



**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

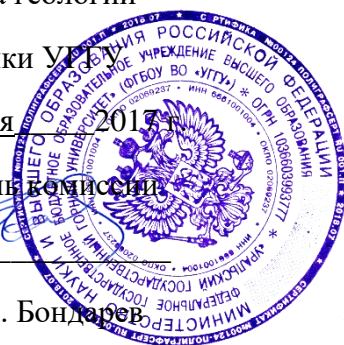
факультета геологии

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».

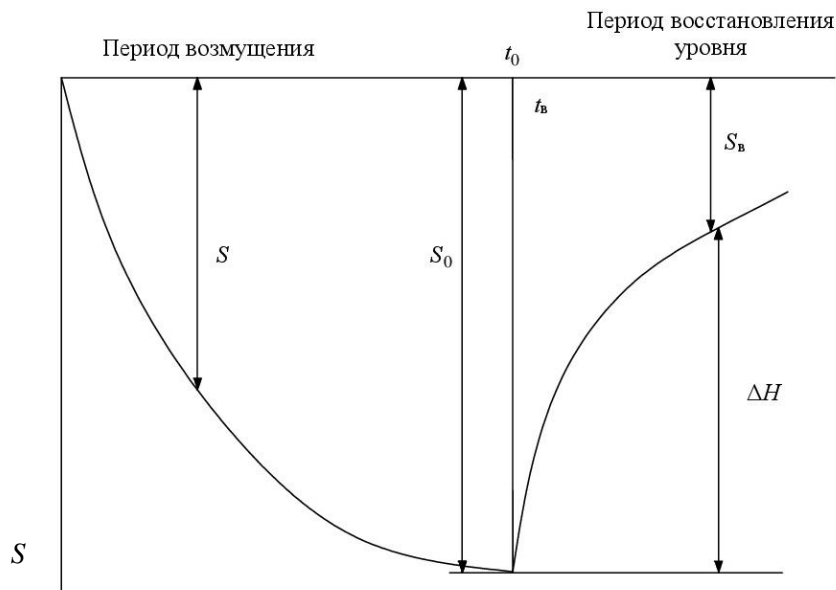
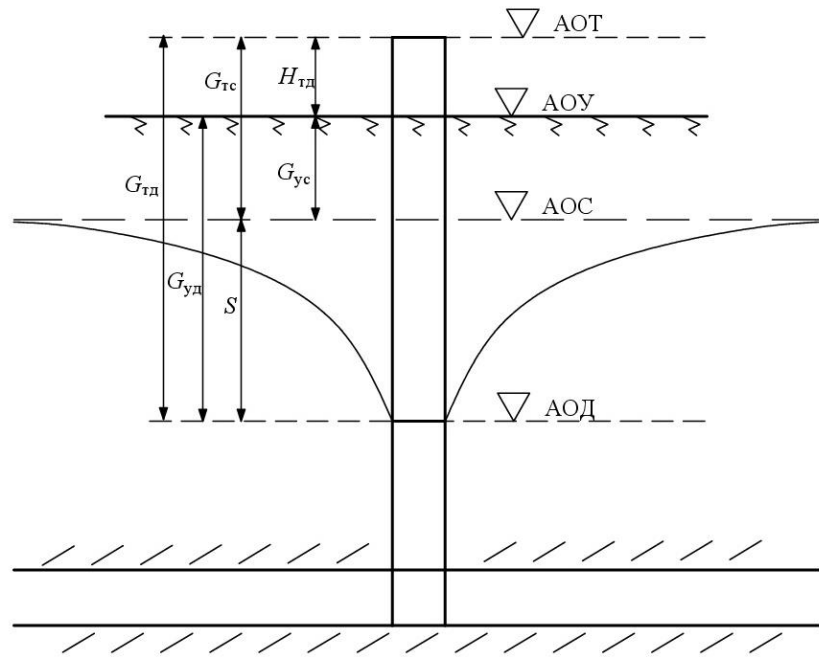


Рис. 1.1. Основные обозначения показателей положения и динамики уровней при опробовании скважин: АОТ, АОУ, АОС, АОД – абсолютные отметки края трубы, устья скважины, статического уровня подземных вод, динамического уровня подземных вод соответственно; $G_{тс}$, $G_{уc}$, $G_{уд}$, $G_{тд}$ – глубины от 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; $H_{тд}$ – высота обсадной трубы над уровнем земли (над устьем); S , S_0 , S_b – понижение (возмущение) текущее, максимальное на конец возмущения, в период восстановления уровня; t_0 – продолжительность опыта (возмущения); t_b – 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 масштабom. 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 (вёдра). 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).

