скорость $v = 0$, и на выходе струи в атмосферу по сжатому сечению, это сечение проведём нормально к направлению движения струи.

2. Сечения 1-1 и 2-2 *проинтегрируем по направлению движения жидкости.*

3. В выбранных сечениях учтём *абсолютное давление*. Подчеркнём, что давление в сжатом сечении равно атмосферному (выход жидкости в атмосферу): $p_1 = p_0$; $p_2 = p_a$.

4. Плоскость сравнения 0-0 проведём через ось отверстия, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. Запишем уравнение Бернулли (см. формулу (4.15)) в общем виде и сделаем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1, 2};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= H; & z_2 &= 0; \\ p_1 &= p_0; & p_2 &= p_a; \\ v_1 &= 0; & v_2 &= v_{сж.}; \quad \alpha_2 = \alpha_{отв.}, \end{aligned}$$

где $\alpha_{отв.}$ — коэффициент неравномерности распределения скорости в отверстии.

Потери напора по длине между сечениями 1-1 и 2-2 (расстояние $0,5d$) отсутствуют, значит, потери напора в гидравлических сопротивлениях (h_w) учтём, как потери напора в самом отверстии, как местном сопротивлении:

$$h_w = h_{отв.} = \zeta_{отв.} \frac{v_{сж.}^2}{2g},$$

где $\zeta_{отв.}$ — коэффициент сопротивления отверстия.

После подстановки параметров получим:

$$H + \frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha_{отв.} v_{сж.}^2}{2g} + \zeta_{отв.} \frac{v_{сж.}^2}{2g},$$

откуда скорость в сжатом сечении:

$$v_{сж.} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{отв.} + \zeta_{отв.}}} \sqrt{2g \left(H + \frac{p_0 - p_a}{\rho g} \right)}. \quad (7.1)$$

В формуле (7.1) обозначим приведённый напор ($H_{прив.}$):

$$H_{прив.} = H + \frac{p_0 - p_a}{\rho g}.$$

Если резервуар будет открытым, в сечении 1-1 давление $p_1 = p_2$, то приведённый напор $H_{\text{прив.}} = H$.

Формулу (7.1) представим в виде:

$$v_{\text{сж.}} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{\text{отв.}} + \zeta_{\text{отв.}}} \sqrt{2gH_{\text{прив.}}}} \quad (7.2)$$

Введём коэффициент скорости (φ):

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{\text{отв.}} + \zeta_{\text{отв.}}}} \quad (7.3)$$

Формула (7.2) принимает вид:

$$v_{\text{сж.}} = \varphi \sqrt{2gH_{\text{прив.}}} \quad (7.4)$$

При расчёте расхода Q (или пропускной способности) из отверстия нужно скорость в сжатом сечении умножить на площадь сжатого сечения:

$$Q = v_{\text{сж.}} \omega_{\text{сж.}}$$

Уменьшение площади сжатого сечения учитывается *коэффициентом сжатия* – ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{сж.}}}{\omega} \quad (7.5)$$

Расчётная формула для расхода с учётом формул (7.4) и (7.5):

$$Q = \varepsilon \varphi \omega \sqrt{2gH_{\text{прив.}}} \quad (7.6)$$

Произведение коэффициентов $\varepsilon\varphi$ обозначим через $\mu_{\text{отв.}}$, который называется коэффициентом расхода отверстия:

$$\mu_{\text{отв.}} = \varepsilon\varphi$$

Окончательно расход жидкости через малое незатопленное отверстие рассчитывается по формуле

$$Q = \mu_{\text{отв.}} \omega \sqrt{2gH_{\text{прив.}}} \quad (7.7)$$

Рассмотрим малое *затопленное* отверстие в тонкой стенке, или истечение из малого отверстия *под уровень* (рис. 7.1, б).

Расчёт аналогичен расчёту малого отверстия в тонкой стенке с истечением в атмосферу. Также составляется уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, скорости в которых соответственно: $v_1 = 0$; $v_2 = v_{\text{сж}}$; давления в выбранных сечениях: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a + \rho g H_2$; плоскость сравнения совмещается с осью отверстия: $z_1 = H_1$; $z_2 = 0$.

После преобразования уравнения Бернулли (предлагается сделать самостоятельно)

$$v_{\text{сж}} = \varphi \sqrt{2g(H_1 - H_2)}. \quad (7.8)$$

Можно обозначить $H_1 - H_2 = \Delta H$, таким образом, ΔH – действующий напор для затопленного отверстия. Расход жидкости через затопленное отверстие:

$$Q = \mu_{\text{отв}} \omega \sqrt{2g\Delta H}. \quad (7.9)$$

Формулы (7.7); (7.9), а ранее при расчёте простых трубопроводных систем формула (6.5) имеют общий вид. Таким образом, для всех видов истечений из отверстий и насадков формула расхода может быть представлена обобщённой формулой:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (7.10)$$

где H – действующий (или приведённый) напор.

7.2. Истечение жидкости через большое боковое отверстие при постоянном напоре

Представим себе большое боковое отверстие прямоугольной формы, ширина которого b , напор над верхней кромкой отверстия H_1 , над нижней H_2 . Пусть напоры над верхней и нижней кромками отверстия отличаются более, чем на 10 %, тогда в формуле расхода учитываем оба напора:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_{\text{отв}} b \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}). \quad (7.11)$$

Теоретический вывод формулы (7.11) следует изучить по учебникам и другим учебным пособиям.

7.3. Истечение жидкости из насадков при постоянном напоре

По форме патрубков различают следующие *типы насадков*:

- а) внешний цилиндрический насадок (рис. 7.2, а);
- б) внутренний цилиндрический насадок (рис. 7.2, б);
- в) конический сходящийся насадок (рис. 7.2, в);
- г) конический расходящийся насадок (рис. 7.2, г);
- д) коноидальный насадок (рис. 7.2, д).

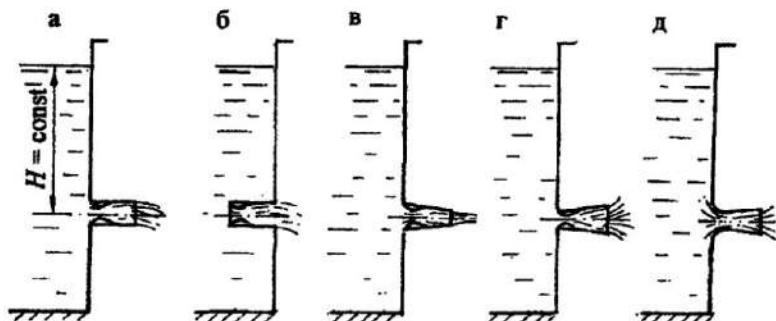


Рис. 7.2

Во всех типах насадков, кроме коноидального, *внутри насадка*, как правило, на расстоянии $0,5d$ образуется *сжатие струи*. В области сжатия возникает вакуум, затем струя расширяется, заполняет весь насадок и выходит полным сечением.

Наличие вакуума внутри насадка доказывается с помощью уравнения Бернулли, такие расчёты приведены в учебниках и курсах лекций.

Вакуум внутри *внешнего цилиндрического* насадка способствует дополнительному подсосу жидкости и увеличению пропускной способности насадка. Так, в цилиндрическом внешнем насадке $H_{\text{вак.}} = 0,75 H$, значит, согласно формуле (7.7):

$$Q = \mu_{\text{отв.}} \omega \sqrt{2g(H + H_{\text{вак.}})} = \mu_{\text{отв.}} \omega \sqrt{2g \cdot 1,75H}.$$

Зная, что $\sqrt{1,75} = 1,32$, обозначим $1,32\mu_{\text{отв.}} = \mu_{\text{нас.}}$. Следовательно, пропускная способность внешнего цилиндрического насадка увеличится на 32%, действительно, $\mu_{\text{отв.}} = 0,62$; $\mu_{\text{нас.}} = 1,32 \cdot 0,62 = 0,82$.

Таким образом, *назначение насадков – увеличение пропускной способности.*

Внутренний цилиндрический насадок используется, когда нужно увеличить пропускную способность, но по техническим условиям нельзя вывести внешний насадок.

Конический сходящийся насадок даёт возможность получить компактную струю с большой скоростью, используется в гидромониторах, брандспойтах и им подобных устройствах. Коэффициент расхода насадка зависит от угла конусности. Оптимальное значение угла конусности $13^{\circ}24'$.

Конический расходящийся насадок даёт увеличение пропускной способности на $40+45\%$, малые скорости на выходе. Эти насадки применяются в эжекторных установках, оросительных системах и др.

Оптимальный угол конусности $5^{\circ}+7^{\circ}$. При увеличении угла конусности происходит срыв вакуума внутри насадка, струя отходит от стенок насадка, насадок не выполняет своего назначения, истечение происходит, как через малое отверстие.

Конoidalный насадок выполнен по форме струи, вытекающей из малого отверстия, имеет малое сопротивление при движении жидкости, обеспечивает повышение пропускной способности на $40+50\%$. Такие насадки применяются в соплах гидравлических турбин, аэродинамических установках.

При теоретических обоснованиях истечения жидкости из отверстий и насадков были введены коэффициенты: α , ζ , φ , ϵ , μ . Значения этих коэффициентов зависят от многих факторов: формы отверстия, степени механической обработки кромок отверстия, полноты и совершенства сжатия струи, а также от числа Рейнольдса (Re). Эти коэффициенты определены экспериментально или рассчитаны аналитически. Значения коэффициентов приведены в справочниках и учебниках. В данном учебном пособии значения коэффициентов φ , ϵ и μ приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Значения коэффициентов скорости (φ), сжатия (ϵ) и расхода (μ) для отверстий и насадков

Вид отверстия, насадка	φ	ϵ	μ
Малое отверстие	0,97	0,64	0,62
Внешний цилиндрический насадок	0,82	1,0	0,82
Внутренний цилиндрический насадок	0,71	1,0	0,71
Конический сходящийся насадок	0,96	0,98	0,94
Конический расходящийся насадок	0,45	1,0	0,45
Конoidalный насадок	0,97	1,0	0,97

7.4. Пример решения задачи по теме: “Истечение жидкости из отверстий и насадков”

Задача 7.4.1. На водонапорной станции установлен трёхкамерный отстойник. В стенках отстойника сделаны отверстия с площадями живых сечений: $\omega_1 = 3 \text{ дм}^2$; $\omega_2 = 2 \text{ дм}^2$; к третьему отверстию присоединён внешний цилиндрический насадок площадью сечения $\omega_3 = 1,2 \text{ дм}^2$. Уровни воды в камерах постоянны. Общий напор $H = 3,0 \text{ м}$.

Определить распределение напоров h_1 , h_2 , h_3 и расход воды (Q), вытекающей из отстойника. Считать стенки отстойника тонкими (рис. 7.3).

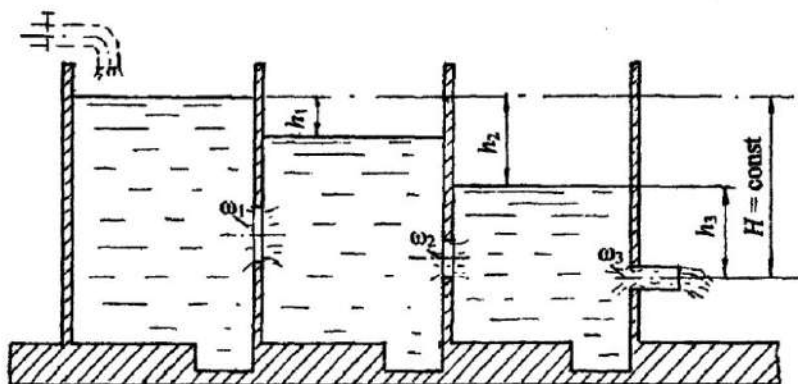


Рис. 7.3

Решение. Из рис. 7.3 следует:

$$H = h_2 + h_3. \quad (7.12)$$

Согласно уравнению неразрывности потока, расходы воды через отверстия и насадок одинаковы:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \text{const}.$$

Расходы воды через каждое отверстие можно вычислить по формуле (7.10), а именно:

$$Q_1 = \mu_{\text{отв.1}} \omega_1 \sqrt{2gh_1};$$

$$Q_2 = \mu_{\text{отв.2}} \omega_2 \sqrt{2g(h_2 - h_1)};$$

$$Q_3 = \mu_{\text{нас.}} \omega_3 \sqrt{2gh_3}.$$

Приравняем расходы и, произведя простые преобразования (сократим на величину $\sqrt{2g}$), получим:

$$\mu_{\text{отв.1}} \omega_1 \sqrt{h_1} = \mu_{\text{отв.2}} \omega_2 \sqrt{h_2 - h_1} = \mu_{\text{нас.}} \omega_3 \sqrt{h_3}. \quad (7.13)$$

Подставим численные значения площадей живых сечений (ω) и коэффициентов расхода (μ) из табл. 7.1:

$$0,62 \cdot 3,0 \sqrt{h_1} = 0,62 \cdot 2,0 \sqrt{h_2 - h_1} = 0,82 \cdot 1,2 \sqrt{h_3}.$$

Приравняем попарно равенства, чтобы найти зависимости между напорами h_1, h_2, h_3 , а затем решить их совместно с уравнением (7.12):

$$9h_1 = 4(h_2 - h_1), \quad \text{отсюда } h_2 = 3,25 h_1;$$

$$3,46 h_1 = 0,97 h_3, \quad \text{отсюда } h_3 = 3,57 h_1.$$

Подставим значения h_2 и h_3 , выраженные через h_1 , в уравнение (7.12):

$$3,25 h_1 + 3,57 h_1 = 3,0 \text{ м, отсюда } h_1 = 0,44 \text{ м, значит, } h_2 = 1,43 \text{ м; } h_3 = 1,57 \text{ м.}$$

Расход воды можно рассчитать через любое отверстие; рассчитаем через первое:

$$Q = Q_1 = 0,62 \cdot 0,03 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,44} = 0,0546 \text{ м}^3/\text{с} = 54,6 \text{ л/с.}$$

Ответ: напоры воды в отстойнике: $h_1 = 0,44$ м; $h_2 = 1,43$ м; $h_3 = 1,57$ м; расход воды из отстойника $Q = 54,6$ л/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное учебное пособие составлено на основании многолетнего преподавания курса гидромеханики (гидравлики). Опыт методической работы показал, что успешное овладение знаниями по этому курсу возможно только на основе решения задач. Решение задач развивает самостоятельное инженерное мышление.

На сегодняшний день имеется немало сборников задач и учебных пособий по гидравлике, тем не менее в этих изданиях недостаточно освещена методика решения задач по различным разделам и темам. Для студентов очень важно усвоить именно методику решения задач, чтобы перейти от решения простых к более сложным задачам.

При разработке учебного пособия ставилась цель – добиться наиболее последовательного и широкого применения методики решения задач. Во многих задачах использованы графические методы решения, дающие возможность просто и наглядно проанализировать ход решения задачи и конечный результат решения.

В учебном пособии даны только основы теории по нескольким разделам гидромеханики, поэтому, само собой разумеется, студент должен обращаться к учебникам по этому курсу.

Кроме таблиц, приведённых в приложении, можно пользоваться аналогичными таблицами других учебников и учебных пособий, в этом случае ответы в задачах могут незначительно отличаться.

Автор надеется, что учебное пособие представит интерес и принесёт пользу в изучении курса гидромеханики. Возможно, книга будет использована преподавателями вузов для проведения практических занятий.

Хотелось бы получить отзывы на книгу, замечания, пожелания.

Автор С. И. Часс

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 497 с.

Андреевская А. В., Кременецкий Н. Н., Панова М. В. Задачник по гидравлике. М.: Энергия, 1970. 567 с.

Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод. 4-е изд. М.: Недра, 1991. 331 с.

Гидравлика и гидропривод: Учеб. пособие / Н. С. Гудилин, Е. М. Кривенко, В. С. Маховиков, И. Л. Пастоев; Под ред. И. Л. Постоева. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГУ, 2001. 520 с.

Примеры расчётов по гидравлике: Учеб. пособие / Под ред. А. Д. Альтшуля. М.: Стройиздат, 1976. 256 с.

Сборник задач по машиностроительной гидравлике: Учеб. пособие / Под ред. И. И. Куколевского и Л. Г. Подвиза. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 464 с.

Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). Л.: Энергоиздат, 1982. 552 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Плотность, коэффициент кинематической вязкости, условная вязкость
некоторых жидкостей

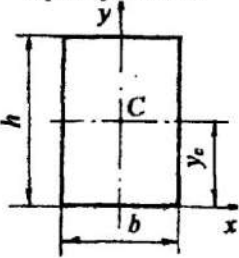
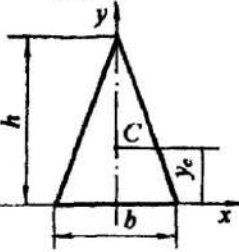
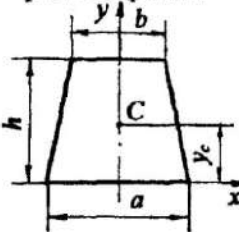
Жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Кинематический коэффициент вязкости ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Условная вязкость °E (ВУ)
Вода пресная	998	1,008	1,0
Этиловый спирт	790	1,52	1,04
Ртуть	13546	0,16	-
Воздух	1,22	14,9	-
Бензин при $t = 15^\circ\text{C}$	740-780	0,83-0,93	-
Керосин	820	2,5	1,13
Нефть	810-930	25,0-27,0	3,7-4,0
Масло турбинное	900	20,0-48,0	3,0-6,7
Масло трансформаторное	884	28,0-30,0	4,05-4,30

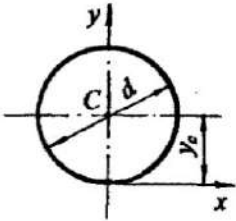
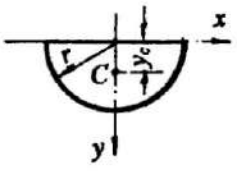
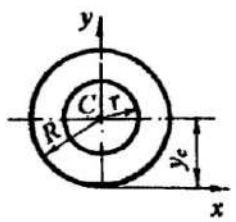
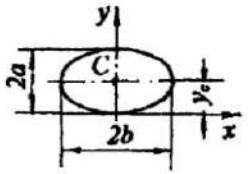
Таблица 2

Соотношение между единицами давления

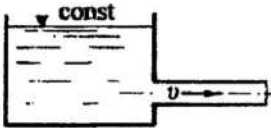
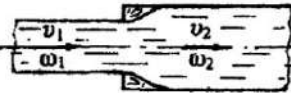
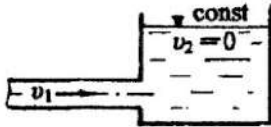

Единица	Па (Н/м ²)	кгс/см ² (ат)	кгс/м ²	мм вод. ст.	м вод. ст.	мм рт. ст.	бар
1 Па (Н/м ²)	1	10,2·10 ⁻⁶	0,102	0,102	102·10 ⁻⁶	750·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
1 кгс/см ² (ат)	9,81·10 ⁴	1	10 ⁴	10 ⁴	10	735,6	0,981
1 кгс/м ²	9,81	10 ⁴	1	1	10 ⁻³	73,56·10 ⁻³	98,1·10 ⁻⁶
1 мм вод. ст.	9,81	10 ⁻⁴	1	1	10 ⁻³	73,56·10 ⁻³	98,1·10 ⁻⁶
1 м вод. ст.	9,81·10 ³	0,1	10 ³	10 ³	1	73,56	98,1·10 ⁻³
1 мм рт. ст.	133,3	1,36·10 ⁻³	13,6	13,6	13,6·10 ⁻³	1	1,33·10 ⁻³
1 бар	10 ⁵	1,02	10,2·10 ³	10,2·10 ³	10,2	750	1

Координаты центров тяжести, площади и моменты инерции плоских фигур относительно горизонтальной центральной оси


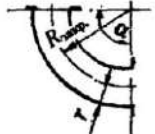
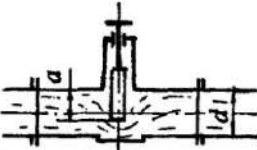

Плоская фигура	Координата центра тяжести y_c	Площадь фигуры A	Момент инерции I_c
<p>Прямоугольник</p> 	$\frac{h}{2}$	bh	$\frac{bh^3}{12}$
<p>Треугольник</p> 	$\frac{1}{3}h$	$\frac{bh}{2}$	$\frac{bh^3}{36}$
<p>Трапеция равнобедренная</p> 	$\frac{h(a+2b)}{3(a+b)}$	$\frac{h(a+b)}{2}$	$\frac{h^3(a^2+4ab+b^2)}{36(a+b)}$

<p>Круг</p> 	$\frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi d^4}{64}$
<p>Полукруг</p> 	$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{\pi r^2}{2}$	$\frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} \cdot r^4$
<p>Кольцо</p> 	R	$\pi(R^2 - r^2)$	$\frac{\pi(R^4 - r^4)}{4}$
<p>Эллипс</p> 	a	πab	$\frac{\pi a^3 b}{4}$

Местные сопротивления

Тип, схема местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления ζ														
<p>Вход в трубу</p> $h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{v^2}{2g}$ 	<p>При острых кромках $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$; при закруглённых кромках и плавном входе $\zeta_{\text{вх}} = 0,2$; при весьма плавном входе $\zeta_{\text{вх}} = 0,05$</p>														
<p>Внезапное расширение</p> $h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.}} \frac{v_1^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{в.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$														
<p>Выход из трубы в резервуар больших размеров, выход под уровень</p> $h_{\text{вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{v_1^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{вых}} = 1,0$														
<p>Внезапное сужение</p> $h_{\text{в.с.}} = \zeta_{\text{в.с.}} \frac{v_1^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{в.с.}} = f \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)$ <table border="1" data-bbox="433 1141 946 1266"> <tbody> <tr> <td>$\frac{\omega_2}{\omega_1}$</td> <td>0,01</td> <td>0,10</td> <td>0,20</td> <td>0,40</td> <td>0,60</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{в.с.}}$</td> <td>0,50</td> <td>0,45</td> <td>0,40</td> <td>0,30</td> <td>0,20</td> <td>0,10</td> </tr> </tbody> </table>	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	$\zeta_{\text{в.с.}}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10
$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80									
$\zeta_{\text{в.с.}}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10									

Местные сопротивления

<p>Поворот трубы (колесо)</p> <p>а) колесо без закругления</p> 	<table border="1"> <tr> <td>Угол α°</td> <td>30</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>60</td> <td>70</td> <td>80</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{закр.}}$</td> <td>0,20</td> <td>0,30</td> <td>0,40</td> <td>0,55</td> <td>0,70</td> <td>0,90</td> <td>1,10</td> </tr> </table>	Угол α°	30	40	50	60	70	80	90	$\zeta_{\text{закр.}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10								
Угол α°	30	40	50	60	70	80	90																		
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10																		
<p>б) колесо с закруглением при $\alpha = 90^\circ$</p> $h_{\text{закр.}} = \zeta_{\text{закр.}} \frac{v^2}{2g}$ 	<table border="1"> <tr> <td>$r/R_{\text{закр}}$</td> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>0,4</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{закр.}}$</td> <td>0,131</td> <td>0,138</td> <td>0,158</td> <td>0,206</td> <td>0,294</td> </tr> <tr> <td>$r/R_{\text{закр}}$</td> <td>0,6</td> <td>0,7</td> <td>0,8</td> <td>0,9</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{закр.}}$</td> <td>0,440</td> <td>0,661</td> <td>0,977</td> <td>1,408</td> <td>1,978</td> </tr> </table> <p>При углах $\alpha \neq 90^\circ$ значение $\zeta_{\text{закр.}}$ нужно умножить на $\alpha/90^\circ$</p>	$r/R_{\text{закр}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\zeta_{\text{закр.}}$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294	$r/R_{\text{закр}}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	$\zeta_{\text{закр.}}$	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978
$r/R_{\text{закр}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5																				
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294																				
$r/R_{\text{закр}}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0																				
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978																				
<p>Задвижка Лудло</p> 	<table border="1"> <tr> <td>a/d</td> <td>Полное открытие</td> <td>1/4</td> <td>3/8</td> <td></td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{завд.}}$</td> <td>0,12</td> <td>0,28</td> <td>0,81</td> <td></td> </tr> <tr> <td>a/d</td> <td>1/2</td> <td>5/8</td> <td>3/4</td> <td>7/8</td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{завд.}}$</td> <td>2,06</td> <td>5,25</td> <td>17,0</td> <td>978</td> </tr> </table>	a/d	Полное открытие	1/4	3/8		$\zeta_{\text{завд.}}$	0,12	0,28	0,81		a/d	1/2	5/8	3/4	7/8	$\zeta_{\text{завд.}}$	2,06	5,25	17,0	978				
a/d	Полное открытие	1/4	3/8																						
$\zeta_{\text{завд.}}$	0,12	0,28	0,81																						
a/d	1/2	5/8	3/4	7/8																					
$\zeta_{\text{завд.}}$	2,06	5,25	17,0	978																					
<p>Пробковый кран, $Re \geq 10^4$</p> 	<table border="1"> <tr> <td>α°</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{пр.}}$</td> <td>0,05</td> <td>0,29</td> <td>1,56</td> <td>5,47</td> </tr> <tr> <td>α°</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>60</td> <td></td> </tr> <tr> <td>$\zeta_{\text{пр.}}$</td> <td>17,3</td> <td>52,6</td> <td>206</td> <td></td> </tr> </table>	α°	5	10	20	30	$\zeta_{\text{пр.}}$	0,05	0,29	1,56	5,47	α°	40	50	60		$\zeta_{\text{пр.}}$	17,3	52,6	206					
α°	5	10	20	30																					
$\zeta_{\text{пр.}}$	0,05	0,29	1,56	5,47																					
α°	40	50	60																						
$\zeta_{\text{пр.}}$	17,3	52,6	206																						

Местные сопротивления

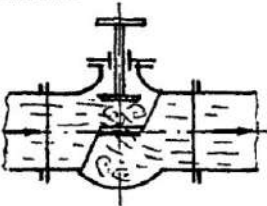
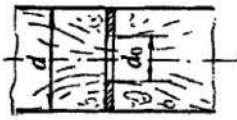
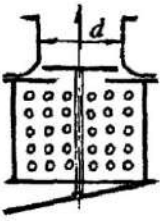
Вентиль	Полностью открытый, $Re \geq 10^4$							
	d , мм	40	80	100	150	200	250	300
	$\zeta_{\text{вент.}}$	4,9	4,0	4,1	4,4	4,7	5,1	5,4
Диафрагма в трубе	$Re > 10^4$							
	$\frac{d_0^2}{d^2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	$\zeta_{\text{диаф.}}$	224	60,2	19,2	9,8	4,4	2,4	1,22
Всасывающий клапан с сеткой, $Re > 10^4$								
	d , мм	40	70	100	200	300	500	
	$\zeta_{\text{сетк.}}$	12	8,5	7,0	4,7	3,7	2,5	
Для ориентировочных расчётов: при наличии обратного клапана $\zeta_{\text{сетк.}} = 10,0$; при отсутствии обратного клапана $\zeta_{\text{сетк.}} = 5 + 6$								

Таблица 5

Коэффициенты сопротивления колен водопроводных труб при $\alpha = 90^\circ$

d , мм	50	100	150	200	250	300
$\zeta_{\text{кол.}}$	0,76	0,39	0,37	0,37	0,40	0,45
d , мм	350	400	450	500	600	700
$\zeta_{\text{кол.}}$	0,45	0,42	0,42	0,46	0,47	0,48

Значения эквивалентной абсолютной шероховатости Δ_s в трубах

Материал и вид трубы	Состояние трубы	Δ_s , мм
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0,001
Бесшовные стальные	Новые и чистые, тщательно уложенные	0,014
	После нескольких лет эксплуатации	0,2
Стальные сварные	Новые и чистые	0,06
	С незначительной коррозией после очистки	0,15
	Умеренно заржавевшие	0,5
	Старые заржавевшие	1
	Сильно заржавевшие или с большими отложениями	3
Чугунные	Новые асфальтированные	0,12
	Новые без покрытия	0,3
	Бывшие в употреблении	1
	Очень старые	3
Бетонные	Новые из предварительно напряженного бетона	0,03
	Новые центробежные	0,2
	Бывшие в употреблении	0,3 +0,8
	Из необработанного бетона	1-3

Значения коэффициентов шероховатости n и $1/n$
(для формул Павловского, Агроскина, Маннинга)

Категория	Характеристика поверхности	n	$1/n$
I	Исключительно гладкие поверхности, покрытые эмалью	0,09	111
II	Весьма тщательно остроганные доски, хорошо пригнанные. Штукатурка из чистого цемента	0,010	100
III	Лучшая цементная штукатурка. Чистые новые гончарные, чугунные и железные трубы, хорошо уложенные и соединенные	0,011	90,9
IV	Неостроганные доски, хорошо пригнанные. Водопроводные трубы в нормальных условиях; весьма чистые водопроводные трубы; весьма хорошая бетонировка	0,012	83,3
V	Тесовая кладка, хорошая кирпичная кладка. Водосточные трубы в нормальных условиях. Несколько загрязненные водопроводные трубы	0,013	76,9
VI	Загрязненные трубы (водопроводные и водосточные); средняя кирпичная кладка, бетонировка каналов в средних условиях	0,014	71,4
VII	Средняя кирпичная кладка, облицовка из тесаного камня в средних условиях. Значительно загрязненные водостоки. Брезент по деревянным рейкам	0,015	66,7
VIII	Хорошая бутовая кладка, старая кирпичная кладка, сравнительно грубая бетонировка. Гладкая, весьма хорошо разработанная скала	0,017	58,8

Таблица 8

Значения величин C , λ , K и $1/K^2 = A$ для нормальных водопроводных труб, подсчитанные по формуле акад. Н. Н. Павловского при $n = 0,012$

d , мм	C	λ	K , м ³ /с	A , с ² /м ⁶
50	44,79	0,0391	0,00987	10340,0
75	47,45	0,349	0,0287	1214,0
100	49,48	0,0321	0,0614	265,0
125	51,07	0,0301	0,111	81,60
150	52,42	0,0286	0,179	31,18
200	54,62	0,0263	0,384	6,78
250	56,40	0,0247	0,692	2,11
300	57,90	0,0234	1,121	0,794
350	59,18	0,0224	1,684	0,354
400	60,31	0,0216	2,397	0,174
450	61,28	0,0209	4,259	0,0932
500	62,28	0,0202	4,324	0,0532
600	63,91	0,0192	6,999	0,0204
700	65,32	0,0184	10,517	0,00904
800	66,58	0,0177	14,965	0,00495
900	67,70	0,0170	20,430	0,00239
1000	68,72	0,0166	26,485	0,00137

Таблица 9

Значение коэффициента удельного сопротивления A (с²/м⁶) для расчёта трубопроводов (при квадратичном законе сопротивления) в зависимости от абсолютной шероховатости Δ

Диаметр d , мм	$\Delta = 0,2$ мм	$\Delta = 0,5$ мм	$\Delta = 1,0$ мм
50	7570	10 000	12 900
75	886	1 160	1 460
100	194	252	313
125	62,6	80,0	95,2
150	23,1	29,3	36,2
200	5,08	6,45	7,81
250	1,58	1,98	2,40
300	0,607	0,709	0,917
400	0,135	0,167	0,201
500	0,0422	0,0518	0,062

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ.....	4
Раздел первый. ГИДРОСТАТИКА.....	6
Глава 1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТИ.....	6
1. Понятие гидростатического давления.....	6
1.1. Свойства гидростатического давления.....	6
1.2. Основное уравнение гидростатики. Абсолютное манометрическое, вакуумметрическое давление.....	6
1.3. Плоскость уровня. Понятие пьезометрической высоты. Эпюры гидростатического давления.....	7
1.4. Единицы измерения давления.....	9
1.5. Примеры решения задач по теме: “Гидростатическое давление в жидкости”.....	10
1.6. Задачи для самостоятельной работы по теме: “Гидростатическое давление в жидкости”.....	15
Глава 2. СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	22
2.1. Аналитический метод определения силы давления жидкости....	22
2.2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления и центра давления на прямоугольные поверхности.....	23
2.3. Примеры решения задач по теме: “Расчёт силы давления жидкости на плоские поверхности”.....	25
2.4. Задачи для самостоятельной работы по теме: “Сила давления жидкости на плоские поверхности”.....	49
Глава 3. СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	57
3.1. Основные понятия и теоретические положения.....	57
3.2. Примеры решения задач по теме: “Расчёт силы давления жидкости на криволинейные поверхности”.....	61
3.3. Задачи для самостоятельной работы по теме: “Сила давления жидкости на криволинейные поверхности”.....	82
Раздел второй. ГИДРОДИНАМИКА.....	89
Глава 4. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ.....	89
4.1. Основные понятия о параметрах движения жидкости.....	89
4.2. Понятие идеальной жидкости и потока жидкости.....	90
4.3. Гидравлические элементы потока.....	91
4.4. Расход жидкости. Средняя скорость потока. Уравнение неразрывности потока.....	92

4.5. Основное уравнение гидродинамики. Уравнение Даниила Бернулли.....	94
4.5.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.....	95
4.5.2. Интерпретация уравнения Бернулли.....	95
4.5.3. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости.....	98
4.5.4. Уравнение Бернулли для целого потока реальной, вязкой жидкости.....	100
4.5.5. Экспериментальное определение статического и полного напоров. Расчёт скорости в точке потока.....	102
4.5.6. Диаграмма уравнения Бернулли для потока жидкости в трубе переменного сечения.....	104
4.5.7. Методика составления уравнения Бернулли для решения теоретических и инженерных задач.....	105
4.5.8. Приборы для измерения скорости и расхода, основанные на уравнении Бернулли.....	106
4.6. Режимы движения жидкости.....	111
Глава 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	113
5.1. Потери напора в гидравлических сопротивлениях.....	113
5.2. Потери напора по длине при ламинарном режиме движения жидкости.....	115
5.3. Потери напора по длине при турбулентном режиме.....	115
5.3.1. Понятие о гидравлически гладких и шероховатых трубах...	116
5.3.2. Потери напора по длине в трубах с описательной шероховатостью.....	119
5.3.3. Потери напора по длине, выраженные через обобщённые параметры.....	120
Раздел третий. ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА.....	123
Глава 6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ.....	123
6.1. Расчёт простых трубопроводных систем.....	123
6.1.1. Расчёт простой трубопроводной системы с истечением жидкости в атмосферу.....	124
6.1.2. Расчёт простой трубопроводной системы с истечением под уровень.....	127
6.1.3. Методика расчёта простых трубопроводных систем.....	129
6.2. Примеры решения задач по теме: “Расчёт простых трубопроводных систем”.....	132
6.3. Задачи для самостоятельной работы по теме: “Расчёт простых трубопроводных систем”.....	156
6.4. Расчёт сложных трубопроводных систем.....	166

6.4.1. Системы с последовательным соединением труб.....	168
6.4.2. Системы с параллельным соединением труб.....	170
6.4.3. Распределительные сети, или тупиковые системы.....	173
6.4.4. Системы с путевым расходом жидкости.....	176
6.5. Примеры решения задач по теме: “Расчёт сложных трубопроводных систем”.....	177
6.6. Задачи для самостоятельной работы по теме: “Расчёт сложных трубопроводных систем”.....	186
Глава 7. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ.	194
7.1. Истечение жидкости из малого незатопленного и затопленного отверстий в тонкой стенке.....	195
7.2. Истечение жидкости через большое боковое отверстие при постоянном напоре.....	198
7.3. Истечение жидкости из насадков при постоянном напоре.....	199
7.4. Пример решения задачи по теме: “Истечение жидкости из отверстий и насадков”.....	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	203
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	204
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	205

Учебное издание

Часс Светлана Ивановна

**ГИДРОМЕХАНИКА
в примерах и задачах**

Учебное пособие

Редактор изд-ва Л. В. Устьянцева

Компьютерная вёрстка автора

**Подписано в печать 10.11.06 г. Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 13,625. Уч.-изд. л. 13,5. Тираж 400 экз. Заказ 50**

**Изд-во УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Отпечатано с оригинал-макета в ООО "ИРА УТК"
620219, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, 42**



พ.อ.อ.อ.อ.



**ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»**

Н. Н. Дерябин, С. Г. Эйнгорн

БУРОВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НА ТВЕРДЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Методические указания
по самостоятельной работе курса
«Буровые машины и механизмы»
для студентов специальности:
21.05.03 Технология геологической разведки
Специализация № 3
Технология и техника разведки МПИ

очного и заочного обучения

**Екатеринбург
2020**

Оглавление

Введение.....	3
1. Принципы классификации буровых установок.....	4
2. Принципиальное устройство буровых станков и установок.....	6
3. Принципиальные схемы компоновки и модификации буровых станков и установок.....	8
4. Буровая установка УКБ-4.....	12
Литература.....	23

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Буровые машины и механизмы» является профилирующей дисциплиной при подготовке специалистов специальности «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых».

Проведение геологоразведочных, геофизических и изыскательских работ непосредственно связано с необходимостью сооружения буровых скважин или изучения межскважинного пространства.

В соответствии с этим студенты специальности, специализация № 3: 21.05.03 «Технология и техника разведки МПИ (ТТР)» должны знать конструкцию, устройство и технико-экономические показатели современной буровой техники.

В методических указаниях дается описание основных компоновочных схем буровых установок, предназначенных для бурения геологоразведочных скважин колонковым способом на твердые полезные ископаемые. Приводятся технические параметры установок ряда УКБ. На примере установки УКБ-4 и станка СКБ-4 подробно рассматривается конструкция данного класса бурового оборудования.

1. Принципы классификации буровых установок

Буровая установка представляет собой комплекс сооружений механизмов и устройств, позволяющих осуществить все работы по бурению, креплению и ликвидации скважин. В состав установки входят следующие основные сооружения и машины:

- буровой станок или вращатель с лебедкой;
- буровой промывочный насос, вместе со станком образуя буровой агрегат;
- буровая вышка с талевой оснасткой;
- комплекс энергетического оборудования. В него входит привод механизмов (электро-, гидро-, двигатели внутреннего сгорания и т. д.) и все системы, обеспечивающие его работу;
- буровое здание;
- циркуляционная система промывочной жидкости, необходимая для очистки ее от шлама.

Кроме этих основных элементов, буровые установки оснащаются механизмами, системами и устройствами, обеспечивающими выполнение вспомогательных технологических процессов. Например: захватывание и удерживание буровых свечей талевой системой, свинчивание-развинчивание труб при выполнении спуско-подъемных операций, укладка их в свечеприемники и т. д.

Состав, тип станка или вращателя, а также размеры бурового оборудования определяются такими факторами, как:

- глубина и диаметр бурения;
- цель бурения;
- прочностные (физико-механические) свойства пород.

Глубина и диаметр скважины. Они определяют затраты мощности при ее бурении. Поскольку двигатель бурового станка (или установки) обеспечивает создание определенного числа оборотов и необходимого по величине крутящего момента при вращении колонны бурильных труб при бурении, то эти параметры будут тем больше, чем длиннее скважина и чем больше ее диаметр. Так, до глубины 1500 метров и диаметра скважины 59 мм, необходимые числа оборотов и величину крутящего момента сможет обеспечить шпиндельный вращатель. При увеличении глубины и диаметра скважины для обеспечения необходимых параметров вращения потребуется роторный вращатель.

Кроме того, чем большая мощность необходима для бурения скважины, тем больше размеры и масса основных машин и механизмов, входящих в состав установки, и тем сложнее обеспечить ее транспортировку. По этой причине установки проектируют с ограничением мощности привода. Это позволяет получить несколько классов установок, различающихся по мощности привода (и, соответственно, по размерам и весу), а это, в свою очередь, позволяет обеспечить их транспортировку различными способами.

Цель бурения влияет на выбор способа разрушения породы и, соответственно, на способ бурения. Большинство способов бурения связано с вращением породоразрушающего инструмента. В зависимости от цели и, соответственно, от способа бурения, частота вращения колеблется в диапазоне от 0 до 2000 об/мин. Не все типы вращателей могут обеспечить этот диапазон полностью.

Возможности вращателей следующие:

Шпиндельный вращатель. Позволяет обеспечить частоту вращения колонны бурильных труб до 1500 об/мин. Это позволяет бурить скважины колонковым способом по породам XII категории по буримости. Поэтому станки со шпиндельными вращателями используются в основном для бурения геологразведочных скважин.

Роторный вращатель. Позволяет обеспечить большой крутящий момент при невысоких частотах вращения. Его целесообразно использовать при бурении глубоких скважин или скважин большого диаметра породоразрушающим инструментом, не требующим высоких частот вращения (например, шарошечными долотами или

твердосплавными коронками). Поэтому роторные вращатели используют при бурении гидрогеологических и инженерно-геологических, а также нефтяных и газовых скважин, отличающихся большой глубиной и диаметром.

Подвижные вращатели. Несмотря на ограничение максимального числа оборотов (до 500-600 об/мин) и небольшую величину крутящего момента, не позволяющие бурить скважины большого диаметра, обладают рядом достоинств, а именно: возможность использования разнообразных способов бурения (от шнекового, пневмоударного до колонкового и шарошечного) и простота конструкции (отсутствие лебедки и механизмов свинчивания-развинчивания труб).

Особенности конструкции установок с подвижным вращателем не позволяют увеличить длину буровой свечи, извлекаемой из скважины при спуско-подъемных операциях. Это ограничивает глубину использования таких установок.

Таким образом, в соответствии с целью бурения приходится учитывать возможности вращателей буровых установок или станков.

Прочностные свойства пород также определяют способ разрушения породы и выбор способа бурения. В сочетании с целью бурения, прочностные свойства пород также влияют на выбор типа вращателя. Например: необходимо получить керн в крепких породах (11 – 12 категории по буримости). Следовательно, забой должен быть кольцевым, а способ бурения – высокооборотный алмазный. Или: необходимо создать скважину в твердых породах (9 – 10 категории по буримости) для водоснабжения предприятия. Следовательно, забой может быть сплошным, а способ бурения - низкооборотный шарошечный, большого диаметра (скорей всего, роторный).

Становится понятным, что в зависимости от ситуации, реализовать необходимый способ бурения могут шпиндельный, роторный или подвижный вращатели.

Таким образом, учитывая существующие типы вращателей, а также размеры и вес установок, целесообразнее всего классифицировать их по двум принципам:

1. По типу вращателя: шпиндельные, роторные, с подвижным вращателем.

2. По транспортабельности: переносные, самоходные, передвижные, стационарные.

Переносные. Они разбираются на узлы малого веса, которые могут переноситься. Мощность привода обеспечивает глубину бурения до 100-150 м; масса установки – до 150 кг.

Самоходные. Оборудование размещается на платформе, закрепляемой на раме серийно выпускаемых легковых и грузовых автомобилей, тракторов или гусеничных тягачей. Мощность привода таких установок позволяет бурить скважины вращательным способом на глубину до 800 м. Масса установки – до 15 т.

Передвижные. Оборудование монтируется в буровом здании, которое находится на полозьях. Транспортировка производится тракторами или гусеничными тягачами. Возможно использование подкатных тележек, устанавливаемых под переднюю и заднюю части здания. При этом оно поднимается гидравлическими или механическими домкратами. Глубина бурения колонковых скважин такими установками достигает 2000 м. Масса установки – до 25 т.

Стационарные. Буровые механизмы и сооружения монтируются на отдельных основаниях или фундаментах. Транспортировка каждого элемента или механизма производится отдельно автомобильным, внедорожным или иным видом транспорта. Глубина бурения может достигать 15 км. Масса оборудования установки – до 50 т.

Классификация буровых установок по транспортабельности хорошо увязывается с глубиной бурения, поскольку глубина определяет мощность привода буровых машин (станка или ротора, лебедки, бурового насоса и т. д.). Увеличение глубины бурения ведет к увеличению как массы исполнительных механизмов и их трансмиссии, так и к появлению дополнительных механизмов и устройств, облегчающих работу с тяжелым оборудованием. Это также увеличивает общий вес и размеры установки. Указанные принципы

классификации бурового оборудования не являются всеобъемлющими, но позволяют достаточно свободно ориентироваться во всем многообразии различных типов установок и их возможностях.

Основные технические параметры станков и установок, предназначенных для бурения скважин колонковым способом, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Основные параметры буровых станков и установок колонкового бурения

Параметр	УКБ1 (12/25)	УКБ2 (200/300)	УКБ4 (300/500)	УКБ5 (500/800)	ЗИФ 600м	ЗИФ 1200MP
1. Глубина бурения, м:						
- твердосплавными коронками	12,5	200	300	500	650	1500
- алмазными коронками	25	300	700	800	800	2000
2. Мощность двигателя, кВт	2,9	13,0	22,0	30,0	30,0	55,0
3. Начальный диаметр бурения, мм	76,0	132,0	151,0	151,0	200,0	250,0
4. Конечный диаметр бурения, мм:						
- твердосплавными коронками	76	93	93	93	93	93
- алмазными коронками	36	46	46	59	59	59
5. Длина бурильной свечи, м	1,0	6,2	9,0	14,0	14,0	18,5
6. Частота вращения бурового снаряда, об/мин:						
- минимальная	100,0	100,0	155,0	120,0	87	75
- максимальная	1200	1500	1600	1500	800	600
7. Количество ступеней измерения чисел оборотов	6	6	8	8	6	8
8. Вес станка или установки, кг	110	6700	14000	16900	17000	20000

Вопросы для самопроверки:

1. Дайте определение буровой установке. Какие основные механизмы и сооружения входят в ее состав?
2. Определите и обоснуйте факторы, влияющие на состав, тип станка или вращателя и размеры оборудования.
3. Почему целесообразнее всего классифицировать буровые установки по двум принципам? Какие это принципы?

2. Принципиальное устройство буровых станков и установок

В зависимости от назначения и возможностей буровой установки, механизмы, обеспечивающие выполнение технологических процессов при бурении, располагают отдельно друг от друга (буровая установка) или компактно, в виде единого блока. Во втором случае речь идет о буровом станке (рис. 2.1).

Буровой станок – это машина, предназначенная для обеспечения таких основных технологических параметров при бурении скважин, как:

- создание и передача крутящего момента и необходимого числа оборотов колонне бурильных труб;
- обеспечение и поддержание необходимой величины осевой нагрузки на забой при бурении.

Буровой станок состоит из следующих групп механизмов и систем:

- исполнительные механизмы,
- трансмиссия,
- привод или двигатель,
- механизм подачи бурильных труб,

- приборы контроля и органы управления.

Исполнительные механизмы. Их два: вращатель и лебедка.

Вращатель предназначен для передачи крутящего момента и числа оборотов от трансмиссии станка к ведущей бурильной трубе и в ряде случаев для задания направления оси скважины.

Лебедка предназначена для наматывания и сматывания талевого каната на барабан, при проведении спускоподъемных операций с колонной бурильных труб. В некоторых конструкциях станков и установок для производства спускоподъемных операций используются не лебедки, а экстракторы или кабестаны.

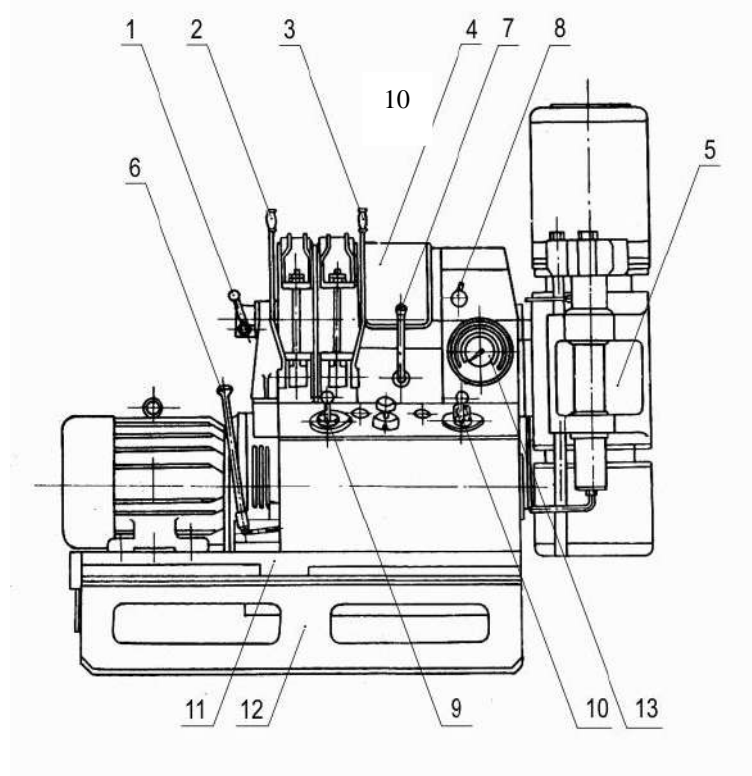


Рис. 2.1. Станок буровой СКБ-4:

1 – рукоятка включения лебедки; 2 – тормоз подъема; 3 – тормоз спуска; 4 – барабан лебедки; 5 – вращатель; 6 – рычаг включения сцепления; 7 – рычаг переключения коробки передач; 8 – рукоятка управления раздаточной коробкой; 9 – четырехпозиционный распределитель; 10 – пятипозиционный прибор управления; 11 – станина; 12 – рама; 13 – стрелочный указатель давления на забой

Трансмиссия бурового станка. Это совокупность механизмов, предназначенных для изменения чисел оборотов и величины крутящего момента, а также передачи их от двигателя станка к исполнительным механизмам.

В состав трансмиссии бурового станка, как правило, входят:

- муфта сцепления трансмиссии с двигателем,
- коробка перемены передач,
- раздаточная коробка.

Привод или двигатель – это машина, преобразующая один вид энергии в другой. В случае с буровым станком двигатель обеспечивает получение определенного числа оборотов и необходимой величины крутящего момента. Совокупность этих параметров определяет мощность двигателя.

В случае со станком исполнительные механизмы, трансмиссия и двигатель монтируются на раме станка. В случае с установкой эти механизмы монтируются раздельно: или на общей платформе, или отдельных фундаментах. Кинематическая связь между ними обеспечивается за счет карданных, цепных или клиноременных передач.

Кроме того, на самих механизмах, раме или платформе монтируются детали и механизмы систем, обеспечивающих как вспомогательные, так и основные технологические процессы при бурении.

Механизм подачи бурильных труб. Он обеспечивает поддержание необходимой величины осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент, а также регулировку скорости подачи бурового инструмента.

У станка это, как правило, гидравлическая система, а у буровых установок - либо канатная, либо комбинированная (канатно-цепная, канатно- гидравлическая и т. п.).

Приборы контроля и органы управления. Для обеспечения эффективного управления процесса проведения основных и вспомогательных технологических операций при бурении станок или установка оборудуется различными приборами и органами управления. Приборы позволяют контролировать осевую нагрузку на забой, давление в гидравлической системе станка и т. д. В ряде случаев на буровой установке устанавливают комплекс контрольно-измерительной аппаратуры. Он может осуществлять контроль практически всех основных технологических параметров бурения: механическую скорость, количество подаваемой в скважину промывочной жидкости, вес бурового снаряда при проведении спускоподъемных операций и т. д.

Органы управления позволяют управлять исполнительными и вспомогательными механизмами и системами станка или установки. К ним относятся рычаги, рукоятки, маховики, переключатели кнопок и т. д.

Вопросы для самопроверки:

1. Назовите назначение бурового станка. Перечислите его основные исполнительные механизмы и их назначение.
2. Какие узлы входят в состав трансмиссии буровых станков? Каково их назначение?
3. Какие машины и системы присутствуют в конструкции станка, кроме исполнительных механизмов?
4. Каково назначение приборов и органов управления бурового станка или установки?

3. Принципиальные схемы компоновки и модификации буровых станков и установок

Компоновка – способ взаимного расположения основных рабочих и вспомогательных механизмов, а также вид их кинематической и конструктивной связи между собой.

Буровые станки и установки компонуются по двум основным схемам – моноблочной и разобщенной.

Моноблочная компоновка используется при проектировании станков, имеющих шпиндельный вращатель. Такие станки называют шпиндельными. В этой схеме основные узлы расположены в непосредственной близости и связаны между собой не только кинематически, но и конструктивно. Небольшие межцентровые расстояния в моноблочной схеме позволяют использовать компактные зубчатые передачи.

Моноблочная компоновка может иметь различные варианты. Например, в станке СКБ-3 (СКБ 200/300) основные узлы и механизмы смонтированы следующим образом: вращатель, лебедка и коробка передач располагаются в одну линию (рис. 3.1). Такое решение упрощает конструкцию станка: исключаются лишние передачи и улучшаются условия работы деталей механизмов. Кроме того, такая компоновка позволяет разместить основные узлы на верхних балках рамы станка. При этом обеспечивается хороший доступ ко всем узлам и местам их соединений для осмотра, регулировки и ремонта. Появляется возможность ремонтировать станок, меняя узлы целиком (так называемый поузловой ремонт).

У станков СКБ-4, СКБ-5, ЗИФ650М и ЗИФ1200МР коробка перемены передач находится под лебедкой (рис. 3.2 и 3.3). Вращение к исполнительным механизмам - вращателю и лебедке передается от коробки передач через редуктор, называемый раздаточной коробкой.

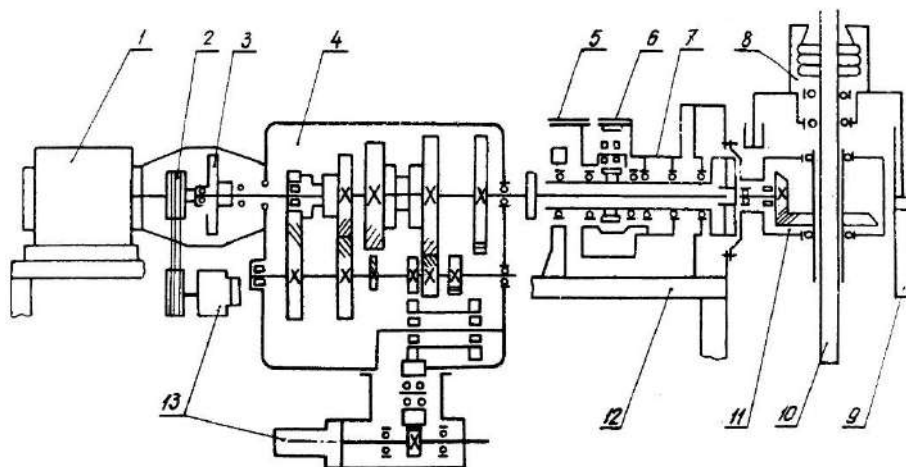


Рис. 3.1. Кинематическая схема станка СКБ-3:

1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – фрикционная муфта; 4 – коробка передач; 5 – тормоз спуска; 6 – тормоз подъема; 7 – лебедка; 8 – зажимной патрон; 9 – гидроцилиндры; 10 – шпиндель; 11 – вращатель; 12 – балки основания станка; 13 – маслонасосы

Такая схема монтажа основных узлов, при высокой компактности, имеет ряд недостатков: затруднен доступ к отдельным деталям для осмотра, регулировок и ремонтов, затруднен поузловой ремонт.

По мере увеличения мощности и веса оборудования компактность буровых станков из достоинства становится недостатком. Из-за возросших размеров деталей и механизмов ухудшается доступ к ним для осмотра и ремонта, а также усложняется доставка к месту бурения, в связи с необходимостью их разборки перед транспортировкой и последующей сборкой на новом месте.

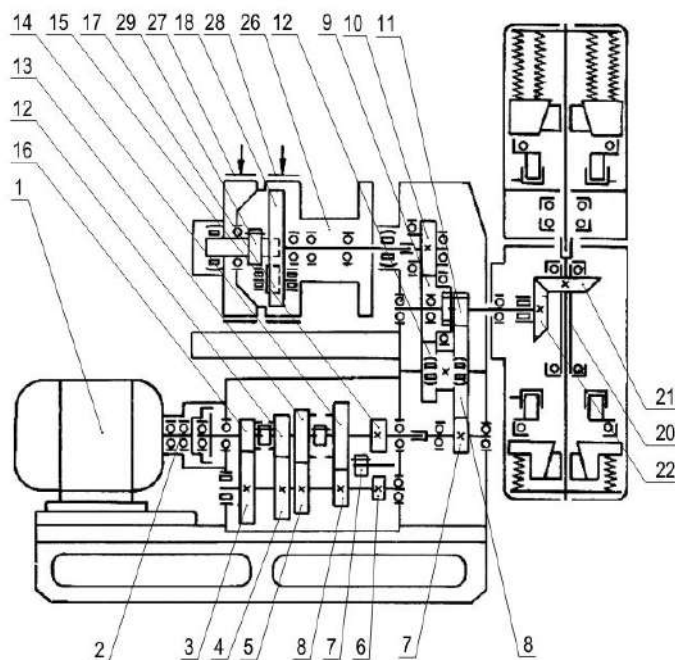


Рис. 3.2. Кинематическая схема станка СКБ-4:

1 – электродвигатель; 2 – муфта сцепления; 3, 4, 5, 8 – шестерни промежуточного вала коробки передач; 6, 7 – шестерни обратного вращения; 10, 11, 19, 23, 24, 25 – шестерни раздаточной коробки; 12, 13, 14, 15 – шестерни вторичного вала коробки передач; 16 – шестерня первичного вала; 17, 18, 29 – шестерни лебедки; 20 – приводная муфта; 21, 22 – шестерни конического редуктора; 26 – лебедка; 27, 28 – тормоза спуска и подъема

Поэтому при разработке крупногабаритных или самоходных установок используют **разобщенную компоновку**. Для нее характерно наличие в большинстве случаев только кинематической связи между узлами или блоками, а также широкое применение цепных и карданных передач, обеспечивающих значительные межцентровые расстояния между механизмами.

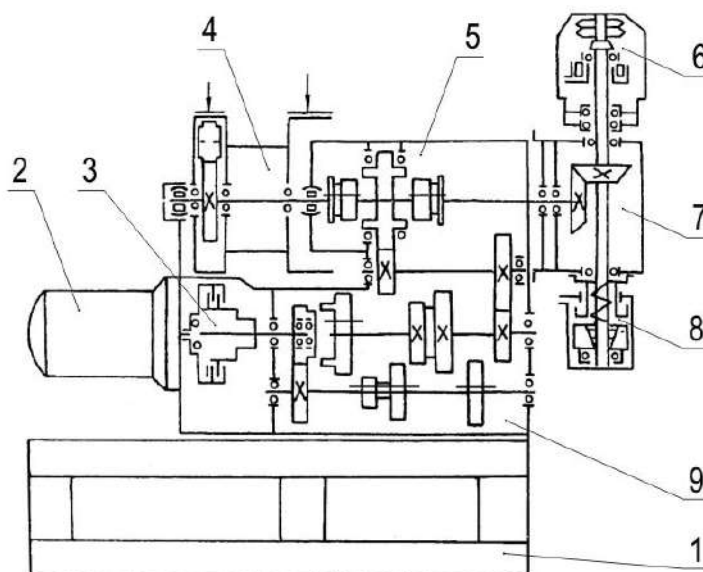


Рис. 3.3. Кинематическая схема станка СКБ-5:

1 – рама; 2 – электродвигатель; 3 – муфта сцепления; 4 – лебедка; 5 – раздаточная коробка; 6, 8 – патроны; 7 – вращатель; 9 – коробка передач

В этом случае установка состоит из отдельных блоков: лебедки, ротора, регулятора подачи, буровой насосной установки, гидросистемы, электрического и гидравлического пультов управления (рис. 3.5).

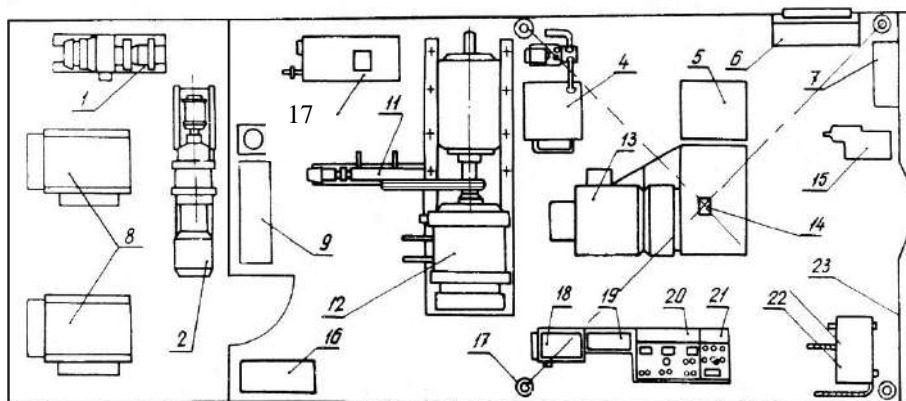


Рис. 3.5. Пример расположения узлов установки с разобщенной компоновкой:

1 – электромашинный усилитель; 2 – главный привод (электродвигатель и генератор); 3 – электростанция; 4 – система охлаждения лебедки; 5 – подсвечник; 6 – верстак; 7 – стеллаж для инструмента; 8 – буровые насосы; 9 – шкаф управления переменного тока; 10 – реостат; 11 – регулятор подачи; 12 – лебедка; 13 – ротор; 14 – устье скважины; 15 – датчик давления; 16 – шкаф управления постоянного тока; 17 – опора вышки; 18 – шкаф тиристорный; 19 – КИП «Курс 613»; 20, 21 – пульты управления; 22 – маслостанция; 23 – буровое здание

Для обеспечения высоких технико-экономических показателей бурения в разнообразных специфических условиях могут использоваться унифицированные буровые комплексы.

Их особенность заключается в возможности переоборудования базовой модели (например, станок СКБ-3) в одну из возможных модификаций, которая лучше всего

удовлетворяет требованиям технологии бурения в конкретных геолого-технических условиях. Основой такого комплекса являются наиболее трудоемкая в изготовлении группа узлов привода и трансмиссии, наличие которой обязательно во всех модификациях.

Сменными являются такие узлы, как:

- коробка передач,
- вращатели с различными диапазонами частот вращения и крутящими моментами, проходным отверстием под бурильные или обсадные трубы разного диаметра,
- средства спуска-подъема, в качестве которых возможно применение лебедок или экстракторов,
- механизмы подачи, отличающиеся величиной хода или развиваемого усилия.

3.1. Описание возможных модификаций

В качестве примера рассматривается унифицированный комплекс, предназначенный для бурения скважин различного назначения на глубину до 300 м.

3.1.1. Базовая модель УКБ 200/300

Она предназначена для колонкового бурения. При этом глубина бурения алмазными коронками достигает 300 м, а твердосплавными - 200 м в обычных геологотехнических условиях. Привод станка может осуществляться от электродвигателя мощностью 13 кВт или от дизеля мощностью 40 л. с. (29,3 кВт).

Установка должна иметь следующие механизмы и узлы:

- буровой станок, состоящий из основания, рамы, коробки передач, лебедки, вращателя с гидравлическим зажимным патроном и гидравлическим механизмом подачи бурильных труб;
- электродвигатель или двигатель внутреннего сгорания для привода бурового станка;
- буровой насос типа НБЗ-120/40;
- мачта типа МР-6.

Установка может выпускаться также в самоходном варианте на шасси грузового автомобиля (например, ЗИЛ-131). Транспортной базой также может служить трактор (например, ТТ-4).

Вращатель шпиндельного типа может быть оснащен гидравлическими или механическими зажимными патронами.

Шпиндель вращателя должен иметь проходное отверстие диаметром 54 мм. Освобождение устья скважины осуществляется отодвиганием бурового станка в сторону с помощью гидросистемы. Давление масла в ней обычно регулируется переливным золотником, установленным в нагнетательной линии. Скорость подачи изменяется дросселем, расположенным на линии слива из нижних полостей гидроцилиндров подачи.

3.1.2. Модификация для труднодоступных условий

Основные отличия этой модификации от базовой модели:

- станок должен разбираться на узлы малого веса (до 500 Н);
- зажимные патроны механические, поскольку они являются более легкими, чем гидравлические, и не требуют для своей работы гидроаппаратуры;
- привод - электродвигатель или карбюраторный двигатель, как более легкий по сравнению с дизелем;
- способ вскрытия устья скважины - отведение вращателя в сторону, в силу отсутствия рамы с гидроцилиндром перемещения;
- отсутствует трубооборот.

3.1.3. Модификация для ударно-вращательного бурения

Основной особенностью этой модификации является наличие низких скоростей вращения шпинделя 15-50 об/мин. В соответствии с этим целесообразнее использовать электродвигатель, который путем переключения может развивать мощность либо 6 кВт, при частоте вращения вала 500 об/мин., либо мощность, равную 7,5 кВт, при частоте вращения 920 об/мин. При этом можно получить два ряда частот вращения шпинделя: 1-й ряд - 25; 45; 80; 120; 185 об/мин; 2-й ряд - 50; 90; 160; 250; 370 об/мин.

3.1.4. Модификация для бурения из подземных горных выработок

Особенностью этой модификации является отсутствие лебедки.

Производство спуско-подъемных операций выполняется с помощью съемных экстракторов. При этом коробка передач, лебедка и вращатель располагаются в одну линию.

Для улучшения транспортировки и монтажа на рабочем месте установка является разборной на узлы малого веса.

Освобождение устья скважины производится отведением в сторону вращателя. Основание с гидроцилиндром перемещения станка исключено. Зажимные патроны механические. Для крепления станка в горной выработке применяются специальные распорные колонки, на которых он монтируется.

Поскольку при бурении горизонтальных скважин затрачивается больше мощности на холостое вращение труб, чем при бурении вертикальных, то установки этой модификации используют двигатели большей мощности - 22 кВт при частоте вращения вала 2910 об/мин.

3.1.5. Модификация для бурения со съемными керноприемными снарядами

У вращателя станка этой модификации увеличен диаметр проходного отверстия до 93 мм. При этом используются механические зажимные патроны, поскольку изготовление гидравлических патронов для труб диаметром 76 и 93 мм связано с усложнением конструкции и утяжелением станка.

Вопросы для самопроверки:

1. Что называется компоновкой бурового станка? Назовите основные схемы компоновок буровых станков.
2. Назовите варианты компоновки основных узлов буровых станков шпиндельного типа, их достоинства и недостатки.
3. Дайте описание модификаций буровых станков, предназначенных для бурения на глубину до 300 м.

4. Буровая установка УКБ-4

4.1. Назначение и параметры буровой установки

Передвижная буровая установка УКБ-4П (рис. 4.1) и самоходная - УКБ-4С предназначены для вращательного бурения геологоразведочных скважин глубиной до 300 и 500 м при конечном диаметре соответственно 93 и 59 мм и углах наклона от 90 до 60° в различных геологических условиях.

Технические характеристики буровой установки УКБ-4П приведены в табл. 1.1.

Установка состоит из бурового станка СКБ-4, бурового насоса НБЗ-120/40, транспортной базы ТБ-15, труборазворота РТ-1200М, устройства для смазки колонны УСК, обогреваемого подсвечника ПО – 4/5, сальника для алмазного бурения СА, элеватора МЗ-50-80 и вертлюга-амортизатора грузоподъемностью 5 т. Кроме того, в состав установки входит буровое здание и мачта типа БМТ-4, допускающая работу свечами длиной 9,5 м.

Грузоподъемность на крюке мачты: номинальная 3,2 т, а максимальная – 8 т. Предельные углы наклона мачты 90-60°, а ее рабочая высота 13,7 м. Ствол мачты состоит из металлической трубы с двумя подкосами. Продольный телескопический подкос позволяет регулировать наклон мачты при бурении. Подъем мачты в рабочее положение и опускание ее при транспортировке производится с помощью двух гидравлических домкратов, работающих от автономной гидросистемы буровой установки.

4.2. Устройство станка СКБ-4

4.2.1. Исполнительные механизмы

Для обеспечения таких технологических процессов при сооружении скважин, как вращение колонны бурильных труб и осуществление спуска или подъема колонны в скважине, станок СКБ-4 имеет два исполнительных механизма – вращатель и лебедку.

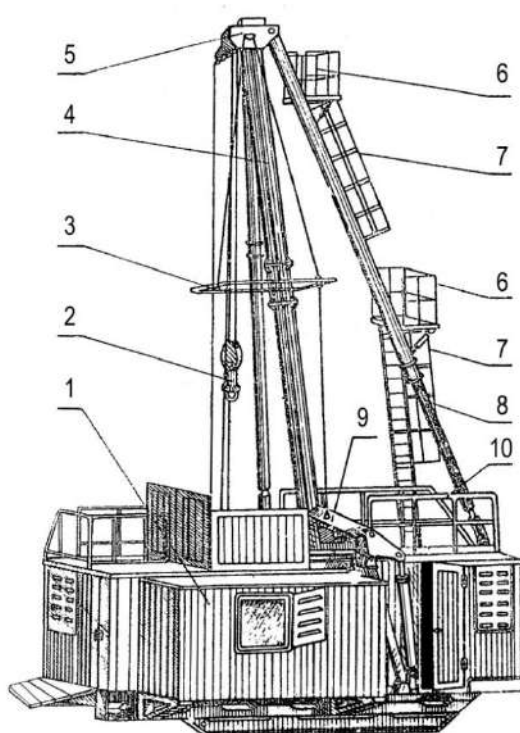


Рис. 4.1. Установка УКБ-4П:

1 – буровое здание; 2 – элеватор; 3 – свечеприемник; 4 – ствол; 5 – кронблок; 6, 10 – площадки; 7 – лестницы; 8 – подкос; 9 – портал

4.2.1.1. Вращатель

Внешний вид вращателя представлен на рис. 4.2, разрез – на рис. 4.3.

Назначение вращателя – передать крутящий момент и частоту вращения от трансмиссии станка к ведущей бурильной трубе. Кроме того, конический редуктор вращателя позволяет поворачивать ось вращения шпинделя (и, соответственно, ведущей бурильной трубы) в вертикальной плоскости. А это позволяет фиксировать вращатель на корпусе станка под различными углами к горизонту и бурить наклонные скважины. Основой вращателя является конический редуктор, состоящий из вала-шестерни 1 (рис. 4.3) и находящейся с ней в зацеплении конической шестерни 2. Они вращаются в подшипниках 3, 4 и 5, установленных в корпусе 6. Шестерня 2 передает крутящий момент приводной муфте 7. Она вращается в подшипниках 8, и через шестерню 2 – в подшипнике 5, которые установлены в корпусе вращателя.

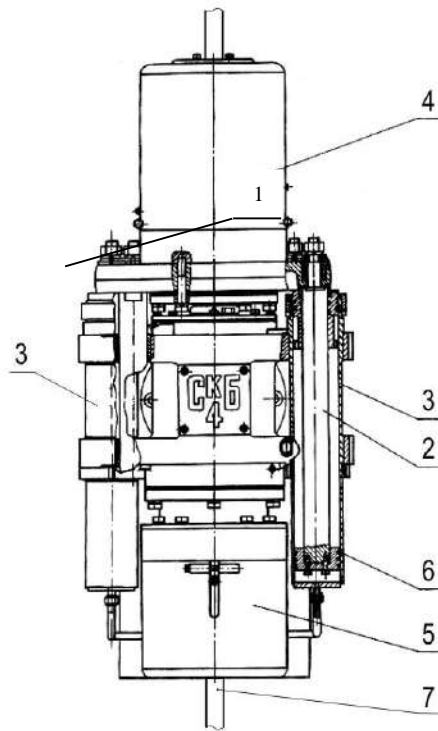


Рис. 4.2. Вращатель. Внешний вид:

1 – траверса; 2 – шток; 3 – гидроцилиндры; 4 – верхний зажимной гидропатрон; 5 – нижний зажимной гидропатрон; 6 – поршень; 7 - ведущая бурильная труба

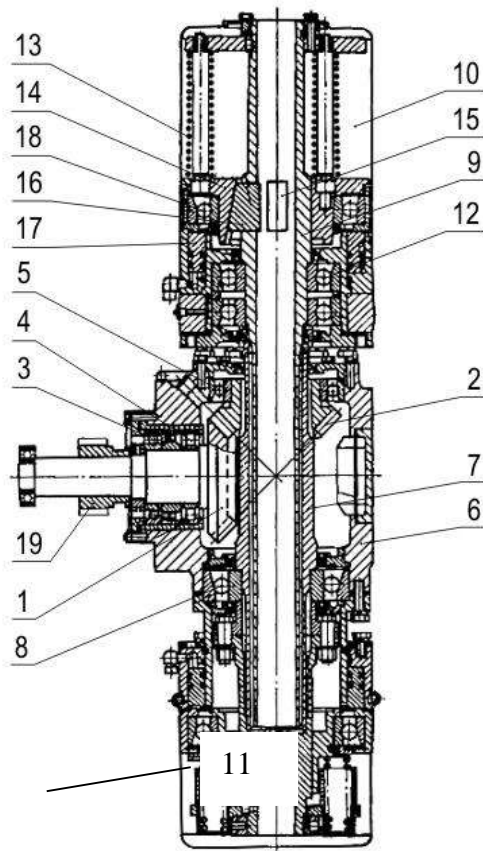


Рис. 4.3. Вращатель. Разрез:

1 – вал-шестерня; 2 – коническая шестерня; 3, 4, 5, 8, 12 - подшипники; 6 – корпус вращателя; 7 – приводная муфта; 9 – шпиндель; 10 – верхний зажимной патрон; 13 – пружина; 14 – коническая обойма; 15 – окно; 16 – кулачок; 17 – кольцевой поршень; 18 – упорный подшипник; 19 – подвижная шестерня

Внутренняя поверхность муфты 7 также изготовлена в виде продольных пазов, называемых шлицами. В эти шлицы вставлена еще одна цилиндрическая деталь, называемая шпинделем 9.

Шпиндель имеет шлицевую наружную поверхность. По шлицам он может перемещаться в муфте 7 относительно корпуса вращателя в осевом направлении и одновременно вращаться. Таким образом, крутящий момент от трансмиссии станка передается шпинделю через конический редуктор и шлицевую муфту.

В свою очередь, от шпинделя крутящий момент передается ведущей бурильной трубе, при помощи зажимного гидравлического патрона 10, сконструированного на верхней части шпинделя. Перемещение шпинделя и зажимного патрона в осевом направлении обеспечивается при помощи массивной стальной балки 1 (см. рис. 4.2), которая называется траверсой. Траверса связана с гидросистемой станка двумя штоками 2, находящимися в гидроцилиндрах 3, закрепленных на корпусе вращателя.

Верхний конец шпинделя вращается в подшипниках 12 (см. рис. 4.3), установленных в траверсе.

Компоновка станка СКБ-4 позволяет смонтировать гидравлический механизм подачи бурильных труб на корпусе вращателя. Верхний зажимной патрон, обеспечивающий механическую связь шпинделя с ведущей бурильной трубой, устроен следующим образом.

Пружины 13 (см. рис. 4.3) гидропатрона давят на коническую обойму 14, и она, перемещаясь, выдавливает в окна 15 шпинделя три кулачка 16, которые и зажимают ведущую бурильную трубу, находящуюся в шпинделе.

При раскреплении гидроцилиндра кольцевой поршень 17 за счет давления масла в гидросистеме давит на обойму 14 через упорный подшипник 18 и, преодолевая давление пружин 13, освобождает кулачки 16.

Таким образом, при отсутствии давления масла в механизме подачи ведущая бурильная труба постоянно зажата в верхнем гидропатроне. Такой патрон называется постоянно замкнутым, в отличие от нижнего 11 (см. рис. 4.3), который постоянно разомкнут.

Нижний патрон закреплен не на подвижной траверсе, а на корпусе станка. Его назначение – обеспечивать вращение колонны бурильных труб во время перемещения траверсы со шпинделем из крайнего нижнего положения в крайнее верхнее. Эта процедура называется обратным перехватом.

4.2.1.2. Лебедка

Назначение лебедки – обеспечить наматывание и сматывание каната талевой системы буровой установки при проведении спуско-подъемных операций с бурильными обсадными трубами.

Она должна соответствовать ряду требований:

- обеспечить необходимый крутящий момент, достаточный для подъема колонны бурильных и обсадных труб из скважины;
- обеспечить достаточное число оборотов барабана, чтобы скорость подъема или спуска была оптимальна;
- иметь возможность реверса, т. е. возможность изменения направления вращения барабана, при переходе от спуска к подъему и обратно;
- иметь удобное управление.

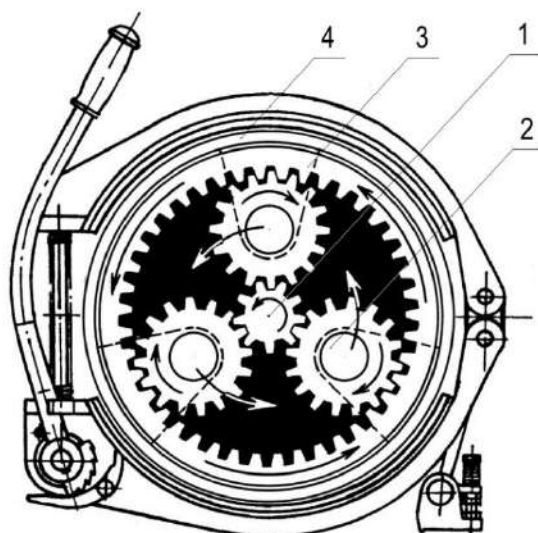


Рис. 4.4. Схема планетарного механизма лебедки:
1 – солнечная шестерня; 2 – сателлит; 3 – зубчатый венец; 4 – шкив водила (шкив тормоза подъема)

Этим условиям удовлетворяет лебедка станка СКБ-4, имеющая отдельный редуктор, обладающий достаточной компактностью и большим передаточным числом. Это редуктор планетарного типа.

Схема работы редуктора лебедки приведена на рис. 4.4, а устройство – на рис. 4.5.

Крутящий момент от трансмиссии станка передается через вал лебедки «солнечной» шестерне 1. Та, в свою очередь, передает его трем шестерням, называемым сателлитами 2, а сателлиты – зубчатому венцу 3. Вокруг зубчатого венца установлен тормозной шкив 4 (рис. 4.5), связанный с барабаном 5. Барабан вращается на валу 6 в двух подшипниках 7.

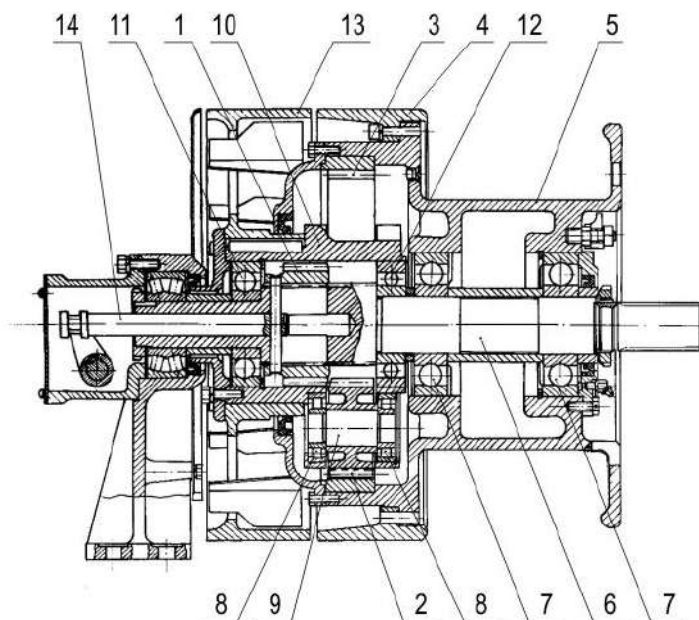


Рис. 4.5. Лебедка:
1 – солнечная шестерня; 2 – сателлит; 3 – зубчатый венец; 4 – шкив тормоза спуска; 5 – барабан; 6 – вал барабана; 7 – подшипник барабана; 8 – подшипник сателлита; 9 – ось сателлита; 10 – водило; 11, 12 – подшипники водила; 13 – шкив тормоза подъема; 14 – шток включения лебедки

Сателлиты вращаются в подшипниках 8 на осях 9. Оси установлены в детали, называемой водило 10. Водило, в свою очередь, вращается вокруг оси барабана на двух подшипниках 11 и 12. Оно соединено с тормозным шкивом 13, называемым шкивом тормоза подъема..

При торможении шкива водила колодочным тормозом оси сателлитов становятся неподвижными и крутящий момент

от солнечного колеса передается ²⁹ атому венцу и связанному с ним, барабану лебедки.

Барабан, вращаясь, наматывает канат. В момент, когда необходимо прекратить подъем, тормозной шкив водила растормаживают, разжимая колодки, и барабан, за счет веса колонны бурильных труб, канатом начинает разматываться. Для того чтобы этот процесс проходил под контролем, тормозят шкив 4 тормоза спуска.

Таким образом, управление лебедкой происходит при помощи двух колодочных тормозов (рис. 4.6) – тормоза спуска и тормоза подъема.

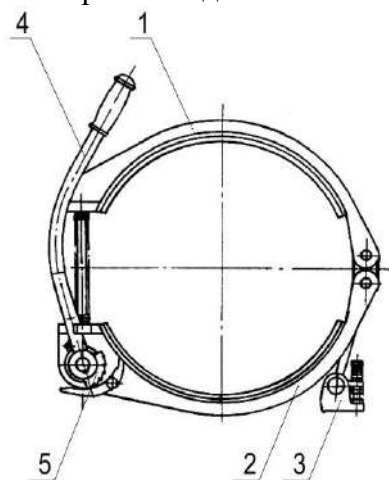


Рис. 4.6. Тормоз лебедки:

1, 2 – тормозные колодки; 3 – опора тормоза; 4 – рукоятка управления; 5 – храповой механизм фиксации тормоза

Они имеют по две колодки 1 и 2, охватывающие тормозные шкивы лебедки. Колодки закреплены на станке при помощи опоры 3, сжимаются и разжимаются рукояткой 4, тормозя шкивы (поз. 2 и 3 на рис. 2.1). Для отключения лебедки от трансмиссии станка, во время бурения, солнечная шестерня может перемещаться по валу 6 (рис. 4.5) в осевом направлении при помощи штока 14. При этом она выходит из зацепления с сателлитами и планетарный редуктор оказывается отключенным от вала 6, связанного с трансмиссией станка. Перемещение штока 14 производится рукояткой, находящейся слева от тормозных шкивов лебедки (поз. 1 рис. 2.1.).

4.2.2. Трансмиссия станка

Предназначена для передачи крутящего момента и частоты вращения от вала двигателя к исполнительным механизмам. В ее состав входят три узла: *муфта сцепления, коробка перемены передач и раздаточная коробка.*

4.2.2.1. Муфта сцепления

Она предназначена для соединения вала электродвигателя и первичного вала коробки передач, а также для кратковременного их разъединения, с целью переключения зацепления шестерен в коробке передач. В буровом станке СКБ-4 используется муфта сцепления, заимствованная от автомобиля ЗИЛ 130.

Принципиальное устройство муфты сцепления приведено на рис. 4.7.

На валу электродвигателя 1 установлен ведущий диск 2, имеющий кольцевую поверхность, к которой прижимается ведомый диск 3. Прижимается он за счет усилия пружин 4, которые находятся в корпусе нажимного диска 5, закрепленном на ведущем диске. Пружины давят на нажимной диск 6 и зажимают ведомый диск между ведущим и нажимным. Крутящий момент от ведущего диска ведомому передается через фрикционные кольцевые накладки 7, которые с двух сторон приклепываются к ведомому диску.

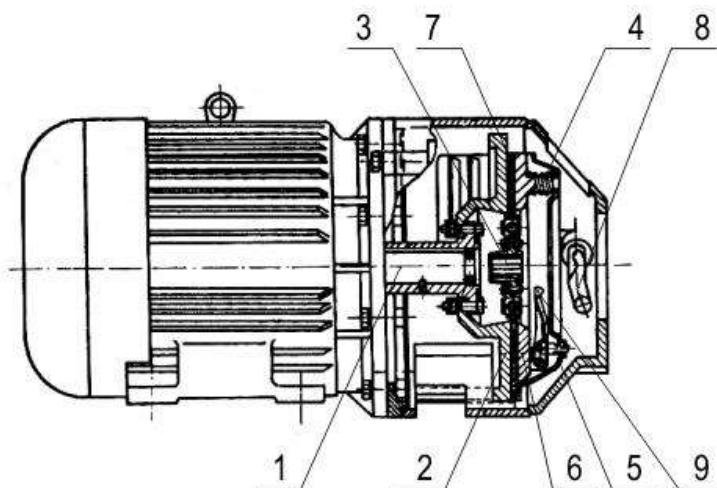


Рис. 4.7. Сцепление станка СКБ-4:
1 – вал электродвигателя; 2 – ведущий диск; 3 – ведомый диск; 4 – пружины нажимные; 5 – корпус нажимного диска; 6 – нажимной диск; 7 – фрикционные накладки; 8 – вилка; 9 – лепестки нажимного диска

В центральной части ведомого диска находится шлицевая ступица, в которую вставляется первичный вал коробки передач (поз. 1. рис. 4.8). На нем находится выжимной подшипник 2, который может перемещаться по валу в осевом направлении вилкой 8 (см. рис. 4.7). Вилка связана с рычагом 6 (см. рис. 2.1), находящимся снаружи корпуса муфты сцепления. С его помощью происходит включение и выключение муфты.

Выжимной подшипник при помощи рычага включения сцепления 6 (см. рис. 2.1) и вилки 8 (см. рис. 4.7) передает давление на лепестки нажимного диска 9. Они сжимают пружины 4 и, таким образом, раздвигают сжатые ведомый и нажимной диски, освобождая зажатый между ними ведомый 3 диск. Валы электродвигателя и коробки передач оказываются разъединенными.

Для включения муфты необходимо переместить рычаг включения обратно, и пружины снова зажмут ведомый диск между ведущим и нажимным. Рукоятка управления муфтой сцепления фиксируется снаружи корпуса сцепления в двух положениях: «включено» и «выключено».

4.2.2.2. Коробка перемены передач

Она предназначена для ступенчатого изменения величины крутящего момента и чисел оборотов, передаваемых от электродвигателя к раздаточной коробке. Кинематическая схема коробки передач приведена на рис. 3.2.

Коробка передач заимствована от автомобиля ЗИЛ 130 и имеет пять прямых и одну обратную передачу. Она представляет собой редуктор (см. рис. 4.8), в котором изменение чисел оборотов и крутящего момента происходит за счет перемещения двух зубчатых муфт с синхронизаторами 3 и 4. Они могут входить в зацепление с шестернями 5, 6, 7, 8,

имеющими различное количество зубьев и диаметр. При этом изменяется суммарное передаточное число шестерен, находящихся в зацеплении. Перемещают зубчатые муфты по валам коробки стальные вилки 9, 10, 11, которые в свою очередь перемещаются рычагом переключения передач 12 (см. рис. 2.1, поз 7).

4.2.2.3. Раздаточная коробка

Раздаточная коробка предназначена для удваивания количества передач, передаваемых от коробки передач, а также для передачи крутящего момента на лебедку и вращатель. Она (см. рис. 4.8) представляет собой вертикальный редуктор, нижняя часть которого соединена с коробкой передач, а верхняя с вращателем и лебедкой.

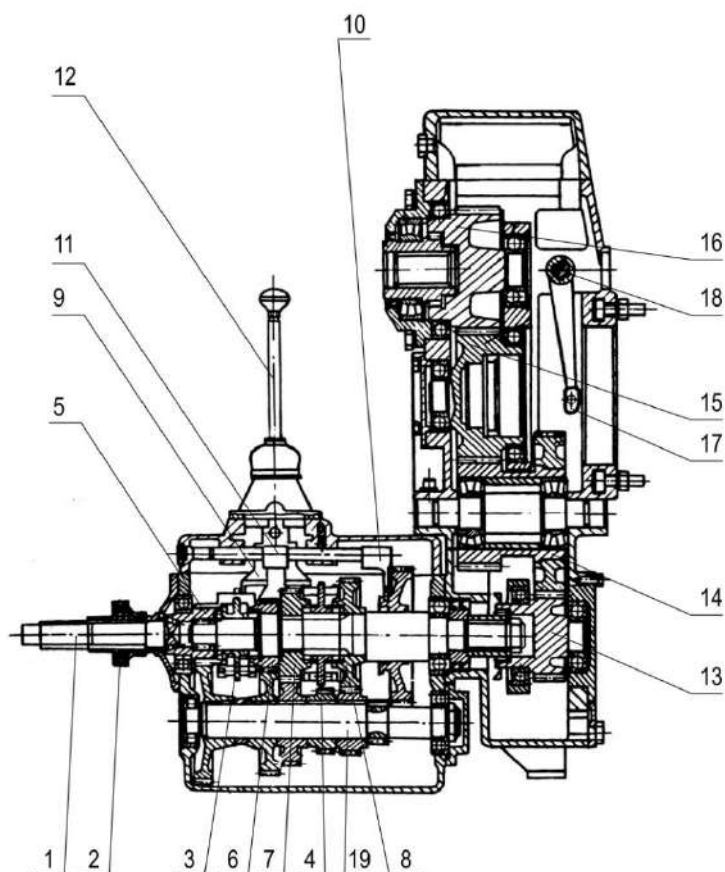


Рис. 4.8. Трансмиссия станка СКБ-4:

1 – первичный вал коробки передач; 2 – выжимной подшипник; 3, 4 – синхронизаторные муфты; 5, 6, 7, 8 – шестерни первичного вала; 9, 10, 11 – вилки переключения передач; 12 – рычаг переключения передач; 13 – шестерня раздаточной коробки; 14 – блок шестерен; 15 – шестерня привода вращателя; 16 – шестерня привода лебедки; 17 – вилка включения вращателя; 18 – ось вилки; 19 – вторичный вал коробки передач с шестернями

Крутящий момент от коробки передач при помощи шестерни 13 и блока шестерен 14 передается шестерням 15 и 16. Шестерня 16 имеет центральное шлицевое отверстие, в которое устанавливается шлицевой вал лебедки (поз. 6 рис. 4.5). Таким образом, он постоянно вращается при работе станка.

Шестерня 15 имеет ступенчатое осевое отверстие. При этом одна из ступеней выполнена в виде зубчатого венца. В этом отверстии размещается подвижная шестерня вращателя (см. поз. 19 на рис. 4.3.). Она имеет возможность двигаться по шлицам вала шестерни в осевом направлении. Перемещение шестерни 19 обеспечиваетсявилкой (см. поз. 17 на рис. 4.8), сухари которой входят в кольцевую проточку, сделанную на наружной

поверхности шестерни. Вилка же перемещается относительно оси 18 рукояткой управления раздаточной коробкой (см. поз. 8 на рис. 2.1).

Таким образом, перемещая вилок шестерню 19 (см. рис. 4.3), ее можно ввести в зацепление: с шестерней 15 (см. рис. 4.8), одной из шестерен блока 14 или вывести из зацепления вообще (нейтральное положение). В первом случае можно получить один ряд чисел оборотов на шпинделе, во втором случае – второй, а в третьем – отключить вращатель от трансмиссии.

4.3. Системы станка

Для выполнения ряда технологических операций в процессе бурения и с целью механизации производственных процессов станки могут оснащаться различными системами, выполняющими эти операции и процессы.

В буровом станке СКБ-4 такой системой является гидравлическая система.

4.3.1. Гидравлическая система

Гидросистема станка обеспечивает работу механизма подачи бурового инструмента в скважину при бурении. Кроме того, с ее помощью станок перемещается от скважины к скважине для освобождения устья при производстве спуско-подъемных операций.

При работе механизма подачи гидросистема обеспечивает выполнение следующих операций:

- закрепление и раскрепление ведущей бурильной трубы в верхнем и нижнем гидропатронах;
- перемещение траверсы со шпинделем в осевом направлении и остановку ее в любом положении;
- осевую нагрузку на траверсу с контролем давления;
- автоматическое и полуавтоматическое перекрепление бурового снаряда гидропатронами с перемещением ведущей бурильной трубы (обратный перехват);
- аварийный подъем бурового снаряда на длину штоков цилиндров при остановке приводного двигателя станка.

Принцип работы гидросистемы станка заключается в следующем:

Масло по трубопроводам, под давлением, подается в гидроцилиндры и заставляет перемещаться поршни, находящиеся в них. Поршни перемещают штоки, связанные с ними, а те, в свою очередь, детали механизмов.

Гидросистема станка СКБ 4 (рис. 4.9) состоит из следующих основных элементов:

- маслобак;
- трубопроводы;
- маслонасос с приводом от электродвигателя;
- ручной маслонасос;
- распределитель;
- прибор управления с дросселем;
- предохранительные клапаны;
- золотники;
- цилиндры;
- поршни;
- штоки.

Гидросистема станка управляет исполнительными механизмами при помощи **двух систем управления**:

- **четырёхпозиционный распределитель** (см. поз. 9 рис. 2.1 и поз. 1 на рис. 4.9) направляет масло к гидропатронам 2 и 3, закрепляя и раскрепляя их, а также в гидроцилиндры 4 механизма подачи при быстром подъеме (перехвате);

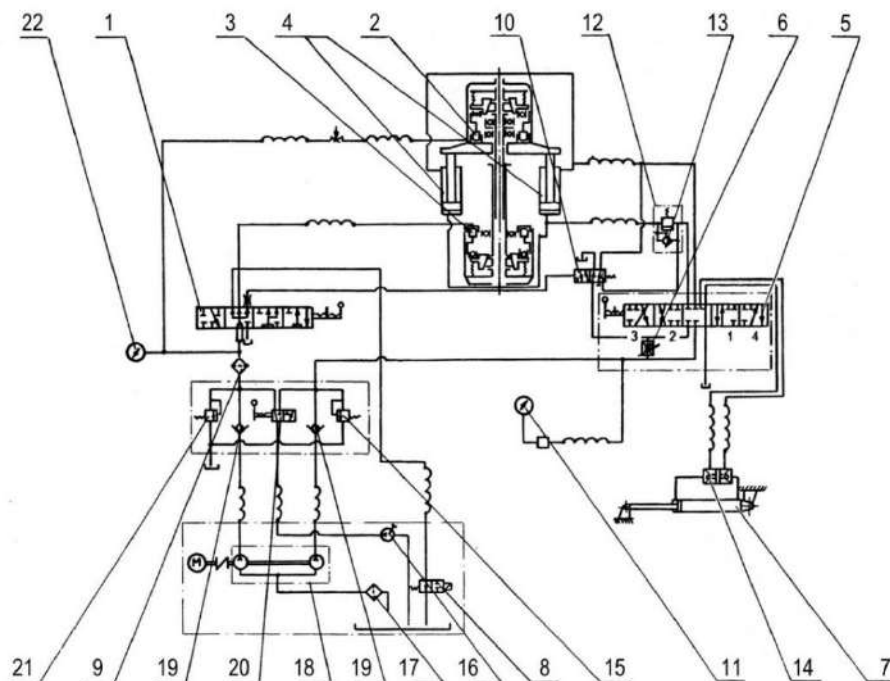


Рис. 4.9. Гидросистема станка СКБ-4:

1 – четырехпозиционный распределитель; 2 – верхний гидропатрон; 3 – нижний гидропатрон; 4 – цилиндры подачи; 5 – пятипозиционный прибор управления; 6 – дроссель; 7 – цилиндр перемещения станка; 8 – электрозолотник; 9 – фильтр пластинчатый; 10 – золотник быстрого подъема; 11 – указатель давления; 12 – регулятор подачи бурового снаряда; 13 – обратный клапан регулятора подачи; 14 – гидрозамок; 15 – клапан предохранительный; 16 – насос ручной; 17 – фильтр; 18 – насос пластинчатый; 19 – клапан обратный; 20 – переключатель работы ручного насоса; 21 – клапан предохранительный; 22 – манометр

- **пятипозиционный прибор управления** (см. поз.10, рис 2.1 и поз. 5, на рис. 4.9) с дросселем 6 направляет масло в гидроцилиндры механизма подачи для создания осевой нагрузки, а также в гидроцилиндр перемещения станка от скважины к скважине. Дроссель – устройство, регулирующее величину потока и давление масла в трубопроводе, а следовательно, давление в гидроцилиндрах.

Основные операции, осуществляющиеся при помощи гидросистемы, производятся следующим образом.

Закрепление верхнего гидропатрона 2 (см. рис. 4.9) производится при установке распределителя 1 в положение «закрепить» (положение распределителя, как на рис. 4.9) Поток масла через электрозолотник 8 направляется на слив в маслобак. Давление в гидравлических полостях зажимных патронов 2 и 3 отсутствует. В верхнем гидропатроне ведущая бурильная труба зажимается по действием усилия винтовых пружин. В это время нижний гидропатрон под действием таких пружин находится в раскрепленном состоянии.

Раскрепление верхнего гидропатрона 2 (см. рис. 4.9) производится при установке распределителя 1 в положение «раскрепить» (крайнее правое положение распределителя на рис. 4.9). Масло поступает в верхний гидропатрон 2 и давит на кольцевой поршень. Он поднимается вверх и позволяет раздвинуться кулачкам. Ведущая бурильная труба раскрепляется. Нижний гидропатрон в это время также остается раскрепленным.

Перехват ведущей трубы происходит при установке распределителя в позицию «перехват» (см. на рис. 4.8 поз. 3 слева). Масло под давлением, через фильтр 18, поступает в верхний патрон и через распределитель – в нижний. Патроны перекрепляются. По мере

повышения давления в системе срабатывает золотник быстрого подъема 10, обеспечивая поступление масла в нижние полости гидроцилиндров 4. Траверса вращателя быстро перемещается вверх, двигаясь относительно вращающейся на месте ведущей бурильной трубы.

Перекрепление патронов может быть выполнено и без совершения быстрого подъема траверсы. При установке распределителя в позицию «обратный перехват» (распределитель на рис. 4.9 в верхнем крайнем левом положении) патроны также перекрепляются, только масло не поступает к золотнику быстрого подъема, и быстрый подъем траверсы не происходит.

Подача шпинделя вниз является рабочей подачей при бурении скважин, особенно тогда, когда веса бурового снаряда недостаточно для обеспечения необходимой осевой нагрузки. Прибор управления 5 (см. рис. 4.9) устанавливается в положение «вниз» (положение 1 на рис. 4.9). Масло под давлением подается в верхние полости цилиндров подачи 4. Величина давления регулируется маховиком дросселя 6 и контролируется стрелочным указателем давления 11 (см. на рис. 2.1. поз 13).

При движении штоков масло поршнями вытесняется из полостей цилиндров через регулятор подачи 12, в маслобак через прибор управления 5 и золотник быстрого подъема 10.

Регулятор подачи представляет собой дроссель, который регулирует диаметр сливного отверстия в трубопроводе так, чтобы давление в нижних полостях цилиндров было больше веса бурового снаряда на величину необходимой осевой нагрузки.

Подача шпинделя вверх производится установкой прибора управления 5 в позицию «вверх» (см. поз. 2 на рис. 4.9). Масло подается в нижние полости цилиндров 4 через обратный клапан 13 регулятора подачи 12. Давление регулируется дросселем 6 и контролируется прибором 11.

Остановка шпинделя производится установкой прибора управления в позицию «Стоп» (положение прибора управления, как на рис. 4.9). В этом случае нижние и верхние полости гидроцилиндров запираются.

Перемещение станка в скважине или от скважины осуществляется при постановке прибора управления 5 в позицию «от скважины» или «к скважине» (см. поз. 3 или 4 на рис. 4.9) и повышая давление масла в системе дросселем 6. При этом масло нагнетается в поршневою или штоковую полости цилиндра перемещения станка (см. поз. 7 на рис. 4.9).

Вопросы для самопроверки:

1. Перечислите основные детали и расскажите устройство вращателя станка СКБ-4. Как конструкция вращателя связана с механизмом подачи? В какой последовательности работают зажимные патроны станка?
2. Назовите назначение лебедки станка СКБ-4 и перечислите требования, которым она должна удовлетворять.
3. Расскажите принцип работы редуктора лебедки и способы управления им.
4. Назовите назначение трансмиссии станка СКБ-4 и устройство муфты сцепления.
5. Расскажите назначение и устройство коробки передач и раздаточной коробки станка СКБ-4.
6. Перечислите операции, выполняемые гидравлической системой СКБ-4. Каков принцип ее работы?
7. Расскажите работу гидросистемы станка при закреплении, раскреплении, перехвате, быстром подъеме и перекреплении гидропатронов.
8. Расскажите работу гидросистемы станка при необходимости подачи бурового снаряда на забой, подачи шпинделя от забоя и остановке шпинделя.
9. Каким образом работает гидросистема при перемещении станка от скважины к скважине?

Литература

1. Марамзин, А. В. Технические средства для алмазного бурения / А. В. Марамзин, Г. А. Блинов, А. А. Галиопа. – Л.: Недра, 1982. – 335 с.
2. Блинов, Г. А. Справочное руководство мастера геологоразведочного бурения / Г. А. Блинов, В. И. Васильев, Ю. Б. Бакланов и др. – Л.: Недра, 1983. – 400 с.
3. Сергиенко, И. А. Основы проектирования установок разведочного бурения / И. А. Сергиенко. – М.: Полиграфист, 1975. – 109 с.
4. Станок буровой СКБ-4. Паспорт и инструкция по эксплуатации.
5. Воздвиженский, Б. И. Колонковое бурение / Б. И. Воздвиженский, С. А. Волков, А. С. Волков. – М.: Недра, 1982. – 359 с.



МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»

С. Г. Эйнгорн, Н. Н. Дерябин

Буровые машины и механизмы

Методические указания
по выполнению курсового проекта
по дисциплине «Буровые машины и механизмы»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
Специализация Технология и техника разведки МПИ
очного и заочного обучения

Екатеринбург
2020

Оглавление

Введение.....	3
1. Методика расчета колонны бурильных труб.....	3
1.1. Расчет напряжений в верхней части колонны.....	3
1.2. Расчет затрат мощности на бурение.....	4
2. Расчет напряжений в нижней части колонны бурильных труб.....	8
3. Расчет бурильной колонны на выносливость.....	9
Приложения.....	11

ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по дисциплине «Буровые машины и механизмы» имеет своей целью закрепление теоретических знаний, полученных ими при изучении курса, а также привитие им навыков проектирования.

В методических указаниях представлен полный перечень вопросов которые должны быть рассмотрены в курсовом проекте, даны общие указания по структуре проекта и методике решения вопросов, связанных с выбором бурового инструмента (бурильных труб) и его прочностным расчетом.

Колонна бурильных труб выбирается исходя из заданной конструкции скважины в соответствии с маркой станка, способом бурения.

При бурении колонна бурильных труб подвергается воздействию разнообразных нагрузок, поэтому в трубах и их соединениях одновременно возникают напряжения сжатия $\sigma_{сж}$, растяжения $\sigma_{р}$, кручения τ , изгиба $\sigma_{из}$. Характер сочетания этих нагрузок определяется сечением, для которого производится расчет.

1. Методика расчета колонны бурильных труб

Прочностной расчет производится для верхней и нижней части колонны бурильных труб, а также для «нулевого сечения».

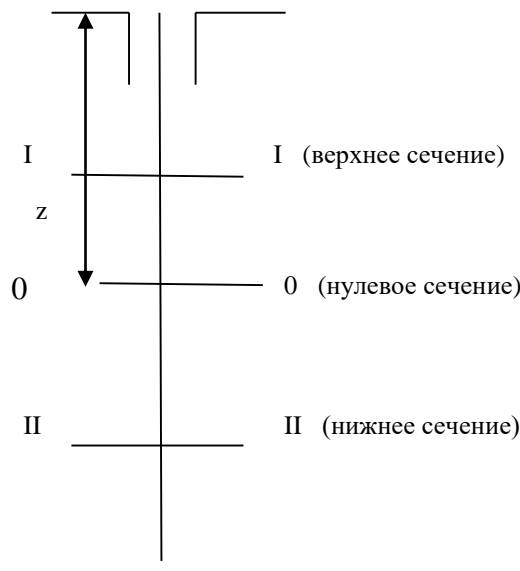


Рис. 1. Характерные сечения колонны бурильных труб. I-I – верхнее сечение; II-II – нижнее сечение; 0-0 – «нулевое сечение»; z – координата рассматриваемого сечения бурильной колонны растянутый участок колонны от нулевого сечения до устья скважины – знак «+», сжатый участок от нулевого сечения до забоя – знак «-».

1.1. Расчет напряжений в верхней части колонны

Здесь необходимо произвести расчет возникающих в колонне растягивающих напряжений – $\sigma_{р}$, и касательных напряжений – τ , поскольку и при бурении с «разгрузкой» и подъеме колонны с вращением механизм подачи станка удерживает колонну в подвешенном состоянии или поднимает ее.

Напряжение растяжения в верхнем сечении:

$$\sigma_{р} = Q_{кр}/F ; \quad (1.1)$$

где $Q_{кр}$ – нагрузка на крюке, Н; F – площадь опасного сечения, м².

$$Q_{кр} = Q \cdot K ; \quad (1.2)$$

где Q – вес снаряда, Н; K – коэффициент прихвата снаряда в скважине.

Вес снаряда, находящегося в скважине, заполненной промывочной жидкостью:

$$Q = \alpha \cdot q \cdot L (\sin \theta + f \cos \theta) (1 - \gamma_{ж}/\gamma_{т}) ; \quad (1.3)$$

где α – коэффициент, учитывающий массу соединительных элементов, 1,3 – для муфто-замковых, 1,0 – для ниппельных; q – вес 1 м. бурильных труб, Н/м; L – суммарная длина труб, м; θ – угол наклона скважины к горизонту, град; f – коэффициент трения материала труб о горную породу; $\gamma_{ж}$ – удельный вес промывочной жидкости, Н/м³; $\gamma_{т}$ – удельный вес материала труб ($5 \cdot 10^4$ – ЛБТ, $7 \cdot 10^4$ – СБТ), Н/м³.

Напряжение кручения рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau = M_{\delta}/W_p ; \quad (1.4)$$

где M_{δ} – крутящий момент, возникающий при бурении, Н/м; W_p – полярный момент сопротивления опасного сечения, м³.

Крутящий момент при бурении:

$$M_{\delta} = N_{\delta}/\omega, \quad (1.5)$$

где N_{δ} – мощность, затрачиваемая на вращение колонны бурильных труб $N_{тр}$, кВт; ω – угловая скорость вращения снаряда, с⁻¹.

Величина W_p определяется:

$$W_p = (d_n^4 - d_b^4)/d_n, \quad (1.6)$$

где d_n – наружный диаметр бурильных труб с учетом износа, м; d_b – внутренний диаметр бурильных труб с учетом износа, м.

Величина ω определяется:

$$\omega = (\pi \cdot n)/30, \quad (1.7)$$

где n – число оборотов бурового снаряда при бурении, об/мин.

1.2. Расчет затрат мощности на бурение

Мощность, отбираемая от двигателя бурового станка, определяется следующим уравнением:

$$N_{\delta} = N_{ст} + N_{тр} + N_3, \text{ кВт} , \quad (1.8)$$

где N_{δ} – мощность отбираемая от двигателя бурового станка, кВт;

$N_{ст}$ – потери мощности на холостое вращение валов, шестерен, подшипников и других деталей трансмиссии станка, кВт;

$N_{тр}$ – затраты мощности на вращение бурильных труб в скважине, кВт;

N_3 – затраты мощности, необходимые для разрушения забоя, кВт.

1.2.1. Расчет затрат мощности, расходуемой в трансмиссии станка

Величина $N_{ст}$ в формуле 1.8 рассчитывается так:

$$N_{ст} = A + B n, \text{ кВт} , \quad (1.9)$$

где A - коэффициент учитывающий затраты мощности в узлах станка, работающих с постоянной частотой вращения: масляный насос, клиноременная передача, фрикцион и т.п.

B - коэффициент, учитывающий потери мощности на вращение деталей станка работающих с различной частотой вращения: редуктор вращателя,

подшипники, валы коробки передач и т. д.

n - частота вращения шпинделя бурового станка, об/мин.

Значения чисел оборотов буровых станков приведены в таблице 1.1. Величины коэффициентов A, B приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.1

Технологические характеристики буровых станков

Тип бурового станка	Частоты вращения на различных передачах, об/мин.
СКБ 50/100	115, 305, 325, 590, 645, 1000, 1170, 2000
СКБ 200/300 (СКБ-3)	110, 160, 200, 290, 355, 515, 555, 805, 815, 1180
СКБ 300/500 (СКБ-4)	155, 279, 394, 493, 637, 710, 1100, 1600
СКБ 500/800 (СКБ-5)	120, 257, 340, 407, 539, 715, 1130, 1500
ЗИФ 650М	87, 118, 254, 340, 576, 800
ЗИФ 1200МР	75, 136, 231, 288, 336, 414, 516, 600

Таблица 1.2

Значения коэффициентов A, B для буровых станков

Тип станка	Мощность привода, кВт	Значения коэффициентов	
		A	B
УКБ 50/100	11,7	0,4	$1,7 \cdot 10^{-3}$
УКБ 200/300	13,0	0,7	$1,8 \cdot 10^{-3}$
УКБ 4	22,0	2,2	$1,9 \cdot 10^{-3}$
УКБ 5	30,0	5,1	$2,1 \cdot 10^{-3}$
ЗИФ 650	30,0	5,1	$2,1 \cdot 10^{-3}$
ЗИФ 1200	55,0	10,4	$6,4 \cdot 10^{-3}$

1.2.2. **Расчет затрат мощности на вращение колонны**

Затраты мощности, необходимые на вращение колонны буровых труб в скважине, рассчитываются по эмпирической формуле, разработанной на основании экспериментальных исследований, выполненных в СКБ НПО «Геотехника».

$$N_{тр} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 [0,92 \cdot 10^{-8} (0,9 + 0,01\delta) D \frac{g}{(EI)^{0,16}} \cdot n^{1,85} L^{0,75} (1 + 0,44 \cdot \cos \Theta) + 1 \cdot 10^{-5} \delta n P] , \quad (1.10)$$

где K_1 - коэффициент, учитывающий применение антивибрационной смазки буровых труб или эмульсионных растворов;

K_2 - коэффициент, учитывающий возможное увеличение диаметра скважины в процессе бурения;

K_3 - коэффициент, учитывающий тип колонны буровых труб для СБТМ $K_3=1,3$, для СБТН – 1,0;

K_4 - коэффициент, учитывающий кривизну буровых труб;

δ - расстояние между буровой трубой и стенкой скважины, мм;

- D - диаметр скважины, мм. Принимается равным диаметру коронки + 2мм;
- L - длина скважины, м;
- n - частота вращения коронки при бурении, об/мин;
- EI - жесткость бурильных труб, Н/м²
где E – модуль Юнга, Н/м², I – осевой момент инерции поперечного сечения бурильной трубы, м⁴;
- g - масса одного метра бурильных труб, кг;
- Θ - угол наклона оси скважины к горизонту, градус;
- P - осевая нагрузка, кН.

Коэффициент K_1 при использовании антивибра-ционной смазки или эмульсии – 0,65. При использовании обычных глинистых растворов $K_1 = 1,1$, при использовании глинистых растворов с повышенным удельным весом и вязкостью $K_1 = 1,3$.

Величина коэффициента K_2 меняется в зависимости от целостности и состояния пород, в которых бурится скважина. Если состояние породы позволяет увеличить диаметр скважины в процессе бурения (вследствие разбухания, осыпания стенок и т. д.), коэффициент $K_2 = 1,0 - 1,4$. Если бурение ведется в монолитных породах или в скважине, обсаженной стальными трубами, $K_2 = 0,8 - 0,5$.

В осложненных условиях (при резком искривлении ствола скважины, при наличии каверн, больших пустот и т. п.) K_2 меняется в диапазоне 1,5 - 2,0.

K_4 – определяется состоянием и качеством изготовления бурильных труб и их соединений.

При использовании импортных бурильных труб и труб повышенной точности, предназначенных для алмазного бурения (например СБТН-54), $K_4 = 1$.

При использовании бурильных труб, изготовленных в заводских условиях и не имеющих большого износа, $K_4 = 1,3$.

Бурильные трубы, эксплуатирующиеся продолжительное время, имеют большой износ и кривизну. При их использовании коэффициент $K_4 = 1,6$.

Величина расстояния между бурильной трубой и стенкой скважины (δ) влияет на величину центробежной силы, прижимающую трубу к стенке скважины при вращении. Чем больше δ , тем больше центробежная сила и трение трубы о породу.

Величина δ определяется как разница между диаметром бурения и диаметром бурильной трубы. При этом диаметр скважины принимается больше, чем диаметр коронки на 1-2 мм.

Жесткость EI – характеризует величину сопротивления колонны бурильных труб изгибу осевой нагрузкой и центробежной силе, прижимающими колонну к стенке скважины. Чем больше этот параметр, тем меньше силы трения, следовательно меньше мощность, затрачиваемая на вращение колонны.

Величины модуля упругости (модуль Юнга) (E) и осевого момента инерции сечения труб (I) приведены в таблице 1.3.

Масса бурильных труб (g) определяет затраты мощности на их вращение, поскольку при ее увеличении увеличивается сила прижатия труб к стенке скважины. Величина g приведена в таблице 1.3.

Механические характеристики бурильных труб

Тип бурильной трубы	Вес (g) 1м. трубы в воде, Н	Модуль упругости трубы (E), Н/м ²	Осевой момент инерции поперечного сечения трубы, I, м ⁴
СБТН 42	40,9	2,1*10 ¹¹	19,22*10 ⁻⁸
СБТН 54	55,6	2,1*10 ¹¹	42,51*10 ⁻⁸
СБТН 68,5	74,0	2,1*10 ¹¹	94,67*10 ⁻⁸
СБТМ 42	46,2	2,1*10 ¹¹	19,22*10 ⁻⁸
СБТМ 50	61,3	2,1*10 ¹¹	39,36*10 ⁻⁸
СБТМ 63,5	75,7	2,1*10 ¹¹	92,67*10 ⁻⁸
ЛБТМ 54	28,0	0,7*10 ¹¹	68,87*10 ⁻⁸
ЛБТН 54	23,3	0,7*10 ¹¹	68,87*10 ⁻⁸

1.3.3. Расчет затрат мощности на разрушение забоя

При бурении алмазными и твердосплавными коронками затраты мощности на разрушение породы определяются по формуле, кВт

$$N_3 = 2,67 \cdot 10^{-5} (\mu_0 + A \Delta V) (D_n + D_v) P \cdot n \quad (1.11)$$

- где N_3 - мощность, затрачиваемая на разрушение породы при бурении, кВт;
 μ_0 - коэффициент трения между коронкой и забоем;
 A - коэффициент, учитывающий прочностные свойства пород и характер их разрушений;
 ΔV - величина углубки колонки за один оборот, мм/об.;
 D_n, D_v - наружный и внутренний диаметр коронки, мм.;
 P - осевая нагрузка, кН;
 n - частота вращения коронки при бурении, об/мин.

Значения коэффициентов μ_0 и A приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Значения параметров μ_0 и A для буровых коронок

Тип коронки	μ_0	A
Алмазная однослойная	0,04	2,9
Алмазная импрегнированная	0,08	5,5
Твердосплавные коронки СМ4, СМ5, СМ6	0,10	2,0
Твердосплавные коронки СН4, СН5, СН6	0,12	2,9

Величину подачи коронки за один оборот ΔV , можно определить по формуле

$$\Delta V = 16,7 \frac{V}{n} \text{ мм/об.}, \quad (1.12)$$

- где ΔV - подача коронки за один оборот, мм/об.;
 V - механическая скорость бурения, м/час;
 n - частота вращения коронки при бурении, об/мин.

Ориентировочные величины механической скорости в зависимости от категории пород, способа бурения и типа коронки приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Значения величин механической скорости бурения

Способ бурения	Категория по буримости	Механическая скорость бурения, м/час.
Твердосплавные коронки СМ4-СМ6	V-VI	1,87
Твердосплавные коронки СМ4-СМ6	VII-VIII	0,94
Алмазные однослойные	VII-IX	0,76
Алмазные импрегнированные	IX-X	0,32
Алмазные импрегнированные	XII	6,05

Диаметры буровых коронок приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Диаметры буровых коронок

Тип буровой коронки	Наружный диаметр, м	Внутренний диаметр, м
Твердосплавные коронки	0,059	0,044
	0,076	0,059
	0,093	0,075
	0,0112	0,094
	0,0132	0,0114
Алмазные коронки	0,059	0,042
	0,076	0,058
	0,093	0,073
	0,0112	0,092

Суммарное напряжение от растяжения и кручения в верхней части колонны рассчитывается по третьей теории прочности:

$$\sigma = \sqrt{\delta_p^2 + 4 \cdot \tau^2}, \quad (1.13)$$

при этом должно выполняться условие:

$$\sigma_{\Sigma} \leq [\sigma_{\text{доп}}]. \quad (1.14)$$

где $[\sigma_{\text{доп}}]$ – допустимое напряжение для материала из которого изготовлены бурильные трубы, Н/м².

2. Расчет напряжений в нижней части колонны бурильных труб

Сжатая часть колонны передает осевую нагрузку породоразрушающему инструменту, испытывая напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}$, при этом вращающаяся бурильная колонна под действием продольных и поперечных сил приобретает изогнутую форму, в результате чего в ней возникают напряжения изгиба $\sigma_{\text{изг}}$ и кручения τ .

Напряжения сжатия рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}} = P_{\text{ос}}/F \quad (2.1)$$

где $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на забой, Н; F – минимальная площадь сечения бурильной трубы, соединений или их резьбовых частей, м².

Напряжение изгиба рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = (\pi^2 \cdot E \cdot d_n \cdot f) / (2 \cdot l^2); \quad (2.2)$$

где E – модуль упругости, Н/м² (табл. 1); d_n – наружный диаметр труб, м; f – стрела прогиба бурильных труб, м; l – длина полуволны, м.

Стрела прогиба бурильных труб определяется:

$$f = (D - d_n) / 2; \quad (2.3)$$

Длина полуволны рассчитывается:

$$l = (10 / \omega) \sqrt{[\pm 0,5 \cdot Z + \sqrt{0,25 \cdot Z^2 + (E \cdot J \cdot \omega^2) / g \cdot q}]}; \quad (2.4)$$

где Z – длина растянутого участка от нулевого сечения в растянутой части принимается $+Z$ (от устья скважины до нулевого сечения), а в сжатой части $-Z$, (от забоя до нулевого сечения); q – вес 1 м бурильных труб, Н; g – 9,8 м / с; N_3 – мощность на разрушение забоя, кВт.

$$Z = L - l_{\text{сж}}; \quad (2.5)$$

где $l_{\text{сж}}$ – длина сжатой части бурильной колонны, м.

$$l_{\text{сж}} = P_{\text{ос}} / [\alpha \cdot q \cdot (1 - \gamma_{\text{ж}} / \gamma_{\text{т}})]; \quad (2.6)$$

Напряжение кручения τ определяется по формуле (1.4), где $N = 1.5 N_3$; N_3 – мощность на разрушение забоя.

Суммарное напряжение от сжатия, изгиба и кручения рассчитывается по следующей зависимости:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{изг}})^2 + 4 \cdot \tau^2}; \quad (2.7)$$

Выбранная бурильная колонна проверяется на запас статической прочности как для верхнего, так и для нижнего сечений колонны.

$$n = \sigma_{\text{т}} / \sigma_{\Sigma} \geq 1,7. \quad (2.8)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала труб, Н/м².

При проверке на статическую прочность в резьбовой части $n \geq 1,5$.

3. Расчет бурильной колонны на выносливость

Расчет производится для «нулевого» сечения, испытывающего знакопеременные напряжения и динамические нагрузки. Рассчитываются напряжения изгиба и кручения:

$$\sigma_{\text{изг}} = (\pi^2 \cdot E \cdot D \cdot f) / 2 \cdot l^2, \quad (3.1)$$

где l – длина полуволны, вычисляется при $Z=0$:

$$l = (10 / \omega) \sqrt[4]{[(E \cdot J \cdot \omega^2) / (g \cdot q)]}; \quad (3,2)$$

$$\tau = M_6 / N_p, \quad (3,3)$$

где M_6 – крутящий момент, развиваемый двигателем при бурении скважины; M_6 определяется так: $M_6 = 0,6 + 0,8 N_{\text{дв.ном}} / \omega$.

Затем рассчитывается запас прочности по нормальным напряжениям:

$$n_\tau = \sigma_{-1} / \sigma_{\text{изг}} \cdot k_d, \quad (3,4)$$

где σ_{-1} – предел выносливости труб при изгибе; k_d – коэффициент, учитывающий динамический характер нагрузки ($k_d = 1,5$).

Величина σ_{-1} определяется так:

$$\sigma_{-1} = (0,4 \div 0,5) \sigma_b. \quad (3,5)$$

Запас прочности по касательным напряжениям:

$$n_\tau = \tau_T / \tau, \quad (3,6)$$

где τ_T – предел текучести при кручении, Па ($\tau_T = 0,5 \cdot \sigma_T$).

Рассчитывается суммарный запас прочности в нулевом сечении:

$$n_\Sigma = n_\sigma \cdot n_\tau / (n_\sigma + n_\tau) \geq 1,3. \quad (3,7)$$

После окончания расчетов делается вывод о правильности выбора колонны бурительных труб.

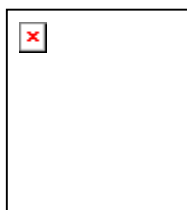
Рекомендованная литература

- Технология и техника разведочного бурения. / Шамшев Ф. А., Тараканов С. Н., Кудряшов Б. Б. и др. / – М.: «Недра», 1983. 565 с.
- Ганджумян Р. А. Практические расчеты в разведочном бурении. – М.: «Недра», 1978, 288 с.
- Калинин А. Г., Ошкордин О. В., Питерский В.М. и др. Разведочное бурение. Учеб. для вузов – М.: Недр, 2000, 748 с.
- Лачинян Л. А., Угаров С. А. Конструирование, расчет и эксплуатация бурительных геологоразведочных труб и их соединений. – М.: Недр, 1975, 232 с.
- Кардыш В. Г., Окмянский А. С., Арифиллин С. А. и др. Методические рекомендации по расчету затрат мощности на бурение скважин малого диаметра. – М.: НПО «Геотехника», 1977, 32 с.
- Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин. Том 1, 2 / Е. А. Козловский, В. Г. Кардыш и др. – Л.: Недр, 1984. – т. 1, 512 с.
- Воздвиженский Б. И., Волков С. А., Волков А. С. Колонковое бурение. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Недр, 1982, 360 с.
- Справочное руководство мастера геологоразведочного бурения. / Г. А. Блинов, В. И. Васильев, Ю. В. Башкатов и др. – Л.: Недр, 1983, 400 с.

Варианты заданий

Номер варианта	Глубина скважины, м	Диаметр бурения конечный, мм	Угол наклона скважины к горизонту, град	Категория пород по буримости	Характеристика пород
1	120	59	89	IX	слаботрещиноватые
2	1000	46	85	IX	монолитные
3	560	59	85	VIII	сильнотрещиноватые
4	280	76	87	VIII	слаботрещиноватые
5	450	59	89	X	плотные, монолитные
6	510	46	90	X	трещиноватые
7	1800	46	90	XI	плотные, монолитные
8	80	110	90	X	трещиноватые
9	580	59	85	XI	монолитные
10	100	93	85	IX	слаботрещиноватые
11	640	59	90	X	плотные, монолитные
12	250	76	88	IX	слаботрещиноватые
13	470	59	85	VIII	сильнотрещиноватые
14	750	46	89	XI	плотные, монолитные
15	600	59	87	X	плотные, монолитные
16	300	76	85	XI	слаботрещиноватые
17	350	59	90	VI	трещиноватые
18	590	46	85	IX	трещиноватые
19	800	59	90	XI	монолитные
20	840	46	87	XII	монолитные
21	900	59	85	XI	слаботрещиноватые
22	940	46	90	X	монолитные
23	960	59	90	XII	плотные, монолитные
24	1300	46	87	IX	плотные, монолитные
25	1570	46	90	XII	монолитные

Пример выполнения титульного листа



**МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО**

**«УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Кафедра ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ РАЗВЕДКИ МПИ

**РАСЧЕТ
Колонны бурильных труб**

Руководитель _____
Студент _____
Группа _____

Екатеринбург 201__г.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Размер шрифта основного текста: - кегль 14, формат А4, 1,5 интервал.

Нумерация страниц проставляется со второй страницы в нижнем поле по центру.

Заголовки отделяются от основного текста сверху и снизу одним интервалом.

Шрифт заголовков выделяется жирным прописным или большим на 1-2 кегля.

По всему проекту соблюдается соподчиненность шрифтов разделов.

Красная строка – 1,5 см.

Раздел (глава) – часть – подчасть – подраздел.

ВВЕДЕНИЕ не имеет нумерации!!!

Поля страницы:

верх – 2 см, низ – 2,5 + нумерация страницы, левое поле – 3 см., правое – 1,5.

Рисунок имеет название (под рисунком) и нумерацию как и формула.

Цифра раздела

$$p_1 = \lambda_1 \cdot \frac{V_1^2 \cdot \rho}{2 \cdot d_1} \cdot (l + l_0) \cdot 10^{-6}, \quad [\text{МПа}] \quad (2.14)$$

где: ρ – плотность промывочной жидкости, кг/м^3 , $\rho=1040 \text{ кг/м}^3$; d_1 – внутренний диаметр бурильных труб, м, $d_1= 0,0545\text{м}$; l – длина колонны бурильных труб, м, $l = L - l_{\text{УБТ}}= 69$
 $4,7= 64,3 \text{ м}$; V_1 – скорость нисходящего потока промывочной жидкости, м/с.

Порядковый номер в разделе

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Бродов Г.С.* Бурение и оборудование скважин на воду. – СПб, 2006. 154 с.
2. *Технология и техника разведочного бурения.* /Под ред. Шамшева Ф.А., Кудряшова Б.Б. и др./ - М.: Недра, 1983, 565 с.

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ГОССТРОЯ СССР**

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ БУРОВЫХ РАБОТ
ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ИЗЫСКАНИЯХ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**



Москва — 1970

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ГОССТРОЯ СССР**

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ БУРОВЫХ РАБОТ
ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ИЗЫСКАНИЯХ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ
Москва—1970**

В Рекомендациях изложены вопросы использования технических средств и выбора рациональной технологии бурения скважин (с поверхности земли), а также отбора образцов грунта при производстве инженерно-геологических изысканий для строительства. Рассматриваются задачи и условия проведения буровых работ. Предлагается технико-технологическая классификация буровых скважин. В соответствии с классификацией выделяются группы скважин по назначению, глубине, условиям подъезда транспортом и проходным грунтам. Дается краткое описание применяемых способов бурения (колонкового, ударно-капатного кольцевым забоем, шнекового, вибрационного) области их рационального использования, достоинств и недостатков.

Рекомендации содержат основные требования, предъявляемые к буровым станкам и установкам. Описываются рекомендуемые модели буровых станков и установок, их технические характеристики и сведения о выпуске. Даются указания по выбору бурового инструмента и рациональных режимов бурения, способствующих получению наиболее качественной инженерно-геологической информации о грунтах. Большое место отводится вопросам отбора монолитов. Рассматриваются вопросы организации буровых работ и техники безопасности при бурении скважин.

Рекомендации разработаны Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя СССР (канд. техн. наук Б. М. Ребрик и инж. Б. В. Цынский).

Редакторы: инж. А. Г. Фомин (ЦТИСИЗ), инж. А. А. Павлов (Теплоэлектропроект), канд. геологоминералогических наук С. П. Абрамов (ПНИИИС).

Замечания и предложения по содержанию настоящих Рекомендаций просим направлять по адресу: Москва, Б-78, Каланчевская ул., 2а, ПНИИИС.

3-2-4

План I кв. 1970 г., п. 18

ПНИИИС ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ
Рекомендации по производству буровых работ
при инженерно-геологических изысканиях для строительства

* * *

Стройиздат
 Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9

* * *

Редактор издательства Г. А. Ифтипла
 Технический редактор В. Д. Павлова
 Корректор Н. А. Зайцева

Слано в набор 4/II-1970 г. Подписано к печати 4/V-1970 г. Т-05490
 Формат 84x108/16 — 1,25 бум. л. 4,2 усл. печ. л. (уч.-изд. 4,40 л.)
 Тираж 20 000 экз. Изд. № XII-2671. Заказ № 155. Цена 22 коп.

Владимирская типография Главполиграфпрома
 Комитета по печати при Совете Министров СССР
 Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-С.

Введение

Буровые работы являются одним из универсальных методов изучения оснований проектируемых сооружений. На начальных стадиях изысканий при инженерно-геологической съемке и поисках, обосновании технико-экономических докладов и схем, а также при рекогносцировочных работах буровые скважины закладываются в ограниченном количестве. В дальнейшем на стадиях технического проекта и рабочих чертежей значение буровых скважин резко возрастает, а их количество и глубина существенно увеличиваются. В процессе строительства и эксплуатации сооружений роль скважин как изыскательских выработок продолжает оставаться значительной. В одном случае они позволяют уточнять условия строительства, в другом — контролировать состояние фундаментов.

Бурение скважин на изысканиях характеризуется рядом особенностей, существенно отличающих его от бурения для других целей. К их числу относятся: сравнительно малая глубина скважин; необходимость непрерывного отбора образцов грунта с сохранением всех его текстурных и структурных особенностей, а в ряде случаев — отбор монолитов (образцов ненарушенной структуры) для определения физико-механических свойств грунта, большое число различных наблюдений и опытных работ в скважинах, разнообразие условий производства работ в масштабе одной организации, значительная разбросанность мест проходки скважин, большие затраты времени на частые переезды с одной точки на другую и т. д.

Рекомендации составлены на основе достигнутого уровня производства буровых работ ведущими проектно-изыскательскими и изыскательскими организациями и содержат следующие вопросы, связанные с бурением скважин инженерно-геологического назначения: цели, задачи и условия проведения буровых работ, выбор способа бурения и буровых станков, технология бурения, основные правила отбора образцов, краткие сведения по организации буровых работ, техника безопасности.

Настоящие рекомендации являются справочным пособием для инженерно-технических работников, занятых на инженерных изысканиях для строительства.

При составлении рекомендаций использованы отечественные и зарубежные материалы: данные о современном состоянии производства буровых работ, результаты научно-исследовательских работ, многочисленные публикации и т. д.

1. ЗАДАЧИ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ БУРОВЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

1.1. Буровые скважины при инженерно-геологических изысканиях проходятся для изучения геологолитологического разреза, отбора образцов грунта, а также проведения различных опытных работ.

1.2. По назначению¹ скважины подразделяются на: зондировочные; разведочные; гидрогеологические; скважины специального назначения.

1.3. При инженерных изысканиях буровые скважины рекомендуется использовать для проведения комплексных исследований.

1.4. Зондировочные скважины проходятся для предварительного изучения геологического разреза, для установления границ между нескальными и скальными грунтами, границ распространения насыпных и заторфованных грунтов и уточнения их мощности, а также границ залегания мерзлых грунтов, для определения уровня грунтовых вод и т. д. Зондировочные скважины являются преобладающими на начальных стадиях изысканий.

1.5. Назначение *разведочных скважин* заключается в детальном изучении геологического разреза. Образец породы (кери), извлекаемый из разведочных скважин, служит для определения особенностей геологического разреза: последовательности в залегании слоев грунта, их мощности и положения контактов, текстурных и структурных особенностей грунта (слоистость, отдельность, дисперсность, тип структуры, наличие примазок, гнезд, включений и т. д.), плотности и консистенции грунта, соответствующих природным условиям; влажности и водоносности грунта и т. д.

Разновидностью разведочных скважин являются *технические скважины*, основное назначение которых заклю-

¹ Назначение буровых скважин определяет диаметр скважины, вид, количество и правила отбора образцов, состав и содержание опытных работ, что, в свою очередь, определяет выбор техники и технологии их проходки.

чается в отборе образцов грунта ненарушенной структуры (монолитов) для определения физико-механических свойств грунта. Из технических скважин может проводиться непрерывный, поинтервальный и одиночный отбор монолитов.

1.6. *Гидрогеологические скважины* проходятся, главным образом, для производства откачек с целью изучения фильтрационных свойств грунтов. Гидрогеологические скважины одновременно могут быть и разведочными. Основное отличие их от последних — сравнительно большой диаметр бурения, обусловленный необходимостью установки в скважину водоподъемных средств. Если при бурении данных скважин задача детальной геологической документации не ставится, проходка может осуществляться без отбора керна.

1.7. Для проведения специальных работ в скважинах, а также обеспечения возможности спуска в них человека, бурятся скважины *специального назначения* (например, скважины большого диаметра). К этой группе скважин относятся также выработки, характер опытных работ в которых требует использования специального оборудования или особой технологии для их проходки.

1.8. В буровых скважинах различного целевого назначения могут производиться следующие виды работ: режимные наблюдения за изменением уровня, температуры и химического состава воды; определение направления и скорости движения подземных вод; опытные откачки, наливы и нагнетания воды; опытные нагнетания воздуха; испытания грунта: вертикальными статическими нагрузками (штампами), на срез (крыльчатками), на обжатие стенок скважины (пресснометрами); статическое и динамическое зондирование на больших глубинах; искиметрия; фотографирование и осмотр стенок скважины с помощью фотобуроскопов, телевизионных камер; специальные опытные работы (цементация, тампонаж) и др.

1.9. В буровых скважинах, главным образом разведочных и гидрогеологических, могут проводиться следующие геофизические исследования: резистивиметрия, кавернометрия, радиоактивный каротаж, ультразвуковой каротаж, радиондикаторные наблюдения, боковое электрокаротажное зондирование (метод СЭИПП), диэлектрическое зондирование и т. д.

1.10. Диаметры скважин и правила отбора образцов при бурении указаны в табл. 1.

Таблица 1

Тип скважин по назначению	Диаметр* скважины в мм	Цель отбора образцов грунта	Правила отбора образцов при бурении
Зондировочные	33—127	Ориентировочная геологическая документация	Образцы отбираются через определенные интервалы
Разведочные	108—219	Детальная геологическая документация; определение физико-механических свойств грунтов	Непрерывный отбор образцов**; допускается отбор образцов через определенные интервалы. Монолиты отбираются по всему интервалу бурения либо с определенных участков
Гидрогеологические	До 400 и более	Гидрогеологическая документация	Образцы отбираются в случае необходимости
Специального назначения	До 2000 и более	Правила отбора образцов определяются специальными требованиями	

* Диаметр скважин условно указан по стандартизованному диаметру обсадных труб.

** При непрерывном отборе образцов грунта интервалы между соседними образцами составляют не более 0,3 м.

1.11. В соответствии с глубиной бурения скважины условно могут быть подразделены¹:

- а) до 10 м;
- б) до 30 м;
- в) до 100 м;
- г) свыше 100 м.

1.12. По условиям транспортирования оборудования, могут быть выделены легкие, средние, тяжелые и особые условия. Характеристика их дана в табл. 2.

¹ Подразделение скважин по глубине бурения дано с целью возможного ограничения числа типов используемых буровых станков и дальнейшей разработки нормального ряда последних.

Таблица 2

Условия транспортирования	Характеристика условий	Краткая характеристика района работ
Легкие	Возможен подъезд автотранспортом любой проходимости	Равнинные почти безлесные районы, слабо пересеченная местность
Средние	Возможен подъезд автотранспортом высокой проходимости при устройстве временных подъездных дорог или транспортом на гусеничном ходу	Пересеченная местность, небольшие лесные массивы и кустарники
Тяжелые	Подъезд обычными видами транспорта (за исключением вьючного, вертолета, аэросаней и т. п.) практически невозможен. Местность, доступная пешеходам	Таежные и горные районы, районы Крайнего Севера
Особые	Необходимо использовать особые виды транспорта (плавучие средства, подъемники и т. п.). Пешеходам район работ недоступен	Акватории портов, русла рек, работы под водой и т. д.

1.13. В соответствии со СНиП II-Б.1-62 «Строительные нормы и правила. Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования» грунты, проходимые при бурении инженерно-геологических скважин, подразделяются на скальные, крупнообломочные (щебенистые и дресвяные), песчаные (песок гравелистый, крупный, средний крупности, мелкий, пылеватый) и глинистые (супесь, суглинок, глина). Эти грунты могут находиться в мерзлом состоянии. При проходке мерзлых грунтов необходимо использовать специальное оборудование и особую технологию бурения.

2. ВЫБОР СПОСОБА БУРЕНИЯ

2.1. Способ бурения необходимо выбирать в зависимости от свойств проходимых грунтов, назначения и глубины скважины, а также условий производства работ. При этом выбранный способ бурения должен обеспечивать наиболее качественную геологическую документацию и достаточно высокую производительность.

2.2. При инженерно-геологических изысканиях применяется вращательное, ударно-канатное, вибрационное и ручное ударно-вращательное бурение.

По типу применяемого бурового снаряда вращательное бурение подразделяется на колонковое, шнековое, медленно-вращательное (инструменты ложкового или змеевикового типа) и роторное; ударно-канатное бурение подразделяется на бурение кольцевым забоем (с отрывом и без отрыва инструмента от забоя) и сплошным забоем.

Вибрационное бурение подразделяется на чисто вибрационное и виброударное; ручное бурение — на ударное и вращательное.

КОЛОНКОВОЕ БУРЕНИЕ

2.3. Основными преимуществами колонкового бурения являются: возможность проходки скважин почти во всех разновидностях горных пород, сравнительно большая глубина проходимых скважин, достаточно хорошо разработанная и освоенная технология бурения, сравнительно небольшие мощности, затрачиваемые на бурение, возможность получения качественного керна.

2.4. Проходка скважин колонковым способом осуществляется твердосплавным, дробовым и алмазным породоразрушающим инструментом. Твердосплавный породоразрушающий инструмент можно применять при проходке скважин в глинистых, песчаных, мерзлых и скальных грунтах (I—VII, частично VIII категории по буримости)¹, дробовой — при проходке скважин в скальных грунтах (VII—XII категории); алмазный — при проходке скважин в скальных монолитных грунтах (VIII—XII категории).

2.5. В зависимости от физико-механических свойств проходимых грунтов и от глубины скважины, бурение колонковым способом может осуществляться «всухую», с промывкой водой и соевыми охлажденными или глинистыми растворами, с продувкой сжатым воздухом,

¹ Здесь и в дальнейшем категория пород приведена по единой классификации горных пород для механического вращательного бурения скважин «Единые нормы выработки на производство геолого-разведочных работ». «Недра», М., 1964.

а также «безнасосным» способом. Выбор агента для очистки скважины от шлама в зависимости от физико-механических свойств проходимых грунтов следует производить в соответствии с данными табл. 3.

2.6. Бурение скважин с продувкой воздухом по сравнению с бурением с промывкой имеет ряд преимуществ: более высокую механическую скорость бурения, увеличенную проходку на породоразрушающий инструмент, улучшенные условия труда буровой бригады (особенно в зимнее время и в северных районах) и др. Кроме того, бурение с продувкой в породах, естественная структура которых нарушается от контакта с водным раствором, предотвращает размыв стенок скважин и образование обвалов. Бурение с продувкой позволяет успешно проходить мерзлые грунты. К числу недостатков бурения с продувкой относятся: уменьшение в некоторых породах выхода керна при прямой продувке (при использовании обратной продувки выход керна сохраняется довольно высоким), повышенный износ бурильных труб, затруднения при бурении обводненных пород.

Бурение инженерно-геологических скважин с продувкой наиболее целесообразно использовать: в районах с суровыми климатическими условиями (северные районы страны); в пустынных и засушливых местностях, в условиях бездорожья, труднодоступных и горных районах, где водоснабжение связано с большими затратами времени, сил и средств; в необводненных устойчивых грунтах; в необводненных трещиноватых породах, где обеспечение нормальной циркуляции жидкости практически невозможно; в мерзлых грунтах; при бурении скважин глубиной более 30 м.

2.7. Сущность «безнасосного» бурения заключается в том, что проходка скважины ведется обычным колонковым способом без подачи насосом на забой промывочной жидкости и с расхаживанием бурового снаряда. Циркуляция жидкости между стенками скважины и наружной поверхностью колонкового снаряда, а также между керном и внутренней поверхностью коронки и колонковой трубы происходит вследствие расхаживания снаряда.

Обязательным условием применения данного способа является наличие в скважине столба жидкости высотой, несколько превышающей длину колонкового снаряда. В случае отсутствия грунтовых вод в скважину периодич-

чески подливают воду или глинистый раствор, в зависимости от устойчивости пород в стенках скважины.

Безнасосное бурение следует применять: при проходке неглубоких скважин или разбурке твердых пород небольшой мощности, в случае возникновения трудностей с обеспечением скважин водой и когда необходимо получить высокий выход керна и достаточно сохранную структуру образца.

Безнасосное бурение не следует применять при сильном поглощении промывочной жидкости у забоя скважины.

ШНЕКОВОЕ БУРЕНИЕ

2.8. Преимуществами шнекового способа являются: высокая механическая скорость бурения в песчаных и глинистых грунтах, большой процент времени чистого бурения (при шнековом бурении процесс проходки и выдача грунта на поверхность совмещаются), незначительные затраты времени на монтажно-демонтажные работы и вспомогательные операции, возможность отбора керна при использовании специального инструмента. Важным является также то обстоятельство, что шнековое бурение не требует использования промывочной жидкости.

Область эффективного использования шнекового способа ограничена нескальными грунтами (глинистыми и песчаными).

2.9. Бурение скважин шнековым способом производится сплошным и кольцевым забоем. Бурение сплошным забоем осуществляется непрерывным рейсом (поточное бурение), рейсовыми заходками (рейсовое бурение) и завинчиванием.

При поточном бурении разбуриваемый грунт непрерывно выносится из скважины на поверхность шнековой колонной, которая по мере погружения в грунт наращивается дополнительными шнеками. Непрерывная выдача грунта на поверхность при этом способе затрудняет производство качественной геологической документации.

Поточное бурение следует применять при проходке зондировочных скважин в неоплывающих и неосылающихся грунтах, обеспечивающих устойчивость стенок скважины и равномерный вынос разбуренной породы на

поверхность (слабые и слабосвязанные супесчаные и суглинистые грунты).

Рейсовое бурение состоит из последовательных циклов (рейсов), включающих погружение шнека с долотом в грунт и последующее его извлечение из скважины с грунтом. Разновидностью рейсового бурения является бурение с холостым вращением (без углубки) колонны шнеков в скважине — в этом случае разрушенный грунт периодически поднимается на поверхность без подъема шнеков, что позволяет получить более точное представление о разрезе.

Рациональной областью применения этого способа является проходка зондировочных и разведочных скважин в основном в пластичных и тугопластичных глинистых грунтах.

Винтовое бурение (завинчивание) отличается от рейсового тем, что шнековую колонну со спиральным долотом завинчивают в грунт на такую глубину, при которой ее можно будет извлечь без вращения из скважины. Винтовое бурение целесообразно использовать при проходке водоносных песков, глинистых грунтов скрытотечной консистенции, илов, торфов и т. д.

МЕДЛЕННО-ВРАЩАТЕЛЬНОЕ БУРЕНИЕ

2.10. Сущность медленно-вращательного бурения заключается в том, что для проходки скважин используют самоходные станки колонкового и роторного бурения, а в качестве наконечников применяется инструмент для ручного ударно-вращательного бурения (змеевики, ложковые буры и т. д.).

Этот способ используют при забурке скважины, а также для проходки значительных толщ рыхлых и мерзлых грунтов.

РОТОРНОЕ БУРЕНИЕ

2.11. Роторное бурение сплошным забоем на инженерных изысканиях применяется очень редко. В основном оно используется для проходки гидрогеологических скважин глубиной 80—100 м и более в тех случаях, когда геологические разрезы представлены преимущественно скальными, полускальными и мерзлыми грунтами.

УДАРНО-КАНАТНОЕ БУРЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫМ ЗАБОЕМ

2.12. При ударно-канатном бурении кольцевым забоем проходка скважины производится за счет сбрасывания на забой скважины или забивки в грунт кольцевого наконечника (забивного стакана, зонда и т. д.), в результате чего грунт заполняет его внутреннюю полость и извлекается на поверхность.

Данный способ бурения по сравнению с другими имеет ряд преимуществ: вполне удовлетворительное качество отбираемого керна, незначительные затраты мощностей на бурение при проходке скважин сравнительно большой глубины, малые затраты времени на спуско-подъемные операции, возможность проходки скважин в несвязных грунтах буровыми наконечниками большого диаметра с одновременным или опережающим погружением обсадных труб, вертикальность скважины.

2.13. Ударно-канатное бурение кольцевым забоем осуществляется забивным способом (без отрыва инструмента от забоя) и «клюющим» (с отрывом инструмента от забоя после каждого удара).

Забивное бурение может быть использовано при проходке всех разновидностей связных глинистых грунтов. «Клюющий» способ дает наилучшие результаты при проходке скважин в мягкопластичных и просадочных (лессовых) глинистых грунтах.

2.14. В случае проходки неустойчивых глинистых и песчаных грунтов бурение ведется забивным способом с одновременным погружением обсадных труб путем их расхаживания или вибрирования.

УДАРНО-КАНАТНОЕ БУРЕНИЕ СПЛОШНЫМ ЗАБОЕМ

2.15. При ударно-канатном бурении сплошным забоем углубление скважины производится за счет сбрасывания на забой породоразрушающего долота с последующей очисткой скважины и подъемом разрушенной породы на поверхность желонкой. Этот способ не обеспечивает получения качественной геологической документации. Основное применение данный способ находит при бурении гидрогеологических скважин в песчаных, глинистых, крупнообломочных грунтах. Кроме того, он мо-

жет быть использован для проходки больших толщ крупнообломочных грунтов, а также встречающихся прослоек крепких пород.

2.16. Третьей разновидностью ударно-канатного способа является желонирование — операция, при которой желонка многократно с небольшой высоты, но со значительной частотой сбрасывается на забой до ее полного наполнения разжиженным грунтом.

Желонирование целесообразно применять при проходке сильно обводненных песчаных грунтов. Проходку скважины в этом случае необходимо вести с одновременным закреплением стенок скважин обсадными трубами.

ВИБРАЦИОННОЕ БУРЕНИЕ

2.17. При вибрационном бурении внедрение в грунт кольцевого породоразрушающего паконечника (вибронзонд и др.) производится под действием веса вибратора и веса бурового снаряда, а также за счет передачи последнему вибрационных колебаний или нанесения ударов с высокой частотой.

Вибрационное бурение относится к числу наиболее перспективных способов проходки скважин при инженерных изысканиях. Обладая высокой производительностью (до 50 м в смену при глубине скважин до 10—12 м в породах I—III категории), этот способ позволяет вести качественную геологическую документацию исследуемого разреза, а также отбирать образцы ненарушенной структуры в ряде разновидностей грунтов.

Вибробурение может применяться при проходке аллювиальных песков, супесей, суглинков и глин, моренных, насыпных и гравелисто-галечных грунтов, а в некоторых случаях мягких мергелей. Рациональной областью применения вибрационного способа является проходка скважин глубиной до 15—20 м в глинистых и песчаных обводненных грунтах.

2.18. Существуют две разновидности вибрационного бурения: чисто вибрационное и виброударное.

Сущность чисто вибрационного бурения состоит в том, что под действием вибрации бурового снаряда резко снижается как лобовое, так и боковое сопротивление грунта, благодаря чему снаряд под действием собственного веса и веса вибратора погружается в грунт. Чисто вибрационное бурение можно использовать при бурении

Таблица 3

Рекомендуемые области применения различных способов бурения инженерно-геологических скважин

Виды бурения	Способ бурения	Грунты, степень их обводненности	Глубина бурения в м	Назначение скважин	Метод отбора монолитов	
Вращательный	колонковый	С промывкой водой	Скальные (монокристаллические и трещиноватые), обводненные и необводненные	До 100 и более	Разведочные, зондировочные	Отбираются одинарными колонковыми снарядами
		С промывкой глинистым раствором	Скальные (трещиноватые), глинистые, песчаные, обводненные и необводненные	То же	То же	Отбираются двойными колонковыми снарядами
		С промывкой соевыми охлажденными растворами	Мерзлые	»	»	То же
		С продувкой воздухом	Скальные (монокристаллические и трещиноватые), необводненные или слабообводненные. Мерзлые	От 30 до 100 и более	»	Отбираются одинарными и двойными колонковыми снарядами
		«Всухую» и безнасосным способом	Глинистые, песчаные, обводненные и слабообводненные. Мерзлые	До 30	»	Отбираются с помощью обуривающих и задавливающих грунтоносов

Виды бурения	Способ бурения		Грунты, степень их обводненности	Глубина бурения в м	Назначение скважин	Метод отбора монолитов
Вращательный	Поточный	переносными мотобурами	Глинистые, песчаные, слабообводненные	До 10	Зондировочные	—
		самоходными установками	То же	До 30	»	—
				До 100	Гидрогеологические	
	Рейсовый	Глинистые, связные; песчаные, слабообводненные	До 30	Разведочные	Отбираются с помощью обуривающих и задавливающих грунтоносов	
	Винтовой	Глинистые, слабосвязные илы, торфы и т. д.; сильно и слабообводненные	До 10	Зондировочные	—	
	Кольцевым забоем	Глинистые пластичные	До 30	Разведочные	Отбираются из магазинных шнеков и шнеково-колонковых буров	

Виды бурения		Способ бурения	Грунты, степень их обводненности	Глубина бурения в м	Назначение скважин	Метод отбора монолитов
Вращательный	медленно-вращательный	С использованием инструмента для ручного ударно-вращательного бурения (ложки, змеевики и т. д.)	Глинистые, песчаные, обводненные и необводненные	До 30	Зондировочные, разведочные	Отбираются с помощью буриющих и задавливающих грунтоносов
	роторный	С промывкой и продувкой	Скальные, глинистые, песчаные; обводненные и необводненные. Мерзлые	От 50 до 100 и более	Зондировочные, гидрогеологические	—
Ударно-канатный	кольцевым забоем	Забивной	Глинистые (полутвердые, пластичные, текучие); сильно и слабообводненные	До 30	Зондировочные, разведочные	Допускается использование забивных грунтоносов в соответствии с требованиями ГОСТ 12071—66
		«Клюющий»	Глинистые (лёссовые); слабообводненные	До 30	То же	Отбираются с использованием грунтоносов, погружаемых за один удар

Виды бурения		Способ бурения	Грунты, степень их обводненности	Глубина бурения в м	Назначение скважин	Метод отбора монолитов
Ударно-канатный	сплошным забоем	С применением долот и желонки	Крупнообломочные, глинистые, песчаные; сильно и слабообводненные. В отдельных случаях полускальные и скальные	До 100 и более	Гидрогеологические	—
		Желонирование. Бурение желонками с одновременным либо опережающим погружением обсадных труб	Песчаные, сильнообводненные	До 100	Зондировочные гидрогеологические	—
Вибрационный		С помощью вибратора	Песчаные, глинистые; обводненные	До 15—20	Зондировочные, разведочные, технические	Допускается применение виброметода в соответствии с требованиями ГОСТ 12071—66 и поправкой к нему
		С помощью вибромолота	Глинистые плотные, песчаные; слабообводненные и обводненные			

Примечание. Ручной ударно-вращательный способ бурения, как правило, не рекомендуется к применению. Использование его допускается лишь для проходки скважин в местностях, где подъезд каким-либо транспортом невозможен, при малых объемах работ, при глубине скважин не более 20 м, в нескальных грунтах.