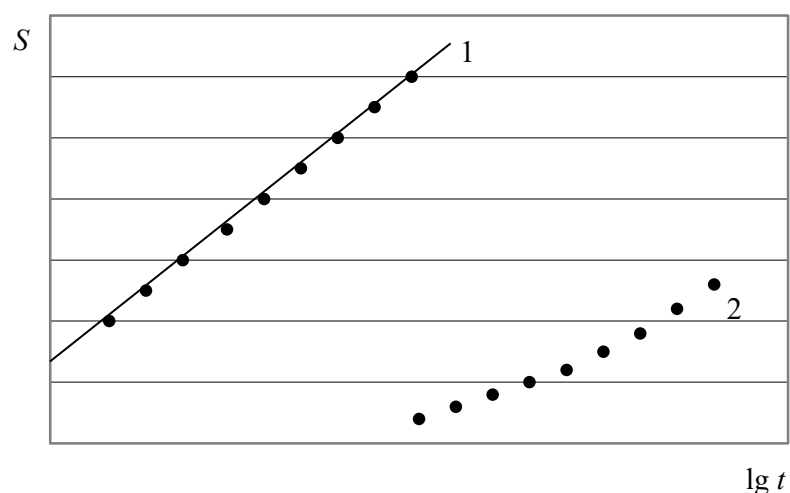


Рис. 2.1. Нестационарный режим при проведении ОФР: 1 – квазистационарный режим (линейная зависимость); 2 – неквазистационарный режим

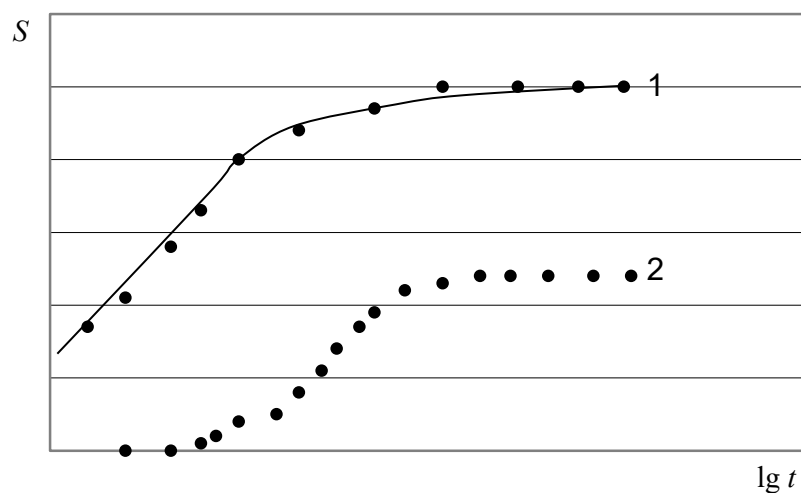


Рис. 2.2. Стабилизация уровней при проведении ОФР: 1 – стационарный режим в центральной скважине; 2 – стационарный режим в наблюдательной скважине

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.

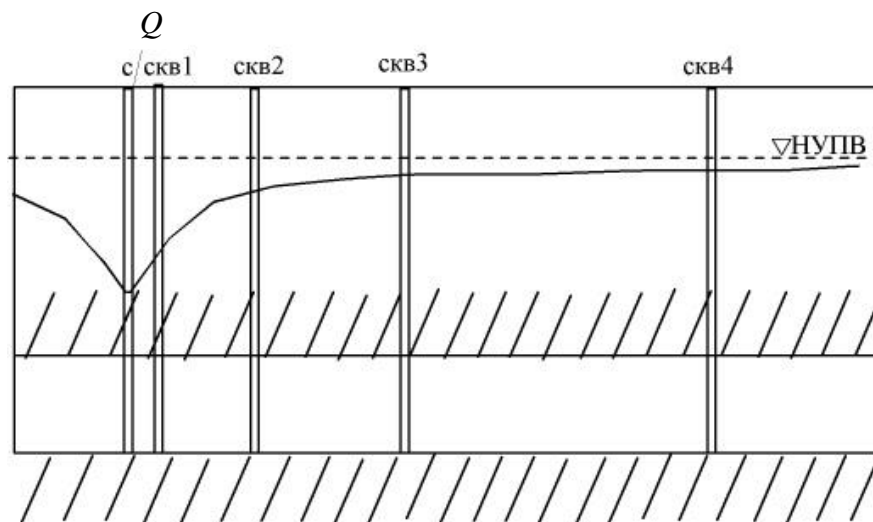
2.2.3. Схематизация гидравлического состояния потока