грунтов с небольшим лобовым и значительным боковым сопротивлением (пески, супеси и т. п.).

Виброударное бурение отличается от вибрационного тем, что буровой снаряд погружается в грунт с помощью ударов, наносимых по его верхнему концу с большой частотой. Виброударное бурение используют при проходке грунтов со значительным лобовым сопротивлением (тугопластичные, полутвердые, твердые глинистые грунты).

2.19. При выборе способа бурения следует руководствоваться указаниями табл. 3.

2.20. В случае бурения скважин, пересекающих различные виды грунтов, применяют комбинированные способы бурения (например, шнековый и колонковый, вибрационный и колонковый и т. д.).

3. ВЫБОР БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Основными факторами, определяющими выбор буровой установки, являются: целевое назначение и глубина бурения, конечный диаметр скважины, характер и свойства проходимых грунтов, природные условия (рельеф, климат).

3.2. Выбираемая буровая установка должна: быть в достаточной степени эффективной технически и экономически, обладать хорошей транспортабельностью (в случае больших габаритов и веса — возможностью разборки на отдельные транспортабельные блоки, а в случае самоходности — высокой проходимостью, маневренностью, достаточной скоростью передвижения), обеспечивать возможность производства бурения несколькими способами, укомплектовываться надежным в работе и удобным в обращении буровым и вспомогательным инструментом, обеспечивать простоту производства ремонта, обеспечивать возможность обслуживания минимальным числом рабочих с незначительными затратами труда, удобство, простоту и безопасность работы.

3.3. Параметры выбранных буровых установок должны соответствовать максимальной глубине и диаметру скважин. Буровые станки необходимо использовать только по их прямому назначению.

3.4. При выборе типа бурового станка по транспортабельности следует руководствоваться указаниями табл. 4.

Таблица 4

Условия транспортирования, согласно п.1.12	Типы рекомендуемых буровых станков по транспортабельности
Легкие	Самоходные (на базе автомобиля или трактора), перевозимые или стационарные и переносные
Средние	Самоходные (на базе трактора), перевозимые, стационарные и переносные
Тяжелые	Переносные; стационарные станки, разбирающиеся на отдельные транспортабельные блоки весом не более 150 кг
Особые	Стационарные станки специальной конструкции либо станки, имеющие специальную комплектацию (плавающими средствами и др.)

3.5. Для проходки скважин глубиной до 10 м рекомендуются следующие буровые установки¹: переносные — Д-10; самоходные БУЛИЗ-15, АВБ-ПМ; перевозимые — УБП-15М, УПБ-25, БУКС-ЛГТ.

Примечания: 1. Для проходки скважин глубиной до 10—15 м следует применять также буровые станки ПВБСМ-15, выпускаемые небольшими партиями мастерскими экспериментального полигона ЦНИИ МПС СССР; ПБУ-10 (Энергосетьпроект) и М-1 (СКБ Министерства геологии СССР), подготовленные к серийному выпуску.

2. В отдельных случаях для проходки скважин в глинистых и песчаных грунтах в легких условиях целесообразно применять установки вибробурения ВБУ-ГАЗ-63, ВБУ-ЗИЛ-157 (Мосгоргеотреста), СВБУ-ЛГВХ (Ленгипроводхоза) и другие, разработанные в ведомственном порядке и серийно не выпускаемые.

3.6. Для проходки скважин глубиной до 30 м рекомендуются следующие буровые станки и установки: самоходные — УРБ-1В, АВБ-ПМ, УГБ-50М, ЛБУ-50; перевозимые — БУКС-ЛГТ, УПБ-25.

Примечания: 1. При проходке скважин в глинистых и песчаных грунтах в легких условиях могут использоваться также различные вибробурения, разработанные в ведомственном порядке и серийно не выпускаемые: ВБУ-ГАЗ-63, ВБУ-ЗИЛ-157, СВБУ-ЛГВХ и др.

2. В отдельных случаях для проходки скважин, главным образом в скальных и полускальных грунтах, могут быть использованы уста-

¹ Технические характеристики буровых станков с указанием заводов-изготовителей и их ориентировочная стоимость приведены в приложении.

Таблица 5

Рекомендуемые буровые станки и установки

Глубина скважин в м	Условия проведения работ				
	Легкие				средние
	Преобладающие грунты в районе работ				
	скальные	крупнообломочные и песчаные	глинистые	мерзлые	скальные
До 10	УПБ-25	БУЛИЗ-15, АВБ-11М, УБП-15М (ПВБСМ-15)	БУЛИЗ-15, АВБ-11М, УБП-15М (ПВБСМ-15)	БУЛИЗ-15 (ПВБСМ-15)	УПБ-25
До 30	УПБ-25, УГБ-50М, ЛБУ-50	АВБ-11М, УГБ-50М, ЛБУ-50, БУКС-ЛГТ, УБП-15М (Д-5-25)	АВБ-11М, УГБ-50М, ЛБУ-50, БУКС-ЛГТ, УБП-15М (Д-5-25)	УГБ-50М, ЛБУ-50	УПБ-25
До 100	УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А	УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А (БУГ-100)	УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А (БУГ-100)	УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А	АВБ-Т, БСК-2М-100
Свыше 100	СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, УРБ-3АМ, ЗИФ-300М	СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, УРБ-3АМ, УКС-22М	СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, УРБ-3АМ, УКС-22М	СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, УРБ-3АМ, ЗИФ-300М	ЗИФ-300М

Глубина скважин в м	Условия проведения работ						
	Средние			Тяжелые			
	Преобладающие грунты в районе работ						
	крупнообломочные и песчаные	глинистые	мерзлые	скальные	крупнообломочные и песчаные	глинистые	мерзлые
До 10	Д-10, БУКС-ЛГТ (ПВБСМ-15)	Д-10, БУКС-ЛГТ (ПВБСМ-15)	Д-10 (ПВБСМ-15)	УПБ-25	Д-10 (ПВБСМ-15)	Д-10 (ПВБСМ-15)	Д-10 (ПВБСМ-15)
До 30	(УРБ-1В) БУКС-ЛГТ	(УРБ-1В) БУКС-ЛГТ	—	УПБ-25	—	—	—
До 100	АВБ-Т	АВБ-Т	АВБ-Т	БСК-2М-100	—	—	—
Свыше 100	ЗИФ-300М	ЗИФ-300М	ЗИФ-300М	—	—	—	—

Примечания: 1. В скобках указаны станки, хорошо зарекомендовавшие себя при проходке инженерно-геологических скважин на изысканиях, но в настоящее время не выпускаемые серийно.

2. В дальнейшем для бурения инженерно-геологических скважин могут быть использованы специальные буровые комплексы, разрабатываемые специальным конструкторским бюро Министерства геологии СССР — УКБ-15/25; УКБ-25/50; УКБ-100/200; УБР-2А и т. д.

3. Для граф, в которых стоит прочерк, соответствующее буровое оборудование не разработано.

новки: СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, АВБ-Т, БСК-2М-100.

3. Кроме того, целесообразно применять буровые станки Д-5-25, хорошо зарекомендовавшие себя при проходке инженерно-геологических скважин (серийный выпуск их прекращен).

3.7. Для проходки скважин глубиной от 30 до 100 м целесообразно использовать следующие буровые станки и установки:

самоходные — УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, АВБ-Т;

стационарные — БУГ-100, БСК-2М-100.

Примечание. В отдельных случаях могут быть использованы буровые станки и установки УРБ-ЗАМ, ЗИФ-300М, УКС-22М.

3.8. Для проходки скважин глубиной свыше 100 м рекомендуются следующие буровые станки и установки: самоходные — СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, УРБ-ЗАМ и стационарные — ЗИФ-300М, УКС-22М.

3.9. При выборе типа бурового станка в зависимости от глубины бурения, проходимых грунтов и условий производства работ следует пользоваться табл. 5.

3.10. В случае проходки скважин с продувкой сжатым воздухом буровые станки и установки необходимо дополнительно укомплектовывать компрессорами производительностью 6—9 м³/мин сжатого воздуха с рабочим давлением 6—10 кг/см² (в зависимости от глубины и диаметра скважины), герметизатором и контрольно-измерительной аппаратурой (расходамерами воздуха, манометрами).

Таблица 6

Технические характеристики компрессоров, рекомендуемых к использованию при инженерно-геологических изысканиях

Марка компрессора	Тип компрессора	Производительность в м ³ /мин	Рабочее давление в кг/см ²	Скорость вращения вала компрессора в об/мин	Двигатель — дизель	Мощность двигателя в л. с.	Габариты в мм			Вес в кг
							длина	ширина	высота	
ПКС-5М	Передвижной	6	7	730	ЗИЛ-120	90	4700	1875	1810	2860
ЗИФ-52	То же	6	7	—	ЯАЗ-204	61	3200	1106	1460	2470
ЗИФ-ВКС-6	»	6	7	1250	ЯАЗ-204	61	3455	1880	2095	3900
ДК-9	»	8,5—9	6	860	КДМ-46	80	5040	1850	2250	5500
КС-9	»	9	6	860	КДМ-46	80	5090	1820	2110	6100

метрами, термометрами и пр.). При бурении в мерзлых грунтах во избежание оттаивания стенок скважины нагретым сжатым воздухом в состав оборудования необходимо включать трубчатый холодильник и влагоотделитель.

3.11. Для проходки скважин при инженерных изысканиях с продувкой сжатым воздухом рекомендуются передвижные компрессоры (см. табл. 6).

4. ТЕХНОЛОГИЯ БУРЕНИЯ

КОЛОНКОВОЕ БУРЕНИЕ

Бурение породоразрушающим инструментом, армированным твердым сплавом, с промывкой

4.1. При бурении твердосплавным инструментом мягких и рыхлых грунтов (I—IV категории по буримости) используют ребристые коронки КР-1, КР-2, КР-4 и КР-5, обеспечивающие большой кольцевой зазор между стенками скважины и колонковым снарядом, который способствует эффективному выносу разбуриваемой породы промывочной жидкостью. Коронки КР-1 применяют для проходки мягких неоднородных, трещиноватых и вспучивающихся грунтов (породы I—III категории); коронки КР-2, КР-4, КР-5 — для проходки более плотных разновидностей указанных грунтов (до IV категории).

4.2. Режимы бурения ребристыми коронками в мягких и рыхлых грунтах приведены в табл. 7.

Таблица 7

Параметры бурения	Единица измерения	Категория пород	Диаметр коронки (средний) в мм			
			95	112	132	151
Давление на коронку	кг	I—II III—IV	240—400 320—500	240—400 320—500	300—560 400—700	300—560 400—700
Скорость вращения инструмента	об/мин	I—II III—IV	150—300	130—260	110—220	90—180
Расход промывочной жидкости	л/мин	I—II III—IV	55—110 90—160	65—130 110—175	80—160 130—220	90—180 150—240

4.3. При бурении мягких и рыхлых грунтов в качестве промывочной жидкости применяют глинистый раствор со следующими параметрами:

удельный вес	1,1—1,2 г/см ³
вязкость	25—28 сек по СПВ-5
водоотдача	10—15 см ³ за 30 мин
содержание песка	не более 4%

4.4. Заклинку керна производят путем «затирки всухую», для чего необходимо бурение последних 5—10 см вести без промывки. С целью предохранения бурового снаряда от зашламования следует применять промывочный ниппель, позволяющий осуществлять призабойную циркуляцию промывочной жидкости после заброски в него шарика.

4.5. При бурении глин, суглинков и супесей во избежание «замазывания» коронки и прекращения циркуляции промывочной жидкости в скважине в результате зашламования пространства между стенками скважины и колонковым снарядом периодически останавливают проходку, не прекращая при этом промывки скважины.

4.6. При бурении малоабразивных пород малой, средней твердости и твердых (IV—VII категории) используют мелкорезцовые коронки типов МР-2НП, СМ-1, СМ-2; при бурении малоабразивных, трещиноватых и переслаивающихся пород той же твердости применяют коронки марки СТ-1 с восьмигранными резцами. Бурение абразивных пород производится самозатачивающимися микрорезцовыми коронками следующих марок: СА — для проходки абразивных пород V—VII категории; БК-8М — для проходки абразивных и трещиноватых пород V—VIII категории; БТ и БТ-45А — для проходки абразивных пород VI—VIII категории.

4.7. Режимы бурения в породах, указанных в п. 4.6, приведены в табл. 8.

4.8. Заклинку керна при бурении плотных твердых пород производят кернарвателем или битым стеклом, фарфором и др.

Бурение дробовым породоразрушающим инструментом с промывкой

4.9. При колонковом бурении дробью рекомендуется: при проходке пород VII—IX категории использовать чугунную дробь, при проходке пород X—XII категории — стальную дробь-сечку.

Параметры бурения	Единица измерения	Характеристика пород	Диаметр коронки (средний) в мм			
			95	112	132	151
Давление на коронку	кг	Малоабразивные, нетрещиноватые IV—VII категории	360—800	360—800	480—900	480—900
		Относительно абразивные, трещиноватые и переслаивающиеся IV—VII категории	960—1200	960—1200	1200—1800	1200—1800
		Абразивные:				
		а) V—VII категории	960—1600	960—1600	1200—1800	—
		б) VI—VIII категории	1100—2400	1100—2400	1600—2600	—
Абразивные, трещиноватые V—VIII категории	1200—1300	1800—2000	1800—2000	—		
Скорость вращения инструмента	об/мин	Малоабразивные, нетрещиноватые IV—VII категории	250—350	200—280	160—230	130—180
		Относительно абразивные, трещиноватые, переслаивающиеся IV—VII категории	230—330	180—250	140—200	110—160
		Абразивные V—VIII категории	150—250	110—190	90—160	80—130
		Абразивные, трещиноватые V—VIII категории	150—250	110—170	80—140	70—120
Количество промывочной жидкости	л/мин	Для всех пород	90—110	110—130	115—160	150—180

При бурении монолитных и трещиноватых пород VIII—IX категории применяют смесь чугунной и стальной дробь-сечки в следующих соотношениях: 2:1, 3:1, 4:1.

4.10. В качестве основного способа питания забоя скважин дробью рекомендуется рейсовый, при проходке абразивных твердых пород — крупнопорционный. В отдельных случаях можно применять мелкопорционное питание.

Рейсовое питание не применяют при сильном поглощении промывочной жидкости у самого забоя скважин.

4.11. Режим рейсового и крупнопорционного питания скважин дробью приведен в табл. 9.

Таблица 9

Расход дробь при бурении			
Категория пород по буримости	Диаметр коронки в мм		
	130	110	91
Вес порции дробь в кг			

Рейсовое питание

Чугунная дробь

VII—VIII	12—14	8—10	6—8
IX	18—20	14—16	10—12

Стальная дробь-сечка

X	3,9	3,3	2,7
---	-----	-----	-----

Крупнопорционное питание

Чугунная дробь

IX	6—8 (3—4)	4—6 (2—3)	3—4 (1—2)
----	-----------	-----------	-----------

Стальная дробь-сечка

XI	2,6 (0,26)	2,2 (0,22)	1,8 (0,18)
XII	3,9 (0,26)	3,3 (0,22)	2,7 (0,18)

Примечание. В скобках указан вес дополнительных порций.

4.12. При рейсовом питании скважин дробью необходимо:

а) во время бурения коронками одного диаметра применять один размер дробь;

б) при переходе с меньшего размера дроби на больший вначале увеличить вес порции дроби меньшего диаметра, затем бурить до разработки ствола под более крупный диаметр дроби. При этом продвигают снаряд через дробь с замедленной скоростью, обеспечивая подачу промывочной жидкости, так как резкий спуск снаряда без промывки может вызвать заклинку керна, а иногда и снаряда;

в) в случае прекращения бурения скважины по каким-либо причинам в последующем рейсе при засыпке дроби учитывать дробь, находящуюся на забое;

г) не допускать расхаживание снаряда, особенно при бурении трещиноватых пород.

4.13. Режимы бурения чугуниой дробью представлены в табл. 10.

Таблица 10

Диаметр коронки (наружный) в мм	Давление на коронку в кг		Скорость вращения снаряда в об/мин
	обычная дробь	дробь улучшенного качества	
130	500—750	900—1050	130—190
110	600—625	750—825	190—240
91	380—480	580—680	240—300

4.14. Режимы бурения при использовании стальной дроби-сечки приведены в табл. 11.

Таблица 11

Диаметр коронки в мм	Давление на коронку в кг	Скорость вращения снаряда в об/мин
130	840—1250	130—190
110	690—1050	190—240
91	610—765	240—300

4.15. Расход промывочной жидкости при рейсовом и крупнопорционном питании указан в табл. 12.

При крупнопорционном питании обычно увеличивают количество подаваемой в скважину жидкости после каждой засыпки. Количество промывочной жидкости на втором этапе увеличивают спустя 20—40 мин после начала углубления скважины в очередном рейсе.

При рейсовом питании по мере истирания дроби количество подаваемой на забой жидкости уменьшают.

Таблица 12

Этапы промывки	Характеристика этапа	Количество промывочной жидкости л/мин при диаметре коронки в мм		
		130	110	91
Первый	Продвижение снаряда к забой скважины через дробь	60—40	50—30	45—25
Второй	Бурение	25—15	20—10	20—10
Третий	Перед засыпкой дроби и заклинкой керна	180—80	110—70	90—55

4.16. При дробовом бурении в состав снаряда необходимо включать шламовую трубу для сбора породного и дробового шлама. Длина трубы должна быть не менее 1,5 м.

4.17. Заклинку керна при дробовом бурении производят битым кварцем, чугушной дробью, кусочками мягкой проволоки.

Бурение алмазным породоразрушающим инструментом с промывкой

4.18. В зависимости от крепости и абразивности пород применяют мелкоалмазные коронки следующих типов (табл. 13).

Таблица 13

Породы	Категория пород по буримости	Тип коронки
Малоабразивные	XI—XII	Шестислойные М-6
Малоабразивные	X—XII	Импregnированные ИМВ-1А, ИМВ-1Б
Среднеабразивные	VIII—XI	Трехслойные АК-3; однослойные АК-1
Абразивные	X—XII	Пястислойные А-5; импregnированные ИМВ-2А, ИМВ-2В
»	IX—XII	Трехслойные МВ-5
»	VII—IX	Однослойные МВ-1
»	VIII—IX	Однослойные ОА

Для калибровки ствола скважины при алмазном бурении используют мелкоалмазные расширители типа РМА, диаметр которых несколько больше (на 0,2—0,3 мм) диаметра соответствующей коронки.

4.19. При бурении мелкоалмазными коронками следует использовать многоскоростные станки, обеспечивающие высокую скорость вращения снаряда и большие осевые нагрузки на забой. Буровой станок должен быть оснащен контрольно-измерительными приборами: указателями давления на забой, числа оборотов снаряда, скорости бурения, крутящего момента и т. д. Буровой насос должен обеспечивать равномерную подачу промывочной жидкости. Каждый насос необходимо оснащать манометром и расходомером.

4.20. Забурку скважин производят твердосплавными коронками, а когда это возможно — отработанными мелкоалмазными многослойными или импрегнированными коронками.

4.21. Алмазные коронки должны иметь неповрежденные матрицы. Коронка, имеющая кольцевую выработку по окружности или односторонний износ по внутренней или внешней стороне и в силу этого потерявшая диаметр, к работе не пригодна.

Таблица 14

Характеристика пород	Категория пород по буримости	Диаметр коронки в мм		
		46	59	76

Скорость вращения коронки в об/мин

Монолитные	n	VII—VIII	600—200	400—150	350—100
		IX—X	400—150	300—100	250—100
Трещиноватые разрушенные	n	VII—VIII	350—150	350—100	150—80
		IX—X	250—100	150—100	100—80

Количество промывочной жидкости в л/мин

Малобразивные	n	VII—X	15—25	20—30	25—35
		XI—XII	20—40	25—45	35—60

Осевая нагрузка на коронку в кг

Все разновидности пород	n	VII—X	150—400	200—600	300—650
		XI—XII	250—700	400—1000	500—1100

4.22. Начинают бурение новой коронкой на малых скоростях вращения с осевой нагрузкой на забой 100—120 кг. Время приработки новой коронки составляет 10—20 мин, после чего постепенно устанавливают нормальный технологический режим бурения.

4.23. Режимы бурения мелкоалмазными коронками (алмазы 2-го сорта) указаны в табл. 14.

4.24. При бурении пород средних категорий число оборотов коронки должно быть максимальным. С повышением категории пород, а также при бурении абразивных пород число оборотов необходимо уменьшать во избежание зашлифовки алмазов. При бурении сильно трещиноватых пород скорость вращения снижают до минимальной.

4.25. Количество промывочной жидкости следует увеличивать при увеличении диаметра коронок, числа оборотов снаряда и давления на забой. Особенно интенсивной должна быть промывка при бурении абразивных пород. При бурении очень твердых пород, если скорость проходки невелика, во избежание быстрой зашлифовки алмазов подачу промывочной жидкости в скважину уменьшают. В качестве промывочной жидкости применяют только воду.

4.26. Применяемый буровой инструмент должен быть исправным и прямолинейным.

4.27. Для предупреждения вибрации в процессе бурения рекомендуется использовать два расширителя — над коронкой и под переходником; применять возможно больший диаметр бурильных труб; устанавливать над колонковой трубой направляющие фонари или утяжеленные трубы, если это возможно; пользоваться штанговой антивибрационной смазкой или мыльной эмульсией для промывки; надежно закреплять буровой станок на прочном основании; не допускать люфта шпинделя вращателя станка.

4.28. Спуск инструмента производят плавно, без рывков. Снаряд на забой устанавливают без удара, предварительно включив промывку. Бурение начинают на пониженных оборотах.

4.29. Для заклинки керна используют в основном кернорватели, резе битое стекло или фарфор.

4.30. При свинчивании и отвинчивании алмазной коронки применяют только специальный инструмент (клещи и т. д.).

4.31. В последующем рейсе перед началом бурения имеющиеся на забое столбики породы разбивают долотом и производят очистку забоя.

4.32. Для предотвращения самозаклинки керна при алмазном бурении необходимо повышать осевое давление и скорость вращения бурового инструмента, применять двойные колонковые трубы, использовать антивибрационную смазку и обратную промывку.

4.33. Для увеличения срока службы алмазной коронки, бурильных и колонковых труб применяют различные антивибрационные смазки, использование которых уменьшает вибрацию снаряда, облегчает завинчивание и отвинчивание бурильных труб.

В качестве смазки можно использовать пасту, приготовленную из $\frac{1}{3}$ канифоли и $\frac{2}{3}$ нигрола. Паста тонким слоем наносится на бурильные трубы (ее устойчивость 10—12 смен).

4.34. При проходке одной скважиной нескальных и скальных пород в некоторых случаях применяют комбинированный способ бурения. Мягкие породы проходят твердосплавным инструментом и закрепляют обсадными трубами, причем башмак последних устанавливают в плотных монолитных породах; дальнейшее углубление скважины проводят алмазным инструментом. Совмещения алмазного бурения с дробовым следует избегать. Наличие в скважине нескольких дробинок либо их обломков может привести к выходу из строя алмазной коронки.

4.35. В случае перехода с дробового бурения на алмазное следует: закрепить скважину обсадными трубами и зацементировать башмак колонны; очистить скважину от шлама и заменить весь промывочный раствор, наполняющий скважину и циркуляционную систему; разобрать всю колонну бурильных труб и тщательно очистить ее от дроби.

Бурение с продувкой воздухом

4.36. При бурении песчаных, глинистых, полускальных и мерзлых грунтов (I—VIII категории) с продувкой воздухом проходку следует вести твердосплавными коронками типа КР либо специальными коронками (рис. 1), обеспечивающими свободный выход воздуха из-под торца.

4.37. Диаметр породоразрушающего инструмента следует выбирать как можно меньше, а диаметр бурильных труб брать таким, чтобы отношение площадей сечения кольцевого пространства и канала в бурильных трубах приближалось к единице.

Необходимо избегать ступенчатого ствола скважин, так как в местах его расширения уменьшается скорость восходящего потока и накапливается шлам.

4.38. Особое внимание при бурении скважин с продувкой сжатым воздухом уделяют установке кондуктора, который не только обеспечивает правильное направление скважины, но и является основанием, на котором закрепляется тройник и герметизирующее устройство. Кондуктор должен быть тщательно отцентрирован относительно шпинделя или ротора установки, так как в противном случае неизбежна разгерметизация устья скважины.

4.39. При бурении скважин самоходными установками концы ног мачты соединяют траверсой, на которой укрепляется короткий направляющий патрубков.

4.40. При бурении коронками, армированными твердыми сплавами, скорость восходящего потока воздуха в кольцевом зазоре между стенками скважины и колонной штанг должна быть в пределах 8—12 м/сек. Осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент примерно

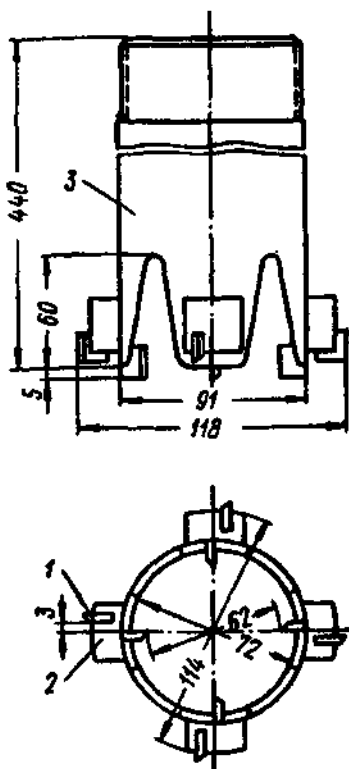


Рис. 1. Твердосплавная коронка для бурения с продувкой воздухом в вязких глинах

1 — пластинка твердого сплава;
2 — сухарь; 3 — корпус

та же, что и при бурении с промывкой. Скорость вращения снаряда поддерживают в пределах 120—280 об/мин.

4.41. Режимы бурения с продувкой твердосплавными коронками приведены в табл. 15.

Таблица 15

Тип коронки	Диаметр бурения в мм	Давление на коронку в кг	Скорость вращения инструмента в об/мин	Скорость восходящего потока воздуха в м/сек	Категория пород по буримости
КР-1	112—151	150—600	102—182	8—10	I—IV
КР-2	112—151	200—700	182	8—10	III—VI
МР6-16	110	600—900	182	10—12	V—VI
МР6-16	110	1100	182	10—12	VII—VIII
ОКВ	112	1000	237	10—12	V—VI
ОКВ	112	1200	182	10—12	VII—VIII
ОКВ	132	1100	237	10—12	V—VI
ОКВ	132	1400	182	10—12	VII—VIII

4.42. Расход воздуха приближенно определяют по формуле

$$Q = VF, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где V — скорость восходящего потока воздуха в м/мин;

$F = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$ — площадь кольцевого зазора между колонной штанг и стенками скважины в м^2 , где D — диаметр скважины в м;

d — наружный диаметр буровых труб в м.

Количество подаваемого в скважину воздуха при диаметре скважины 132 мм должно быть не менее 6 $\text{м}^3/\text{мин}$.

4.43. При бурении дробовыми коронками скорость вращения бурового снаряда берется в пределах 120—280 об/мин; осевая нагрузка на коронку примерно такая же, что и при бурении с промывкой (см. п. 4.13); первоначальный расход воздуха при диаметре дробовой коронки 110 мм — порядка 1,5 $\text{м}^3/\text{мин}$. Через каждые 20—25 мин чистого бурения расход воздуха снижают на 0,2—0,3 $\text{м}^3/\text{мин}$. Расход воздуха в конце рейса должен быть порядка 0,3—0,4 $\text{м}^3/\text{мин}$.

4.44. Величину оптимального давления сжатого воздуха выбирают опытным путем применительно к конкретным условиям бурения.

Например, при бурении скважины диаметром 110 мм с использованием бурильных труб диаметром 63,5 мм и расходе воздуха 6 м³/мин давление должно находиться в следующих пределах:

глубина бурения от 0 до 50 м	0,8—1,5 кг/см ²
» » » 50 » 150	1,5—2,5 »
» » » 150 » 300 »	2,5—3,5 »

Следует отметить, что в течение рейса (по мере заполнения керном колонковой трубы и увеличения количества шлама в скважине) происходит повышение давления воздуха в пределах 0,5—1 кг/см², соответственно этому увеличивается верхний предел оптимального давления.

4.45. С целью предупреждения образования сальников при бурении в мерзлых грунтах, а также в случае поступления пластовой воды в скважину рекомендуется:

а) перед началом бурения производить продувку скважины без вращения инструмента в течение 20—50 мин;

б) применять азрированные растворы;

в) вводить дополнительное количество воды в скважину в сочетании с расхождением снаряда и т. д.

При бурении мерзлых грунтов для уменьшения влажности воздуха, поступающего в скважину, на его пути от компрессора к устью скважины устанавливают влагоотделители и холодильники.

Бурение твердосплавным инструментом «всухую»

4.46. При проходке полускальных, песчаных и глинистых грунтов колонковым способом «всухую» в качестве бурового снаряда применяют колонковые трубы длиной 1,5 м и диаметрами 89, 108, 127, 146 и 168 мм с твердосплавными коронками типов МР-2НП (для полускальных грунтов) и КР (для песчаных и глинистых грунтов). В отдельных случаях (при проходке легко буримых супесей, суглинков и т. д.) применяются колонковые трубы длиной 3 м.

4.47. Бурение колонковым способом «всухую» ведется укороченными рейсами (длина рейса в зависимости от буримости проходимых грунтов колеблется от 1 до 2,5 м).

Параметры бурения устанавливают следующие: скорость вращения инструмента 80—150 об/мин, давление на забой — 300—600 кг.

Заклинка керна производится путем затирки «всухую», для чего необходимо последние 5—10 см рейса пройти с повышенным давлением на забой.

Безнасосное бурение

4.48. При безнасосном бурении применяют твердосплавные буровые коронки, имеющие выход резцов за наружную поверхность не менее чем на 3 мм и за внутреннюю — не менее чем на 2 мм на сторону (ребристые коронки типа КР).

4.49. Основными факторами, определяющими режим безнасосного бурения, являются:

- а) частота расхаживания бурового снаряда (число качаний снаряда в мин);
- б) высота подъема снаряда над забоем в м;
- в) осевое давление на забой в кг;
- г) скорость вращения снаряда в об/мин.

4.50. Частоту расхаживания бурового снаряда выбирают в зависимости от физико-механических свойств проходимых пород. Ориентировочные данные по частоте расхаживания бурового снаряда приведены в табл. 16.

Таблица 16

Порода	Число качаний в мин
Известняки, песчаники, сланцы (породы с небольшим удельным весом)	10—15
Глины, мягкие известняки, доломиты, алевролиты	15—20
Супеси и суглинки тугопластичной, мягкопластичной и пластичной консистенции	20—25
Пески	40—60

Чем чаще производится расхаживание снаряда, тем интенсивнее циркулирует жидкость, лучше омывается забой и повышается скорость бурения. Однако при слишком частом расхаживании нередко происходит размывание керна. В связи с этим опытным путем уточняют рациональное число расхаживаний по отдельным

разновидностям пород. Высота подъема снаряда при рас­ хаживании не должна превышать 10 см. Чем больше ча­ стота расхаживания, тем меньше должна быть высота подъема снаряда над забоем.

4.51. В процессе бурения давление на забой необхо­ димо поддерживать в следующих пределах: в нескаль­ ных породах — 150—250 кг; в полускальных породах — 200—400 кг и более.

Число оборотов снаряда устанавливают с учетом глу­ бины и диаметра скважины. С увеличением числа обо­ ротов наблюдается повышение скорости бурения, что, в свою очередь, требует увеличения частоты расхажива­ ния снаряда.

Обычно скорость вращения бурового снаряда уста­ навливается из расчета средней окружной скорости ко­ ронки 80—150 об/мин. При бурении в твердых породах можно применять и большие окружные скорости.

Максимальная углубка за рейс не должна превышать 1—1,5 м, а при хорошем выходе керна — 2,5 м.

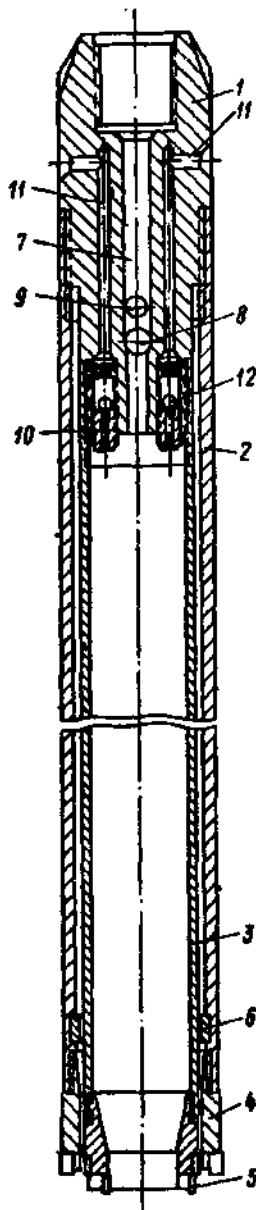
4.52. При проходке пород, дающих тяжелый шлам, перед перекреплением шпинделя необходимо до остано­ ки вращения снаряда 3—4 раза его поднять над забоем на небольшую высоту (до 15 см). Перекрепление зажим­ ных патронов производят быстро во избежание заклинки керна, а иногда и бурового снаряда. При этом шпиндель станка закрепляется на 5—10 см ниже крайнего верхнего положения. После перекрепления зажимных патронов производят 3—4 расхаживания, а затем продолжают углубление.

При остановке вращения во избежание зашламова­ ния бурового снаряда нельзя прекращать его расхажива­ ние.

4.53. Показателем прекращения внутренней циркуля­ ции жидкости являются торможение вращения и затруд­ нения с расхаживанием снаряда. Если циркуляция жид­ кости нарушена и ее невозможно восстановить частым расхаживанием снаряда без вращения, необходимо не­ медленно поднять снаряд из скважины.

4.54. Заклинку керна при безнасосном бурении про­ изводят: в мягких породах — затиркой «всухую» на 10— 20 см при прекращении расхаживания снаряда и повы­ шенном давлении на забой; в твердых породах — шла­ мом, скапливающимся над керном при остановке вра­ щения и расхаживания снаряда.

Бурение двойными колонковыми снарядами



4.55. Двойные колонковые снаряды (ДКС), используемые при проходке скважин, должны удовлетворять следующим требованиям:

а) надежно защищать керн от размывающего действия промывочной жидкости;

б) защищать керн от ударов, вибраций, толчков (особенно, если керн легко разрушается от механического воздействия);

в) обеспечивать легкое вытеснение жидкости из керноприемной трубы непосредственно в полость скважины и постоянный восходящий поток жидкости во внутренней трубе; разбуривание твердых прослоек в грунтах; надежную заклинку, срыв и удержание керна; возможность подъема снаряда с вращением и промывкой, с полным сохранением керна; свободное извлечение керна из внутренней трубы без нарушения его структуры.

4.56. При проходке грунтов, легко разрушающихся под действием потока промывочной жидкости, но относительно устойчивых к механическим воздействиям, применяют двойные колонковые снаряды с вращающимися внутренней и наружной трубами. Наиболее характерным снарядом этого типа является двой-

Рис. 2. Двойной колонковый снаряд треста Львовуглегеология

1 — переходник; 2 — наружная труба; 3 — внутренняя труба; 4 — наружная коронка; 5 — внутренняя коронка; 6 — направляющее кольцо; 7 — осевой канал; 8 — шаровой клапан; 9 — боковые каналы; 10 — седла; 11 — дренажные каналы; 12 — шаровые клапаны

ной колонковый снаряд треста Львовуглегеология (рис. 2). Режимы бурения ДКС с вращающейся внутренней трубой следующие: скорость вращения снаряда 80—120 *об/мин*, осевое давление на коронку 400—600 *кГ*, расход промывочной жидкости 100—120 *л/мин* (для диаметра бурения 92—112 *мм*).

4.57. Проходку грунтов, разрушающихся промывочной жидкостью и вибрацией снаряда (сильно трещиноватые скальные, а также несвязные и слабосвязные грунты), осуществляют ДКС с невращающейся внут-



Рис. 3. Двойной колонковый снаряд «Штамп 91м»

1 — коронка; 2 — наружная колонковая труба; 3 — переходник; 4 — стальной полый штамп; 5 — керноприемная труба; 6 — шаровой клапан; 7 — пружина; 8 — регулировочные кольца; 9 — упорный стержень; 10 — гильза

ренней трубой: ДТА-2 системы С. А. Алексеенко и двойным колонковым снарядом «Штамп 91м» конструкции А. С. Станишевского (рис. 3).

Режимы бурения указанными ДКС: скорость вращения снаряда 120—200 *об/мин*; осевое давление на коронку 600—800 *кГ*; расход промывочной жидкости 100—120 *л/мин* (для диаметра бурения 92 *мм*).

При этом рекомендуется следующее рациональное опережение внутренней коронки относительно наружной: для грунтов II и III категории по буримости — 2—5 *мм*; VII категории — 6—8 *мм*.

4.58. При проходке перемежающихся по твердости грунтов, которые разрушаются промывочной жидкостью и вибрацией снаряда, применяют ДКС комбинированного типа: конструкции МГРИ и Уральского геологического управления.

Мероприятия по повышению выхода керна при колонковом бурении

4.59. С целью повышения выхода керна при колонковом бурении рекомендуется:

а) устанавливать минимальный диаметр скважин при твердосплавном бурении 91 *мм*, дробовом — 110 *мм*, алмазном — 59 *мм*;

б) при проходке рыхлых и мягких пород использовать качественный глинистый раствор с низкой водоотдачей (4—5 см³ за 30 мин), а иногда с повышенной вязкостью (до 60 сек по СПВ-5);

в) выбирать такое значение критической скорости потока жидкости, при которой она не размывает керн и стенки скважины, а шлам выносится на поверхность; значения критической скорости потока (м/сек) в зависимости от категории породы и вида промывочной жидкости приводятся в табл. 17;

Таблица 17

Категория пород	Глинистый раствор	Вода
I	1,5	0,4
II	2,2	1,2
III	5	3,4

г) уменьшать длину рейса и ограничивать расход промывочной жидкости;

д) при бурении полускальных и скальных сильнотрециноватых и рассланцованных пород снижать расход промывочной жидкости на 25%, давление на забой на 25—40%;

е) при бурении скальных высокоабразивных монолитных пород увеличивать давление на забой и расход промывочной жидкости на 25%;

ж) применять «безнасосное бурение», двойные и эжекторные колонковые снаряды.

ШНЕКОВОЕ БУРЕНИЕ

4.60. В комплект инструмента для шнекового бурения входят долота и шнеки. При шнековом бурении применяют двух- или трехперые ступенчатые долота, а также долота типа РХ.

При проходке скважин кольцевым забоем используют специальные магазинные шнеки или шнеково-колонковые буры.

4.61. Шнековое поточное бурение следует вести спиральными долотами, диаметр которых равен диаметрам применяемых шнеков. В случае проходки плотных грун-

тов и грунтов с включениями гальки и т. п. вместо спиральных применяют трехперые массивные долота.

4.62. Скорость вращения снаряда при поточном бурении устанавливают в пределах 250—300 *об/мин*. Вращающуюся шнековую колонну погружают в грунт под действием собственного веса и веса вращателя, при этом величина подачи должна обеспечивать равномерное и непрерывное углубление, так как быстрое погружение шнековой колонны может вызвать переполнение шнеков грунтом, прекращение выноса последнего на поверхность и заклинивание снаряда в скважине.

4.63. При рейсовом бурении используют комбинированную колонну, нижняя часть которой состоит из шнеков с долотом, а верхняя — из бурильных труб. Длина колонны шнеков при этом должна в 2,5 раза превышать длину рейса.

Величину рейсового углубления устанавливают от 0,8 до 1 м, скорость вращения шнековой колонны — 100—300 *об/мин*, осевую нагрузку — до 50 *кГ*.

4.64. При рейсовом бурении слабых грунтов свободное погружение шнековой колонны происходит при скорости вращения 75—100 *об/мин* и при освобожденном канате лебедки.

4.65. При бурении грунтов, прилипающих к шнековому буру, с целью его свободного извлечения из скважины и последующей установки на забой, между первым шнеком и шнековой колонной устанавливают расширитель. Последний представляет собой трубу с продольным вырезом и диаметром, равным диаметру шнеков. В верхней части трубы к кромке продольного выреза прикреплен нож из твердой стали, выступающий на 7 мм за контур трубы. При бурении нож срезает грунт со стенок скважины и заполняет внутреннюю часть расширителя, тем самым расширяя скважину на 14 мм, что позволяет легко извлекать колонну шнеков из скважины и устанавливать ее на забой.

4.66. При винтовом бурении скорость ввинчивания шнековой колонны в грунт должна составлять 75—100 *об/мин*. По мере погружения колонны в грунт ее наращивают дополнительными шнеками. Каждый раз после погружения колонны на 0,3—0,4 м бурение прекращают и приподнимают колонну на 2—3 см. Если колонна поднимается, то можно продолжать бурение (погружение). Если же колонна не поднимается (бывает, ког-

да она слишком глубоко завинчена в грунт), ее вывинчивают сначала вручную, а затем поднимают лебедкой.

4.67. В случае проходки крупнообломочных грунтов бурение проводится с использованием одного или двух

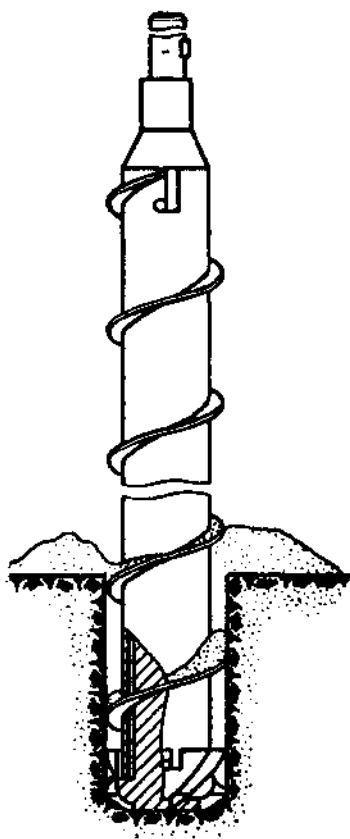


Рис. 4. Шнековый бур для отбора образцов мерзлого грунта конструкции ЦНИИ МПС

звеньев утяжеленных шнеков с ребрами из толстой листовой стали. В качестве породоразрушающего инструмента применяют спирально-ступенчатое долото, представляющее собой суживающийся утяжеленный шнек с резами на ребре, расположенными под углом 90° друг к другу. Низ лезвия долота представляет собой лопасти типа РХ. Бурение ведется со скоростью вращения инструмента до 300—350 об/мин.

4.68. Бурение кольцевым забоем осуществляется переносными мотобурами с использованием пробоотборников к механическому буру МП-1. Пробоотборник позволяет отбирать керн диаметром 30 мм. Длину рейса устанавливают в пределах 15—20 см.

Глубокие скважины проходятся самоходными станками УГБ-50А и др. При этом применяют магазинные шнеки, которые позволяют получать образцы грунта с малонарушенной структурой. Величину рейса устанавливают от 0,4 до 2 м.

4.69. Проходка скважин глубиной до 10 м шнековым способом в мерзлых грунтах может производиться с использованием шнеково-колонковых буров, разработанных к установке ПВБСм-15 (рис. 4). Бур позволяет отбирать керн из вертикальных, наклонных и горизонталь-

ных скважин глубиной до 12 м. Диаметр выбуриваемых скважин 75 мм, диаметр отбираемого керна 44 м.

МЕДЛЕННО-ВРАЩАТЕЛЬНОЕ БУРЕНИЕ

4.70. Бурение скважин медленно-вращательным способом станками типов УГБ-50А, СБУД-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А и др. целесообразно производить комплектом инструмента для ручного ударно-вращательного бурения (ложки, змеевики), а также для колонкового бурения. Диаметр буровых наконечников выбирается в пределах 89—168 мм.

4.71. Бурение следует вести при пониженных скоростях вращения бурового инструмента (30—100 об/мин). Давление на забой регулируют рычагом или штурвалом; величину рейса устанавливают в зависимости от проходных грунтов в пределах 0,3—0,8 м. Проходку скважин, как правило, ведут без промывки. В некоторых случаях при медленно-вращательном бурении в скважину необходимо подливать воду в небольших количествах.

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ БУРЕНИЕ СПЛОШНЫМ ЗАБОЕМ (РОТОРНОЕ)

4.72. Для проходки скважин диаметром 151—248 мм применяют: лопастные долота типа РХ и пикобуры в рыхлых и мягких грунтах I—IV категории; трехшарошечные зубчатые долота типа Т СКБ МГ СССР в полускальных и скальных грунтах V—VIII категории.

4.73. Для проходки скважин диаметром 150—490 мм используют следующие типы шарошечных долот: М — для мягких грунтов, С — средних, СТ — средней твердости, Т — твердых и К — крепких Министерства нефтедобывающей промышленности СССР.

4.74. Применяемые режимы бурения сплошным забоем с промывкой приведены в табл. 18.

УДАРНО-КАНАТНОЕ БУРЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫМ ЗАБОЕМ

4.75. Технологические приемы проходки инженерно-геологических скважин при ударно-канатном бурении кольцевым забоем зависят от глубины, начального диаметра скважины и свойств проходных грунтов.

4.76. Бурение неглубоких (до 30 м) скважин произ-

Таблица 18

Тип долота	Категория грунтов по буримости				
	I—III	III—IV	V—VI	VI—VIII	IX—XII
<i>Удельное давление на 1 см диаметра долота в кг</i>					
РХ	50—60	60—100	—	—	—
Пикобуры	40—50	50—80	—	—	—
Шарошечные (типа Т)	—	—	100—200	200—300	—
Шарошечные (типа К)	—	—	—	—	300—400
<i>Средние окружные скорости долота в м/сек</i>					
РХ	0,8	1	—	—	—
Пикобуры	0,8	1,5	—	—	—
Шарошечные	—	—	0,6—1	1,0—1,5	0,6—1
<i>Количество промывочной жидкости на 1 см диаметра долота в л/мин</i>					
РХ и пикобуры	10—12	15—20	—	—	—
Шарошечные	—	—	15—20	15—20	15—20

водят забивными стаканами, желонками и грунтоносами диаметром от 89 до 168 мм. При этом рекомендуется использовать автоматический подъем и сбрасывание инструмента на забой. Углубление скважины может эффективно производиться также непосредственно с лебедки станка.

4.77. При бурении связных глинистых грунтов применяют стаканы с одним или двумя продольными вырезами, которые дают возможность производить описание геологического разреза и облегчают очистку стаканов от грунта. Особенно рекомендуются разъемные стаканы, которые легко и быстро очищаются от грунта (рис. 5).

4.78. При бурении слабосвязных грунтов используют стаканы с клапаном (клапанами) (рис. 6), позволяющим удерживать грунт при извлечении стакана из скважины.

4.79. Для бурения скважин в несвязных грунтах, а также для очистки скважин от бурового шлама, образующегося в результате разрушения крепких прослоек и валунов, используют желонки. Для разбивки встречающихся при проходке крепких прослоек и валунов ис-

пользуют долота, применяемые при ударно-канатном бурении сплошным забоем.

4.80. Забивной способ применяют при проходке всех разновидностей связных грунтов. Основными технологическими параметрами этого способа являются:

- а) вес ударного патрона в кг;
- б) число ударов в мин;
- в) величина подъема ударного патрона в м;
- г) величина углубления наконечника в м.

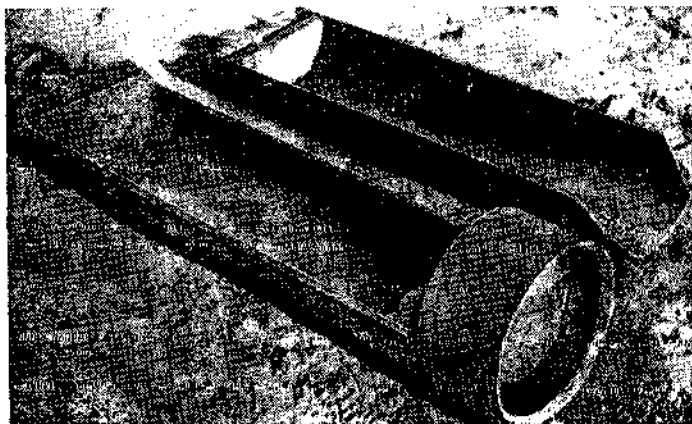


Рис. 5. Разъемный стакан конструкции Гидропроекта



Рис. 6. Забивные стаканы с клапаном конструкции Гидропроекта

4.81. В зависимости от диаметра стакана вес ударного патрона должен находиться в пределах 100—150 кг. Величина подъема ударного патрона обычно регламентируется его конструкцией и равна 0,6—1 м. Число ударов забивного патрона колеблется в пределах 20—25 уд/мин. Во избежание прихвата наконечника на забое рейсовое углубление ограничивают до 0,2—0,4 м.

4.82. В мягкопластичных и лёссовых глинистых грунтах применяют «клюющий» способ бурения.

Основными параметрами этого способа являются: вес бурового снаряда и высота его подъема над забоем. Для эффективного бурения необходимо стремиться, чтобы вес был как можно больше, доводя его до 150—200 кг; буровой снаряд при этом следует поднимать на возможно большую высоту (2—3 м).

4.83. При проходке отдельных интервалов крупнообломочных и песчаных грунтов следует переходить на бурение сплошным забоем, используя обычный ударно-канатный инструмент (долота, желонки и т. д.).

4.84. При желонировании число ударов желонки должно быть 20—30 в мин, а высота ее подъема над забоем 0,15—0,2 м. Желонки применяют с утяжелителями и с таким расчетом, чтобы их вес был равен 50—100 кг. В процессе желонирования скважину необходимо закреплять трубами, при этом желонка не должна выходить за башмак обсадных труб более чем на 0,5—1 м.

4.85. Скважины глубиной более 30 м проходят станками, оснащенными балансирными либо оттяжными устройствами. В качестве бурового инструмента следует использовать инструмент для ударно-канатного бурения кольцевым забоем, разработанный для буровых установок БУК-75 и БУГ-100 (рис. 7).

4.86. При значительных глубинах бурения с целью уменьшения бокового зажима бурового инструмента выбирают ступенчатую конструкцию скважин.

4.87. Основные параметры бурения с использованием указанного в п. 4.85 бурового инструмента следующие:

Высота подъема бурового снаряда в м	250—500
Число ударов снаряда в мин	60—120
Вес ударного патрона для бурения в связных грунтах в кг	150—300
Вес желонки с утяжелителем для бурения в несвязных грунтах в кг	130—200

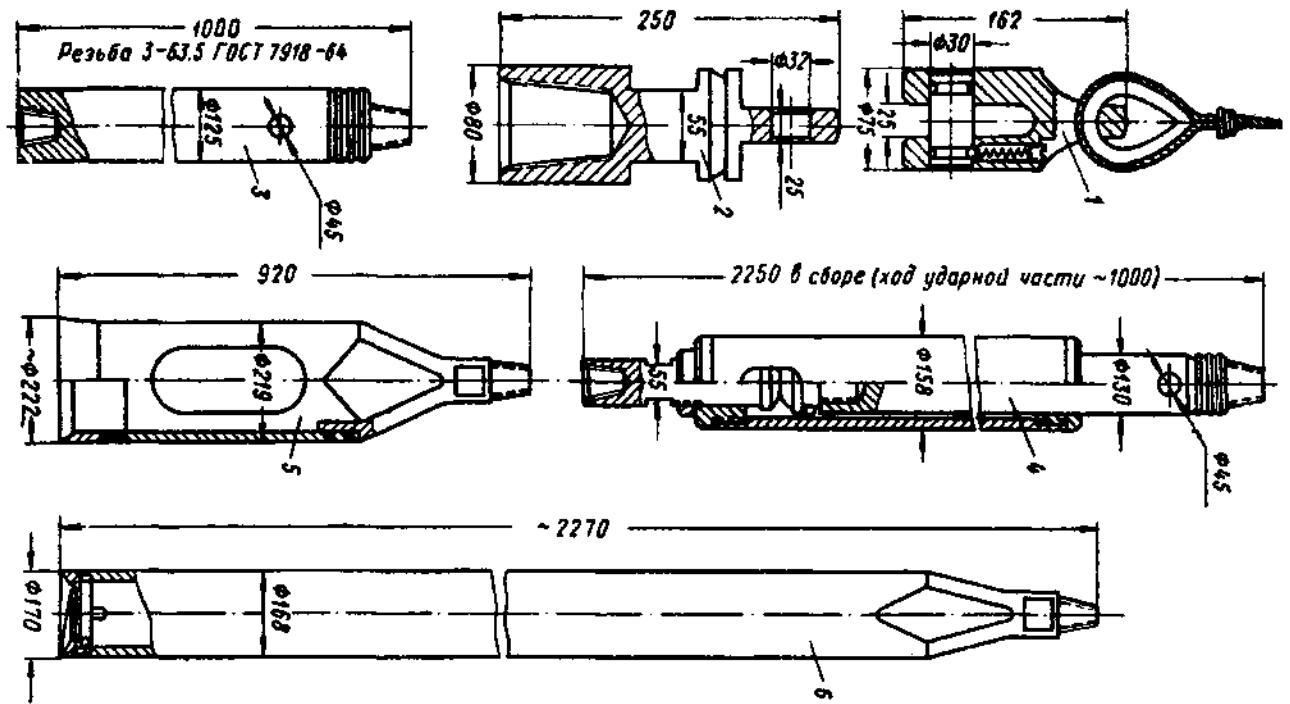


Рис. 7. Буровой инструмент для ударно-канатного бурения кольцевым забоем установками БУК-75 и БУГ-100
 1 — быстроръемный замок; 2 — переходник; 3 — утяжелитель; 4 — патрон ударный; 5 — стакан; 6 — желонка

4.88. Бурение в устойчивых грунтах (маловлажные глины, суглинки и т. п.) производят забивными стаканами без обсадки скважин трубами.

Углубление за рейс ограничивают 30—40 см, так как в пластичных грунтах происходит увеличение длины выбуриваемого образца за счет разницы между наружным и внутренним диаметрами стакана. Большая величина углубления стакана может привести к его прихвату в скважине.

4.89. При проходке грунтов, насыщенных водой, применяют стаканы с клапанами. В некоторых разновидностях указанных грунтов между внутренней стенкой стакана и керном образуются скользкая пленка, вследствие чего выбуренный грунт в стакане не удерживается.

4.90. При проходке неустойчивых грунтов бурение скважин осуществляют желонками или стаканами с клапанами с одновременным укреплением стенок скважин обсадными трубами.

При ударно-канатном бурении погружение обсадных труб в скважину одновременно с проходкой может осуществляться путем расхаживания или вибрирования обсадных труб. В частности, установки БУГ-100, рекомендуемые для проходки скважин глубиной до 100 м в глинистых, песчаных, крупнообломочных и других грунтах, оснащены механизмами расхаживания обсадных труб, которые позволяют также механизировать процесс свинчивания и развинчивания обсадных труб.

К основным технологическим параметрам процесса расхаживания труб относятся: крутящий момент, угол поворота труб и число расхаживаний в минуту. Наиболее важным из них является крутящий момент. Последний при диаметре обсадных труб 168—325 мм и глубине их погружения до 100 м должен быть не менее 1500—2000 кг·м; при погружении труб диаметром до 168 мм на глубину до 30 м величина крутящего момента может быть ограничена — 500 кг·м. Процесс эффективного погружения труб обычно осуществляется при числе двойных расхаживаний в минуту — 30—150, при этом угол поворота обсадных труб должен быть равен 15—20°. Увеличение скорости расхаживания выше указанных пределов нежелательно, поскольку это может привести к появлению значительных динамических нагрузок в колонне.

4.91. Бурение с вибрационным погружением обсад-

ных труб используют при проходке песчаных грунтов. В этом случае применяют вибраторы и вибромолоты с центральным проходным отверстием (ВГ-6, ВГ-8, С-835, ВО-10 и др.). Наличие отверстия позволяет вести погружение труб с одновременной проходкой.

УДАРНО-КАНАТНОЕ БУРЕНИЕ СПЛОШНЫМ ЗАБОЕМ

4.92. При ударно-канатном бурении сплошным забоем в качестве бурового инструмента применяют долота и желонки.

4.93. Эффективность проходки скважин зависит от веса бурового снаряда, высоты падения и числа ударов инструмента.

4.94. Вес бурового снаряда, в зависимости от свойств проходимых пород, выбирают из расчета нагрузки на 1 см долота, которая соответствует (в кг):

для песчаных и глинистых пород	15—25
для скальных пород средней крепости	30—40
для крепких скальных пород	40—50
для весьма крепких скальных пород	50—70
высоту падения инструмента устанавливают в пределах	0,3—1 м
количество ударов	40—55 в мин

4.95. Бурение твердых пород производят утяжеленным снарядом с малой высотой подъема инструмента над забоем и максимальным числом ударов; проходку мягких пород осуществляют снарядом небольшого веса с большой высотой подъема и небольшим числом ударов по забою.

ВИБРАЦИОННОЕ БУРЕНИЕ

4.96. При проходке скважин вибрационным способом в качестве буровых наконечников используют виброноты (рис. 8), реже виброжелонки и грунтоносы.

4.97. Вибронот представляет собой трубу длиной от 0,5 до 3 м; на нижнем конце ее находится рабочее кольцо, а на верхнем — переходник для присоединения к буровым трубам. Труба по всей длине имеет одну или несколько прорезей для очистки зонда от породы.

При проходке скважин самоходными виброустановками используют вибронды диаметрами 108, 127, 146 и 168, реже — 89 и 219 мм. При бурении скважин ручными переносными вибробурами применяются зонды диаметрами от 40 до 70 мм.

4.98. Для уменьшения сил трения зонда о породу целесообразно, чтобы рабочее кольцо последнего имело толщину стенки несколько большую, чем стенка трубы (зонда). Превышение толщины стенки должно быть

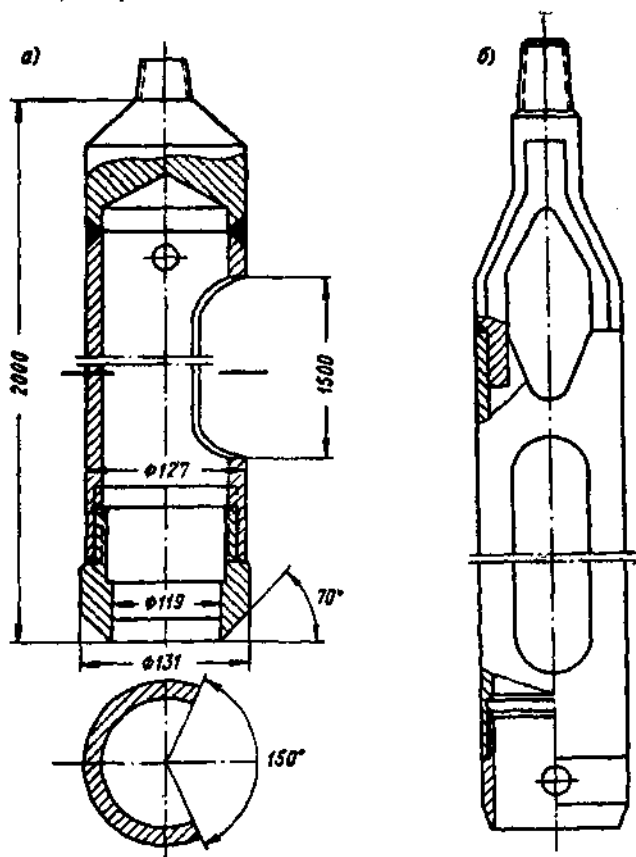


Рис. 8. Инструмент для вибробурения

а — вибронд с одной прорезью; *б* — вибронд с двумя прорезями

равномерно распределено между наружной и внутренней стороной башмака (по отношению к трубе).

4.99. В зависимости от проходимых пород применяют вибронды с различными углами скоса рабочего кольца (от 10 до 60°). В более плотных породах применяют рабочие кольца с большим углом скоса. Для вязных глинистых пород используют рабочие кольца с наружным скосом, так как внутренний скос способствует образованию пробки внутри зонда, тем самым препятствуя дальнейшему углублению зонда.

В неустойчивых породах, особенно в песках, применяют рабочие кольца с внутренним скосом (образование уплотненных зон в этом случае будет предохранять грунт от выпадения при извлечении зонда из скважины).

4.100. Бурение устойчивых вязных глинистых грунтов осуществляют зондами с одной прорезью и с углом выреза 140—160°. Большой угол выреза позволяет легко очистить зонд от породы. В менее устойчивых, но вязных породах используют зонды с меньшим углом выреза (90—140°), либо зонды с двумя вырезами.

4.101. При бурении грунтов, в которых возможна проходка скважин большими рейсами, применяют зонды, имеющие несколько прорезей по длине.

4.102. Бурение слабосвязных грунтов следует вести зондами с клапанами.

4.103. Несвязные (оплывающие и сыпучие) грунты проходят желонками, входное отверстие которых полностью перекрывается клапаном (клапанами). В верхней части таких желонок расположено отверстие или узкая продольная щель для очистки их от породы.

4.104. Для облегчения очистки зондов от грунта (наиболее трудоемкая операция при вибробурении) применяют разъемные вибронды.

4.105. При необходимости проходки скважин, требующих закрепления стенок трубами по всей глубине, используют вибронд (грунтонос) с замком для закрепления его в нижней части обсадных труб. В этом случае зонд (грунтонос) погружается вместе с обсадными трубами с последующим его извлечением канатом.

4.106. При бурении крупнообломочных и насыпных грунтов со строительным мусором используют обычные зонды с прорезью, оборудованные вместо рабочего кольца зубчатой коронкой.

4.107. Внутренний диаметр зонда при вибробурении с отбором образцов ненарушенной структуры должен быть не менее 80 мм.

4.108. Образцы с ненарушенной структурой для производства физико-механических исследований грунтов следует отбирать специальными грунтоносами диаметром 108 и 127 мм; длина грунтоноса при этом должна быть не менее 500 мм.

4.109. В качестве штанг при вибробурении применяют бурильные трубы по ГОСТ 7909—56 с замками по ГОСТ 7918—64 диаметром 50 и 63,5 мм. Можно также применять колонковые трубы диаметром 57 и 73 мм по ГОСТ 6238—52 с приваренными к ним замками.

4.110. Забуривание производят зондом возможно большего диаметра. Первый рейс, как правило, дает выход керна меньше 100% ввиду уплотнения поверхностных слоев грунта. Поэтому, если требуется сохранить выход керна, близкий к 100%, величину начального рейса уменьшают до 0,5 м. В остальных случаях зонд погружают на всю его длину.

4.111. При спуске в скважину зонд, диаметр которого равен диаметру скважины, нередко не доходит до забоя на 0,5; 1; 2 м и более. Объясняется это отчасти сужением или оплыванием стенок скважины, но главным образом тем, что буровой снаряд, будучи не прямолинейным, при спуске внедряется в стенки скважины и дает ей новое направление. Добивку снаряда обычно производят под действием веса вибропогружателя, а иногда путем кратковременных включений его в работу. При этом зонд на большую часть своей длины заполняется ранее пройденной породой, и рейс оказывается искусственно уменьшенным. Геологическая документация в данном случае затруднена, так как нет четкой границы между ранее задокументированным и вновь пройденным интервалом.

Во избежание этого необходимо возможно чаще переходить с одного диаметра бурения на другой. Так, например, скважина глубиной 10 м в грунтах, не требующих крепления стенок обсадными трубами, может быть пройдена таким образом: первые 4 м — зондом диаметром 168 мм, следующие 4 м — диаметром 127 мм и последующие 2 м — диаметром 108 мм. Переход с одного диаметра бурения на другой позволяет резко сократить время на проходку скважины.

4.112. При бурении скважины необходимо добиваться заполнения зонда породой на всю его длину. Это не всегда возможно вследствие образования в зонде грунтовой пробки, которая препятствует его погружению в грунт. Грунтовую пробку иногда можно пробить свободным сбрасыванием инструмента на забой скважины с одновременным включением вибропогружателя.

4.113. Для получения качественной геологической документации величину рейса при вибрационном бурении следует ограничивать. Значения рейсовых заходов приведены в табл. 19.

Таблица 19

Грунты	Величина рейса в м
Обводненные пески, супеси и суглинки	1—2,5
Суглинки и глины мягкопластичной и пластичной консистенции	0,8—1,5
Суглинки и глины тугопластичной и полутвердой консистенции	0,3—0,8

Кроме того, величина рейса зависит от диаметра применяемых зондов: чем больше диаметр зонда, тем на большую глубину он может быть погружен за один рейс.

4.114. Основными технологическими параметрами, определяющими эффективность вибробурения, являются: момент эксцентриков, частота колебаний и вес вибратора, скорость удара, вес ударной части и частота ударов вибромолота.

Рекомендуемые параметры вибропогружателей представлены в табл. 20.

Таблица 20

Параметры	Единица измерения	Вибратор	Вибромолот
Момент эксцентриков	кг·см	100—250	80—150
Скорость вращения дебалансов	об/мин	1000—1500	800—1500
Число ударов	уд/мин	—	500—1500
Вес	кг	150—500	100—300
Вес ударной части	кг	—	50—200
Мощность двигателя	квт	4—7	3—5

При вибробурении глинистых грунтов применяют в основном вибромолоты с большим моментом эксцентров и с пониженной частотой ударов. В песчаных грунтах хороший эффект дают высокочастотные вибраторы.

4.115. Время непрерывной работы вибропогружателя не должно превышать 10—15 мин. Если погружение зонда почти прекратилось (скорость бурения не превышает 0,05 м/мин), вибробурение прекращают. Исключением являются особо плотные породы.

4.116. При подъеме бурового снаряда из скважины в момент отрыва зонда от забоя нередко требуются большие усилия, величина которых зависит от свойств грунта, степени внедрения зонда и его диаметра. Особенно большие усилия необходимы при выдергивании зондов из глин при бурении без обсадки. В подобных случаях следует уменьшать величину рейса и в период отрыва зонда периодически включать вибропогружатель на 3—5 сек с одновременной натяжкой инструмента через лебедку виброустановки.

4.117. При сильном прихвате зонда на забое скважины для его извлечения допускается включение вибратора на короткое время (не более 1—2 мин).

4.118. Неустойчивые породы при вибробурении закрепляют обсадными трубами. Для погружения обсадных труб используют вибропогружатели с центральным проходным отверстием. В этом случае погружение труб может осуществляться одновременно с бурением. Кроме того, для обсадки используются вибропогружатели, с помощью которых производится вибробурение.

Для установления границ литологических разностей грунта при проходке неустойчивых пород, особенно плывунов, необходимо, чтобы обсадная колонна несколько опережала забой скважины.

4.119. Для проходки значительных толщ водоносных песков с тонкими прослойками глин и суглинков может быть применен способ, разработанный в Украинском отделении Гидропроекта. В этом случае колонна обсадных труб, оборудованная в нижней части башмаком с клапанами, при помощи вибратора (ВГ-6) погружается на полную глубину скважины. Внутри каждой обсадной трубы размещается разъемная тонкостенная металлическая гильза. После проходки скважины трубы вместе с керном поднимают на поверхность, развинчивают и из

них извлекают гильзы с керном, по которому устанавливают строение геологического разреза.

Указанный метод позволяет изучать геологическое строение песчаного разреза глубиной 15 м и более.

ПРОХОДКА СКВАЖИН В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

4.120. Проходку мерзлых грунтов осуществляют в основном колонковым способом («всухую», с промывкой или с продувкой).

4.121. Сезонномерзлые грунты бурят, как правило, теми же способами, которые используются для проходки остальных интервалов скважины.

4.122. Проходку нескальных мерзлых грунтов до глубины 10 м ведут вращательным способом, используя при этом специальный бур для отбора керна (см. рис. 4). Погружение бура производят при 250—300 об/мин.

4.123. Проходку нескольких мерзлых грунтов на глубину до 30 м осуществляют колонковым способом «всухую».

В качестве бурового снаряда применяют колонковые трубы длиной 1,5 м и диаметрами 89, 108, 127, 146 и 168 мм с ребристыми коронками типа КР.

При бурении колонковым способом на глубину до 10 м длину рейса устанавливают в пределах 0,3—0,6 м; величину осевой нагрузки на забой—300—400 кг; скорость вращения инструмента—60—140 об/мин.

При бурении скважин на глубину до 25—30 м давление на забой повышают, длину рейса увеличивают до 1 м.

4.124. Проходку более глубоких скважин (до 100 м и более) в мерзлых грунтах производят колонковым способом с промывкой или продувкой.

При проходке мерзлых грунтов, представленных твердыми и крепкими разностями (например, песчаниками, известняками, плотными глинистыми сланцами и др.), для промывки применяют воду любой положительной температуры (если при этом не ставится задача изучения мерзлого состояния пород).

4.125. При бурении осадочных грунтов (мерзлые пески, глины и пр.) без включений «сухой мерзлоты» или пород, содержащих влагу в жидкой фазе, в качестве промывочной жидкости применяют воду, имеющую достаточно низкую температуру при входе в скважину. Предохранение воды от замерзания может быть обеспе-

чено добавлением определенного количества поваренной соли (табл. 21).

Таблица 21

Содержание соли в %	Количество сухой соли в кг на 1 м ³ воды	Объемный (удельный) вес раствора при 15° С в кг/л	Температура замерзания раствора в град
0,1	1	1	0
1,5	15,2	1,01	— 0,9
2,9	29,9	1,02	— 1,8
4,5	45	1,03	— 2,6
5,6	59	1,04	— 3,5
7	75	1,05	— 4,4
8,3	90	1,06	— 5,4
9,6	106	1,07	— 6,4
11	124	1,08	— 7,5
12,3	141	1,09	— 8,5
13,6	157	1,1	— 9,6
14,9	175	1,11	— 11

4.126. При бурении скважин в осадочных мерзлых грунтах, представляющих чередование сплошной мерзлоты с грунтами, содержащими влагу в жидкой фазе, для промывки применяют только глинистый раствор. Рекомендуемые параметры глинистого раствора представлены в табл. 22.

Таблица 22

Виды мерзлых грунтов	Вязкость в сэк	Водоотдача в см ³ за 30 мин	Толщина корки в мм	Сопротивление сдвига в кг/см ²	Суточный отстой в %	Содержание песка в %	Удельный вес в г/см ³
Пылевато-илистые пески с прослойками или линзами льда	40	≤ 20	3—4	30	≤ 4	≤ 5	1,3
Пески с галькой	40	≤ 20	3—4	30	≤ 4	≤ 4	1,3
Скопление мерзлой гальки	50	≤ 20	3—4	40	≤ 4	≤ 4	1,4
Сухая мерзлота	40	≤ 10	2—3	30	≤ 3	≤ 5	1,3
Пески с влагой в жидкой фазе	50	≤ 10	2—3	40	≤ 3	≤ 4	1,4
Мерзлые крупнозернистые пески, глины, слабые песчаники, известняки	20	≤ 20	2—3	30	≤ 3	≤ 4	1,2

4.127. Температура промывочной жидкости, входящей в скважину, должна быть отрицательной (от 0 до $-2,5^{\circ}\text{C}$) и, по возможности, близкой к температуре мерзлых стенок скважины.

Для скважин, проходимых в пойме больших рек, где температура мерзлых грунтов обычно не опускается ниже -2°C , достаточно поддерживать температуру промывочной жидкости в пределах от 0 до -1°C .

Для скважин с температурой мерзлых грунтов до -5°C температура промывочной жидкости должна находиться от -2 до $-2,5^{\circ}\text{C}$.

Понижение температуры промывочной жидкости летом в полевых условиях может быть произведено в специальных шурфах, пройденных в мерзлых грунтах. Шурфы следует защищать от воздействия наружной температуры плотными крышками и слоем мха или торфа. Необходимо учитывать, что температура промывочной жидкости в шурфе будет на $1-1,5^{\circ}\text{C}$ выше температуры мерзлых грунтов.

4.128. Минимальный диаметр бурения при проходке мерзлых грунтов 91 мм.

4.129. Для бурения с промывкой тонкозернистых и глинистых переувлажненных грунтов (с высокой льдистостью), а также сплошного льда применяют твердосплавные коронки типов КР-1, КР-2 и МР-2НП. Осевую нагрузку следует поддерживать в пределах 360—480 кг (из расчета давления 30—40 кг на один резец коронки), при скорости вращения 150—350 об/мин и расходе промывочной жидкости 100—180 л/мин (из расчета 10—12 л/мин на 1 см диаметра коронки).

4.130. Для бурения средне- и крупнозернистых мерзлых грунтов с умеренной льдистостью используют коронки типов МР-2НП и МР6-16. Осевую нагрузку поддерживают в пределах 480—840 кг (40—70 кг на один резец коронки) при скорости вращения коронки 200—300 об/мин и расходе промывочной жидкости 140—220 л/мин (13—15 л/мин на 1 см диаметра коронки).

4.131. При бурении плотных мерзлых грунтов с разной зернистостью и льдистостью применяют коронки МР-6-1 и БК-8М (осевая нагрузка 150—160 кг на штабик — один комбинированный резец). Параметры режима бурения соответствуют изложенным в п. 4.130.

4.132. Скопления мерзлой гальки, гравия, щебня проходят долотами различных типов, в крайнем случае

коронками типа КР, армированными восьмигранными резцами. Параметры режима бурения устанавливаются на месте работ с учетом конкретных условий.

4.133. Рекомендации по проходке мерзлых грунтов с продувкой воздухом изложены в разделе «Бурение с продувкой сжатым воздухом».

5. ОТБОР ОБРАЗЦОВ ГРУНТА ИЗ БУРОВЫХ СКВАЖИН

5.1. Отбор образцов грунта из буровых скважин производят в соответствии с требованиями ГОСТ 12071—66*. «Грунты. Отбор, упаковка, хранение и транспортирование образцов».

ОТБОР ОБРАЗЦОВ ГРУНТА С НАРУШЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

5.2. Для отбора образцов грунта с нарушенной структурой используют те же буровые наконечники, которые обычно применяются при бурении скважин (коронки с колонковыми трубами, желонки, забивные стаканы, виброронды и т. д.).

При колонковом, ударно-канатном, вибрационном и ручном ударно-вращательном бурении образцы грунта отбирают из керна или разрыхленной породы, поднятой к устью скважины после проходки определенного интервала.

5.3. При шнековом бурении скважины грунт транспортируется по винтовой спирали шнеков в виде комков и лент различных форм или угловатых частиц породы. Образцы отбирают как непосредственно около устья скважины в процессе бурения, так и с лопастей шнеков, поднятых на поверхность.

В связи с тем что на транспортировку грунта по шнекам требуется определенное время, применяют специальные пересчетные коэффициенты для определения истинной глубины отбора образцов. Методика определения глубины отбора образцов зависит в основном от способа бурения скважин.

* В ГОСТ 12071—66 внесена поправка (см. «Бюллетень строительной техники», № 7, 1967).

ОТБОР ОБРАЗЦОВ ГРУНТА С НЕНАРУШЕННОЙ СТРУКТУРОЙ (МОНОЛИТОВ)

5.4. Отбор монолитов из буровых скважин производят грунтоносами. Конструкция грунтоносов должна удовлетворять следующим основным требованиям: обеспечивать минимальное нарушение структуры и естественной влажности грунта в монолите; предохранять монолит от выпадения при подъеме из скважин; предотвращать вытекание воды из монолита, обеспечивать высокую производительность работ и простоту использования.

Все существующие грунтоносы подразделяются:

а) по способу погружения — задавливающие, забивные, вибрационные, обуривающие и вращательные;

б) по способу удержания монолита в грунтоносе — грунтоносы без запорных устройств и грунтоносы с запорными устройствами;

в) по наличию керноприемных гильз — грунтоносы без керноприемных гильз и грунтоносы с керноприемными гильзами;

г) по способу предохранения монолита от продольных деформаций — грунтоносы без предохраняющих устройств и поршневые грунтоносы.

Помимо перечисленных имеется большая группа грунтоносов специальной конструкции (для отбора монолитов из открытых горных выработок, со дна водоемов, из стенок скважины и т. д.).

5.5. Способ погружения, конструкцию грунтоноса и оптимальные параметры режима бурения грунтоносом выбирают в зависимости от физико-механических свойств грунтов и от типа применяемых буровых установок.

5.6. При задавливающем способе грунтонос погружается в грунт под действием вертикальной статической нагрузки. Различают две разновидности задавливающего способа — быстрое и медленное погружение грунтоноса. При быстром задавливании скорость погружения грунтоноса составляет не менее 2 м/мин.

Быстрое задавливание грунтоноса рекомендуется при отборе монолитов из связных грунтов полутвердой и тугопластичной консистенции. Медленное задавливание грунтоноса применяют при отборе монолитов из рыхлых, пластичных и водонасыщенных песчано-глинистых и торфянистых грунтов.

5.7. При забивном способе грунтонос погружается в грунт под действием ударов, наносимых либо по самому грунтоносу, либо через посредство бурильных труб. Удары наносятся кувалдой, тяжелой ударной штангой, ударным патроном и т. д. Грунтонос может погружаться также и за один удар (одноударное погружение). Буровой снаряд в этом случае должен состоять из грунтоноса и тяжелой ударной штанги. Указанный снаряд сбрасывается на забой с определенной высоты.

5.8. Вибрационное погружение производится за счет передачи грунтоносу высокочастотных динамических импульсов. Под действием веса инструмента и вследствие снижения сил бокового трения о грунт при вибрации грунтоноса создаются благоприятные условия для легкого и быстрого погружения пробоотборника.

5.9. При вращательном способе погружение грунтоноса происходит в результате передачи ему вращательного и поступательного движения от бурового станка. При этом керноприемная гильза грунтоноса вращается вместе с корпусом и коронкой.

Вращательный способ погружения грунтоноса рекомендуется при отборе монолитов из скальных пород, не разрушающихся от воздействия промывочной жидкости и от вибрации бурового снаряда.

5.10. При обуривающем способе коронка грунтоноса выбурирует столбик монолита, который поступает в невращающийся стакан грунтоноса. Этот способ используют при отборе монолитов из скальных, плотных песчаных и твердых связных грунтов, а также из плотных торфянистых грунтов с корнями растений.

5.11. При задавливающем, забивном и вибрационном способах погружения применяют тонкостенные грунтоносы с заостренным краем башмака. Угол заточки башмака должен находиться в пределах 5—30°.

5.12. Для отбора монолитов из нетрещиноватых и слаботрещиноватых скальных грунтов применяют одинарный колонковый снаряд.

Для отбора монолитов из сильнотрещиноватых скальных грунтов используют двойные и эжекторные колонковые снаряды.

Рекомендуемые способы и режимы бурения при отборе монолитов в таких грунтах изложены в 4-м разделе.

5.13. Отбор монолитов из глинистых грунтов твердой консистенции осуществляется двойными колонковыми

снарядами с невращающейся внутренней трубой или вращающимися грунтоносами конструкции ВСЕГИН-ГЕО, НИИОСП, Томгипротранса (рис. 9).

5.14. Для отбора монолитов из глинистых грунтов тугопластичной консистенции применяют двойные колонковые снаряды ДТА-2 системы С. А. Алексеенко, «Штамп-91м» и обуривающий грунтонос ВСЕГИНГЕО.

Режим бурения скважин грунтоносом следующий:

число оборотов не должно превышать 60—70 об/мин, давление на забой скважины 50—100 кг, расход промывочной жидкости 80—100 л/мин. Глинистый раствор должен иметь следующие параметры: водоотдача 4—5 см³ за 30 мин, вязкость 30—35 сек, удельный вес не менее 1,20 г/см³, содержание песка не более 4%.

Режим бурения двойными колонковыми снарядами приведен в пп. 4.56, 4.57.

5.15. Отбор монолитов из глинистых грунтов полутвердой и тугопластичной консистенции, плотных цементированных песков и лёссовидных грунтов производят обуривающим грунтоносом Томгипротранса.

Бурение ведется «всухую». Режим бурения устанавливают следующий: число оборотов от 20 до 60 в мин (нижний предел при ручном бурении), давление на забой 20—50 кг. При отборе монолитов мерзлых глинистых грунтов давление на забой должно составлять 50—70 кг, скорость вращения грунтоноса 60 об/мин.

5.16. Для отбора монолитов из тугопластичных, пластичных, неуплотненных просадочных, скрытотекучих и илистых грунтов применяют задавливающие грунтоносы. В табл. 23 приведе-

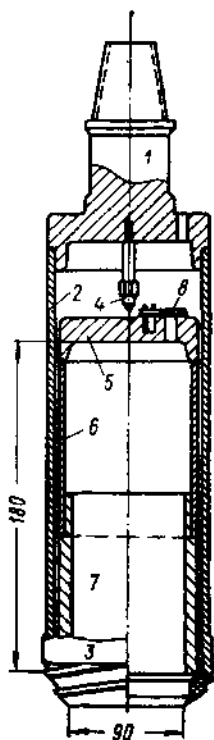


Рис. 9. Грунтонос конструкции Томгипротранса

1 — переходник; 2 — корпус;
3 — коронка; 4 — игла; 5 — головка стакана;
6 — стакан;
7 — подстаканник; 8 — тарельчатый клапан

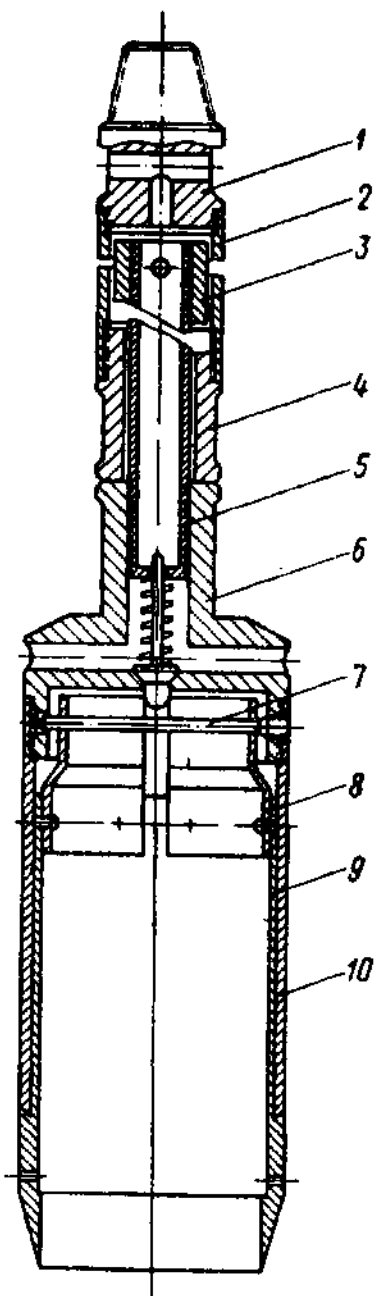


Рис. 10. Забивной грунтонос

1 — переходник; 2 — корпус ударника; 3 — муфта; 4 — ударник; 5 — направляющая штанга; 6 — головка грунтоноса; 7 — стопорный винт; 8 — полузамок; 9 — полу-гильза; 10 — корпус грунтоноса

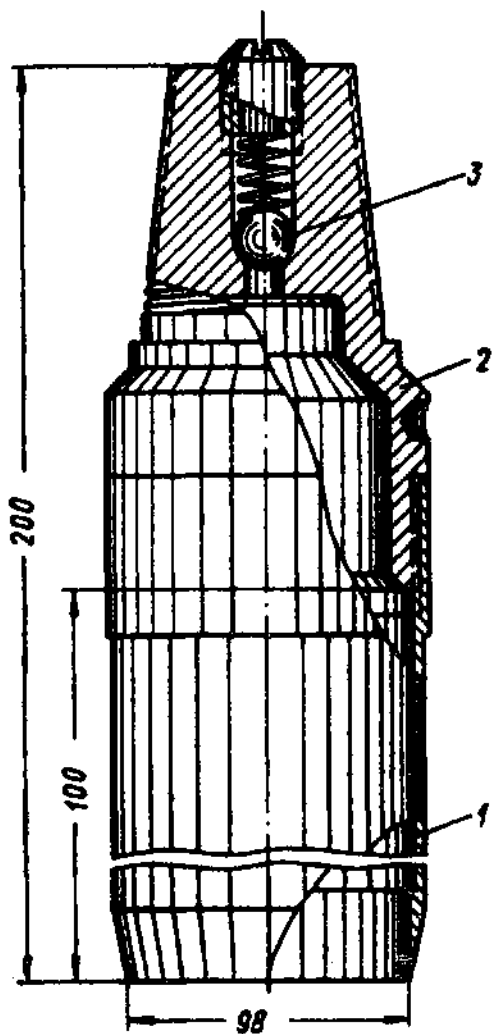


Рис. 11. Грунтонос Д-1 конструкции Днепрогипротранса

1 — корпус; 2 — переходник; 3 — шариковый клапан

ны основные размеры рациональных конструкций грунтоносов.

5.17. Монолиты из тугопластичных, мягкопластичных, неуплотненных просадочных и рыхлых песчаных грунтов отбирают с помощью грунтоносов Гидропроекта ГК-3 и Днепрогипротранса Д-1 (рис. 10, 11).

5.18. Монолиты из мягкопластичных, текучепластичных и илистых грунтов отбирают задавливающим грунтоносом конструкции ЛенГРИИ (рис. 12).

5.19. Для отбора монолитов из органогенных грунтов применяют обуривающий грунтонос конструкции ЦНИИСа.

5.20. В слабосвязных грунтах отбор монолитов производят только грунтоносами с запорными устройствами (лепесткового, пружинного, ножевого, проволочного или диафрагмового типа). В зависимости от конструкции, запорные устройства могут обеспечивать пере-

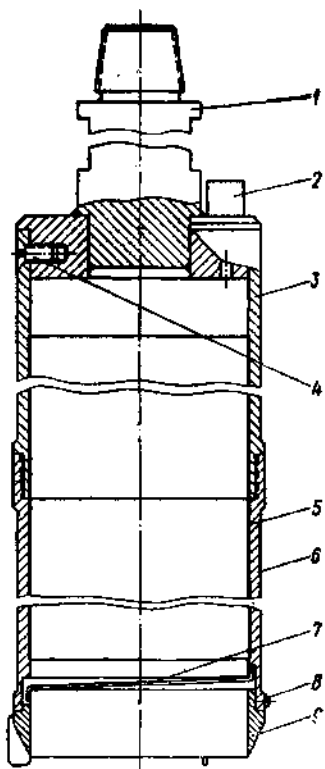


Рис. 12. Задавливаемый грунтонос

1 — переходник; 2 — воздушный клапан; 3 — верхний стакан; 4 — винт; 5 — керноприемная гильза; 6 — нижний стакан; 7 — подрезающие дуги; 8 — винт; 9 — башмак грунтоноса

крытие входного отверстия грунтоноса либо полностью, либо частично.

5.21. С целью предохранения монолита от деформаций в процессе его извлечения из грунтоноса и транспортировки в лабораторию грунтоносы следует оборудовать специальной внутренней тонкостенной кернопри-

емной гильзой, изготовленной из белой жести, пропитанного парафином картона и др.

Таблица 23

Грунты	Угол заточки башмака в град	Высота су-женной части башмака в мм	Сужение башмака в %	Общая тол-щина стенки грунтоноса в мм	Длина ста-кана в мм	Длина гиль-зы в мм	Основной способ удерживания монолита породы в грунтоносе
Тугопла-стичные, мягкопла-стичные и неуплот-ненные про-садочные	5—6	25	1,5	6	500—600	300—400	Трение породы о внутренние стенки башмака и стакана
Текучепла-стичные и илистые	7	20	0,5	8	600—700	300—400	В нижней части грунтоноса — запорное уст-ройство; в верх-ней части — клапан, пор-шень

6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ БУРОВЫХ РАБОТ

6.1. В зависимости от объема выполняемых работ, степени разбросанности объектов изысканий и сложившихся форм деятельности организаций рекомендуются три основные схемы функционирования буровых служб:

1) буровые службы, входящие в состав инженерно-геологических партий или экспедиций, которые выполняют комплексные инженерные изыскания (ПНИИИС, ЦТИСИЗ и проектно-изыскательские институты);

2) специализированные буровые службы (партии, цехи, отделы), обслуживающие инженерно-геологические партии, либо отделы по их заданиям (Мосгоргеотрест и др.);

3) смешанная схема.

Вторая схема более целесообразна при больших объемах работ, а также при наличии в полевом подразделении ремонтно-механических мастерских. Эта схема

обеспечивает лучшее обслуживание буровой техники, благодаря чему достигается более высокий коэффициент использования оборудования.

6.2. При обслуживании объектов с небольшим объемом буровых работ и территориально удаленных друг от друга следует ориентироваться на использование самоходных, обладающих высокой проходимостью и достаточной скоростью передвижения буровых станков (однако это не исключает использование легких перевозимых и переносных станков). В этих случаях может быть использована так называемая «радиальная» схема организации буровых работ, при которой буровые бригады базируются на стационарные производственные подразделения (базы).

6.3. Постоянная или временная база организуется в наиболее удобном месте района производства работ (как правило, в населенном пункте). На базе располагаются склады, размещается ремонтная мастерская, хранятся станки в нерабочее время и т. д. В начале смены буровые бригады выезжают на место производства работ и по окончании — вновь возвращаются на базу.

6.4. При проходке неглубоких и средней глубины скважин в нескальных грунтах буровые работы, как правило, ведутся в одну смену. При проходке скважин средней глубины и глубоких в скальных грунтах работу следует вести, в основном, в три смены (особенно при использовании стационарных буровых станков); допускается также односменная и двухсменная работа бригад. Следует учитывать, что при увеличении числа смен в сутки резко возрастает коэффициент использования оборудования.

6.5. Основным условием эффективного проведения буровых работ является четкое функционирование подсобных и вспомогательных служб. Только при хорошо организованном энергоснабжении, глинохозяйстве, транспорте, материально-техническом обеспечении и ремонтном обслуживании можно успешно проводить буровые работы.

6.6. При значительных объемах работ, сосредоточенных на небольшой площади, энергоснабжение изыскательских партий и экспедиций, как правило, осуществляется в централизованном порядке (от центральных энергосистем либо от стационарных и передвижных электростанций). Однако во многих случаях целесообразно

применять буровые станки и установки, имеющие свои источники энергопитания.

6.7. Глинистый раствор в качестве промывочной жидкости на изысканиях используется сравнительно редко, поэтому готовят его в случае необходимости непосредственно на буровых скважинах.

6.8. Транспортное обслуживание буровых работ прежде всего должно быть основано на использовании автомашин высокой проходимости и тракторов. Частично проблема транспорта может быть решена путем приобретения самоходных буровых установок, смонтированных на автомашинах и тракторах. В ряде случаев рекомендуется прокат транспортных средств.

6.9. Материально-техническое обеспечение буровых работ состоит в бесперебойном снабжении буровых бригад инструментом, горюче-смазочными материалами, запасными частями и различным другим оборудованием и материалами. Особое внимание уделяют созданию достаточного резерва запасных частей.

6.10. Особое место на буровых работах занимает организация ремонтных служб. Каждое крупное и среднее изыскательское подразделение должно иметь свою ремонтно-механическую мастерскую. Более мелкие подразделения (в случае отсутствия собственной мастерской) устанавливают сотрудничество с ближайшим заводом или мастерской.

В ряде случаев на участках с большим объемом работ целесообразно организовывать временные базы с применением передвижных авторемонтных мастерских (ПАРМ).

6.11. Ответственность за работоспособность и готовность всего бурового оборудования в изыскательской организации несет служба главного механика.

6.12. В организации буровых работ важное место занимает разработка мероприятий по повышению коэффициента использования станочного парка. Объемы работ в отдельно взятой изыскательской партии или экспедиции, как правило, бывают невелики. Поэтому при относительно одинаковых глубинах и диаметрах скважин целесообразно применять буровые станки одного типа. В этом случае существенно облегчаются эксплуатация, ремонт и обслуживание станков, улучшаются условия обеспечения их запасными частями, обучения буровых бригад и т. д. При использовании однотипного

станочного оборудования снижается аварийность, повышается производительность труда и уменьшается стоимость буровых работ.

Повышение коэффициента использования бурового оборудования может быть достигнуто и за счет применения этого оборудования для проведения различных опытных работ.

Так, в некоторых организациях рациональным оказалось использование буровых агрегатов УГБ-50А, УРБ-2А, СБУД-150-ЗИВ и др. для механизированной проходки шурфов (ПНИИС, ХарьковГИИНТИЗ, КуйбышевТИСИЗ, Теплоэлектропроект и др.), для проведения статического зондирования (ПНИИС, ЦТИСИЗ и др.), испытаний штампами в скважинах, испытаний на срез (ПНИИС) и т. д.

6.13. Эффективным средством борьбы с непроизводительными простоями буровых станков и другого оборудования, а также транспортных средств может явиться организация прокатных баз. Первоначально прокатные базы целесообразно создавать в порядке эксперимента в крупных изыскательских организациях (трестах, территориальных и республиканских институтах и т. д.).

6.14. В организации буровых работ большое внимание необходимо уделять вопросам техники безопасности, диспетчеризации и радиотелефонной связи, культурно-бытовому обслуживанию, наглядной агитации и т. д.

6.15. При проведении буровых работ целесообразно организовать учет работы бурового оборудования. Организация учета должна быть поставлена в соответствии со спецификой различных видов изысканий.

Указанный учет должен давать возможность определять следующие эксплуатационные показатели работы станков:

- выработка на станок в год;
- сменная производительность;
- средняя механическая скорость проходки;
- средний баланс рабочего времени в смену;
- коэффициент использования бурового оборудования;
- уровень механизации буровых работ.

На основании этих показателей можно судить об эффективности производства буровых работ на изысканиях в отдельно взятой организации.

7. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОГО ВЕДЕНИЯ БУРОВЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

7.1. Буровые работы должны производиться в соответствии с требованиями и правилами техники безопасности Госгортехнадзора СССР, главы СНиП III-A.II-62 «Техника безопасности в строительстве», а также в соответствии с рекомендациями настоящего раздела.

7.2. К техническому руководству буровыми работами допускаются лица, имеющие законченное горнотехническое образование или право ответственного ведения этих работ.

7.3. Управление буровыми станками, обслуживание двигателей и другого оборудования должно производиться лицами, имеющими на это право, подтвержденное соответствующим документом.

Передавать управление и обслуживание механизмов и оборудования лицам, не имеющим на то право, а также оставлять работающие механизмы, требующие присутствия людей, без присмотра запрещается.

7.4. Все буровые рабочие допускаются к работе только после прохождения ими производственного инструктажа по технике безопасности буровых работ.

При внедрении новых технологических процессов и методов труда, при применении новых видов оборудования, инструментов и механизмов, а также при введении новых правил и инструкций по технике безопасности рабочие должны пройти дополнительный инструктаж по технике безопасности.

7.5. Перед началом работы буровой мастер должен проверить исправность оборудования и инструмента, состояние рабочей площадки, исправность защитных и вспомогательных приспособлений и устройств. Категорически запрещается использование неисправного оборудования и инструмента.

7.6. Производство работ на открытом воздухе в зимнее время при температуре -30°C не разрешается. При температуре от -20 до -25°C рабочим должна быть предоставлена возможность для обогрева в течение 10 мин после каждых 50 мин работы. Кроме того, при

температуре от -25 до -30°C следует сокращать рабочий день на 1 ч.

7.7. Самоходные и передвижные буровые установки обеспечиваются противопожарным инвентарем (два огнетушителя, ведро, штыковая лопата, кошма). Все работники должны знать правила по тушению пожаров и уметь пользоваться противопожарным инвентарем.

7.8. При передвижении самоходных буровых установок рабочие могут находиться в кабине водителя и на специальном сиденье платформы установки.

На крутых подъемах и спусках (свыше 15°) рабочим запрещается находиться на буровой установке.

7.9. Запрещается:

а) передвигать самоходную буровую установку с поднятой мачтой, опущенной на опоры, но не закрепленной хомутами;

б) перевозить на платформе установки грузы, не входящие в комплект установки;

в) производить какие-либо работы под линией электрпередач, а также в пределах охранной зоны.

Таблица 24

Размеры охранной зоны

Напряжение сети в кВ	Расстояние от проекции крайнего провода до границы зоны в м
1—20	10
85	15
110	20
220	25
400	30

г) проезжать под высоковольтными электролиниями, если между проводами и самой верхней точкой установки расстояние менее 2 м. При проезде под линией все, кроме водителя, должны оставить установку.

7.10. Перед подъемом мачты буровой установки необходимо проверить ее состояние. Выявленные недостатки должны быть устранены до подъема мачты.

7.11. Мачты буровых установок должны подниматься и опускаться с помощью исправных подъемных механизмов, предусмотренных конструкцией установки.

Подъем и спуск должны производиться плавно и на малых скоростях.

7.12. При подъеме и опускании мачты буровой установки запрещается:

а) находиться около ротора или шпинделя бурового станка, на площадке и в кабине автомобиля, трактора (кроме лица, управляющего подъемом и опусканием мачты);

б) находиться на поднимаемой мачте или под ней;

в) оставлять приподнятую мачту на весу, удерживать ее вручную или при помощи подпорок.

7.13. Ремонт кронблока и талевого оснастки мачты, не имеющей специальной кронблочной площадки, разрешается производить только при горизонтально расположенной мачте.

7.14. При эксплуатации самоходных и передвижных буровых установок мачта в рабочем положении должна быть закреплена соответствующими запорами и поддомкрачена. Во избежание смещения буровой установки в процессе работы ее колеса, гусеницы, полозья должны быть прочно закреплены.

7.15. При расположении буровой установки вблизи отвесных склонов (уступов) расстояние от нее до кромки склона должно быть не менее 3 м.

7.16. Во время работы на буровых станках запрещается:

а) переключать скорости лебедки и вращателя, а также с лебедки на вращатель и обратно до полной остановки вращения валов;

б) заклинивать рукоятки управления станком.

7.17. Во время спуско-подъемных операций запрещается:

а) работать на лебедке с неисправными тормозами;

б) опускать снаряд или обсадные трубы с недовернутыми резьбовыми соединениями;

в) проверять или чистить резьбовые соединения голыми руками.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ КОЛОНКОВОМ БУРЕНИИ

7.18. При производстве работ на колонковом бурении запрещается:

а) касаться движущихся деталей буровых установок или инструмента до полной их остановки;

б) поднимать бурильные, колонковые, обсадные трубы из горизонтального положения в вертикальное со скоростью, превышающей вторую скорость лебедки на прямом канате.

7.19. Подкладная вилка должна иметь скобу для держания и загнутый кверху конец рукоятки.

7.20. При извлечении керна из колонковой трубы запрещается:

а) поддерживать руками снизу колонковую трубу, находящуюся в подвешенном состоянии;

б) проверять рукой положение керна в подвешенной колонковой трубе.

7.21. При бурении скважин станками с рычажной и дифференциальной подачами запрещается:

а) работать рычагами с неисправными стопорными устройствами;

б) находиться вблизи станка в плоскости движения рычага;

в) наращивать рычаг подачи патрубками;

г) оставлять рычаг подачи включенным в тех случаях, когда это не требуется по условиям работы;

д) поднимать бурильные трубы через шпиндель при неотключенном рычаге;

е) работать на станке при отсутствии на вращателе ограничительной дуги кругового вращения рычага.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ШНЕКОВОМ БУРЕНИИ

7.22. При производстве шнекового бурения запрещается:

а) удерживать вращатель на весу с помощью подъемной лебедки;

б) находиться под поднятым вращателем;

в) бурить шнеками, имеющими трещины и надрывы на трубе или на спирали шнека;

г) применять шнеки с изношенными соединительными элементами (хвостовиками, пальцами), не обеспечивающими достаточной жесткости колонны;

д) соединять шнеки штырями и другими предметами, не предназначенными для этого;

е) очищать шнеки от шлама во время их вращения;

ж) соединять и разъединять шнеки на весу;

з) включать вращатель со шнеком, не касающимся грунта.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ БУРЕНИИ

7.23. Прочность соединений частей вибратора должна проверяться перед его пуском и через каждые полчаса работы.

7.24. Запрещается пользоваться вибраторами, имеющими в корпусах и деталях хотя бы самые незначительные трещины.

7.25. Электродвигатель вибратора необходимо включать отдельным рубильником.

7.26. При забурировании запрещается направлять и удерживать снаряд руками.

7.27. Обслуживающему персоналу запрещается:

а) перевозить агрегат со скважины на скважину с поднятой мачтой;

б) производить бурение или какие-либо работы на агрегате в дождь;

в) мыть агрегат брандспойтом;

г) работать при пониженном либо повышенном напряжении электросети, а также при большой силе тока (20—40 а);

д) бурить скважины вибратором со снятым замыкателем тормоза лебедки.