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

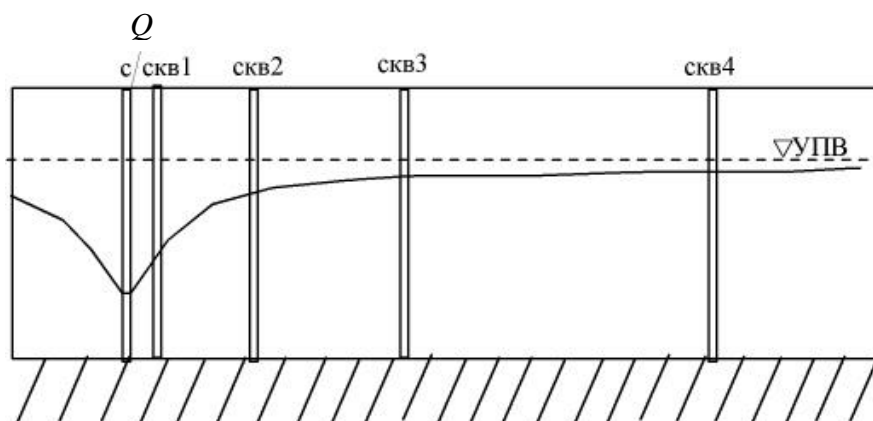


Рис. 2.3. Схемы безграничных пластов: а - напорного,
б - безнапорного

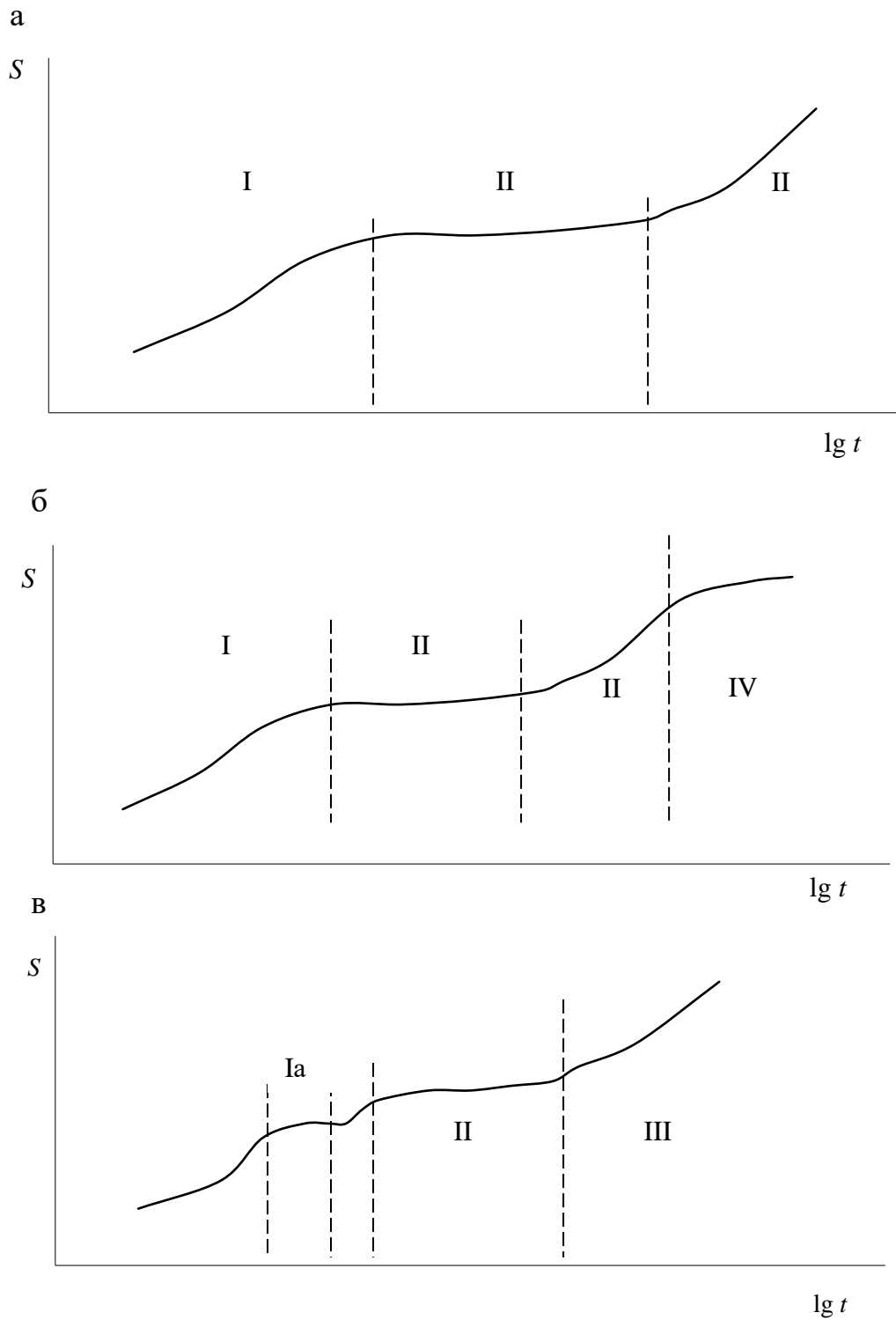


Рис. 2.4. Временные графики в двухслойных пластах

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:

$$T = 0,183 \frac{Q}{C_p}; \quad (3.7)$$

$$\lg \frac{a}{r^2} = \frac{A}{C_p} - 0,35; \quad (3.8)$$

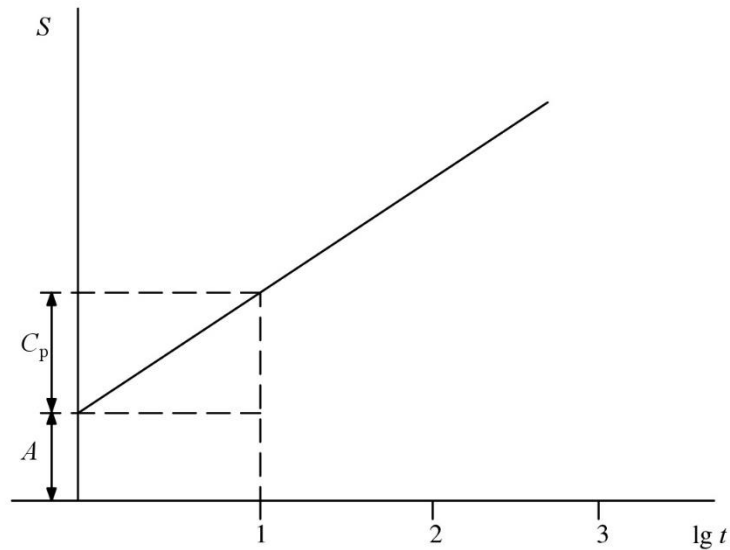


Рис. 3.1. Определение расчетных коэффициентов A и C_p

$$\lg a = \frac{A}{C_p} - 0,35 + 2 \lg r. \quad (3.9)$$

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		

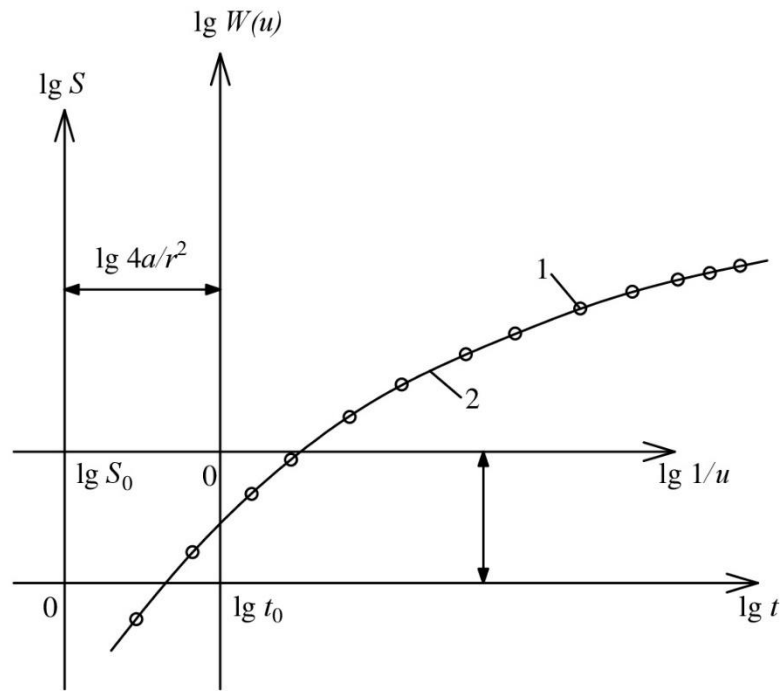


Рис. 3.2. Определение параметров способом эталонной кривой:
 1 - опытные точки (график $\lg S \div \lg t$);
 2 - эталонная кривая (график $\lg W(u) \div \lg 1/u$)

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.

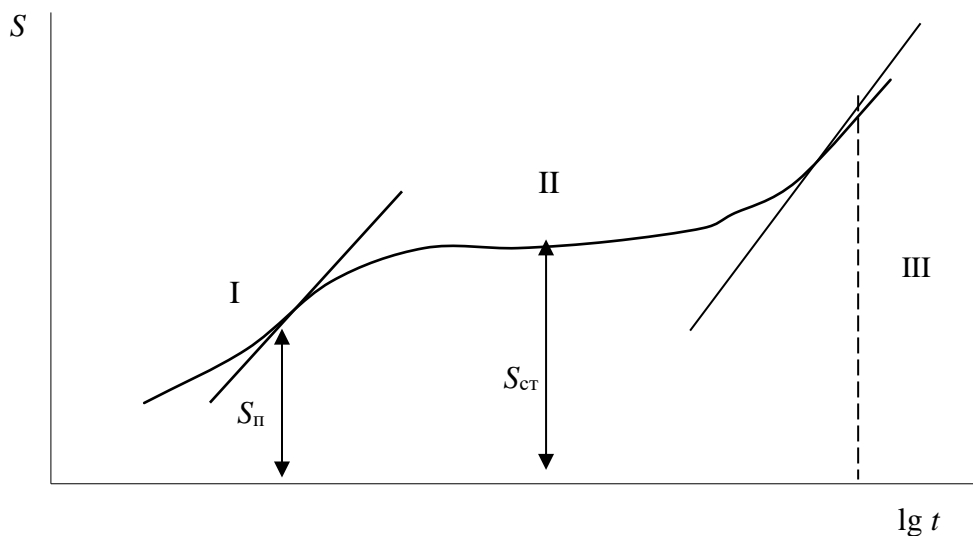


Рис. 3.3. Интерпретация временного графика в двухслойном безграничном пласте

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 ($R_{вл}$) откачки, на основании значения понижения уровня, при котором достигнута стабилизация ($S_{ст}$). Последовательность расчётов следующая:

$$\lg (R_{\Pi}/r) = 2,73 T S_{ст} / Q; \quad (3.20)$$

$$R_{\Pi} = (R_{\Pi}/r) \cdot r; \quad (3.21)$$

$$B = R_{\Pi}/1,12; \quad (3.22)$$

$$R_{вл} = 5 B. \quad (3.23)$$

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):

$$\Delta H = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2}; \quad (3.25)$$

$$\Delta H = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25at}{r^2}; \quad (3.26)$$

$$\Delta H = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25a}{r^2} + 0,183 \frac{Q}{T} \lg t; \quad (3.27)$$

$$\Delta H = A + C_p \lg t; \quad (3.28)$$

$$A = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25a}{r^2}; \quad (3.29)$$