7.28. Во время работы вибропогрузателя обслуживающий персонал должен находиться от него не ближе 2 м (за исключением сменного мастера, находящегося у пульта управления агрегата).

7.29. Обслуживающему персоналу запрещается:

а) находиться в плоскости вращения дебалансов (эксцентриков) вибратора;

б) находиться под вибратором как во время работы, так и после его выключения.

7.30. При спуско-подъемных операциях надсвание фарштуля на вибратор, соединение фарштуля с бурильными трубами производятся только при неподвижном вибраторе, причем тормоз лебедки, на канате которой подвешен вибратор, должен быть надежно зафиксирован.

7.31. Запрещается работа вибратора при отсоединенном талевом блоке или быстростъемном соединении.

7.32. Максимальное время непрерывной работы вибратора не должно превышать 15 мин.

7.33. Запрещается работа вибратора при неисправных вольтметре и амперметре.

7.34. При появлении каких-либо посторонних шумов и стуков, отличных от тех, которые издают трансмиссия и ритмично работающий вибратор, необходимо отключить вибратор и трансмиссию и установить причину возникновения этих шумов.

7.35. При появлении запаха горелой резины следует немедленно отключить вибратор и генератор и установить причину его появления.

7.36. Необходимо заменить тросовую петлю подвески вибратора, если на 10 см ее длины имеется более двух оборванных проволок.

7.37. При спусках и подъемах мачты категорически запрещается обслуживающему персоналу находиться на платформе агрегата.

7.38. В дождь агрегат следует укрывать брезентом.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УДАРНО-КАНАТНОМ БУРЕНИИ

7.39. При производстве работ на ударно-канатном бурении запрещается:

а) направлять руками буровой снаряд и желонку при спуске их в скважину, а также удерживать от раскачивания и оттащить их в сторону, для этого следует пользоваться специальными крюками или канатом;

б) оставлять открытым устье скважины, когда этого не требуют условия работы;

в) оставлять буровой снаряд и колонку в подвешенном состоянии.

ТРЕБОВАНИЯ К КАНАТАМ

7.40. Талевый канат для спуско-подъемных операций должен иметь запас прочности не менее 2,5 по отношению к максимально возможной нагрузке.

7.41. Все работающие канаты должны осматриваться:

а) буровым мастером — перед началом каждой смены и после работы на предельных нагрузках;

б) начальником партии не реже двух раз в месяц.

7.42. Канат считается непригодным к работе, если:

а) число оборванных проволок на длине шага свивки каната превышает 5%;

б) износ каната по диаметру составляет более 10%;

в) оборвана полностью одна прядь.

Технические данные по буровым станкам и установкам, геологических

Название станка и его шифр	База станка	Способы бурения	Глубина бурения в м	Диаметр бурения в мм	Скорость вращения бурового инструмента в об/мин
Станок-мотобур Д-10	—	Вращательный (шнеками и буровыми долотами)	10	75	180—320
Переносная буровая установка ПБУ-10	—	Вращательный (шнеками и коронками)	10 2	100, 300	80—200
Мотобур М-1	—	То же	10 1,5	75 100	255 и 615
Портативный вращательный буровой станок ПВБСМ-15	Одноосная колесная тележка	.	15	70	70—80, 300—350, 700—750
Установка поискового бурения УПВ-25	То же	Вращательный (шнековый, колонковый)	15 25	62— 102, 36	252, 840
Буровая пенетрационная установка УВП-15М	Одноосный прицеп	Ударно-канатный	15	108— 168	—
Буровой передвижной ударно-канатный станок БУКС-ЛГТ	То же	То же	30	89— 168	—
Буровой ударно-механический станок Д-5-25	.	.	25	89— 146	—
Универсальная самоходная буровая установка БУЛИЗ-15	Автомашинка ГАЗ-69	Вращательный (шнековый и колонковый); ударно-канатный; вибрационный	15	116, 131, 168, 91	32—165

рекомендуемым к использованию при инженерно-изысканиях

Привод станка	Вес станка в кг	Сведения о выпуске	Ориентировочная стоимость в руб.	Примечание
Двигатель «Дружба-4» мощностью 4 л. с.	19	Выпускается серийно Свердловским машиностроительным заводом им. Воровского	420	С комплектом инструмента мотобур весит 65 кг
То же	34	—	—	Установка рекомендована для серийного производства
>	—	Серийное изготовление организовано на Оренбургском заводе Министерства геологии РСФСР	—	Мотобур М-1 разработан взамен прообразника МП-1 и мотобура Д-10
>	50	Выпускается небольшими партиями мастеровскими экспериментального полигона ЦНИИ МПС	—	Чертежи бурового станка и его инструмента можно приобрести в ЦБТИ НИИ организации и технической помощи строительству
Двигатель «Дружба-4» мощностью 4 л. с.	90	Выпускается серийно Свердловским машиностроительным заводом им. Воровского	764	Стоимость установки без комплекта бурового инструмента
Двигатель УД-2 мощностью 8 л. с.	1100	Выпускается серийно Угличским ремонтно-механическим заводом Гидропроекта	1400	Установка обеспечивает проведение пенетрации на глубину 15 м
Двигатель Д-300 мощностью 6 л. с.	440	Выпускается серийно Свердловским машиностроительным заводом им. Воровского	800	—
Двигатель ОДВ-300В или УД-2 мощностью 6 или 8 л. с.	370	До 1968 г. станок выпускался серийно Днепротетровским заводом строительных машин	—	В настоящее время серийный выпуск станков прекращен
Привод буровых механизмов осуществляется от ходового двигателя автомашины	2030	Установка серийно выпускается Зуевским механическим заводом МЭиЭ СССР	5500	Установка может быть оборудована навесным автоматическим пенетрометром НАП-10

Название станка и его шифр	База станка	Способы бурения	Глубина бурения в м	Диаметр бурения в мм	Скорость вращения бурового инструмента в об/мин
Агрегат вибрационно-го и ударно-канатного бурения АВБ-11М	Автомашина ГАЗ-66	Вибрационный, ударно-канатный	20 40	108— 168, 108— 219	—
Самоходная буровая установка УРБ-1В	Гусеничный вездеход ГАЗ-47	Вращательный (шнековый)	30	135	58—90, 120—186, 220—342, 370—580
Самоходная буровая установка УГБ-50А (УГБ-50М)	Автомашина ГАЗ-63 (ГАЗ-66)	Вращательный (шнековый и колонковый); ударно-качатый	50 100, 50	135— 230, 92— 198, 135— 230	70, 125, 200
Легкая самоходная буровая установка ЛБУ-50 (ПБУ-50)	Автомашина ЗИЛ-157КЕ	Вращательный; ударно-канатный	50	200— 280	13,8; 42,5; 70,8; 113,2; 285,7
Самоходная буровая установка дизельная СВУДМ-150-ЗИВ	То же	Вращательный (колонковый)	150	76— 150	88, 128, 204, 320, 510
Самоходная буровая установка электрифицированная СБУЭ-150-ЗИВ	.	То же	150	131	95, 180, 360
Агрегат вращательного бурения АВБ-Т (АВБ-ТМ)	Трактор С-100	Вращательный (роторный)	100	76— 140, 248	44, 91, 166, 270
Буровая установка УРБ-2А	Автомашина ЗИЛ-157	Вращательный (роторный и колонковый)	100 200	130— 190 76	106, 210, 320

Привод станка	Вес станка в кг	Сведения о выпуске	Ориентировочная стоимость в руб.	Примечание
Привод осуществляется от двигателя автомобиля	6300	Выпускается серийно Свердловским машиностроительным заводом им. Воровского	12 500	Вес агрегата указан с прицепом
Привод буровых механизмов осуществляется от транспортного двигателя вездехода	4700	Выпускался до 1969 г.	7730	
Дизельный двигатель Д-38М мощностью 40 л. с.	5100	Выпускается серийно Щигровским механическим заводом	9250	На установке предусмотрен привод промывочного насоса
Привод буровых механизмов осуществляется от двигателя автомашины	8710	Выпускается небольшими партиями Щигровским механическим заводом	37 000	Установка обеспечивает проходку шурфов в нескальных грунтах диаметром 1050 мм на глубину 15 м
Дизельный двигатель Д-48 мощностью 48 л. с.	10 200	Выпускается серийно Свердловским машиностроительным заводом им. Воровского	8286	Установка комплектуется промывочным насосом ГР 16/40 производительностью 16 м³/ч, рабочее давление 40 кг/см²
Привод буровых механизмов осуществляется от индивидуальных электродвигателей; питание двигателей осуществляется от синхронного генератора либо от промышленной сети	8500	То же	12 029	Установка комплектуется промывочным насосом ГР 16/40
Привод буровых механизмов осуществляется от ходового двигателя	—	Выпускается серийно Кншлячским машиностроительным заводом (г. Баку)	9200	Агрегат комплектуется промывочным насосом НГ 200/30
Привод буровых механизмов осуществляется от двигателя автомашины	4100	Выпускается серийно Днепропетровским заводом горношахтного оборудования	10 880	Установка комплектуется промывочным насосом П ГР производительностью 300 л/мин, рабочее давление 50 кг/см²

Название станка и его шифр	База станка	Способы бурения	Глубина бурения в м	Диаметр бурения в мм	Скорость вращения бурового инструмента в об/мин
Буровая установка БСК-2М-100	—	Вращательный (колонковый)	100	36—92	300 и 600
Буровой агрегат БУГ-100	—	Ударно-канатный	80	168—377	—
Буровая установка УРБ-ЗАМ	Автомашинна МАЗ-200	Вращательный (роторный и колонковый)	300 500	7 ³ / ₄ "— 5 ³ / ₄ " 76	109,6; 189,6; 313,6
Буровой агрегат ЗИФ-300М	—	Вращательный (колонковый)	300	151—59	102, 182, 237, 480
Ударно-канатный станок УКС-22М	—	Ударно-канатный	300	До 600	—

Привод станка	Вес станка в кг	Сведения о выпуске	Ориентировочная стоимость в руб.	Примечание
Электродвигатель АО2-51-4 мощностью 7,5 квт	480	Выпускается Новочеркасским машиностроительным заводом им. Никольского	—	Установка разбирается на транспортные узлы, максимальный вес которых не превышает 90 кг
Дизельный двигатель Д-7М мощностью 40 л. с.	2500	Агрегаты изготавливает Угличский экспериментальный ремонтно-механический завод Гидропроекта	3000	Агрегат снабжен специальным механизмом для расхаживания, свинчивания и развинчивания обсадных труб
Дизельный двигатель Д-54 мощностью 54 л. с.	3400	Выпускается серийно Кунгурским машиностроительным заводом Пермской области	15 530	—
Дизель Д-38 мощностью 38 л. с. или электродвигатель А-62-4 мощностью 14 квт	1390	—	1760, 2900	—
Электродвигатель типа АО-78-6 мощностью 20 квт	7600	Выпускается серийно Новочеркасским машиностроительным заводом им. Никольского	4160	—

ЛИТЕРАТУРА

Башкатов Д. Н., Васильев А. В. Скоростные методы бурения при инженерно-геологических изысканиях. В сб.: «Скоростные методы инженерно-геологических исследований для целей массового строительства». «Недра», М., 1964.

Волков С. А., Волков А. С. Справочник по разведочному бурению, Госгеолтехиздат, М., 1963.

Вопросы применения современной техники в гидрогеологии и инженерной геологии, Госгеолтехиздат, М., 1963.

Единые правила безопасности при геологоразведочных работах, Углетехиздат, М., 1958.

Елманов И. П. и др. Инструктивные указания по бурению геологоразведочных скважин с очисткой забоя воздухом. ОНТИ, ВИТР, Л., 1960.

Елманов И. П. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом в многолетнемерзлых породах, «Недра», Л., 1965.

Кардыш В. Г., Окмянский А. С. и Никитин Е. В. Методы бурения неглубоких скважин в мягких породах. Труды ЦКБ Госгеолкомитета, 1963, № 6.

Лактионов А. Т. Основы теории и техники бурения скважин с очисткой забоя воздухом и газом. Госгостехиздат, М., 1961.

Лактионов А. Т. Бурение мелких скважин с продувкой воздухом. М., «Недра», М., 1966.

Левин Е. Ф. Опыт бурения скважин с очисткой забоя сжатым воздухом при инженерно-геологических изысканиях. Госстройиздат, М., 1958. (Тр. Гидропроекта. Проектные и научно-исследовательские работы. Сб. 1).

Марамзин А. В., Ермолаев В. М. Бурение структурно-поисковых скважин, «Недра», Л., 1964.

Материалы к совещанию по методике и технике отбора монолитов горных пород при инженерно-геологических исследованиях, ВСЕГИНГЕО, 1966.

Пальянов П. Ф., Штейнберг А. М. Бурение скважин, «Недра», М., 1964.

Ребрик Б. М. Анализ современного состояния буровых работ на инженерных изысканиях. Информационный бюллетень ЦТИСИЗ, № 2, 1965.

Ребрик Б. М. Вибротехника для бурения, «Недра», М., 1966.

Ребрик Б. М. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях, «Недра», М., 1968.

Техника безопасности в строительстве. СНиП III-A.11-62.

Техника и технология разведочного бурения на твердые полезные ископаемые и воду, «Недра», М., 1966.

Шнековое бурение. Под ред. Ю. П. Копытко. Госгеолтехиздат, М., 1960.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1 Задачи и условия проведения буровых работ при инженерно-геологических изысканиях	5
2. Выбор способа бурения	8
Колонковое бурение	9
Шнековое бурение	11
Медленно-вращательное бурение	12
Роторное бурение	12
Ударно-канатное бурение кольцевым забоем	13
Ударно-канатное бурение сплошным забоем	13
Вибрационное бурение	14
3. Выбор бурового оборудования	19
4. Технология бурения	24
Колонковое бурение	24
Бурение породоразрушающим инструментом, армированным твердыми сплавами, с промывкой	24
Бурение дробовым породоразрушающим инструментом с промывкой	25
Бурение алмазным породоразрушающим инструментом с промывкой	29
Бурение с продувкой воздухом	32
Бурение твердосплавным инструментом «всухую»	35
Безнасосное бурение	36
Бурение двойными колонковыми снарядами	38
Мероприятия по повышению выхода керна при колонковом бурении	39
Шнековое бурение	40
Медленно-вращательное бурение	43
Вращательное бурение сплошным забоем (роторное)	43
Ударно-канатное бурение кольцевым забоем	43
Ударно-канатное бурение сплошным забоем	49
Вибрационное бурение	49
Проходка скважин в мерзлых грунтах	55
5. Отбор образцов грунта из буровых скважин	58
Отбор образцов грунта с нарушенной структурой	58
Отбор образцов грунта с ненарушенной структурой (монолитов)	59
6. Рекомендации по организации буровых работ	64
7. Правила безопасного ведения буровых работ при инженерно-геологических изысканиях	68
Общие положения	68
Правила безопасности при колонковом бурении	70
Правила безопасности при шнековом бурении	71
Правила безопасности при вибрационном бурении	72
Правила безопасности при ударно-канатном бурении	73
Требования к канатам	73
Приложение	74
Литература .. .	80

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ

И ЭФФЕКТИВНОМУ
ПРИМЕНЕНИЮ
СПОСОБОВ БУРЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
СКВАЖИН В РАЗЛИЧНЫХ
ПРИРОДНЫХ
И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ



МОСКВА 1974

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Цели и задачи проведения буровых работ при инженерно-геологических изысканиях. Требования, предъявляемые к буровым скважинам	3
2. Условия проведения буровых работ при инженерно-геологических изысканиях и выбор способа бурения	4
3. Способы бурения инженерно-геологических скважин и их рациональное использование	9
Колонковый способ	9
Ударно-канатный кольцевым забоем	13
Вибрационное бурение	16
Медленновращательное бурение	18
Шнековое бурение	19
Комбинированные способы бурения	20
4. Рекомендации по оценке эффективности способов бурения инженерно-геологических скважин	21
Приложение	
Пример опытно-производственной оценки способов бурения инженерно-геологических скважин в геологическо-литологических условиях Верхнего Поволжья	25

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ И ЭФФЕКТИВНОМУ ПРИМЕНЕНИЮ СПОСОБОВ БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Редактор издательства Е. А. Мельникова
Технические редакторы В. Д. Павлова, Т. В. Кузнецова
Корректоры В. Г. Штанге, М. Ф. Казакова

Сдано в набор 24/IV—1974 г.	Подписано к печати 7/VI—1974 г.
T-11807	Формат 84X108 ¹ / ₃₂ д. л.
	Бумага типографская № 2
	1,68 усл. печ. (уч.-изд. 2,59 л.)
Тираж 16.500 экз.	Изд. № XII—4680
	Зак. № 234
	Цена 13 коп.

Стройиздат
103006, Москва, Калужская, 23а
Подольская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, д. 26.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ

И ЭФФЕКТИВНОМУ
ПРИМЕНЕНИЮ
СПОСОБОВ
БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
СКВАЖИН В РАЗЛИЧНЫХ
ПРИРОДНЫХ
И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЯХ



МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1974

Рекомендации по выбору и эффективному применению способов бурения инженерно-геологических скважин в различных природных и геологических условиях. М., Стройиздат, 1974, 34 с. Производств. и научн.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в стр-ве Госстроя СССР.

В Рекомендациях изложены цели и задачи проведения буровых работ при инженерно-геологических изысканиях; требования, предъявляемые к буровым скважинам инженерно-геологического назначения, условия проведения буровых работ и рекомендации по выбору способа бурения. Рассматриваются различные способы, применяемые при инженерно-геологических изысканиях, и эффективность их использования в различных природных и геологических условиях.

Предлагается методика оценки эффективности способов бурения инженерно-геологических скважин и дается пример пользования этой методикой.

Предназначены для работников изыскательских служб, занимающихся вопросами бурения инженерно-геологических скважин.

Рекомендации разработаны Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя СССР (д-р техн. наук Б. М. Ребрик, канд. геолого-минералогических наук С. П. Абрамов, инж. Б. В. Цынский, Л. И. Куник).

© Стройиздат, 1974

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОВЕДЕНИЯ БУРОВЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К БУРОВЫМ СКВАЖИНАМ

1.1. Буровые скважины при инженерно-геологических изысканиях проходят для изучения геолого-литологического разреза, гидрогеологических условий, отбора образцов грунта для определения физико-механических свойств грунтов, проведения различных опытных работ. В зависимости от назначения скважины и этапа изысканий к буровым скважинам предъявляются различные требования в отношении инженерно-геологической информации, степени ее детальности, полноты и точности, диаметра и глубины бурения.

1.2. На начальных этапах изысканий при выполнении инженерно-геологической рекогносцировки инженерно-геологические съемки скважины проходят с целью: установления геологического разреза; выявления условий залегания пород; изучения криогенного строения мерзлых пород и их температурного режима; изучения гидрогеологических условий; отбора образцов пород и воды для полевых и лабораторных исследований; производства опытных инженерно-геологических и гидрогеологических работ, производства стационарных наблюдений, выявления и оконтуривания зон проявления физико-геологических процессов и изучения этих процессов; обоснования интерпретации геофизических, зондировочных и пенетрационно-каротажных работ.

1.3. На последующих этапах изысканий при выполнении крупномасштабной инженерно-геологической съемки и инженерно-геологической разведки бурят разведочные скважины для уточнения геологического разреза в сфере взаимодействия проектируемого сооружения с геологической средой, отбора образцов грунтов и подземных вод для полевых и лабораторных изучений их свойств, проведения опытных полевых работ; производства стационарных наблюдений.

1.4. Глубина бурения разведочных скважин в зависимости от проектируемых объектов колеблется от 10 до 100 м и более, диаметр бурения 108—219 мм. Скважины глубиной до 10 м бурят при изысканиях под жилищное строительство малой этажности, аэродромы, при линейных изысканиях (под автомобильные и железные дороги, линии электропередач, связи, трубопроводы). Скважины глубиной до 30 м бурят при изысканиях под гражданское, несложное промышленное и гидротехническое строительство глубиной до 100 м при изысканиях под крупные промышленные и специальные объекты, где по технологическим условиям требуется заглубление отдельных цехов; для проектирования сложных гидротехнических сооружений (ГЭС, каналов, дамб, водохранилищ).

1.5. Для освещения гидрогеологических условий района сооружений, изучения фильтрационных свойств грунтов проходят гидрогеологические скважины, которые отличаются большим диаметром, что обусловлено необходимостью установки в скважину водоподъемных средств. Диаметр бурения гидрогеологических скважин достигает 355 мм и более, глубина бурения до 100 м и более.

1.6. Для проведения специальных опытных работ (испытания грунтов методом статических нагрузок, вращательного среза), для отбора монолитов грунтов путем вырезания их из скважины, для

визуального осмотра геологического разреза бурят скважины специального назначения. Глубина этих скважин достигает 25—30 м, диаметр — 650 мм и более.

1.7. Одной из основных задач при бурении скважин при инженерно-геологических изысканиях является установление геолого-литологического разреза. Особенно большое значение для составления геологического разреза, соответствующего природному, имеет точность фиксации глубины залегания слоев грунта, устанавливаемая по керну. Согласно требованию СНиП II-Б.1-62* эта величина должна составлять $\pm 0,50$ м, однако в ряде случаев она может быть меньше, что устанавливается проектировщиком.

1.8. Установление геологического разреза, оценка гидрогеологических условий и инженерно-геологических свойств грунтов исследуемого района (участка) производится в большинстве случаев на основании геологической документации, а также результатов изучения состава, состояния и свойств грунтов по образцам, отобраным при бурении из скважин.

Грунт в образце должен быть типичным для определенного инженерно-геологического элемента. В образцах, отобранных для геологической документации, петрографической и гранулометрической состав грунтов, а в отдельных случаях и их влажность должны соответствовать естественным. Извлекаемый на поверхность грунт должен отражать последовательность слоев грунта, их мощность, текстурные и структурные особенности грунта (слоистость, отдельность, тип структуры, наличие включений, гнезд, примазок); плотность и консистенцию грунта, соответствующие естественным.

Отбираемый образец грунта должен иметь объем, достаточный для геологического описания или проведения необходимого комплекса лабораторных определений физико-механических свойств. Объем отбираемых образцов регламентирован ГОСТ 12071—72 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» в зависимости от вида грунта, конкретных задач, этапа изысканий и метода лабораторных испытаний.

1.9. При бурении скважин для инженерно-геологических целей производится отбор образцов грунта нарушенного сложения и монолитов. Основным требованием при отборе образцов грунта нарушенного сложения является сохранение его состава и влажности. В монолитах, кроме того, должно быть сохранено сложение, а также трещиноватость грунта и природное состояние заполнителя трещин.

1.10. Количество образцов грунта нарушенного или ненарушенного сложения, отбираемых из каждого однородного слоя грунта, устанавливается программой работ.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ БУРОВЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ И ВЫБОР СПОСОБА БУРЕНИЯ

2.1. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях осуществляется в различных природных и геологических условиях, оказывающих существенное влияние на выбор способа бурения, технических средств и технологических приемов бурения и на эффективность их использования.

2.2. Выбор способа бурения прежде всего определяется типом проходимых грунтов и характером геологического разреза.

2.3. При инженерно-геологических изысканиях бурение скважин

осуществляется в основном в нескальных грунтах (песчаных, глинистых и крупнообломочных), а также в скальных, полускальных и мерзлых грунтах.

2.4. Песчаные грунты могут быть неустойчивыми в стенках буровых скважин (сухие и водонасыщенные пески), а также слабоустойчивыми в стенках скважин (пески различной влажности).

Бурение песчаных, неустойчивых в стенках скважин грунтов может быть успешно выполнено только при одновременной либо опережающей обсадке скважин трубами. В наибольшей степени этому требованию удовлетворяет ударно-канатное бурение.

Бурение скважин в песчаных грунтах, устойчивых в стенках буровых скважин, может быть выполнено шнековым, вибрационным, ударно-канатным кольцевым забоем, колонковым и медленновращательными способами бурения. Использование того или иного способа бурения в этом случае должно определяться целями и задачами бурения, а также производительностью способа.

2.5. Глинистые грунты могут быть слабоустойчивыми в стенках буровых скважин (увлажненные супеси, пластичные слабо уплотненные суглинки и глины) и вполне устойчивыми (тугопластичные плотные глины и суглинки, моренные суглинки с различным содержанием крупнообломочного материала).

Среди глинистых грунтов выделяются просадочные разности: лёссы и лёссовидные грунты.

В глинистых грунтах практически могут быть использованы все способы бурения инженерно-геологических скважин. Выбор способа бурения должен определяться целями и задачами бурения, а также производительностью способа.

2.6. Крупнообломочные грунты характеризуются обычно высокой водопроницаемостью и неустойчивостью в стенках буровых скважин.

При бурении скважин в крупнообломочных грунтах выбираемый способ бурения должен обеспечивать одновременную либо опережающую обсадку скважины трубами. Этому требованию удовлетворяет ударно-канатное бурение.

2.7. Скальные и полускальные грунты могут находиться в виде сплошного или трещиноватого массива; они нерастворимы, практически инертны к воде, при отсутствии трещиноватости — водонепроницаемы.

Единственным способом проходки инженерно-геологических скважин в скальных грунтах является колонковый.

2.8. Грунты всех типов могут находиться в мерзлом состоянии. Мерзлые нескальные грунты подразделяются на твердомерзлые — прочно цементированные льдом, характеризующиеся хрупким разрушением; пластично-мерзлые — цементированные льдом, обладающие вязкими свойствами вследствие содержания в них значительного количества незамерзшей воды.

При бурении скважин в мерзлых грунтах выбираемый способ бурения должен обеспечить минимальное нарушение естественного температурного режима и режима влажности грунта в отбираемых образцах, сохранение ствола скважины в хорошем состоянии.

Для бурения твердомерзлых грунтов может быть использован колонковый способ «всухую» с промывкой охлажденными водными и глинистыми растворами; пластично-мерзлых — колонковый «всухую», ударно-канатный кольцевым забоем, вибрационный и ручной ударно-вращательный.

2.9. Условия проведения буровых работ, характеризуемые сте-

пенью сложности инженерно-геологической обстановки, изученности территории, а также степенью сложности доставки и транспортирования бурового оборудования, определяют дополнительные требования к способам и технологии бурения, к оборудованию, реализующему тот или иной способ бурения, а также к объему получаемой инженерно-геологической информации.

2.10. По условиям проведения буровых работ могут быть выделены территории с простыми, средней сложности и сложными инженерно-геологическими условиями; легко-средне- и труднодоступные различным видам транспорта, а также особые территории по доставке и транспортированию бурового оборудования.

2.11. При бурении скважин на территориях со среднесложными и сложными инженерно-геологическими условиями (с неблагоприятными физико-геологическими процессами и явлениями) необходимо руководствоваться положениями СНиП II-A.13-69 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения».

В районах распространения лёссовых (просадочных) грунтов бурение скважин должно осуществляться без применения промывочной жидкости. Наиболее эффективным способом бурения этих грунтов является заблужающая разновидность ударно-канатного бурения кольцевым забоем.

В районах развития карста диаметр и конструкция скважин должны обеспечить проведение в них в случае необходимости опытных работ. При бурении в закарстованных породах необходимы следующие дополнительные сведения: процент выхода керна, характеристика керна, относительная буримость пород, характеристика шлама, баланс циркулирующей промывочной жидкости, изменение уровня воды в скважине; особое внимание должно быть обращено на фиксирование зон провалов инструмента и на характер циркуляции или поглощения промывочной жидкости, а также на наличие и характер газопроявлений. Основным способом бурения скважин в закарстованных грунтах является колонковый с промывкой. При этом рекомендуется использовать буровые станки колонкового бурения УГБ-50М, ЗИФ-300М, ВИТР-300, БСК-2М-100 с гидравлической подачей бурового инструмента.

Бурение следует вести с тщательным хронометражом основного процесса бурения, фиксируя при этом механическую скорость бурения, процент выхода керна, провалы инструмента с точным указанием интервала глубин и характера провала.

Для точной и надежной регистрации параметров бурового процесса используемые буровые станки целесообразно комплектовать контрольно-измерительной аппаратурой (типа ПКМ, ГП-18, ИРБ-5А, 8МР-1 и др.).

2.12. Сложность доставки и транспортирования бурового оборудования определяют прежде всего транспортную базу и конструктивные особенности буровых станков и установок, реализующих тот или иной способ бурения.

В зависимости от категории сложности доставки и транспортирования бурового оборудования следует использовать:

в легких условиях* — самоходные буровые установки на авто-

* Характеристика условий транспортирования и доставки бурового оборудования дана в «Рекомендациях по производству буровых работ при инженерно-геологических изысканиях для строительства», Стройиздат, М., 1970.

мобильном ходу: БУЛИЗ-15; УГБ-50А(М), АВБ-2М, СБУДМ-150-ЗИВ, СБУЭМ-150-ЗИВ, УРБ-2А, ЛБУ-50; передвижные — УПБ-25, УБП-15М, БУКС-ЛГТ, Д-5-25, ПВБСМ-15, БСА-6 «Амурец»; стационарные — ЗИФ-300М, УКС-22М, БУГ-100 и др.;

в средних условиях — самоходные установки на пусеничном ходу: АВБТМ, УШ-2Т (УШБ-ТМ); передвижные — УПБ-25, БУКС-ЛГТ, Д-6-15, ПВБСМ-15, БСА-6 «Амурец»; стационарные — ЗИФ-300М, БСК-2М-100; переносные — Д-10, М-1, ПБУ-10; в отдельных случаях возможно использование самоходных установок на автомобильном ходу;

в тяжелых условиях — переносные станции — Д-10, М-1, ПБУ-10, УПБ-25, ПВБСМ-15; разборные на отдельные блоки: Д-6-15, БСК-2М-100;

в особых условиях, когда бурение выполняется с понтонов, плотов и барж, для перевозки оборудования следует использовать специальный водный транспорт; для бурения могут быть использованы стационарные станки ЗИФ-300-М, ВИТР-300, БСК-2М-100, а также установка УПБ-25.

2.13. Этап изысканий также оказывает существенное влияние на характер проведения буровых работ.

2.14. На начальных этапах изысканий (при инженерно-геологической рекогносцировке или мелко- и среднемасштабной съемке) буровые работы выполняются на территориях, характеризующихся значительной площадью, а степень детальности изучения разреза при этом сравнительно невысока.

Для бурения этих скважин следует использовать способы бурения, которые реализуются в легком, мобильном, достаточно простом в обслуживании и надежном в эксплуатации оборудовании. Это в основном легкие переносные и перевозимые станки с приводом от двигателя внутреннего сгорания мощностью 3—4 л. с. (Д-10М, ПБУ-10, М-1, ПВБСМ-15, Д-6-15), отчасти самоходные буровые установки БУЛИЗ-15, которые обеспечивают бурение шнековым, колонковым «всухую» и ударно-канатным кольцевым забоем способами.

2.15. На последующих этапах (при инженерно-геологической съемке крупного масштаба и разведке) буровые работы выполняются на ограниченных по площади территориях с детальным изучением разреза. Бурение скважин следует осуществлять способами, обеспечивающими наибольшую точность и полноту геологической документации — колонковым, ударно-канатным кольцевым забоем, вибрационным, которые позволяют отбирать образец грунта в виде столбика керна.

Минимальный диаметр бурения должен быть не менее 89 мм.

В зависимости от вида проходимых грунтов конечный диаметр бурения следует устанавливать: 89 мм — при бурении скальных грунтов; 108 мм — при бурении глинистых и песчаных грунтов. При глубине бурения до 30 м рекомендуется использовать станки и установки АВБ-2М, БУЛИЗ-15, УГБ-50М, ЛБУ-50, БУКС-ЛГТ, УБП-15М, Д-5-25, обеспечивающие бурение колонковым, вибрационным и ударно-канатным кольцевым забоем способами.

При глубине бурения до 100 м и выше основным способом проходки скважин является колонковый, реже применяется ударно-канатный кольцевым забоем. Рекомендуемыми установками являются УГБ-50М, СБУДМ-150-ЗИВ, СБУЭ-150-ЗИВ, УРБ-2А, АВБ-ТМ, ЗИФ-300М, БСК-2М-100, БУГ-100, УКС-22М.

2.16. Для проходки скважин гидрогеологического назначения следует использовать способы бурения, обеспечивающие максимальную сохранность естественных характеристик водоносных горизонтов и свойств подземных вод. Буровые установки, реализующие эти способы бурения, должны обеспечивать возможность оборудования скважин для производства пробных и опытных откачек, а также гидрогеологических наблюдений.

Рекомендуемыми способами бурения этих скважин являются ударно-канатный сплошным забоем, роторный, в отдельных случаях может быть использован колонковый.

Ударно-канатный способ рекомендуется:

при глубине скважины до 150 м и начальном диаметре более 300—500 мм;

в районах, где геологический разрез и гидрогеологические условия недостаточно изучены;

при частом чередовании в разрезе водоносных и водонепроницаемых пород;

при необходимости отдельного опробования отдельных водоносных горизонтов;

в районах, где нет воды и высококачественной глины для приготовления глинистого раствора.

Роторный способ целесообразно применять:

при бурении скважин глубиной свыше 200 м при условии хорошей изученности геологического разреза и гидрогеологических условий;

при бурении скважин на предварительно разведанные и опробованные водонасыщенные горизонты.

В водоносных породах, представленных мелкозернистыми или среднезернистыми песками, бурение скважин глубиной 250—300 м рекомендуется производить комбинированным способом—ударно-канатным и роторным.

Колонковый способ целесообразно применять для предварительной оценки гидрогеологических условий.

Для бурения гидрогеологических скважин рекомендуются станки и установки: БУКС-ЛГТ, БСА-6 «Амурец», БУГ-100, УКС-22М, УКС-30М, УГБ-50М, УРБ-2А, УРБ-3АМ.

2.17. Для бурения скважин специального назначения следует использовать способы, обеспечивающие проходку скважин требуемого диаметра и глубины с соблюдением требований, предъявляемых к стволу скважины последующими опытными работами.

Для бурения специальных скважин большого диаметра рекомендуется медленновращательный (специальными шнековыми бурями) и ударно-канатный (наконечниками ячеистой конструкции) способы.

2.18. При линейных изысканиях буровые работы выполняются на территориях, характеризующихся значительной линейной протяженностью, в силу чего следует использовать буровые станки и установки, обладающие хорошей транспортабельностью, — легкие, имеющие большую скорость передвижения, высокоманевренные и т. д.

2.19. При площадных изысканиях буровые работы выполняются, как правило, на ограниченных участках, для бурения могут быть использованы разнообразные по модификации станки и установки.

2.20. При изысканиях под гидротехнические сооружения и другие буровые работы часто выполняются на акваториях морей, рек и озер. В этом случае для бурения скважин могут быть исполь-

зованы разнообразные по модификации, диаметрам и способам бурения станки, которые монтируются на платформах и понтонах.

3. СПОСОБЫ БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

3.1. Все способы бурения, используемые при инженерных изысканиях, могут быть разделены на три группы:

способы, дающие керн в виде столбика грунта, относительно ненарушенного, с последовательностью слоев, включений, текстурных и структурных особенностей, в значительной степени соответствующих природным. К этой группе относятся вибрационный, ударно-канатный кольцевым забоем, колонковый и шнековый кольцевым забоем;

способы, дающие керн в виде перемятого, с нарушенным сложением грунта. Сюда относятся медленновращательный, шнековый и ручной ударно-вращательный;

способы, дающие грунт в виде шлама. Это ударно-канатное бурение сплошным забоем и роторное.

3.2. При бурении скважин инженерно-геологического назначения предпочтение следует отдавать способам, позволяющим наиболее полно и точно устанавливать геологический разрез (глубину залегания слоев, структурные и текстурные особенности грунта) и обеспечивающим качественный отбор монолитов.

Наиболее качественную инженерно-геологическую документацию обеспечивают способы бурения, дающие образцы грунта в виде столбика керна, которые рекомендуются применять при инженерно-геологической съемке крупного масштаба и разведке. На начальных этапах изысканий в зависимости от характера решаемых задач могут быть использованы медленновращательный и шнековый способы.

Колонковый способ

3.3. Колонковый способ обеспечивает бурение инженерно-геологических скважин диаметром от 33 до 168 мм, глубиной до 100 м и более почти во всех разновидностях грунтов, являясь единственным способом бурения скальных грунтов.

При инженерно-геологических изысканиях используется колонковое бурение «всухую» с промывкой водой или глинистым раствором, с продувкой сжатым воздухом.

3.4. Колонковое бурение «всухую» следует использовать для проходки скважин диаметром 108—219 мм, глубиной до 30 м в глинистых и песчаных слабообводненных грунтах, устойчивых в стенках скважин, а также в мерзлых грунтах. Менее эффективно оно может быть использовано для бурения скважин в рыхлых обводненных грунтах (песчаных).

3.5. Бурение «всухую» рекомендуется осуществлять обычными ребристыми твердосплавными коронками при скорости вращения прибора не более 60—80 об/мин, при равномерном давлении на забой. Величина рейса не должна превышать 40—50 см; в случае полного отсутствия жидкости в скважине, а также при проходке мерзлых грунтов углубление за рейс следует ограничивать 20—30 см.

Бурение «всухую» происходит наиболее эффективно при наличии в скважине подземных вод или при подливе в скважину воды, а также при интенсивном расхаживании снаряда, однако в этом случае столбик грунта значительно деформируется.

3.6. При колонковом бурении «всухую» граница между слоями грунта в геологическом разрезе, устанавливаемом по керну, может быть зафиксирована с точностью, находящейся в пределах 0,25—0,50 м, при этом могут быть пропущены отдельные слои грунта со средней мощностью до 0,25 м.

3.7. При колонковом бурении «всухую» получают образцы грунта с несколько нарушенной структурой и естественной влажностью за счет скручивания и растяжения керна, а также нагревания грунта.

Для отбора образцов грунта ненарушенной структуры из глинистых грунтов твердой и тугопластичной консистенции, плотных песчаных грунтов, а также мерзлых глинистых грунтов рекомендуется использовать грунтоносы обуривающего типа (конструкции Том-гипротранса), а также шнеково-колонковые буры. Режим бурения устанавливают следующий: давление на забой 20—50 кг, скорость вращения — 30—60 об/мин.

3.8. Колонковое бурение «всухую» характеризуется самыми низкими показателями механической и рейсовой скорости бурения по сравнению с другими способами проходки инженерно-геологических скважин.

Среднесменная производительность этого способа бурения при реализации его на установке СБУДм-150-ЗИВ составляет 12 м/см.

3.9. Колонковое бурение с промывкой при инженерно-геологических изысканиях следует использовать в основном для проходки скважин глубиной до 100 м и более в скальных и полускальных грунтах, в отдельных случаях — для проходки песчаных и глинистых грунтов.

3.10. Колонковое бурение в скальных и полускальных грунтах рекомендуется осуществлять твердосплавным, алмазным или дробовым породоразрушающим инструментом, в качестве промывочной жидкости — использовать воду или глинистый раствор.

При бурении скальных монолитных грунтов высокой крепости (VII—XII категории по буримости) следует использовать алмазный или дробовый породоразрушающий инструмент, в качестве промывочной жидкости — воду; при бурении полускальных и скальных грунтов, монолитных или трещиноватых, малой и средней крепости (до VII—VIII категории по буримости) — твердосплавный породоразрушающий инструмент; в качестве промывочной жидкости — глинистый раствор, в некоторых случаях — воду; при бурении не-скальных грунтов (песчаных и глинистых) — твердосплавный породоразрушающий инструмент, в качестве промывочной жидкости — глинистый раствор.

3.11. Колонковое бурение с промывкой в не-скальных грунтах, представленных глинистыми и песчаными разностями, дает неудовлетворительные результаты по качеству инженерно-геологической документации в связи с недостаточным выходом керна, изменением химического и минералогического состава грунтов вследствие воздействия промывочной жидкости. При бурении с промывкой нельзя своевременно и правильно установить глубину появления воды, при смешивании нагнетаемой промывочной жидкости искажает химический состав воды водоносного горизонта. Использование в качестве

промывочной жидкости глинистого раствора приводит к кальматации трещин, а порой — и к пропуску при документации безнапорных водоносных горизонтов.

Колонковое бурение с промывкой дает хорошие результаты по качеству инженерно-геологической документации при проходке полускальных и скальных грунтов.

3.12. Для лучшего сохранения керна и повышения процента выхода керна при колонковом бурении следует применять рациональные конструкции бурового снаряда и выбирать оптимальные режимы бурения (давление на инструмент — P , кгс, число оборотов снаряда — n , об/мин; расход промывочной жидкости — Q , л/мин).

При бурении скважин в трещиноватых скальных и полускальных грунтах рекомендуется использовать двойные колонковые трубы или эжекторные колонковые снаряды.

3.13. Рекомендуемые режимы бурения твердосплавными коронками приведены в следующей таблице.

Категория грунтов по буримости	Диаметры бурения, мм							
	76		93		112		132	
	n	P	n	P	n	P	n	P
I—IV	400	500	300	600	250	700	200	800
IV—V	500	600	300	800	250	900	200	100
VI—VIII	400	1300	250	1600	250	2000	—	—

При бурении рыхлых, слабосвязных грунтов I—IV категории по буримости (глинистые и песчаные) рекомендуется применять небольшие нагрузки на коронку с целью улучшения условий удаления шлама из-под торца коронки и обеспечения лучшей сохранности керна.

По мере увеличения диаметра бурения следует снижать окружную скорость вращения инструмента при соответствующем увеличении удельной нагрузки на резец. Это способствует созданию более спокойных условий работы снаряда и оборудования.

Кроме того, для лучшего сохранения керна целесообразно уменьшать величину зазора между буровым снарядом и стенками скважины, а также увеличивать длину снаряда.

3.14. При бурении с промывкой следует использовать обратную циркуляцию промывочной жидкости, способствующую увеличению выхода керна, уменьшению самозаклинок, повышению механической скорости бурения и проходки за рейс. При этом расход промывочной жидкости должен составлять:

при диаметре бурения 132 мм	70—80 л/мин
„ „ 112 „	50—60 „
„ „ 92 „	40—45 „

3.15. Сохранность слоения и влажности грунтов при бурении колонковым способом с промывкой в значительной мере зависит от качества промывочной жидкости и главным образом от показателя водоотдачи. Чем меньше величина водоотдачи раствора, тем более благоприятные условия создаются для сохранения естественного состояния грунта.

При проходке скальных и полускальных грунтов сильнотрещиноватых и рассланцованных следует использовать глинистый раствор, имеющий следующие показатели:

вязкость по СПВ-5 $T=30-35$ с, водоотдачу $B=18-20$ см³ за 30 мин, удельный вес $\gamma=1,15-1,20$ Г/см³, содержание песка не более 4%; при проходке глинистых грунтов: вязкость $T=30-35$ с, водоотдачу $B=4-5$ см³ за 30 мин, удельный вес не менее 1,20 Г/см³ и содержание песка не более 4%.

3.16. Длина рейса при колонковом бурении должна определяться степенью сохранности керна, твердостью грунта и износостойкостью породоразрушающего инструмента.

3.17. При бурении скважин глубиной до 25—30 м в песчаных и глинистых грунтах станками, предназначенными для проходки скважин глубиной до 100 м и более (СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭм-150-ЗИВ, УРБ-2А), колонковый способ бурения с промывкой имеет самые низкие скорости бурения. В этом же случае не эффективно используется мощность двигателей, характеризующихся высокой энергоемкостью.

С увеличением глубины бурения эффективность использования мощности повышается. При глубине скважин более 50 м, а также в случае наличия скальных грунтов колонковое бурение с промывкой (продувкой) является единственным способом проходки инженерно-геологических скважин.

3.18. Колонковое бурение с продувкой рекомендуется осуществлять при проходке скважин глубиной свыше 30 м в необходимых, устойчивых в стенках скважин грунтах, трещиноватых скальных и полускальных грунтах, где обеспечение нормальной циркуляции промывочной жидкости практически невозможно, в мерзлых грунтах; в пустынных и засушливых местностях, в условиях бездорожья, труднодоступных и горных районах, где водоснабжение связано с большими затратами времени, сил, средств. Бурение скважин с продувкой воздухом по сравнению с промывкой имеет ряд преимуществ: более высокую механическую скорость бурения, увеличенную проходку на породоразрушающий инструмент, улучшенные условия труда буровой бригады (особенно в зимнее время и в северных районах). Кроме того, бурение с продувкой в грунтах, естественная структура которых нарушается от контакта с водным раствором, предотвращает размыв стенок скважин и образование обвалов.

3.19. Реализация колонкового бурения в различных конструкциях буровых станков и установок (передвижных — УПБ-25; самоходных — УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, СБУЭм-150-ЗИВ, УРБ-2А и др.; стационарных — ЗИФ-300М; стационарных разборных на транспортные блоки — БСК-2М-100) дает возможность использовать этот способ в самых разнообразных условиях по сложности доставки и транспортирования бурового оборудования.

Гидравлическая система подачи бурового инструмента на забой, которой обеспечены многие буровые станки колонкового бурения (УГБ-50М, ЗИФ-300М, БСК-2М-100 и др.), позволяет успешно их использовать при бурении скважин в карстовых районах.

При использовании буровых установок колонкового бурения последние целесообразно комплектовать контрольно-измерительной аппаратурой для регистрации основных параметров процесса бурения (аппаратура типа ИРБ-5А, ПКМ, ГП-18).

Для определения баланса циркулирующей жидкости целесообразно использовать электромагнитные датчики расхода промывочной жидкости, входящие в комплект аппаратуры ИРБ-5А и ПКМ, а также электромагнитные расходомеры типа ЭМР-1.

3.20. При колодежном бурении отбор монолитов может быть осуществлен вращательным, обуривающим и вдавливающим способами, что позволяет отбирать их из большинства разновидностей грунтов (скальных, песчаных, глинистых, мерзлых)

Ударно-канатный кольцевым забоем

3.21. Ударно-канатный способ бурения кольцевым забоем обеспечивает проходку скважин инженерно-геологического назначения диаметром от 89 до 273 мм, а также скважин большого диаметра (560 мм и более), глубиной до 30 м и более в глинистых и песчаных грунтах, устойчивых и неустойчивых в стенках буровых скважин. Этот способ может быть успешно использован при бурении пластично-мерзлых грунтов и некоторых разновидностей крупнообломочных грунтов.

Различают «клюющую» и забивную разновидности ударно-канатного бурения кольцевым забоем.

3.22. Ударно-канатное бурение кольцевым забоем обеспечивает достаточно качественную инженерно-геологическую документацию. Образцы грунта при этом способе бурения получают в виде столбика керна, что позволяет с удовлетворительной точностью фиксировать положение слоев грунта (точность находится в пределах 0,25—0,50 м), при этом могут быть пропущены отдельные слои грунта со средней мощностью до 0,20 м. Наилучшие показатели по точности фиксации слоев грунта в геологическом разрезе этот способ бурения обеспечивает в увлажненных песчаных грунтах, в глинистых грунтах, кроме мягко- и текучепластичной консистенции. При проходке илистых грунтов, торфов, глинистых грунтов мягкопластичной консистенции и сухих песков точность этого способа снижается.

3.23. С целью повышения точности фиксации положения границ слоев грунта в геологическом разрезе, устанавливаемом по буровой скважине, рекомендуется увеличивать длину рейса при ударно-канатном бурении кольцевым забоем до 0,5 м и более.

С учетом оптимальной длины рейса рекомендуется использовать буровые наконечники длиной 0,85 м и более с возможно меньшей толщиной стенки башмака, имеющего наружную заточку.

При установлении границ слоев в геологическом разрезе следует учитывать удлинение керна при бурении глинистых грунтов, которое составляет около 15% при использовании наконечника диаметром 146 мм, при наконечнике диаметром 127 мм это увеличение равно 20%.

Для оценки увеличения длины поднятого керна по сравнению с длиной рейса рекомендуется использовать забивные стаканы, снабженные линейкой, расположенной около прорези стакана.

3.24. Под действием удара при бурении ударно-канатным способом сложение некоторых связных грунтов (илы, мягкопластичных супесей, суглинков) полностью нарушается и грунт извлекается в виде жидкой массы, что не дает правильного представления о его структуре.

При бурении скважин этим способом отбор монолитов следует

производить одноударной или многократной забивкой грунтоноса в грунт.

В соответствии с ГОСТ 12071—72 «Грунты. Отбор, упаковка, хранение и транспортирование образцов» отбор монолитов этими способами допускается производить из глин с коэффициентом пористости $e < 1,1$; суглинков $e < 0,9$; супесей $e < 0,7$ при показателе консистенции $V < 1$.

3.25. Отбор монолитов одноударным способом рекомендуется производить тонкостенными грунтоносами типа Д-1 и Д-2.

Опыт отбора монолитов одноударным способом свидетельствует о том, что он обеспечивает отбор вполне удовлетворительных монолитов из лёссов и лёссовидных суглинков. При этом происходит незначительное уплотнение грунта и некоторое уменьшение относительной просадочности, остальные показатели физико-механических свойств существенных изменений не претерпевают.

Отбор монолитов одноударным способом следует производить с соблюдением следующих условий:

падение снаряда должно происходить без поперечных раскачиваний.

полушпильки керноприемника должны быть зажаты между переходником и внутренним буртом в строго фиксированном положении (нахлестка полустаканов приводит к их деформации и нарушению монолита);

желательно усиливать башмак грунтоноса твердым сплавом с целью увеличения срока службы грунтоноса.

3.26. Ключущее бурение рекомендуется использовать при проходке скважин диаметром от 89 до 168 мм, а также скважин большого диаметра (560 мм и более) глубиной до 30 м в увлажненных песчаных и глинистых грунтах, устойчивых в стенках буровых скважин, а также в лёссах и лёссовидных суглинках.

3.27. Производительность «ключущего» бурения во многом зависит от выбора рационального бурового наконечника при проходке того или иного вида грунтов, оптимальных технологических параметров процесса бурения, от степени механизации и ускорения процесса очистки забивных стаканов.

3.28. При бурении скважин диаметром до 146 мм в глинистых грунтах следует использовать обычные забивные стаканы, в этом случае грунт достаточно хорошо удерживается в стакане при его подъеме. При больших диаметрах следует использовать стаканы, разделенные пополам внутренней вставкой, что способствует лучшему удержанию грунта в стакане при его подъеме.

При бурении увлажненных песчаных грунтов такие стаканы рекомендуется использовать, начиная с диаметра 108 мм. При бурении большого диаметра (560 мм и более) рекомендуется использовать специальные буровые стаканы ячеистой конструкции.

3.29. С целью увеличения эффективности внедрения наконечника в грунт необходимо стремиться к использованию более тяжелого инструмента. Оптимальной высотой сбрасывания инструмента при бурении скважин большого диаметра (более 500 мм) является 6—7 м, при бурении скважин диаметром менее 200 мм — 8—10 м.

3.30. С целью рационального расхода энергии падающего бурового снаряда, исключения засорения образца разрыхленным грунтом с вышележащих горизонтов, особенно при бурении слабоустойчивых в стенках буровых скважин грунтов, необходимо добиваться падения снаряда по скважине без раскачивания, для чего перед сбрасы-

ванием буровой снаряд должен быть приведен в строго фиксированное положение. Выполнение такой операции вручную является весьма трудоемким процессом. С целью стабилизации положения бурового инструмента перед сбрасыванием предлагается оснащать буровые установки устройством, обеспечивающим строго фиксированное положение снаряда.

3.31. Для ускорения и механизации процесса очистки забивных стаканов рекомендуется использовать стаканы с большим углом выреза (до $140-150^\circ$), разъемные и поршневые стаканы.

3.32. «Клюющее» бурение при проходке скважин глубиной до 10—15 м в песчаных грунтах с небольшим включением крупнообломочного материала, в слабоуплотненных супесях различной влажности, а также при проходке скважин глубиной от 10—15 до 30 м в пластичных глинистых грунтах невысокой плотности, в лёссах и лёссовидных суглинках является самым производительным способом бурения.

В пластичных глинистых грунтах невысокой плотности, в тугопластичных и твердых плотных глинах и моренных суглинках с небольшим содержанием крупнообломочного материала при глубине бурения до 10—15 м этот способ по производительности уступает только вибрационному.

При бурении грунтов, неустойчивых в стенках скважины (сухих и водонасыщенных песков, дресвы, гравийно-галечниковых отложений), клюющее бурение по производительности уступает только забивному с механизированной посадкой обсадных труб.

Производительность «клюющего» способа бурения достигает 25—30 м в смену при глубине скважин до 30 м.

3.33. Забивной способ рекомендуется использовать при бурении скважин диаметром до 273 мм, глубиной до 30 м и более во всех разновидностях песчаных и глинистых грунтов, а также в несвязных крупнообломочных грунтах.

При проходке грунтов, неустойчивых в стенках буровых скважин, представленных песками сухими и водонасыщенными вплоть до плывунов, несцементированной дресвой, гравийно-галечниковыми отложениями, рекомендуется использовать забивное бурение с одновременной либо опережающей обсадкой скважин трубами.

3.34. Погружение обсадных труб следует осуществлять путем вибрации, раскачивания или вращением с одновременным задавливанием.

Вибрационное погружение обсадных труб рекомендуется использовать при бурении песчаных грунтов.

Особенно эффективно в этом случае применение вибраторов и вибромолотов, имеющих центральное проходное отверстие (ВГ-6, С-835, ВО-10 и др.). Наличие отверстия позволяет вести погружение труб с одновременным бурением, что дает возможность эффективно проходить скважины в песчаных породах.

Метод задавливания обсадных труб с одновременным их вращением рекомендуется использовать при бурении скважин трубами диаметром до 219 мм. Для этого следует использовать установки, оборудованные подвижными вращателями (установка УБР-1а); при больших диаметрах использовать механизмы раскачивания труб (установки БУГ-100).

3.35. При бурении забивным способом рекомендуется использовать автоматический подъем и сбрасывание инструмента на забой, для чего желательно оснащать установки ударно-канатного бурения

устройством, автоматизирующим процесс ударно-канатного бурения (разработано Энергосетьпроектом).

3.36. Забивной способ бурения является самым производительным при проходке скважин глубиной от 10—15 до 30 м в песчаных грунтах различной влажности и насыщенности крупнообломочным материалом, в тугопластичных и твердых глинах, моренных суглинках с различным содержанием крупнообломочного материала, а также при проходке скважин глубиной до 30 м и более в неустойчивых в стенках скважины грунтах.

3.37. Ударно-канатное бурение кольцевым забоем реализуется в различных конструкциях буровых станков и установок, отличающихся своими параметрами и транспортной базой: станки на одноосном колесном ходу — Д-5-25, БУКС-ЛГТ, УБП-15М; самоходные установки — УГБ-50М, АВБ-2М и др.; стационарные станки — БУГ-100 и др., что обеспечивает возможность использования этого способа бурения в самых разнообразных условиях по сложности доставки и транспортированию оборудования.

В конструктивном и эксплуатационном отношении специализированные буровые станки, реализующие этот способ бурения, отличаются простотой и высокой надежностью в работе. Основным рабочим органом этих станков является планетарная или фрикционная лебедка, привод которой осуществляется бензодвигателем через клиноременную или цепную передачу.

Ударно-канатное бурение кольцевым забоем является наименее энергоемким и металлоемким способом из всех, используемых при инженерно-геологических изысканиях.

Станки ударно-канатного бурения в песчаных и глинистых грунтах способны обеспечить производительность до 35 м в смену.

Вибрационное бурение

3.38. Вибрационное бурение обеспечивает проходку скважин диаметром 89—168 мм, глубиной до 20—25 м в глинистых и песчаных грунтах, устойчивых в стенках буровых скважин. Рациональная глубина бурения 15 м.

3.39. Вибрационное бурение обеспечивает получение качественной инженерно-геологической документации. При проходке скважин с целью установления геологического разреза вибробурение дает наиболее точные данные о строении исследуемых толщ по сравнению с другими способами. Этот способ позволяет получать сведения о геологическом разрезе с ошибкой в определении положения границы между слоями, не превышающей 0,25 м, при этом могут быть пропущены слои грунта, имеющие в среднем мощность 0,1 м.

При бурении водонасыщенных грунтов типа плавунув в процессе вибрации изменяется плотность грунта, нарушаются внутренние связи, перераспределяются частицы с различным удельным весом, а тяжелые частицы выпадают из взвеси, в силу чего резко снижается точность документации.

3.40. С целью повышения точности фиксации положения слоев в геологическом разрезе по буровой скважине рекомендуется увеличивать длину рейса при вибробурении до 2 м и более. С учетом длины рейса рекомендуется использовать буровой наконечник длиной 3 м и более.

3.41. При отборе монолитов вибрационным способом вибрационное воздействие приводит к нарушению структуры грунта и частич-

ному искажению его физико-механических свойств в большей степени, чем другие виды воздействия.

Вибрационный способ допускается при отборе монолитов из глин с коэффициентом пористости $\epsilon < 1,1$; суглинков с $\epsilon < 0,9$; супесей с $\epsilon < 0,7$ при показателе консистенции $B < 1$.

3.42. Для эффективной проходки скважины вибрационным способом необходимо поддерживать оптимальный режим работы вибратора и соблюдать технические режимы бурения.

В плотных маловлажных грунтах погружение зонда должно осуществляться при большой величине отскока ударной массы и малой частоте ударов, в слабых обводненных грунтах — при небольшой величине отскока и большом числе ударов. При значительных объемах бурения в песчаных грунтах целесообразно перейти на чисто вибрационный режим работы вибропогружателя.

3.43. Оптимальный режим работы вибропогружателя может быть достигнут только изменением скорости вращения дебалансов.

В вибропогружателе с приводом от двигателя внутреннего сгорания последний достигается небольшим изменением скорости вращения приводного двигателя. При этом, в частности при работе на агрегате АВБ-2М, необходимо следить за тем, чтобы напряжение в сети находилось в пределах 350—420 В, а частота тока 45—55 Гц.

3.44. Длину рейса при вибробурении следует устанавливать на 15—20% меньше предельной величины погружения виброзонда.

В зависимости от глубины скважины, свойств проходимых грунтов, диаметра используемого зонда длина рейса может находиться в пределах от 0,5 до 3 м. Длину рейса следует снижать по мере увеличения глубины скважины. При одинаковой буримости грунтом длина рейса на глубине 10 м должна быть меньше первоначальной примерно в 2 раза и составлять от 0,6 до 1,2 м.

Вибрационное воздействие на виброзонд исходя из условий опробования допускается в песчаных грунтах не более 2—3 мин, в глинистых — не более 5—7 мин.

3.45. При бурении скважин глубиной до 15—20 м в случае отсутствия в скважине воды целесообразно вместо ударного патрона на вибраторе использовать призабойный ударный патрон, размещенный непосредственно над зондом. Для этого может быть использован ударный патрон для забивного бурения (из комплекта к установке УБП-15М или БУГ-100). В этом случае вибратор должен быть переоборудован как для чистого бурения.

3.46. Для ликвидации нередко образующихся в зонде грунтовых «пробок», вызывающих резкое снижение механической скорости бурения, а подчас и прекращение углубки, рекомендуется пробивать их путем подбема бурового снаряда на некоторую высоту и свободного сбрасывания его на забой скважины с одновременным включением в работу вибратора.

3.47. Для ускорения и снижения трудоемкости процесса очистки буровых наконечников при вибрационном бурении следует использовать разъемные и поршневые стаканы.

При проходке песчаных необводненных или слабообводненных грунтов для очистки бурового наконечника после документации может быть использовано вибрирование инструмента, свободно подвешенного на канате.

3.48. При вибробурении целесообразно ориентироваться на применение возможно более жестких бурильных труб, которые снижают влияние глубины на эффект воздействия вибрации.

3.49. Наилучшей буримостью при вибробурении обладают пластичные глинистые грунты, худшей — сухие, плотные, тугопластичные и твердые глины и сухие пески.

При бурении скважин глубиной до 10—15 м в пластичных глинистых грунтах невысокой плотности, а также в тугопластичных и твердых плотных глинах, моренных суглинках с небольшим включением крупнообломочного материала вибрационный способ бурения по производительности превосходит все другие способы.

Производительность вибрационного бурения существенно снижается с увеличением глубины и диаметра бурения.

3.50. Вибробурение реализуется в основном на самоходных буровых установках (АВБ-2М, ВБУ-63, СВБУ-ЛГВХ).

Реализация способа на самоходных буровых установках позволяет весьма эффективно использовать его при производстве изысканий в условиях, доступных подъезду автотранспорта.

3.51. Станки вибрационного бурения способны обеспечить производительность до 60 м в смену при глубине бурения до 10—15 м. Выработка на установку в год может достигать 9000 м бурения.

3.52. Вибрационный способ характеризуется большими энергозатратами, высокой металлоемкостью и энерговооруженностью.

Основным рабочим органом вибробуровых установок является вибратор или вибромолот с приводом от одного до двух электродвигателей мощностью 4,5—7 кВт. Электроэнергию для привода электродвигателей вибропогружателей вырабатывают генераторы мощностью 12—28 кВт, привод которых осуществляется от транспортных двигателей установок.

Медленновращательное бурение

3.53. Медленновращательное бурение обеспечивает бурение скважин диаметром от 70 до 650 мм и более на глубину до 30 м в скальных грунтах. Одним из достоинств медленновращательного бурения является возможность проходки скважины большого диаметра.

Этот способ бурения практически не пригоден для проходки неустойчивых в стенках скважины грунтов, представленных сухими и водонасыщенными песками, а также несцементированными гравийно-галечниковыми отложениями, так как проходимый грунт не может быть доставлен на поверхность.

3.54. Медленновращательное бурение обеспечивает низкое качество инженерно-геологической документации. Граница между слоями грунта в геологическом разрезе, устанавливаемом по образцам грунта при этом способе бурения, может быть зафиксирована с ошибкой, равной 0,50—0,75 м, при этом могут быть пропущены отдельные слои грунта со средней мощностью до 0,3 м.

Образцы грунтов, отобранные при этом способе бурения, позволяют определить лишь литологический разрез и совершенно не пригодны для исследований, требующих ненарушенного сложения грунта.

Отбор монолитов при медленновращательном бурении следует производить грунтоносами обуривающего и вдавливающего типа.

3.55. Медленновращательное бурение осуществляется буровым инструментом для ручного ударно-вращательного бурения (спиральные ложковые буры и т. д.), при бурении скважин большого диаметра — специальными бурами ложкового и шнекового типов.

3.56. В зависимости от вида проходных грунтов при медленно-вращательном бурении рекомендуется использовать тот или иной тип бурового наконечника.

3.57. При бурении в глинистых пластичных грунтах следует использовать спиральные буры типа змеевиков, шнеков или цилиндрических спиралей.

Спиральные буры позволяют вести бурение с увеличенной длиной рейса, составляющей 0,8—1 м. При использовании спирального бура рекомендуется длину рейса устанавливать равной 0,5—0,7 длины бура. Превышение длины рейса приводит к образованию сальников над буром, что резко увеличивает усилие, необходимое для извлечения снаряда из скважины, а в ряде случаев к прихвату инструмента.

3.58. При проходке рыхлых грунтов различной влажности и насыщенности крупнообломочным материалом рекомендуется использовать ложковые буры, имеющие режущее лезвие, направленное под острым углом к забою и срезающее слой грунта, равный углубке за один оборот.

Применение ложковых буров обеспечивает минимальную скорость бурения.

Длину рейса при использовании ложковых буров рекомендуется устанавливать не более 0,2—0,4 м.

3.59. Медленно-вращательное бурение следует осуществлять при скорости вращения бурового инструмента 20—80 об/мин.

При использовании спиральных буров целесообразно вести бурение при повышенных скоростях вращения инструмента; при использовании ложковых буров предпочтительно увеличивать давление на забой.

3.60. Медленно-вращательное бурение обеспечивает сравнительно невысокую сменную производительность, достигающую 15 м в смену. Особенно низка производительность этого способа бурения при проходке скважин в слабоустойчивых в стенках скважины грунтах.

3.61. Медленно-вращательное бурение реализуется на буровых станках и установках вращательного и комбинированного бурения (УГБ-50М, СБУДм-150-ЗИВ, УРБ-2А и др.). Единственным требованием к установкам, которые могут быть использованы для бурения этим способом, является наличие вращателя с достаточно высоким крутящим моментом ($M_{кр} \geq 100$ кГ·м). Специализированной установкой медленно-вращательного бурения является установка УРБ-1а.

Шнековое бурение

3.62. Шнековое бурение обеспечивает проходку скважин диаметром 70—230 мм, глубиной до 30 м и более в нескальных грунтах при отсутствии в разрезе крупных валунов. Наиболее эффективно этот способ бурения используется в мягких, устойчивых в стенках буровых скважин грунтах. Неэффективно использование этого способа бурения при проходке плотных глинистых грунтов, а также валунно-галечниковых отложений.

При инженерно-геологических изысканиях бурение скважин шнековым способом осуществляется сплошным и кольцевым забоем. Бурение сплошным забоем производится непрерывным рейсом (точное бурение), рейсовыми заходками (рейсовое бурение) и завинчиванием.

3.63. Одним из серьезных недостатков шнекового бурения является трудность проведения качественной геологической документации. Наиболее неудовлетворительный материал для геологической документации дает шнековое поточное бурение, так как оно не позволяет точно определить глубину залегания определенных слоев грунта, кроме того, доставляемый на поверхность грунт деформирован и сильно перемешан. Ошибка в определении границ между слоями грунта в геологическом разрезе, устанавливаемом по скважине, при использовании этого способа превышает 0,75 м, при этом могут быть пропущены отдельные слои грунта со средней мощностью до 0,50 м.

Шнековое рейсовое бурение позволяет определять границы между слоями грунта в геологическом разрезе с ошибкой, находящейся в пределах 0,50—0,75 м; т. е. также обеспечивает низкую точность инженерно-геологической документации.

3.64. Шнековое рейсовое бурение следует использовать при проходке пластичных и тугопластичных глинистых грунтов.

При проходке толщ очень слабых грунтов (оплывающие водоносные пески, пески-пльвуны, глинистые грунты текучей консистенции, слабые торфы, илы и т. д.) и подстилающих их плотных грунтов следует переходить на винтовое бурение, отличающееся от рейсового бурения тем, что спиральное долото со шнековой колонной заворачивают как винт на такую глубину, при которой колонну без вращения можно извлечь из скважины с помощью лебедки станка. Шнековое бурение характеризуется высокой сменной производительностью, достигающей 50—60 м/см.

3.65. Шнековое бурение реализуется в станках различной конструкции и модификации (от переносных — Д-10М, М-1, ПБУ-10, УБП-25, ПВБСм-15 — до самоходных: УГБ-50М, УШБ-16), что значительно расширяет область его применения.

Комбинированные способы бурения

3.66. Повышение производительности эффективности буровых работ может быть достигнуто за счет рационального сочетания различных способов бурения. Такое сочетание в ряде случаев (особенно при наличии пестрых геологических разрезов с перемежающимися слоями грунта, отличающимися физико-механическими свойствами) является не только рациональным, но и неизбежным.

3.67. При бурении несвязных, неустойчивых в стенках буровых скважин грунтов (песчаные и крупнообломочные сухие и водонасыщенные) хорошие показатели дает сочетание медленновращательного и ударно-канатного бурения с одновременной или опережающей посадкой обсадных труб.

Подобное сочетание по сравнению с другими комбинациями способов бурения в указанных грунтах обеспечивает высокую производительность и удовлетворительное качество опробования при бурении скважин диаметром до 219 мм и более, глубиной до 50 м.

3.68. При бурении скважин в районах распространения мерзлых грунтов ввиду наличия подмерзлотных водоносных горизонтов целесообразно применять колонковый способ бурения «всухую» в комбинации с ударно-канатным.

3.69. Достаточно эффективна комбинация ударно-канатного бурения с колонковым за счет придания буровым установкам откидных вращателей. Наличие последних позволяет бурить прослой твердых

грунтов и добуривать скважины в скальных грунтах колонковым способом.

3.70. Вибрационное бурение целесообразно сочетать с ударно-канатным, что обеспечивает возможность эффективного бурения скважин глубиной более 25 м с пересечением неустойчивых грунтов (особенно песчаных, крупнообломочных) и плотных глин. В этом случае при бурении неустойчивых песчаных грунтов погружение и извлечение обсадных труб может производиться с помощью вибромолотов. Особенно эффективно применение вибромолотов, имеющих центральное проходное отверстие.

Опыт работы ряда организаций (УкрГИИНТИЗ, ХарьковГИИНТИЗ и др.) свидетельствует о том, что эффективность использования виброустановок может быть повышена за счет доукомплектования их планетарными лебедками, электродвигателем и дополнительным блоком, что позволит производить бурение ударно-канатным способом.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН*

4.1. Эффективность способов бурения оценивается в зависимости от условий его использования по трем факторам: инженерно-геологическому, техническому, экономическому.

4.2. Инженерно-геологические факторы определяют инженерно-геологическую информативность способа бурения, которая является определяющей при бурении скважин инженерно-геологического назначения. К ним относятся точность отражения геологического разреза, представительность описания разреза, возможность отбора качественных монолитов, возможность качественного проведения опытных работ.

4.3. Под точностью отражения геологического разреза понимается точность фиксации положения слоев грунта при описании разреза по образцам грунта, полученным в виде керна (шлама) при использовании того или иного способа бурения по сравнению с разрезом, устанавливаемым по шурфу, либо обнажению грунтов.

4.4. Критериями точности отражения геологического разреза служат количественные характеристики, среднеарифметическая ошибка определения глубины залегания границ слоев грунта, среднеквадратичное отклонение этой ошибки, показатель неполноты отражения геологического разреза и средняя мощность пропущенного слоя.

4.5. Среднеарифметическая ошибка определения положения границы слоев грунта (\bar{X}) характеризует закономерную величину ее смещения, присущую определенному способу бурения, и определяется формулой

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

* Пример опытно-производственной оценки эффективности различных способов бурения инженерно-геологических скважин дан в приложении.

где x_i — разница между индивидуальным замером положения границы слоев по скважине и по шурфу;

n — число индивидуальных замеров (объем выработки).

4.6. Среднеквадратичное отклонение этой ошибки σ характеризует случайную составляющую смещения границы и определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - x_i)^2}{n - 1}}$$

4.7. Показатель неполноты отражения геологического разреза K_{Π} характеризует количество пропущенных слоев грунта в разрезе, устанавливаемое при бурении скважины, по отношению к эталонному. Определяется по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{N_{\Pi}}{N_0}$$

где N_{Π} — число пропущенных слоев;

N_0 — общее число пересеченных слоев.

Средняя мощность пропущенного слоя определяется по формуле

$$m_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{\Pi i}}{n}$$

где $m_{\Pi i}$ — мощность единичного пропущенного слоя;

n — количество пропущенных слоев.

4.8. Понятие «точность отражения разреза» следует дополнять качественной характеристикой, отражающей состояние извлекаемого на поверхность грунта (в виде столбика керна при вибрационном, колонковом и других способах, в виде перемятых комков и кусков грунта — при шнековом). Эта качественная характеристика существенно влияет на точность фиксации границ между слоями грунта.

4.9. Под представительностью понимается возможность достаточно полного и точного описания по керну текстурных и структурных особенностей грунта в массиве.

В качестве меры представительности может служить условная точность визуальной оценки природных свойств грунта в массиве по керну, полученному при бурении.

Точность оценки природных свойств грунта может быть выражена отношением

$$M_{\text{пр}} = \frac{C}{\bar{X}_{\text{св}}}$$

где C — истинное свойство грунта в массиве, выражаемое в различных показателях в зависимости от характера свойства;

$\bar{X}_{\text{св}}$ — среднеарифметическое значение количественной оценки свойств грунта по керну,

$$\bar{X}_{\text{св}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(x_i — индивидуальное значение количественной оценки свойств грунта по керну; n — число наблюдений).

4.10. Дополнительной мерой, характеризующей возможный разброс индивидуальных значений свойств, является среднеквадратичное отклонение σ , которое также необходимо учитывать при оценке представительности описания разреза.

4.11. Представительность описания разреза определяется в первую очередь достаточным объемом грунта в получаемом при бурении керне, который зависит от диаметра бурения. Количественные оценки представительности могут быть получены путем постановки натуральных наблюдений и с помощью физического моделирования.

4.12. Отбор образцов грунта ненарушенной структуры (монолитов) для определения физико-механических свойств грунтов является одной из важнейших задач инженерно-геологического опробования, вследствие чего возможность отбора монолитов при использовании того или иного способа проходки буровых скважин представляет существенный фактор, определяющий эффективность способа бурения.

Отбор монолитов из буровых скважин в зависимости от свойств грунтов производят грунтоносами, отличающимися конструктивными особенностями и способом погружения. В связи с этим буровая установка, используемая на бурении скважин тем или иным способом, должна обеспечивать оптимальные режимы погружения грунтоноса, в свою очередь обеспечивающие качественный отбор монолитов.

Под возможностью качественного отбора монолитов при использовании того или иного способа бурения понимается возможность способа обеспечить технологические приемы отбора монолитов из различных по своим физико-механическим свойствам грунтов, в соответствии с требованиями ГОСТ 12071—72.

4.13. Инженерно-геологическая информация о свойствах грунтов и строении исследуемого разреза может быть получена также с помощью полевых опытных работ, выполняемых в буровых скважинах, в связи с чем бурение следует производить с использованием таких способов и технологии, которые обеспечивают качественное проведение в буровых скважинах опытных работ, обеспечивающее точность получаемых данных.

Под возможностью качественного проведения опытных работ в буровых скважинах понимается возможность способа обеспечить проходку скважин необходимого в зависимости от вида опытных работ диаметра и глубины. При этом технология бурения должна обеспечить получение скважины с соблюдением требований, предъявляемых к ним характером последующих опытных работ.

4.14. Техническую эффективность способа бурения рекомендуют оценивать производительностью, универсальностью способа, транспортабельностью бурового оборудования, реализующего способ бурения, энергоемкостью и металлоемкостью этого оборудования.

4.15. Производительность способа бурения в первую очередь определяет его техническую эффективность.

Объективным критерием для сравнения способов бурения по производительности могут служить достигнутая среднесменная производительность и выработка на установку в год (при использовании рассматриваемого способа). Кроме того, вспомогательными критериями оценки способов бурения по производительности могут служить механическая и рейсовая скорости бурения, а также данные

о распределении затрат времени на производство отдельных операций в процессе бурения.

Величина рейсовой скорости и ее изменение под влиянием различных внешних факторов могут характеризовать технологические возможности способа в данных условиях, поскольку отражают различные стороны процесса бурения скважины.

Баланс затрат рабочего времени при бурении скважин позволяет судить о специфике отдельного способа бурения и особенностях оборудования.

4.16. Универсальность способа бурения следует оценивать по возможности его использования для бурения скважин различных диаметров и глубин в разнообразных грунтах, отличающихся физико-механическими свойствами, т. е. технологическими возможностями способа.

Технологические возможности различных способов бурения следует рассматривать применительно к группам пород, объединяемых определенными структурными и текстурными особенностями и физико-механическими свойствами, а также в зависимости от диаметра и глубины бурения, что определяется назначением скважины.

4.17. Транспортability оборудования, реализующего тот или иной способ бурения, оказывает существенное влияние на возможность и эффективность его использования в зависимости от характера условий производства работ.

4.18. Энергоемкость и металлоемкость бурового оборудования, реализующего различные способы бурения, целесообразно оценивать по двум значениям: абсолютному (конкретной величине приводной мощности и веса станка для бурения данным способом) и относительному (мощности или весу, отнесенному к 1 м производительности).

Абсолютные значения энергоемкости и металлоемкости имеют значение при выборе бурового станка для бурения данным способом, а относительные значения — для сопоставления этих показателей по различным способам бурения.

4.19. Экономическая эффективность способа бурения инженерно-геологических скважин является важным фактором оценки эффективности способа бурения. Очевидно, что при прочих равных условиях (особенно в части инженерно-геологической информативности) применяться должны способы, обладающие большей экономической эффективностью.

Экономическая эффективность способов бурения может определяться соотношением затрат, которые необходимо произвести к достигнутой производительности того или иного способа бурения. Для сопоставления различных способов бурения по экономической эффективности можно использовать величину условной себестоимости станко-смены, в которой учитываются лишь нормируемые затраты, необходимые для обеспечения процесса бурения.

Стоимость станко-смены следует определять затратами, которые обеспечивают процесс бурения, условиями (инженерно-геологическими, географическими) производства работ и их организацией, зарплатой инженерно-технических работников (основная и дополнительная), материалами, амортизацией, износом, услугами, транспортом и ремонтом.

**ПРИМЕР ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБА БУРЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН
В ГЕОЛОГО-ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ
ВЕРХНЕГО ПОВОЛЖЬЯ**

1. Оценка точности

Работы по оценке точности способов бурения выполнялись по следующей методике: на заранее выбранной площадке проходились шурфы с весьма точным и тщательным описанием геологического разреза по каждому шурфу.

Выделение слоев и контактов производилось по ясно выраженным не вызывающим сомнения признакам (литологическим, генетическим, по изменению окраски грунтов). Геологические разрезы по шурфам рассматривались в качестве эталонных. В непосредственной близости от каждого шурфа проходились скважины различными способами. Глубина скважин соответствовала глубине шурфа. По керну, извлекаемому в процессе бурения, велось описание разрезов и выделение слоев. Для описания скважин, проходимых различными способами, привлекались разные техники-геологи, ранее незнакомые с исследуемым геологическим разрезом, примерно равной квалификации.

Экспериментальные работы проводились в районе городов Иванова и Костромы. В районе Иванова под почвенно-растительным слоем мощностью 0,3—0,6 м залегают покровые безвалунные суглинки, которые на глубине 1,05—1,45 м подстилаются мелкими среднеплотными маловлажными песками. В толще песков отмечены отдельные маломощные (0,10—0,25 м) прослой суглинков. С глубины 2—2,75 м вскрыты валунные суглинки, которые прослежены до глубины 6—7 м. В толще валунных суглинков красновато-бурого цвета четко прослеживается слой их буровато-серых разностей. В нижней части разреза отмечены прослойки мелкого песка мощностью 0,05—0,15 м. Число выделенных слоев в одной выработке колеблется от 6 до 12. Грунтовые воды не вскрыты.

Участок, расположенный в районе Костромы, характеризуется большей пестротой разреза (отмечено большее число слоев), кроме того, отмечено наличие нижней морены. Нижние слои песчаных грунтов водонасыщены.

Скважины бурились вибрационным, ударно-канатным кольцевым забоем (забивным и клюющим), колонковым, медленновращательным, шнековым рейсовым и шнековым поточным способами.

Проходка шурфов осуществлялась механическим вращательным способом с помощью буровой установки УГБ-50А. В качестве накопника использовался шнековый бур диаметром 650 мм.

Проходка скважин вибрационным способом осуществлялась агрегатами АВВ-1М и АВВ-2М. Применялись виброннды диаметром 108 и 146 мм. Длина рейса составляла 0,5; 1 и 1,5 м. Ударно-канатное бурение кольцевым забоем производилось забивным и «клюю-

щим» способами установкой УБП-15М. Диаметр забивного стакана 127 мм. Длина рейса колебалась от 0,3 до 0,5 м. Все виды вращательного бурения осуществлялись установкой УГБ-50А при скорости вращения 70 об/мин. Колонковое бурение производилось «всухую». Применялась коронка типа С диаметром 93 мм. Длина рейса не превышала 0,5 м. При медленновращательном бурении использовались ложковые и спиральные буры диаметром 146 мм. Длина рейса составляла 0,2—0,75 м. При шнековом бурении применялись шнеки диаметром 180 мм. В качестве породоразрушающего наконечника использовались трехперные долота конструкции СКБ МГиОН. При рейсовом бурении углубка за рейс составляла 1,5 м.

При установлении границ между слоями грунта по керну учитывалось, что они могут оказаться смещенными вверх или вниз относительно их истинного положения, а также пропущены (пропуск отдельных слов). Смещение границы связано с технологическими особенностями способа бурения, а также с влиянием множества случайных неконтролируемых факторов (например, ошибки геологов в установлении этой границы). Ошибки, связанные со способом бурения, являются закономерными, т. е. обусловленными постоянно действующими факторами. Ошибки, обусловленные неконтролируемыми факторами, являются случайными.

При определении точности фиксации положения слоев грунта необходимо учитывать также соотношения слоев грунта по их плотности.

Были выделены три случая:

I — верхний слой грунта более плотен, чем нижний;

II — плотность обоих слоев одинакова;

III — верхний слой грунта менее плотен, чем нижний.

Описание разреза велось по общепринятой методике по извлекаемому керну. (Шнековое поточное бурение документировалось по методике, изложенной в работе Башкатова Д. Н. и Олоновского Ю. А. Вращательное шнековое бурение геологоразведочных скважин. «Недра», М., 1968).

Величина индивидуальной ошибки при отбивке границы между слоями вычислялась как разность между глубиной ее залегания, измеренной в шурфе и определенной по данным бурения. Положительное значение ошибки свидетельствовало о смещении глубины залегания этой границы вверх, отрицательное — о смещении вниз. Полученные значения ошибок рассматривались как случайные величины. Отработка и анализ значений ошибок производился для различных случаев соотношения слоев по плотности для каждого из исследуемых способов бурения.

Результаты обработки материалов приведены в табл. 1. Из нее следует, что все способы бурения для случая I соотношения слоев по плотности смещают границу между слоями вниз. Величина этого смещения для различных способов различна. Для вибрационного бурения она минимальна, для медленновращательного — максимальна. Среднеквадратичное отклонение ошибки также минимально при вибрационном бурении. Существенное возрастание отклонения наблюдается для всех других способов бурения и особенно шнекового.

Для случая II имеют место как отрицательные, так и положительные значения ошибок. Но в этом случае отмечается увеличение среднеквадратичного отклонения ошибки от вибрационного к шнековому способу бурения.

Таблица 1

Значения количественных характеристик точности фиксации положения слоев
в геологическом разрезе различными способами бурения

Способы бурения	Состояние извлекаемого грунта	Случай соотношения слоев по плотности	Объем выборки	Показатели точности фиксации положений контактов		Показатель неполноты отражения разреза $K_{\Pi} (K_{\Pi})$ % $\left(\frac{1}{m}\right)$	Средняя мощность одного пропущенного слоя, м	Предлагаемая градация способов бурения по точности
				\bar{X} , м	σ , м			
1	2	3	4	5	6	7	8	9 м
Вибрационный	Керн в виде столбика грунта	I	42	-0,03	$\pm 0,11$	—	—	Высокая $(\bar{x} + \sigma)$ $< 0,25$; $K_{\Pi} < 10\%$
		II	25	+0,03	$\pm 0,12$	5	0,10	
		III	54	+0,01	$\pm 0,10$	(0,05)	—	
Ударно-канатный кольцевым забоем (забивной)		I	16	-0,11	$\pm 0,19$	—	—	Средняя $(\bar{x} + \sigma) =$ $= 0,25 - 0,50$ м; $K_{\Pi} 10 - 20\%$
		II	13	-0,07	$\pm 0,23$	13	0,18	
		III	20	-0,06	$\pm 0,18$	(0,17)	—	
Ударно-канатный кольцевым забоем («клюющий»)		I	6	-0,09	$\pm 0,22$	—	—	Средняя $(\bar{x} \pm \sigma) =$ $= 0,25 \div 0,50$ м; $K_{\Pi} = 10 - 20\%$
		II	9	-0,04	$\pm 0,15$	20	—	
		III	9	-0,01	$\pm 0,31$	—	0,17	

Способы бурения	Состояние извлекаемого грунта	Случай соотношения слоев по плотности	Объем выборки	Показатели точности фиксации положения контактов		Показатель неполноты отражения разреза $K_{\Pi} (K)_{\Pi}$ % $\left(\frac{1}{m}\right)$	Средняя мощность одного пропущенного слоя, м	Предлагаемая градация способов бурения по точности
				\bar{x} , м	σ , м			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Колонковый «всухую»	Керн в виде столбика грунта	I	14	-0,06	$\pm 0,22$	— 14 (0,19)	— 0,22 —	—
		II	13	+0,09	$\pm 0,20$			
		III	20	-0,03	$\pm 0,24$			
Медленновращательный	Комки грунта с нарушенным сложенным	I	10	-0,13	$\pm 0,27$	— 28 (0,38)	— 0,30 —	Низкая $(\bar{x} \pm \sigma) =$ $= 0,50-0,75$ м; $K_{\Pi} = 20-30\%$
		II	21	+0,01	$\pm 0,36$			
		III	16	10,17	$\pm 0,38$			
Шнековый рейсовый	Комки грунта с нарушенным природным сложенным	I	16	-0,10	$\pm 0,38$	— 20 (0,20)	— 0,20 —	Низкая $(\bar{x} \pm \sigma) =$ $= 0,50-0,75$ м; $K_{\Pi} = 20-30\%$
		II	23	+0,20	$\pm 0,41$			
		III	21	+0,13	$\pm 0,33$			
Шнековый поточный	Комки грунта с нарушенным природным сложенным	I	12	-0,24 -0,08 +0,19	$\pm 0,45$	— 38 (0,51)	— 0,38 —	Весьма низкая $(\bar{x} + \sigma) >$ $> 0,75$ м; $K_{\Pi} > 30\%$
		II	16		$\pm 0,66$			
		III	18		$\pm 0,47$			

Характерным является распределение показателя неполноты отражения разреза K_n . Этот показатель увеличивается от 3,2% для вибрационного способа до 38,5% для шнекового поточного способа. Вместе с увеличением показателя неполноты отражения разреза возрастает и средняя мощность одного пропущенного слоя соответственно от 0,08 до 0,39 м. Медленноповоротный способ по этим двум показателям оказался менее качественным, чем шнековый рейсовый способ, хотя имеющаяся разница невелика.

Таким образом, группа способов бурения, дающих керн в виде столбика грунта, характеризуется более низкими значениями показателей точности, что свидетельствует о более высокой точности отражения разреза этими способами.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для указанных районов из всех применяемых в настоящее время способов проходки инженерно-геологических скважин наиболее высокой точностью обладает вибрационный способ. Ударно-канатный и колонковый способы по точности близки между собой, однако оба они уступают вибрационному. Несколько более низкие значения среднеквадратичных ошибок и показателя неполноты отражения разреза дают основание считать, что ударно-канатный способ более точен, чем колонковый.

Медленноповоротное и шнековое рейсовое бурение по точности существенно уступает вибрационному, ударно-канатному кольцевым забоем и колонковому способам. Более предпочтительным из этих двух способов является медленноповоротный.

Шнековый поточный способ даже при соблюдении всех необходимых требований к правилам геологической документации обеспечивает весьма низкую точность отражения геологического разреза.

2. Изменения показателей

физико-механических свойств грунта в монолитах, отбираемых из скважин забивным и вибрационным погружением грунтоносов

Содержание исследований заключалось в сопоставлении показателей физико-механических свойств в монолитах, отобранных забивным и вибрационным способами с эталонными значениями, определенными в монолитах, отобранных из шурфов ручным вырезанием. Исследования были поставлены на двух широко развитых в этом районе разновидностях грунтов — покровных и моренных суглинках. Покровные суглинки характеризуются числом пластичности 13—16 и коэффициентом пористости в пределах 0,6—0,8. Эти грунты, как правило, не содержат включений крупнообломочного материала. Моренные суглинки имеют число пластичности в пределах 7—12 и коэффициент пористости — 0,4—0,6. В моренных суглинках содержатся включения крупнообломочного материала до 10—15%. Показатель консистенции суглинков не превышает 0,25.

Экспериментальные работы выполнялись в районе г. Иванова. Выбирались площадки, на которых, по предварительным данным, имели развитие исследуемые грунты. Затем на каждой из выбранных площадок бурились скважины, по которым выяснялось геолого-литологическое строение разреза до глубины 6—8 м. Были выбраны и изучены две площадки. На каждой из площадок намечали контур шурфа сечением 2×2 м и на расстоянии 0,5—0,7 м от него бури-

лись скважины, из которых через 0,5 м отбирались монолиты. Затем вручную отрывали шурф. По мере проходки из забоя на тех же глубинах, что и в скважинах ручным вырезанием, отбирались монолиты сечением $15 \times 15 \times 15$ см.

Упаковка, транспортирование и хранение запарафинированных монолитов грунтов, отобранных из скважин и шурфов, производились в соответствии с ГОСТ 12071—72 и Рекомендациями по отбору, упаковке, транспортированию и хранению образцов.

Для отбора монолитов использовали серийно выпускаемый грунтонос ГК-3 с внутренним диаметром 108 мм. При забивном способе отбора применялась установка УВП-15М, при вибрационном — АВВ-1М. Зачистка забоя скважин перед отбором монолитов осуществлялась забивными стаканами и виброзондами.

Лабораторные определения показателей физико-механических свойств выполнялись согласно действующим стандартам и инструкциям. Сдвиговые испытания проводились по методике «быстрого» сдвига.

При обработке полученных данных выделялись пары монолитов (эталонных и отобранных забивным или вибрационным способом), которые удовлетворяли условиям приблизительной идентичности. Для сопоставлений брались лишь телары монолитов, у которых пределы пластичности и число пластичности отличались не более чем на 4% (т. е. на двойную точность лабораторного определения названных показателей). Всего было отобрано 25 пар монолитов для забивного и 28 — для вибрационного способа.

При дальнейшей обработке вычислялись средние значения показателей и их среднеквадратичные отклонения, определенные по монолитам, отобранным из шурфов (эталонные значения), и соответствующие им парам монолитов, отобранных из скважин, отдельно для покровных и моренных суглинков.

Анализ полученных данных свидетельствует, что показатели физических свойств в монолитах, отобранных из скважин забивным и вибрационным погружениями грунтоносов, отличаются от своих эталонных значений на величину, в основном не превышающую точность их лабораторного определения, хотя при этом отмечается некоторое увеличение объемного веса для обеих разновидностей грунтов. Показатели прочностных свойств, определенные в монолитах, отобранных грунтоносами, отличаются от их эталонных значений несущественно и при этом также отмечается некоторое увеличение удельного сцепления. Величина модуля деформации несколько занижена в монолитах из скважин по сравнению с монолитами из шурфов.

3. Оценка производительности способов бурения

Для оценки производительности различных способов бурения по механической и рейсовой скорости бурения был проведен хронометраж бурения около 100 скважин глубиной до 10 м. На основании этих исследований было установлено, что наиболее высокой производительностью обладает вибрационное бурение, несколько уступает ему шнековое, существенно меньшая производительность у медленно-вращательного бурения. Ударно-канатный кольцевым забоем и колонковый «всухую» способы характеризуются в целом близкими значениями по производительности бурения.

4. Расчет экономической эффективности способов бурения

Экономическая эффективность (т. е. себестоимость 1 м бурения) определялась для вибрационного, колонкового, ударно-канатного кольцевым забоем, шнекового и ручного ударно-вращательного способов бурения. В качестве станков, на которых реализуются эти способы бурения, приняты наиболее распространенные на изысканиях установки: АВВ-2М, СБУД-150-ЗИВ, УГБ-50А, УБП-15М и комплект ручного бурения.

Таблица 2

Расчет условной себестоимости станко-смены (комплектно) для различных способов бурения, руб.

Наименование расходов	Вибробурение АВВ-2М	Колонковое бурение СБУД-150-ЗИВ	Ударно-канатное бурение УБП-15М	Шнековое бурение УГБ-50М	Ручное ударно-вращательное бурение
1	2	3	4	5	6
Основная зарплата ИТР и рабочих	16,21	18,62	11,18	16,21	14,17
Дополнительная зарплата ИТР и рабочих	1,10	1,19	0,76	1,10	0,88
Отчисления на социальное страхование	0,83	0,95	0,58	0,83	0,72
Зарплата, всего	18,14	20,76	12,52	18,14	15,77
Материалы, всего	2,78	8,57	1,59	2,01	0,29
В том числе:					
истирающие	—	4,63	—	—	—
колонковые и шламовые трубы	—	0,41	—	—	—
электроэнергия	1,48	—	—	—	—
бензин	0,94	1,89	0,74	1,58	—
смазочные	0,16	0,32	0,16	0,24	—
глина	—	0,47	—	—	—
прочие	0,19	0,85	0,69	0,19	0,29
Амортизация	6,41	4,24	2,99	4,74	0,15
Износ	1,71	1,46	1,97	1,71	0,71
Услуги	0,90	1,87	1,04	0,90	0,24
Транспорт	0,17	0,17	2,43	0,17	4,36
Ремонт	4,52	2,96	1,13	2,77	0,43
Всего прямые затраты	34,63	40,03	23,67	30,44	31,95
Накладные расходы	3,59	4,12	2,48	3,59	3,12
Плановые накопления	0,45	0,52	0,32	0,45	0,39
Итого стоимость 1 станко-смены	38,67	44,67	24,47	34,48	25,46

Стоимость станко-смены определялась необходимыми затратами, которые обеспечивают процесс бурения, условиями (инженерно-геологическими, географическими) производства работ и их организацией: зарплата инженерно-технических работников (основная и дополнительная), материалы, амортизация, износ, услуги, транспорт и ремонт. В себестоимость смены ручного бурения дополнительно включены затраты транспорта на перевозку бурового оборудования из расчета один автомобиль на два комплекта. Затраты на ремонт условно приняты от себестоимости станко-смены в следующих размерах: УБП-10М — 5%; АБВ-2М — 15%; СБУД-150-ЗИВ — 8%; УГБ-50А — 10%; ручной комплект — 2%.

Накладные расходы и плановые накопления составляют соответственно 19,8 и 2,5% зарплаты.

Все расчеты выполнены для следующих условий; благоприятный период — работы производятся без выплаты полевого довольствия, диаметр бурения до 160 мм, глубина скважин до 20 м, вторая категория грунтов, первый пояс цен (средняя полоса европейской части СССР). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Себестоимость 1 м бурения определена с учетом среднесменной производительности и приведена в табл. 3.

Таблица 3

Расчет экономической эффективности и условной себестоимости 1 м бурения различными способами

	Вибробу- рение АБВ-2М	Колонко- вое бу- рение СБУД- 150-ЗИВ	Ударно- канатное кольцевым забоем УБП-15М	Шнеко- вое бу- рение УГБ-50А	Ручное ударно- враща- тельное
Условная себестоим- ность 1 станко-смены, руб.	38,67	44,67	26,47	34,48	25,46
Средняя производи- тельность, м/см	33,9	12,7	14	19,3	13,1
Условная себестоим- ность 1 м, руб.	1,12	3,51	1,9	1,79	1,95
Отпускная цена 1 м, руб.	1,7	8,29	7,01	1,02	6,08

Как следует из табл. 3, условная себестоимость 1 м бурения имеет минимальное значение для вибрационного бурения. Себестоимости ударно-канатного, шнекового и ручного ударно-вращательного бурения в целом близки между собой. Достаточно высокой себестоимостью 1 м бурения характеризуется колонковое бурение. По условной себестоимости 1 станко-смены наиболее низкие значения у ударно-канатного и ручного ударно-вращательного бурения.

5. Рациональные области применения различных способов бурения в условиях Верхне-Волжского треста инженерно-строительных изысканий

1. Рациональная область применения вибрационного бурения определяется его высокой точностью и производительностью при

бурении инженерно-геологических скважин глубиной до 15 м в песчано-глинистых грунтах при отсутствии в них значительных включений крупнообломочного материала.

2. Ударно-канатный кольцевым забоем способ бурения обеспечивает возможность получения точной геологической документации. Область его рационального использования — бурение скважин на глубину до 30 м во всех разновидностях нескальных грунтов.

3. Медленновращательный способ, обеспечивающий низкую точность геологической документации и характеризующийся низкой производительностью при бурении песчано-глинистых грунтов на глубину до 30 м, в значительной степени может быть заменен вибрационным и ударно-канатным способами. Область использования медленновращательного бурения может быть расширена за счет использования его для проходки скважин большого диаметра (от 500 до 850 мм), глубиной до 10 м.

4. Шнековое рейсовое бурение (рейсами не более 1—1,5 м) обеспечивает низкую точность геологической документации, но обладает весьма значительной производительностью. Область его рационального использования определяется простыми геологическими разрезами при изысканиях на ранних этапах для бурения зондировочных скважин с целью получения общих сведений о геологическом строении района.

5. Для использования в условиях Верхнего Поволжья не рекомендуется шнековый поточный способ.



**МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»**

Л. И. Кралина

СООРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ, ГАЗОВЫХ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Методические указания
**по выполнению курсового проекта
для студентов специальности
21.0503 Технология и техника разведки МПИ
очного и заочного обучения**

**Екатеринбург
2020**

Оглавление

1. Общие положения	3
2. Методические указания по разработке основных разделов курсового проекта по технологии бурения на нефть и газ	3
Введение	3
2.1. Выбор конструкции скважин и буровой установки	4
2.2. Расчет обсадных труб	5
2.3. Расчет цементирования скважин	5
2.4. Испытание обсадных колонн на герметичность	6
2.5. Выбор способа бурения скважины	6
2.6. Технология бурения	7
2.7. Вскрытие продуктивных пластов и освоение скважины	7
3. Методические указания по разработке основных разделов курсового проекта по технологии бурения скважин на воду	8
Введение	8
3.1. Гидрогеологическая характеристика разреза	8
3.2. Выбор и характеристика средств откачки	9
3.3. Выбор и расчет фильтра	9
3.4. Выбор способа бурения и расчет конструкции скважины	11
3.5. Технология бурения	11
3.6. Выбор бурового оборудования и инструмента	12
3.7. Вскрытие и освоение водоносного пласта	13
3.8. Техника безопасности и охрана окружающей среды	13
Список литературы	14

Приложения

Приложение 1. Пример оформления титульного листа курсового проекта	15
Приложение 2. Задание на курсовой проект по технологии бурения на нефть и газ	16
Приложение 3. Геологические разрезы скважин на нефть и газ	18
Приложение 4. Пример оформления геолого-технического наряда по технологии бурения на воду	20
Приложение 5. Пример оформления геолого-технического наряда по технологии бурения на нефть и газ	21

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Целью курсового проекта по дисциплине "Сооружение нефтяных, газовых и геотехнологических скважин" является закрепление навыков применения теоретических знаний для решения технико-технологических задач, возникающих при проектировании скважин на нефть, газ или воду.

Заданием на курсовой проект предусматривается выполнение технического проекта на сооружение скважины на нефть, газ или воду в конкретных геологических условиях.

Проект должен носить конкретный характер. Следует избегать общих рассуждений и описания стандартного оборудования и инструмента. Вместе с тем выбранные инженерные решения необходимо обосновать примерами из практики, техническими и экономическими расчетами. Проект разрабатывается с учетом современных достижений техники и технологии бурения.

В расчетной части проекта должна быть сформулирована задача и определены исходные данные. Затем выбирается расчетная схема и приводятся расчетные формулы. При этом необходимо сделать ссылку на источник формулы, раскрыть ее содержание и указать размерности. Результаты расчетов необходимо сводить в таблицы и графики.

Пояснительная записка пишется на бумаге формата 210×297 мм и брошюруется в следующей последовательности: титульный лист (приложение 1); задание на проектирование; содержание; введение; основные разделы, включившие описание, технические расчеты и пояснения; выводы; список использованной литературы; приложения»

Геолого-технический наряд оформляется на листе ватмана формата А3.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ОСНОВНЫХ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ НА НЕФТЬ И ГАЗ

Задание по курсовому проекту выдается индивидуально каждому студенту согласно приложениям 2 и 3.

Курсовой проект должен содержать следующие основные разделы:

Введение

1. Выбор конструкции скважины и буровой установки.
2. Расчет обсадных труб.
3. Расчет цементирования скважины.
4. Испытание обсадных колонн на герметичность.
5. Выбор способа бурения скважины.
6. Технология бурения.
7. Вскрытие продуктивных пластов.
8. Мероприятия по технике безопасности и охране окружающей среды.
9. Расчет расхода основных материалов на сооружение скважины.

Введение

Во введении формулируется назначение проектируемой скважины. Приводятся общие сведения о районе работ, даются его краткая физико-географическая и экономическая характеристики, оцениваются условия производства работ по бурению и оборудованию скважин, отмечается обеспеченность электроэнергией, топливом, водой, глиной и т. д.

2.1. Выбор конструкции скважины и буровой установки

Конструкция скважины состоит из ствола, пробуренного в горных породах, нескольких обсадных колонн и тампонажного камня, заполняющего цементом полностью или частично пространство между колоннами и стенками ствола. Конструкцию скважины характеризуют число спущенных в нее обсадных колонн, их диаметры и длина, диаметры ствола под каждую колонну, местоположение интервалов цементирования.

Конструкция скважины выбирается на основании детального изучения геологического разреза. Особое внимание уделяется изучению зон, в которых возможны осложнения (обвалы стенок скважины, поглощения промывочной жидкости, проявления высоконапорных пластов и т. д.).

Выбор размеров обсадных колонн и диаметров ствола на отдельных интервалах скважины осуществляют методом снизу вверх, т. е. начиная с выбора эксплуатационной колонны.