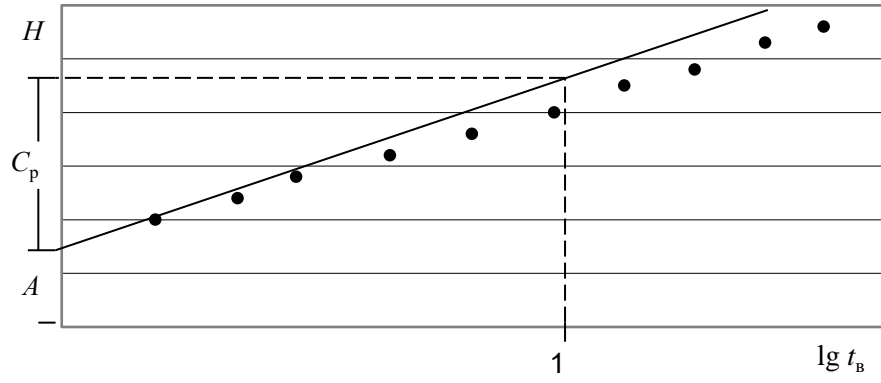
$$C_p = 0,183 \frac{Q}{T}; \quad (3.30)$$

$$T = 0,183 \frac{Q}{C_p}; \quad (3.31)$$

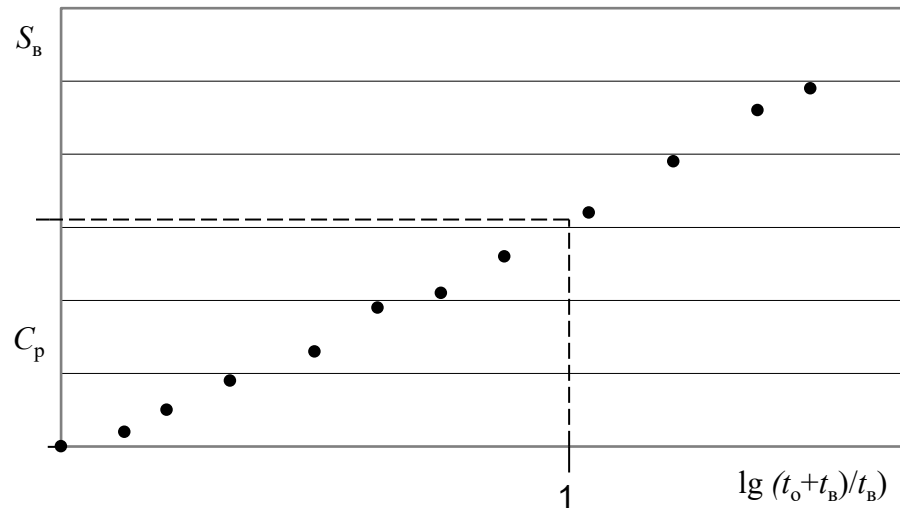
$$\lg \frac{a}{r^2} = \frac{A}{C_p} - 0,35; \quad (3.32)$$

$$\lg a = \frac{A}{C_p} - 0,35 + 2 \lg r. \quad (3.33)$$

а



б



в

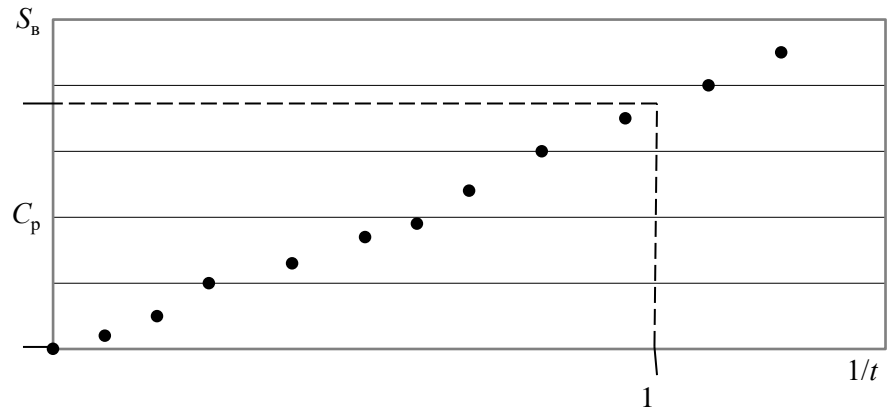


Рис. 3.4. Форма временных графиков в однородных безграничных пластах при обработке данных восстановления уровней

"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;