Диаметр эксплуатационной колонны выбирают в зависимости от вида полезного ископаемого и ее дебита. Ниже показаны примерные сочетания диаметров эксплуатационных колонн и дебитов применяемых на практике скважин (табл. 1, 2).

Таблица 1

Нефтяные скважины

Дебит, м ³ /сут.	40	40-100	100-150	150-300	300
Примерный диаметр эксплуатационной колонны, мм	114	127-140	140-146	168-178	178-194

Таблица 2

Газовые скважины

Дебит, тыс.м ³ /сут.	75	250	500	1000	5000
Примерный диаметр эксплуатационной колонны, мм	114	114-146	146-148	168-219	219-273

После выбора диаметра эксплуатационной колонны определяют количество обсадных колонн и глубину их спуска. Число обсадных колонн определяют на основании анализа геологического разреза в месте заложения скважины.

Определив число обсадных колонн и глубину их спуска, приступают к согласованию расчетным путем нормализованных диаметров обсадных колонн и породоразрушающего инструмента. Исходным для расчета является диаметр эксплуатационной колонны.

Таким образом, порядок проектирования конструкции скважины сводится к следующему:

- выбирают диаметр эксплуатационной колонны;
- решают вопрос о числе и глубине спуска технических (промежуточных) колонн;
- определяют глубину спуска кондуктора и шахтного направления;
- выбирают диаметр долота для бурения скважины (ствола) под эксплуатационную колонну;
- определяют диаметр технической колонны;
- выбирают диаметр долота для бурения скважины под техническую колонну;
- определяют диаметр кондуктора;
- выбирают диаметр долота для бурения скважины под кондуктор;
- определяют диаметр шахтного направления;
- определяют интервалы цементирования кондуктора, технической и эксплуатационных колонн.

При выборе типа буровой установки в качестве исходного условия принимают глубину бурения, а затем проверяют, подходит ли она по нагрузке на крюке. Расчетный вес самой тяжелой обсадной колонны или нагрузка, возможная при ликвидации прихвата буровой колонны, не должны превышать допустимую нагрузку на крюке.

Выбранная буровая установка должна обладать высокими технико-эксплуатационными характеристиками и в полной мере соответствовать условиям бурения и транспортирования на точку.

2.2. Расчет обсадных труб

Обсадные трубы применяют для компоновки шахтных направлений, кондукторов, технических (промежуточных) и эксплуатационных колонн. В зависимости от назначения колонны изменяются и условия работы обсадных труб. В наиболее тяжелых условиях находится эксплуатационная колонна. При спуске, цементировании и последующей работе в колонне возникают ряд напряжений, главнейшими из которых являются:

- растяжение от собственного веса;
- смятие от действия столба промывочной жидкости, находящейся в затрубном пространстве, и от давления обрушающихся горных пород;
- внутреннее давление, возникающее при цементировании или фонтанировании скважины;
- сжатие, возникающее при частичной разгрузке обсадной колонны вследствие установки ее на забой скважины;
- температурные напряжения, возникающие в эксплуатационной колонне.

Многолетняя практика свидетельствует, что наиболее вероятным нарушением прочности обсадных колонн от растягивающих усилий является расстройство муфтовых соединений обсадных труб.

Величина растягивающих усилий и внешнего сминающего давления изменяется по длине эксплуатационной колонны. Стягивающие усилия в момент спуска колонны достигают наибольшего значения в самой верхней трубе (у устья скважины), а наибольшее сминающее бывает в нижних трубах (у забоя) в процессе эксплуатации по мере снижения уровня жидкости в колонне. Одновременно на самые нижние трубы, расположенные в фильтровой зоне скважины, может действовать высокое пластовое давление, достигающее значительной величины в процессе эксплуатации. Таким образом, эксплуатационная колонна для нефтяных скважин рассчитывается на смятие от внешнего гидростатического столба жидкости и на страгивание (расстройство) резьбовых соединений, а для газовых скважин – дополнительно и на внутреннее избыточное давление соединений труб.

2.3. Расчет цементирования скважин

Цементирование включает пять основных видов работ: приготовление тампонажного раствора, закачку его в скважину, подачу (продавку) тампонажного раствора в затрубное пространство, ожидание затвердения закачанного материала (ОЗЦ) и проверку качества цементировочных работ.

Расчет цементирования является инженерным обоснованием выбора технических средств и их количества и проверкой реализуемости их на практике принятой технологии. На основании расчетов уточняют изменения в режиме подачи тампонажного раствора в затрубное пространство, а также определяют необходимое количество исходных материалов для приготовления нужного объема тампонажного раствора, продолжительность отдельных операций и суммарную всех работ по цементированию.

Для выполнения расчетов необходимы следующие исходные данные: глубина спуска цементруемой колонны; диаметр открытого ствола скважины; размеры цементруемой обсадной колонны (ее наружный и внутренний диаметр, длина); высота

подъема цементного раствора в затрубном пространстве; высота цементного стакана внутри цементируемой колонны; глубина спуска предшествующей колонны и ее внутренний диаметр, плотность промывочной жидкости в стволе скважины; высота буферной жидкости за колонной и ее плотность; плотность сухого цемента и в насыпной массе.

Весь расчет цементирование можно подразделить на три основные части: определение расхода материалов, режима работы цементировочных агрегатов и цементосмесительных машин и продолжительности работ по цементированию обсадной колонны. В первой части определяют необходимый объем тампонажного раствора по объему цементируемого пространства за колонной и цементного стакана в колонне. Объем цементируемого пространства рассчитывают с учетом среднего фактического диаметра ствола скважины или коэффициента кавернозности для открытой части ствола.

По объему тампонажного раствора и известному содержанию компонентов определяют суммарный расход материалов, в том числе и объем воды для затворения. Подсчитывают объемы буферной и продавочной жидкостей.

Во второй части расчета определяют максимально допустимую скорость течения раствора в затрубном пространстве и, сопоставляя ее с критической скоростью, определяют режим его подачи.

Зная подачу раствора, определяют суммарные потери напора на разных этапах и по ним судят о давлении нагнетания на цементировочной головке. Давления нагнетания позволяют обоснованно выбрать тип цементировочного агрегата и режим его работы, а суммарная подача позволяет определить количество агрегатов. В числе агрегатов необходимо предусмотреть один резервный. По общему количеству сухих тампонажных материалов с учетом одновременно действующих цементировочных агрегатов определяют необходимое количество цементно-смесительных машин и режим их работы.

В третьей части по режимам подачи рассчитывают продолжительность работ по закачке тампонажного раствора в скважину и продавке его в затрубное пространство. При определении общей продолжительности работ учитывают резервное время около 15 мин. на навинчивание цементировочной головки после введения нижней пробки в обсадную колонну. Общая расчетная продолжительность работ не должна превышать 0,75 от времени начала схватывания тампонажного раствора.

2.4. Испытание обсадных колонн на герметичность

Данный раздел курсового проекта носит описательный характер. Методы испытаний обсадных колонн приведены в работах (метод опрессовки или понижение уровня жидкости).

2.5. Выбор способа бурения скважины

Принятие решения об использовании того или иного способа бурения - один из ответственных этапов при проектировании технологии проходки скважины, так как в дальнейшем выбранный способ определяет многие технические решения - режимы бурения, гидравлическую программу, буровой инструмент, тип буровой установки и как следствие технологию крепления скважины.

В качестве исходной информации для принятия решения о способе бурения используют следующие данные: глубину бурения и забойную температуру, профиль ствола и диаметр долот, тип породоразрушающего инструмента и бурового раствора.

На основании этой информации в соответствии с табл. 3 может быть выбран способ бурения по интервалам или для всей скважины в целом.

Рекомендуемые области применения способов бурения

Геолого-технические условия бурения	Способ бурения		
	роторный	гидравлическими забойными двигателями	электробуром
Глубина бурения, м:			
3500	+	+	+
3500-4200	+	-	+
4200	+	-	-
Забойная температура, °С:			
140	+	+	+
140	+	-	-
Диаметры долот, мм:			
190	+	-	-
190	+	+	+
Профиль ствола скважины:			
вертикальный	+	+	+
наклонный	-	+	+
Породоразрушающий инструмент:			
2- и 3-лопастные долота и шарошечные типа М	+	-	-
Долота типов МС, МСЗ, С, СЗ, СТ, Т, ТЗ, ТК, ТКЗ, К и ОК	+	+	+
Долота истирающего типа и алмазные	-	+	+
Тип очистного агента:			
газы, пена	+	-	-
Буровые растворы плотностью, кг/м ³ :			
1000	+	-	+
1000	+	+	+

2.6. Технология бурения

В данном разделе выбирается тип породоразрушающего инструмента, вид очистных агентов и режимы бурения скважины в различных интервалах.

Тип породоразрушающего инструмента выбирают в зависимости от физико-механических свойств горных пород, глубины, вида и способа бурения.

Вид очистного агента (его компонентный состав) зависит главным образом от геологических условий бурения: пластового давления вскрытых скважиной горизонтов, устойчивости пород, слагающих эти горизонты, минералогического состава разбуриваемых пород, забойной температуры.

При роторном способе бурения рассчитывают следующие параметры режима бурения: осевую нагрузку на породоразрушающий инструмент, частоту вращения бурового снаряда и расход промывочной жидкости. В случае применения забойных двигателей определяются те же параметры режима бурения, а затем они уточняются с рабочими характеристиками забойных двигателей.

2.7. Вскрытие продуктивных пластов и освоение скважины

В данном разделе должны быть приведены вопросы вскрытия нефтегазоносных пластов и испытания скважины на продуктивность: обоснование выбора способа первичного вскрытия продуктивных пластов; выбор аппаратуры для опробования перспективных объектов в

процессе бурения, режимов и продолжительности работ по опробованию; выбор способа вторичного вскрытия и жидкости для заполнения эксплуатационной колонны в этот период, способа создания депрессии для вызова притока из пласта; выбор колонн насосно-компрессорных труб (НКТ); выбор оборудования для испытания скважин, режимов и продолжительности испытания; обоснование необходимости стимулирующего воздействия на испытываемые объекты.

На основании геологического задания, выбора бурового оборудования, конструкции скважины и разработанной технологии бурения составляют геолого-технический наряд на бурение скважины, форма которого приведена в приложении 5.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НА ВОДУ

Курсовой проект разрабатывается на основании фактических материалов, собранных студентом на производственной практике.

Эти материалы включают геологическую карту района производства работ, геологический разрез с указанием места заложения и профиля проектных скважин, гидрогеологическую характеристику разреза с подробными данными о всех водоносных горизонтах и ориентировочным проектным удельным дебитом каждого из них.

Курсовой проект должен содержать следующие основные разделы:

Введение.

1. Гидрогеологическая характеристика разреза.
2. Выбор и характеристика средств откачки.
3. Выбор и расчет фильтра.
4. Выбор способа бурения и расчет конструкции скважины.
5. Технология бурения скважины.
6. Выбор бурового оборудования и инструмента.
7. Вскрытие и освоение водоносного пласта.
8. Техника безопасности и охрана окружающей среды.

Список используемой литературы.

Приложения.

Введение

Во введении обосновывается назначение проектируемой скважины.

Приводятся общие сведения о районе работ, даются его краткая физико-географическая и экономическая характеристики, оцениваются условия производства работ по бурению и оборудованию скважин, отмечается обеспеченность электроэнергией, топливом, водой, глиной и т. д.

3.1. Гидрогеологическая характеристика разреза

Приводится описание литологического состава горных пород, указывается их мощность, физические свойства, категория буримости, дается характеристика коллекторских свойств пород водоносных горизонтов (трещиноватость, гранулометрический состав), величина дебита каждого водоносного горизонта и статический уровень подземных вод.

Затем приводится характеристика тектонических зон и указываются возможные осложнения при их бурении. Геологический разрез составляется в масштабе 1:200 или 1:500.

3.2. Выбор и характеристика средств откачки

В зависимости от целевого назначения скважины и ее дебита выбирается наиболее рациональный способ подъема воды из скважины. Выбор водоподъемной установки осуществляют с учетом следующих исходных данных:

- проектного дебита скважины;
- глубины установки водоподъемных средств;
- особых условий производства откачки, вызванных повышенной температурой, минерализацией или высоким загрязнением воды. При этом фактические производительность и напор выбранного водоподъемника должны быть равны или несколько больше проектных. Особое внимание уделяется размерам водоподъемника, особенно его диаметру, который влияет на выбор размера водоподъемных труб и, следовательно, на конструкцию скважины. Обычно необходимо выбирать водоподъемники с минимально возможными размерами рабочих органов, что упрощает и удешевляет конструкцию скважины.

Водоподъемные установки выбирают по справочникам на основании данных о проектном дебите и динамическом уровне откачки.

Эрлифты применяют на стадии испытания, освоения водоносных горизонтов и при откачке из разведочных скважин. Выбранная схема эрлифта должна быть рассчитана для определения основных его параметров: глубины погружения смесителя, удельного расхода воздуха и производительности эрлифта, диаметров водоподъемных и воздухопроводных труб.

3.3. Выбор и расчет фильтра

Производительность скважины в процессе откачки зависит от правильного выбора типа фильтра и от его геометрических размеров.

Тип, конструкцию фильтра выбирают в зависимости от характера пород (гранулометрического состава) водоносного горизонта, назначения скважины, ее производительности и глубины, агрессивности вод и ряда других факторов (табл. 4).

Таблица 4

Условия применения различных типов фильтров

Водосодержащие породы	Рекомендуемый тип фильтра	Характеристика фильтра
1	2	3
Скальные и полускальные устойчивые породы	Не рекомендуется	-
Полускальные, неустойчивые породы, щебенистые и галечниковые породы с преобладающей крупностью щебня и гальки от 20 до 100 мм (50 % по весу)	Трубчатые фильтры с круглой перфорацией Фильтры щелевые Стержневые фильтры	Скважность каркаса фильтра 20-25 %, диаметр круглых отверстий 15-25 мм. Щели: ширина 10-30 мм, длина 250-300 мм. Скважность 10-30 % Скважность до 60 %

1	2	3
Пески крупные с преобладанием частиц крупностью 1-2 мм (более 50 % по весу)	Трубчатые фильтры с щелевой перфорацией с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, штампованного стального листа или сетки квадратного плетения. Скважность штампованного листа 20-25 %. Стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, стального штампованного листа или сетки квадратного плетения; диаметр проволоки 2-4 мм, скважность стального листа 20-25 %	Скважность фильтра 30-50 %, ширина щели 10-30 мм. Расстояние между витками проволоки и диаметр отверстий в листе зависят от диаметра частиц породы. Скважность, зазор между витками и диаметр отверстия зависят от размера зерен породы
Пески средние с преобладанием частиц крупностью от 0,25 до 0,5 мм (более 60 % по весу)	Трубчатые и стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из сеток гладкого (галунного) плетения; сетка из латуни или нержавеющей стали. Трубчатые и стержневые фильтры с однослойной гравийной обсыпкой (гравийные фильтры); толщина обсыпки не менее 30-40 мм	Скважность каркаса фильтра 30-50 %, размер ячеек сетки зависит от крупности преобладающей фракции породы. Сортированный гравий с $K_n=1,5+3,0$
Пески различной зернистости при наличии устойчивой кровли	Бесфильтровые скважины	
Гравий и гравелистый песок с крупностью частиц от 1 до 10 мм и преобладанием частиц от 2 до 5 мм (более 50 % по весу)	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией, с водоприитоками. Стержневые фильтры с обмоткой проволокой из нержавеющей стали 3-4 мм или из нержавеющей листовой стали толщиной 0,8-1 мм, штампованной	Скважность от 25 до 70 %. Зазор между витками проволоки зависит от диаметра частиц породы или обсыпки. Скважность до 60 % Скважность 20-25 %
Пески мелкие с преобладанием частиц крупностью от 0,25 до 0,5 мм (более 50 % по весу)	Трубчатые и стержневые фильтры с одно-, двух- или трехслойной обсыпкой гравием (гравийные фильтры), фильтры ФКО	Сортированный гравий с $K_n=1,5-3,0$

Необходимые конструктивные размеры фильтра для конкретных условий откачки определяют расчетом.

Диаметр и длину рабочей части фильтра подбирают и рассчитывают с учетом дебита скважины, коэффициента фильтрации пород водоносного горизонта и его мощности. При этом необходимый диаметр фильтра уточняется исходя из диаметра выбранного водоподъемника, а точнее диаметра эксплуатационной колонны. При мощности водоносного горизонта, не превышающей 5 м, диаметр фильтра рассчитывают с учетом проектного дебита скважины, рабочей длины фильтра и коэффициента фильтрации пород. В данном случае длину рабочей части фильтра принимают равной мощности водоносного горизонта (5 м), а при мощности более 5 м рассчитывают на основании проектного дебита скважины и диаметра фильтра. Скважность фильтра выбирают с учетом характеристики пород водоносного горизонта. Она должна обеспечивать водопропускную способность фильтра с минимальным сопротивлением движению и с допустимой скоростью движения воды, которая не приводит к переносу частиц шлама в скважину.

При правильном выборе и расчете параметров фильтра его водопропускная способность должна быть равна или больше проектного дебита скважины.

3.4. Выбор способа бурения и расчет конструкции скважины

Выбор способа бурения скважин на воду производят с учетом гидрогеологических условий, проектной глубины скважины, ее целевого назначения, экономичности и качественных показателей по вскрытию и освоению водоносного горизонта.

В настоящее время применяют следующие способы бурения скважин на воду: роторный, колонковый, ударно-вращательный и канатно-ударный.

Роторный способ применяют при бурении разведочно-эксплуатационных и эксплуатационных скважин на воду в твердых, трещиноватых породах с промывкой водой; в мягких породах, а также в тектонических зонах сильно рассланцованных, перемятых пород с промывкой глинистым раствором. В районах с затрудненным водоснабжением (Крайний Север, Средняя Азия) роторное бурение целесообразно использовать с продувкой воздухом или применять пневмоударное бурение. Роторное бурение рекомендуют использовать при вскрытии глубокозалегающих водоносных горизонтов, и оно отличается более высокой производительностью и экономичностью по сравнению с другими способами.

Канатно-ударное бурение применяют для бурения разведочно-эксплуатационных, эксплуатационных и дренажных скважин большого диаметра (свыше 500 мм) при вскрытии низконапорных горизонтов. Оно отличается высокой металлоемкостью конструкции скважин и является более дорогостоящим по сравнению с роторным бурением. Канатно-ударный способ рекомендуется при бурении скважин глубиной до 150 м в породах осадочного комплекса, представленного средне- и крупнозернистыми песками, валунно-галечными отложениями, а также сильнотрещиноватыми и кавернозными породами, в которых использование роторного бурения весьма затруднительно.

Колонковый способ в основном применяют при бурении разведочных скважин на воду небольшого диаметра (до 200 мм) в породах различной крепости.

После выбора способа бурения проектируется конструкция скважины. При бурении скважин на воду выделяют следующие элементы конструкции скважин: кондуктор (направление), эксплуатационную колонну и фильтр. Устье скважины оборудуют направлением или кондуктором. Эксплуатационная колонна обеспечивает крепление ствола скважины, в ней устанавливают насос для подъема воды. В скважинах со сложным геологическим разрезом, в котором может встречаться несколько зон осложнений, устанавливают иногда промежуточную колонну, которая обычно следует после кондуктора. Выбор конструкции разведочно-эксплуатационной скважины необходимо начинать с определения типа водоподъемника и его диаметра, который обуславливает внутренний диаметр эксплуатационной колонны.

При проектировании конструкции скважины необходимо учитывать специфику и возможности выбранного способа бурения. В частности, расчетные диаметры бурения и обсадных труб должны быть увязаны со стандартными размерами бурового инструмента конкретно для выбранного способа бурения.

3.5. Технология бурения

Технологию бурения разрабатывают на основании составленного ранее геологического разреза с учетом физико-механических свойств горных пород и характеристик водоносных горизонтов. При этом для каждой разновидности горных пород выбирают рациональные конструкции породоразрушающего инструмента и определяют технологические параметры режима бурения.

При выборе породоразрушающего инструмента устанавливают его необходимые характеристики в соответствии с конструкцией скважины и способом бурения.

Затем для вращательных способов бурения выбирают вид промывочной жидкости и определяют необходимые параметры (например, глинистых растворов), характеризующие

их качество. Параметры промывочных жидкостей (плотность, вязкость, водоотдача, статическое напряжение сдвига, содержание песка и др.) применяют в зависимости от возможных осложнений при бурении скважин.

После этого рассчитывают рациональные значения технологических параметров режима бурения. Для вращательных способов бурения это осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент, частота вращения бурового снаряда и количество промывочной жидкости, нагнетаемой в скважину. Для канатно-ударного бурения определяют вес, высоту подъема и частоту ударов бурового снаряда.

Необходимо также разработать мероприятия по борьбе с возможными осложнениями при бурении скважин (обвалы стенок скважин, поглощения промывочной жидкости и др.). Особое внимание уделяется технологии бурения скважин в интервалах водоносных горизонтов, направленной на сохранение естественной водопроницаемости водоносных пластов.

В случае бурения разведочных скважин устанавливают интервалы бурения с отбором керна для составления детального геологического разреза и проведения исследований образцов горных пород. Особое внимание необходимо уделить разработке мероприятий по обеспечению получения качественного керна с интервалов водоносных горизонтов. С целью обеспечения получения качественных образцов горных пород при бурении необходимо выбрать комплекс технических средств и разработать специальные технологические и организационные мероприятия.

3.6. Выбор бурового оборудования и инструмента

Буровое оборудование выбирают с учетом целевого назначения скважины, ее конструкции, характера пород геологического разреза и разработанной технологии бурения.

В настоящее время буровое оборудование комплектуется в буровые агрегаты и установки, которые выпускаются отечественной промышленностью. Поэтому выбор основного бурового оборудования сводится к выбору буровой установки.

Выбор буровой установки производится в зависимости от проектной глубины бурения, величины начального и конечного диаметров, которые обычно даются в ее характеристике. Также учитываются и другие данные характеристики буровой установки, такие как скорости вращения, осевое усилие, развиваемое механизмом подачи, которые обеспечивают необходимые технологические параметры режима бурения. В зависимости от наличия источников энергоснабжения в районе бурения скважин, буровые установки выбирают с электроприводом (от электролинии) или с автономным приводом от двигателя заутреннего сгорания (при отсутствии электролинии).

Вспомогательное буровое оборудование (труборазвороты, элеваторы, КИП, талевая оснастка, вертлюги-сальники и др.) выбирают в зависимости от его потребности и условий производства работ.

После выбора всего комплекса бурового оборудования, необходимого для бурения проектируемой скважины, приводятся его технические характеристики.

Выбор породоразрушающего инструмента (коронки, долот) производят с учетом физико-механических свойств горных пород и их буримости.

Для вращательного бурения выбирают типы бурильных труб и их диаметры, конструкцию и тип колонковой трубы для обеспечения качественного выхода керна, длину и диаметр утяжеленных труб при бурении скважин сплошным забоем большого диаметра (более 150 мм).

Для ударно-канатного бурения выбирают компоновку и размеры ударного снаряда, тип и размеры желонки. Для ликвидации наиболее распространенных аварий (обрыва бурильных канатов, колонковых, обсадных труб) необходимо предусмотреть ловильный аварийный инструмент (метчики, колокола, труболочки, крючки, штропы, овершоты).

В приложении нужно дать спецификацию всего бурового оборудования, инструмента с указанием его наименования и количества, необходимого для бурения скважины.

На основании геологического задания, выбора бурового оборудования, конструкции скважины и разработанной технологии бурения составляют геолого-технический наряд на бурение скважины, форма которого приведена в приложении 4.

3.7. Вскрытие и освоение водоносного пласта

Ответственными операциями при сооружении скважин на воду являются вскрытие и освоение водоносного пласта, которые оказывают большое влияние на производительность и долговечность скважины.

Вскрытие водоносного пласта включает комплекс технологических операций, направленных на успешное бурение горных пород водоносного пласта при обеспечении их устойчивости и сохранения естественной водопроницаемости.

Выбор технологии вскрытия водоносного пласта зависит от глубины его залегания, устойчивости и коллекторских свойств горных пород, слагающих водоносный пласт, пластового давления, мощности водоносного пласта и дебита скважины.

Неустойчивые горные породы водоносного пласта не рекомендуется вскрывать с применением глинистого раствора, так как глинистые частицы вызывают кольматацию пор и трещин и резкое снижение их водопроницаемости. В этом случае применяются специальные промывочные жидкости: малоглинистые, меловые, полимерные, азрированные, самораспадающиеся промывочные жидкости, пены и др.

Безнапорные пески при наличии устойчивой кровли водоносного пласта могут вскрываться гидроразрывом фильтра, а также формированием каверны в водоносном пласте. Существуют и другие методы с применением различных схем промывки.

Освоение скважины обычно включает такие технологические операции, как установка фильтра в скважину, восстановление естественной водопроницаемости или ее искусственное увеличение, устройство гравийной обсыпки фильтров, откачки воды из скважины с целью формирования водоприемной части скважины и осветления воды.

При выборе способа освоения скважины необходимо учитывать эффективность и простоту его технического выполнения.

3.8. Техника безопасности и охрана окружающей среды

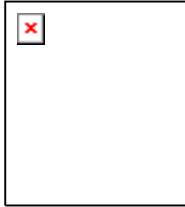
В этом разделе необходимо предусмотреть мероприятия по охране здоровья работающего персонала и средства по оказанию первой медицинской помощи пострадавшим.

Мероприятия по технике безопасности, противопожарной технике и охране окружающей среды проектируют в соответствии с действующими инструктивными указаниями при выполнении различного вида работ: монтаж установок, бурение скважины, транспорт, демонтаж установки, эксплуатация скважин.

Список рекомендуемой литературы

1. *Башкатов Д. Н.* Справочник по бурению скважин на воду. – М.: Недра, 1979. – 560 с.
2. *Бейсебаев А. М., Туякбаев Н. Т., Федоров Б. Д.* Бурение скважин и горно-разведочные работы. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
3. *Булатов А. И., Долгов С. В.* Спутник буровика: справ. пособие в 2 кн. – М.: Недра-бизнесцентр, 2006. 1 кн. - 379 с., 2 кн. – 534 с.
4. *Калинин А. Г., Левицкий А. З., Никитин Б. А.* Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ: учебник для вузов. – М.: Недра, 1998. - 440 с.
5. *Подгорнов Ю. М.* Эксплуатационное и разведочное бурение на нефть и газ. – М.: Недра, 1988. – 325 с.
6. *Щукин А. А.* Строительство скважин: Учебное пособие. – Томск: Изд-во STT, 2005. – 588 с.
7. *Элияшевский И. В.* Типовые задачи и расчеты в бурении. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
8. *Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование/ А. М. Гусман, К. П. Порожский и др.; УГГГА.* – Екатеринбург, 2002. - 592 с.
9. *Бурение и оборудование геотехнологических скважин/ И. А. Сергиенко, А. Ф. Мосев, Э. А. Бочко, М. К. Пименов.* – М.: Недра, 1984. -224 с.
10. *Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду: справочник / Д. Н. Башкатов, С. Л. Драхлис, В. В. Сафонов, Г. П. Квашник.* – М.: Недра, 1988. – 269 с.

Пример оформления титульного листа курсового проекта



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО

**«УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ РАЗВЕДКИ МПИ

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

НА ТЕМУ: «

»

Руководитель _____

Студент _____

Группа _____

Екатеринбург 201__г.

Задание на курсовой проект по технологии бурения на нефть и газ

Глубина скважины, м; номер геологического разреза	Вид полезного ископаемого			
	нефть			
	дебит, т/сут			
	100	150	200	300
1500 П2.1	№35 $P_{пл} = 12$ МПа Сужение ствола скважины в интервале 500-800 м	№48 $P_{пл} = 13$ МПа Обрушение стенок скважины в интервале 800-850 м	№39 $P_{пл} = 14$ МПа Водопроявление в интервале 900-950 м	№33 $P_{пл} = 15$ МПа Пласт соли в интервале 900-1000 м
2000 П2.2	№41 $P_{пл} = 19$ МПа Поглощение в интервале 1200-1300 м	№26 $P_{пл} = 20$ МПа Водопроявление в интервале 300-400 м	№11 $P_{пл} = 21$ МПа Кавернообразование в интервале 1380-1450 м	№13 $P_{пл} = 23$ МПа Поглощение в интервале 400-500 м
2500 П2.3	№23 $P_{пл} = 23$ МПа Образование сальников в интервале 800-950 м	№20 $P_{пл} = 24$ МПа Обрушение стенок скважины в интервале 1650-1700 м	№5 $P_{пл} = 25$ МПа Газопроявление в интервале 1000-1100 м	№7 $P_{пл} = 26$ МПа Поглощение в интервале 1700-1800 м
3000 П2.4	№44 $P_{пл} = 24$ МПа Водопроявление в интервале 1900-2000 м	№30 $P_{пл} = 29$ МПа Сужение ствола скважины в интервале 2100-2000 м	№22 $P_{пл} = 31$ МПа Пласт соли в интервале 2000-2050 м	№1 $P_{пл} = 30$ МПа Газопроявление в интервале 2600-2650 м
3500 П2.5	№36 $P_{пл} = 32$ МПа Водопроявление в интервале 1600-1700 м	№16 $P_{пл} = 34$ МПа Образование сальников в интервале 800-1500 м	№2 $P_{пл} = 35$ МПа Поглощение в интервале 2600-2700 м	№6 $P_{пл} = 36$ МПа Обрушение стенок скважины в интервале 2950-3000 м
4000 П2.6	№32 $P_{пл} = 34$ МПа Нефтегазопроявление в интервале 1500-1600 м	№10 $P_{пл} = 35$ МПа Сужение ствола скважины в интервале 1400-1500 м	№18 $P_{пл} = 36$ МПа Газопроявление в интервале 3000-3100 м	№14 $P_{пл} = 37$ МПа Поглощение в интервале 2500-2600 м

Продолжение приложения 2

Глубина скважины, м; номер геологического разреза	Вид полезного ископаемого			
	газ			
	дебит, м ³ /сут			
	75	250	500	1000
1	2	3	4	5
1500 П2.1	№37 P _{пл} = 13 МПа Газопроявление в интервале 800-850 м	№43 P _{пл} = 14 МПа Кавернообразование в интервале 900-1000 м	№28 P _{пл} = 15 МПа Сужение ствола скважины в интервале 500-580 м	№8 P _{пл} = 16 МПа Сальникообразование в интервале 450-600 м
2000 П2.2	№17 P _{пл} = 19 МПа Газопроявление в интервале 800-850 м	№9 P _{пл} = 20 МПа Образование глинистой корки в интервале 1150-1250 м	№24 P _{пл} = 21 МПа Обрушение стенок скважины в интервале 1200-1300 м	№46 P _{пл} = 22 МПа Пласт соли в интервале 1000-1050 м
2500 П2.3	№3 P _{пл} = 23 МПа Газопроявление в интервале 700-800 м	№15 P _{пл} = 26 МПа Кавернообразование в интервале 900-1000 м	№31 P _{пл} = 28 МПа Сужение ствола в интервале 800-900 м	№45 P _{пл} = 31 МПа Сальникообразование в интервале 800-900 м
3000 П2.4	№44 P _{пл} = 24 МПа Водопроявление в интервале 1900-2000 м	№30 P _{пл} = 29 МПа Сужение ствола скважины в интервале 2100-2000 м	№22 P _{пл} = 31 МПа Пласт соли в интервале 2000-2050 м	№1 P _{пл} = 30 МПа Газопроявление в интервале 2600-2650 м
3500 П2.5	№36 P _{пл} = 32 МПа Водопроявление в интервале 1600-1700 м	№16 P _{пл} = 34 МПа Образование сальников в интервале 800-1500 м	№2 P _{пл} = 35 МПа Поглощение в интервале 2600-2700 м	№6 P _{пл} = 36 МПа Обрушение стенок скважины в интервале 2950-3000 м
4000 П2.6	№32 P _{пл} = 34 МПа Нефтегазопроявление в интервале 1500-1600 м	№10 P _{пл} = 35 МПа Сужение ствола скважины в интервале 1400-1500 м	№18 P _{пл} = 36 МПа Газопроявление в интервале 3000-3100 м	№14 P _{пл} = 37 МПа Поглощение в интервале 2500-2600 м

Геологические разрезы скважин на нефть и газ

Разрез П2.1

1. Супеси с галькой, суглинки, м	0-200
2. Известняки, глины известковистые, м	200-450
3. Известняки плотные, кристаллические, местами окремненные, м	450-500
4. Алевролиты плотные, глины алевролитистые, м	5 00-900
5. Песчаники кварцевые, плотные, м	900-1300
6. Известняки, м	1300-1500
Продуктивная толща в интервале, м	1350-1480

Разрез П2.2

1. Пески чистые и глинистые, красно-бурые; суглинки, м	0-320
2. Песчаники кварцевые, грубозернистые; алевролиты, м	320-1100
3. Лески кварцевые, рыхлые, местами глинистые; глины слабослюдистые, м	1100-1350
4. Алевролиты и песчаники разнозернистые, плотные, известковые; аргиллиты известковые, м	1350-1800
5. Известняки, м	1800-2000
Продуктивная толща в интервале, м	1850-1950

Разрез П2.5

1. Суглинки сильнослюдистые, пески кварцевые, разнозернистые, серые, м	0-400
2. Глины известковистые и чистые, пески, песчаники глинистые, алевролиты слюдистые, м	400-900
3. Глины сильнопесчанистые, слоистые с песчано-алевролитовыми пропластками, м	900-1500
4. Алевролиты и песчаники разнозернистые, кварцевые, различной цементации, м	1500-2100
5. Известняки плотные, плитчатые, местами окремненные и трещиноватые, м	2100-2900
6. Песчаники, пески, алевролиты кварцевые, слюдистые, м	2900-3200
7. Аргиллиты трещиноватые, сланцы окремненные, известняки, м	3200-3500
Продуктивная толща в интервале, м	3340-3450

Разрез П2.6

1. Супеси, суглинки, пески и глины с галькой и валунами, м	0-300
2. Песчаники кварцевые, слабоизвестковые, иногда глинистые, темно-серые; известняки плотные; мергели, м	300-1000
3. Глины красно-бурые, кирпично-красные с прослоями песчаников, алевролитов, м	1000-1500
4. Песчаники аркозовые, разнозернистые, серо-розоватые, зеленовато-серые, м	1500-2450
5. Доломиты; глины алевролитистые, песчанистые,	

пестроцветные, м	2450-3000
6. Песчаники, м	3000-3600
7. Известняки, м	3600-4000
Продуктивная толща в интервале, м	3850-3950

Разрез П2.3

1 Суглинки буровато-желтые, супеси с галькой и валунами, м	0-250
2. Известняки чистые и глинистые, глины темно-серые с гнездами гипса, м	250-750
3. Глины известковистые, известняки доломитизированные, кристаллические с тонкими прослоями алевролитов, м	750-1100
4. Известняки плотные, кристаллические, песчаники кварцевые, средне- и мелкозернистые, м	1100-1650
5. Алевролиты плотные, разномзернистые, аргиллиты темно-серые с тонкими прослоями песчаников, м	1650-2200
6. Песчаники кварцевые мелкозернистые, плотные, м	2200-2500
Продуктивная толща в интервале, м	2350-2480

Разрез П2.4

1. Лёссовидные суглинки и галечник из песчаника, м	0-70
2. Песчаники известковые, глинистые, различной цементации; глины, м	70-600
3. Песчаники кварцевые, м	600-2000
4. Глины известковистые и чистые, неравномерно песчаные; мергели, м	2000-2400
5. Известняки, м	2400-2600
6. Пески серые и темно-серые, м	2600-2800
7. Песчаники, м	2800-3000
Продуктивная толща интервале, м	2840-2950

Пример оформления геолого-технического наряда по технологии бурения на воду

ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИЙ НАРЯД

ПГО _____ Буровой станок _____
 ГРЭ _____ Буровой насос _____
 Проектная глубина _____ Двигатель _____
 Начало бурения _____ Мачта _____
 Окончание бурения _____ Бурильные трубы _____

Геологическая часть							Техническая часть										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Параметры режимов бурения			15	16	17	18
											12	13	14				
масштаб глубин	стратиграфическая колонка	наименование горных пород	категория пород по буримости	интервалы и вид возможных осложнений	проектный выход керна, %	уровень грунтовых вод, м	Конструкция скважины	Тип и размер породоразрушающего инструмента	Диаметр и длина УБТ	Диаметр и количество ударных штанг	осевая нагрузка или вес бурового снаряда, даН	частота вращения или ударов	расход промывочной жидкости, л/мин	Количество бурового раствора	Способы борьбы с геологическими осложнениями	Способы вскрытия и освоения водоносных пластов	Примечание

**Пример оформления геолого-технического наряда
по технологии бурения на нефть и газ**

ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИЙ НАРЯД

Министерство _____
 ПГО _____
 ГРЭ _____
 Площадь _____
 Цель бурения _____
 Проектная глубина _____
 Проектный горизонт _____
 Способ бурения _____
 Угол наклона _____
 Вид энергии _____
 Начало бурения _____
 Окончание бурения _____

Буровая установка _____
 Лебедка (тип) _____
 Грузоподъемность талевой системы _____
 Ротор _____
 Буровой насос _____
 Двигатель к насосу _____
 Двигатель лебедки и ротора _____
 Вышка _____
 Превентер _____

Геологическая часть										Техническая часть									
Стратиграфический разрез										Режим бурения						Подъем инструмента			
Проект																			
факт	факт																		
1	Глубина, м																		
2	система, отдел																		
3	ярус, толща																		
4	система, отдел																		
5	ярус, толща																		
6	проектный																		
7	фактический																		
8	интервалы проходки с отбором керна																		
9	интервалы нефтегазопрооявлений, осложнения ствола скважины, пластовое давление																		
10	крепость пород																		
11	промыслово-геофизические исследования и испытания в процессе бурения																		
12	конструкция скважины, способ испытания																		
13	геометричность колонн, высота подъема цемента, объекты опробования																		
14	параметры и обработка промывочной жидкости																		
15	тип и размер долот																		
16	частота вращения ротора (турбобура), с																		
17	осевая нагрузка, даН																		
18	кол-во и производительность насосов, л/с																		
19	предельное давление на манометре насоса, МПа																		
20	тип и размер турбобура																		
21	компоновка и конструкция бурильной колонны, мм																		
22	скорость, м/с																		
23	количество свечей																		
24	оснастка талей																		
25	примечание																		



МИНОБРНАУКИ РФ

**ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»**

Л. И. Кралина, Ф. П. Сердюков, Г. А. Усов

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
В БУРЕНИИ**

**Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по профилирующим дисциплинам
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
21.05.02 Прикладная геология
очного обучения**

**Екатеринбург
2020**

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено в помощь преподавателям и студентам при проведении занятий по бурению скважин, а также для подготовки курсовых и квалификационных работ по профилирующим дисциплинам. Сборник выполнен для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки и 21.05.02 Прикладная геология. При выполнении работ используются справочные материалы, которые приведены в таблицах каждого расчета. Большинство работ рассчитано на выполнение и оформление непосредственно на занятиях. Если работа не закончена, то с разрешения преподавателя она может быть оформлена и сдана к следующему занятию.

В конце приводится список литературы, использованной при написании данного учебно-методического пособия.

Расчет №1 Расчет предельного значения кернопотерь

1. Расчет предельного значения кернопотерь

$$B_k^{\min} = F(\text{НП}, \text{И}, [m_k]).$$

При НП, И $[m_k]$ табличные значения (см. таблицу) расчет по формуле для реального (различного) B_k и по данным лабораторных анализов $P, P_k, P_{\text{сред}}$

$$B_k^{\min} = \frac{(\text{НП}-1)*\text{И}}{(\text{НП}-1)*\text{И}+m_k^{\text{доп}}} * 100 \%$$

где B_k^{\min} - выход керна минимальный, %;

НП- неоднородность оруденения, %;

И- избирательность кернопотерь, %;

$m_k^{\text{доп}}$ - погрешность опробования, %.

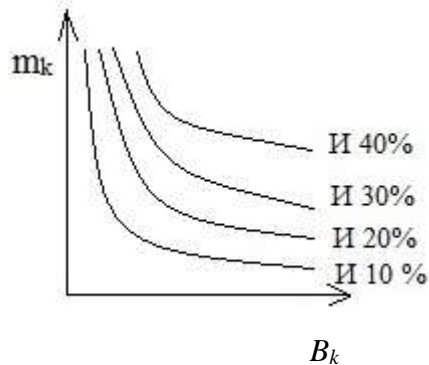
Группировка месторождений по значениям НП и И

Группы и типы руд	Примеры руд и месторождений	Характерные значения	
		НП, %	И
I. Сплошные массивные			
I.1. Мономинеральные	Сплошные мартитовые, магнетитовые, гидромагнетитовые и другие богатые железные руды криворожского типа, сплошные мономинеральные руды каменной соли, бокситы Боксонского месторождения, тальк Алгуйского месторождения и т. п.	1,2±10	40±15
I.2. Полимнеральные	Сплошные колчеданные медные и медно-цинковые месторождения уральского типа, сплошные полиметаллические руды Горевского, Риддер-Сокольного и других месторождений.	4±10	15±10
	Апатиты Ошурковского месторождения и т. п.	2,5±10	20±10
II. Вкрапленные			
II. 1. В массивных изверженных и осадочных породах	Вкрапленные руды полиметаллических месторождений Садовое, Миргалимсай. медные руды Алмалык, редкометалльных месторождений Белозиминское, Африкандское и т. п.	6,5±10	7± 5
II. 2. В жилах и дайках	Руды жильных золоторудных месторождений Средней Азии, Забайкалья, Якутии, оловянных и вольфрамовых месторождений Приморья, Якутии и др.	16±5	5±4
III. Прожилково- и слоисто-вкрапленные			
III. 1. Руды штокверковых месторождений	Руды вольфрамовых, молибденовых, медно-молибденовых месторождений Забайкалья, Казахстана и Средней Азии	6,5±5	10±8
III. 2. В линейно-вытянутых зонах трещиноватости	Руды полиметаллических месторождений Алтая, Средней Азии, Прибайкалья, оловорудных месторождений Комсомольского района, ртутных месторождений Терлиг-Хая и частично Никитовки и т. п.	8,3±6	10±8
IV. Прожилковые, слоистые и переливающиеся			
IV. 1. Прожилковые	Медные руды месторождения Дальнего: никель-кобальтовые руды Тувинской АССР, асбестовое месторождение Молодежное; оловянные - Тарбальджей, Иигода, Хрустальное; золотые - Советское, Коммунар и др.	3,3±15	25±15
IV. 2. Переслаивающиеся и полосчатые	Железистые кварциты Кольского полуострова, Кривоного, сферосидериты Дагестана	1,7±10	30±15
V. Прожилково-гнездовые			
V. Прожилково-гнездовые	Руды ртутных месторождений Средней Азии (Хайдаркан, Акташ, Чувай), отдельных участков Никитовки и др. Мусковит Луговского, Чуйского и Согдиондонского месторождений	20±10 6,5±5	4±3 8±5

2. Изучение влияния выхода зерна на погрешность опробования для различных сортов руд (для бакалаврской работы)

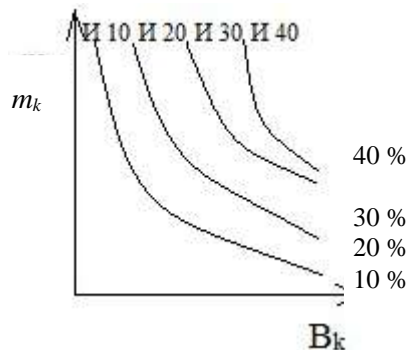
Слабонеоднородные руды **НП=2**

$m_k \backslash I$	10 %	20 %	30 %	40 %
5 %	B_k^{1-1}	B_k^{1-2}	...	...
10 %	...	B_k		B_k^{2-4}
15 %	B_k^{3-1}			B_k^{4-4}
20 %	...			B_k^{5-4}
25 %	B_k^{5-1}	...	...	B_k^{5-4}

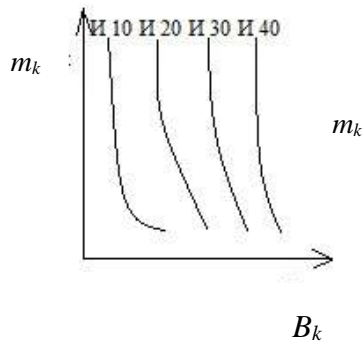


Среднеоднородные руды **НП=6**

$m_k \backslash I$	10 %	20 %	30 %	40 %
5 %	B_k^{1-1}	B_k^{1-2}	...	...
10 %	...	B_k		B_k^{2-4}
15 %	B_k^{3-1}			B_k^{4-4}
20 %	...			B_k^{5-4}
25 %	B_k^{5-1}	...	...	B_k^{5-4}



Сильнеоднородные руды **НП=15**



$m_k \backslash I$	10 %	20 %	30 %	40 %
5 %	B_k^{1-1}	B_k^{1-2}	...	...
10 %	...	B_k		B_k^{2-4}
15 %	B_k^{3-1}			B_k^{4-4}
20 %	...			B_k^{5-4}
25 %	B_k^{5-1}	...	...	B_k^{5-4}

3. Основные аналитические задачи:

- 3.1. Для каких руд избирательность истирания более всего влияет на погрешность опробования?
- 3.2. При какой избирательности и в каких сортах руд наибольший эффект дают мероприятия по повышению выхода зерна?
- 3.3. Постройте таблицу нормативных значений минимального выхода зерна, при допустимой погрешности $m_k=5\%$ (10 %, 15 %, 20 %, 25 %) для всех сортов руд (для всех табличных комбинаций НП и I).

Расчет №2

Определение рациональной частоты вращения бурового снаряда при твердосплавном бурении, рад/с

$$n = \frac{60 \cdot 0,105 \omega_0}{\pi \cdot D_0} \approx \frac{2 \cdot \omega_0}{D_0} ;$$

$$n = \frac{60 \cdot \omega_0}{\pi \cdot D_0} \approx \frac{20 \cdot \omega_0}{D_0} .$$

Таблица исходных данных

Обозначение	Наименование	Ед.изм	Пределы изменения		Примечание
			от	до	
ω_0	Окружная скорость движения резцов	м/с	1,0 крепкие породы (УІ-УІІ кат.)	3,0 мягкие породы (ІІ-ІУ кат.)	Ограничивается сверхнормативным износом
D_0	Средний диаметр коронки	м	$46 \cdot 10^{-3}$	$223 \cdot 10^{-3}$	Стандарт
n_0	Частота вращения	Рад/с об/ мин	9,3 93	65 500	Ограничение техническими условиями бурения

Расчет №3

Минимальная (критическая) частота вращения шнекового снаряда, рад/с

$$n_{\min} = \frac{30}{\pi} * \frac{\sqrt{g * (\tan a + f)}}{f' * R * (1 - f * \tan a)}.$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Единица измерения	Пределы измерения	
			от	до
R	Радиус вала шнека	м	$50 * 10^{-3}$	$89 * 10^{-3}$
a	Угол подъема винтовой ленты	град	10	30
f	Коэффициент трения породы о шнек	-	0,25	1,4
f'	Коэффициент трения породы о породу	-	0,2	1,5
g	Ускорение силы тяжести	м/с ²	9,8	

Основные аналитические задачи

- 1.1. Оцените влияние коэффициента трения породы о шнек и породы о породу на n_{\min} . Постройте графики зависимости n_{\min} от f и f' для различных значений R и a .
- 1.2. Оцените влияние конструктивных параметров шнека (R и a) на n_{\min} для вязких ($f'=1,5$; $F=0,25$). Постройте графики.

Расчет №4

Определение критической скорости восходящего потока и расхода очистного агента по предельным нормативным характеристикам (для воды малоглинистых растворов)

1. Критическая скорость восходящего потока очистного агента, м/с:

$$U_{кр} = K_{\phi} \sqrt{\frac{d_u(\gamma_n - \gamma_p)}{\gamma_p}}$$

2. Рациональная скорость восходящего потока, м/с:

$$U_p = U_{кр} + U$$

3. Расход промывочной жидкости, обеспечивающий рациональную скорость движения восходящего потока, м³/с:

$$Q_{кр} = U_p * \frac{\pi(D_{скв}^2 - d_{бур.тр.}^2)}{4}$$

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы изменения	
			от	до
K_{ϕ}	Коэффициент формы частиц шлама	-	2,5 (плоские)	5,11 (ид. шар)
d_u	Диаметр (средний размер) частиц	м	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
γ_n	Удельный вес горной породы, руды	т/м ³	2,0	5,5
γ_p	Удельный вес раствора	т/м ³	1	1,15
U	Желательная скорость движения шлама вверх	м/с	0,1	0,3
$d_{бур.тр.}$	Диаметр бурильной колонны, номинальный (без учета износа)	м	$32 \cdot 10^{-3}$	$73 \cdot 10^{-3}$
$d'_{бур.тр.}$	Диаметр бурильной колонны, с учетом износа	м	$30 \cdot 10^{-3}$	$70 \cdot 10^{-3}$
$D_{скв}$	Диаметр скважины, номинальный	м	$46 \cdot 10^{-3}$	$225 \cdot 10^{-3}$
$D'_{скв}$	Диаметр скважины, с учетом разработки ствола	м	$47 \cdot 10^{-3}$ $230 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-3}$ $250 \cdot 10^{-3}$
$D''_{скв}$	Диаметр скважины, с учетом каверн	м	По геолого-геофизическим и гидрогеологическим данным $D_{скв} \quad 500 \cdot 10^{-3}$	
Q	Расход очистного агента	м ³ /с л/мин	0,0002 10,0	0,003 160

Расчет №5

Критический расход глинистого раствора с учетом реологии раствора

$$Q_{кр} = 0,392 * \eta * \frac{D+d}{\gamma} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2*10^{-3}*\gamma*\tau_0*(D-d)^2}{3*\eta}} \right]$$

Таблица исходных данных

Параметр	Наименование	Ед. изм.	Пределы измерения		Примечания
			от	до	
D	Диаметр долота	мм	46	225	
d	Диаметр колонны	мм	32	73	
η	Пластическая вязкость	Пуаз (Па*с)	0,05	0,4	В зависимости от содержания глины в качестве раствора
γ	Уд. вес раствора	г/см ³	1,01	1,2	
τ_0	Динамическое напряжение сдвига	Дин/см ²	50	600	
Q	Расход глинистого раствора Критическая скорость восходящего потока	л/с м/с	0,1	5,0	В зависимости от диаметра скважины