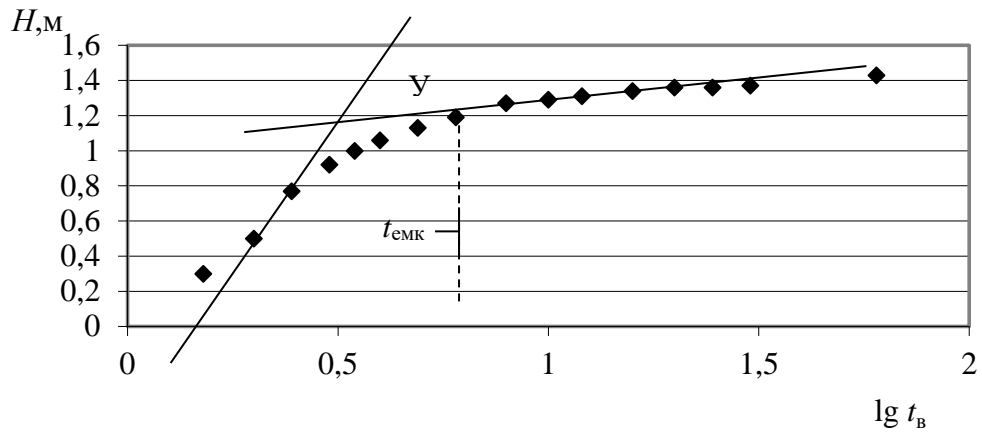
ε - допустимая погрешность.

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:

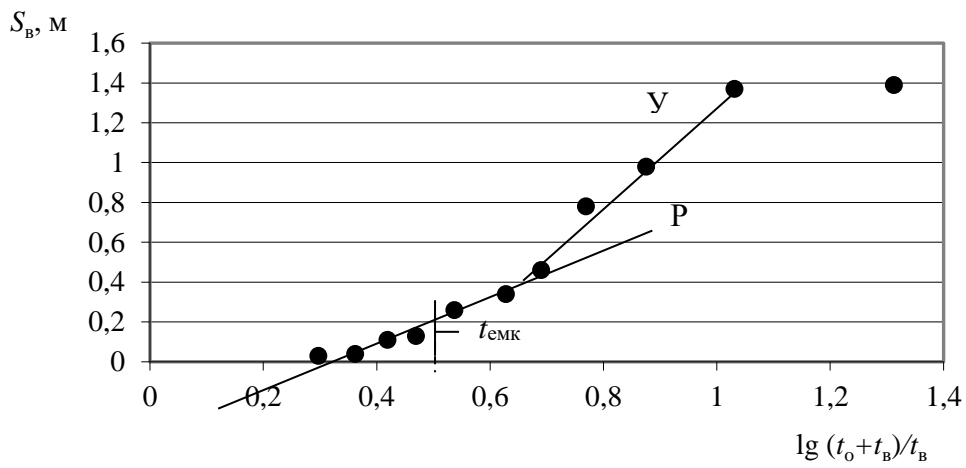
$$t_{емк} = \frac{10\pi r_c^2}{T} = \frac{31,4r_c^2}{T}. \quad (3.51)$$

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

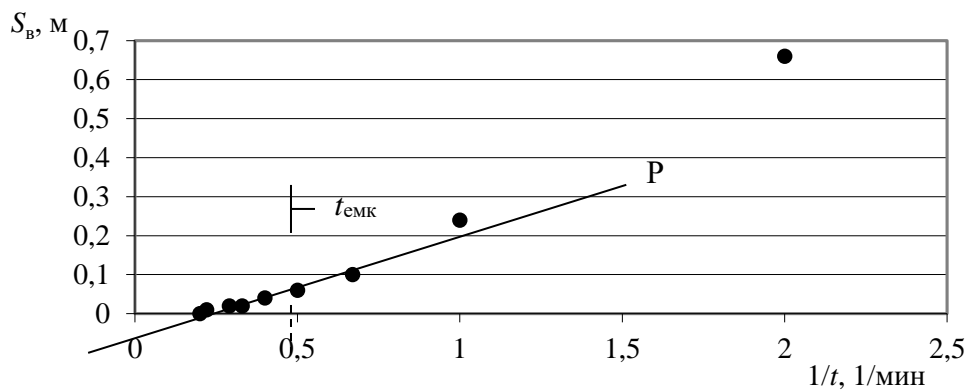


Рис. 3.5. Особенности интерпретации временных графиков; $t_{емк}$ – период влияния емкости скважины; P – расчетный участок; Y – участок для определения условного коэффициента C_y

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 скважин 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).

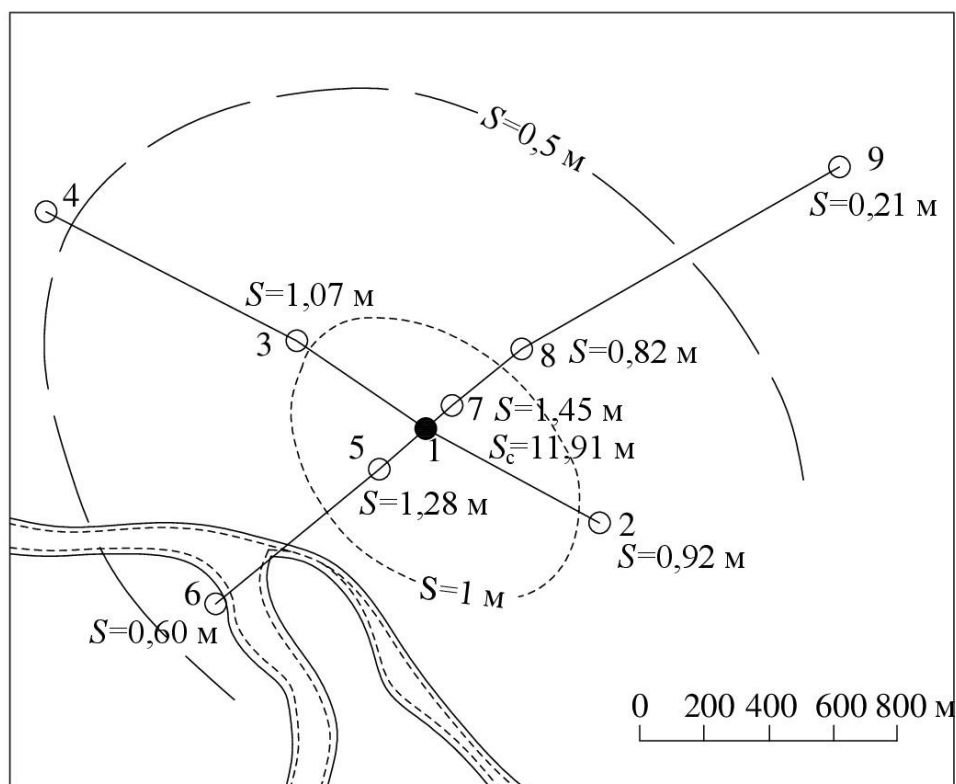


Рис. 4.1. План опытного куста скважин

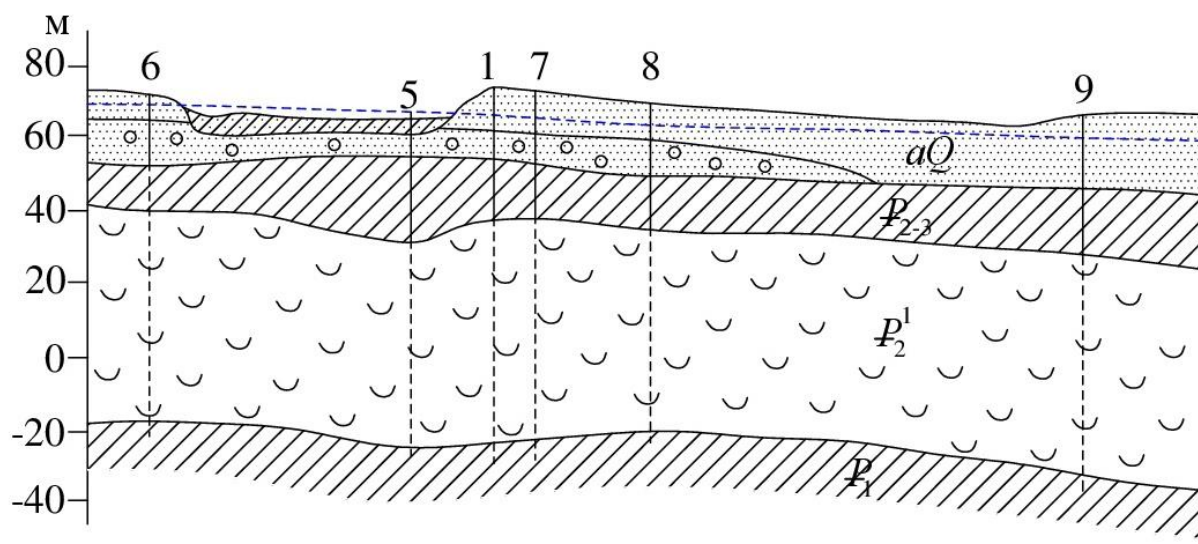


Рис. 4.2. Гидрогеологический разрез

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.

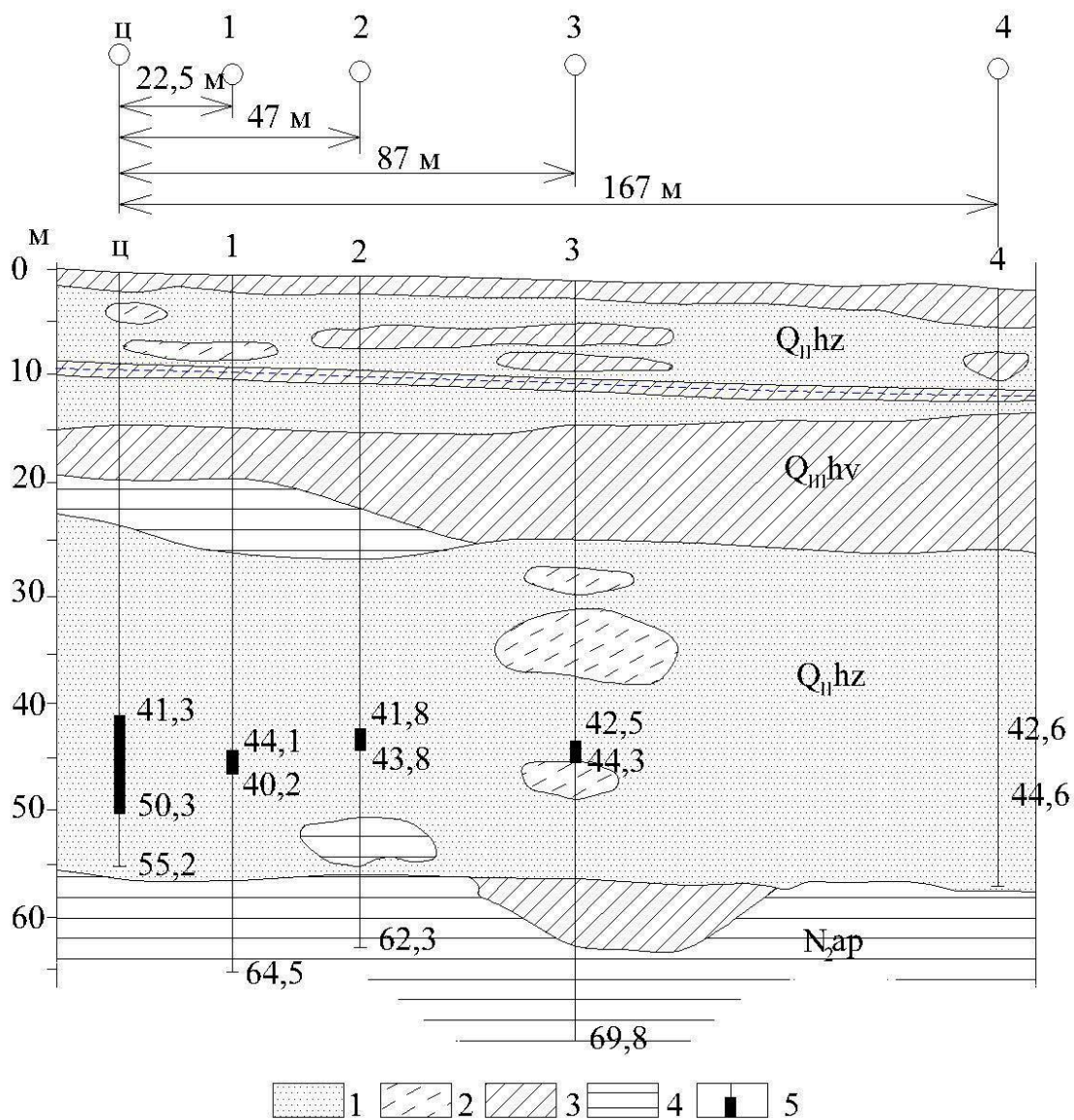


Рис. 4.3 План расположения и разрез по лучу пьезометрических скважин кустовой откачки из хазарских отложений:

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

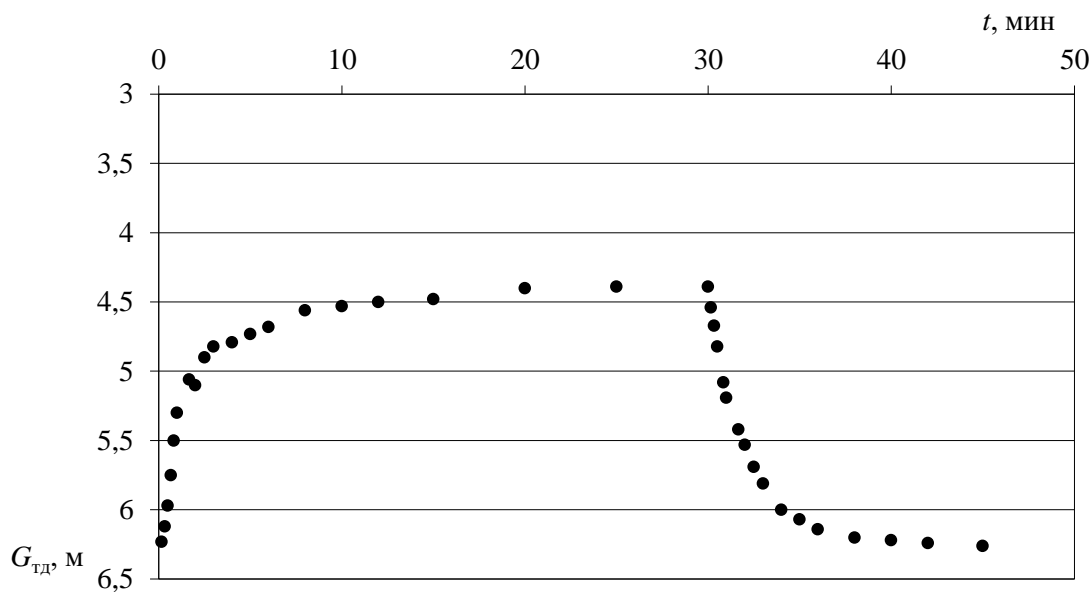
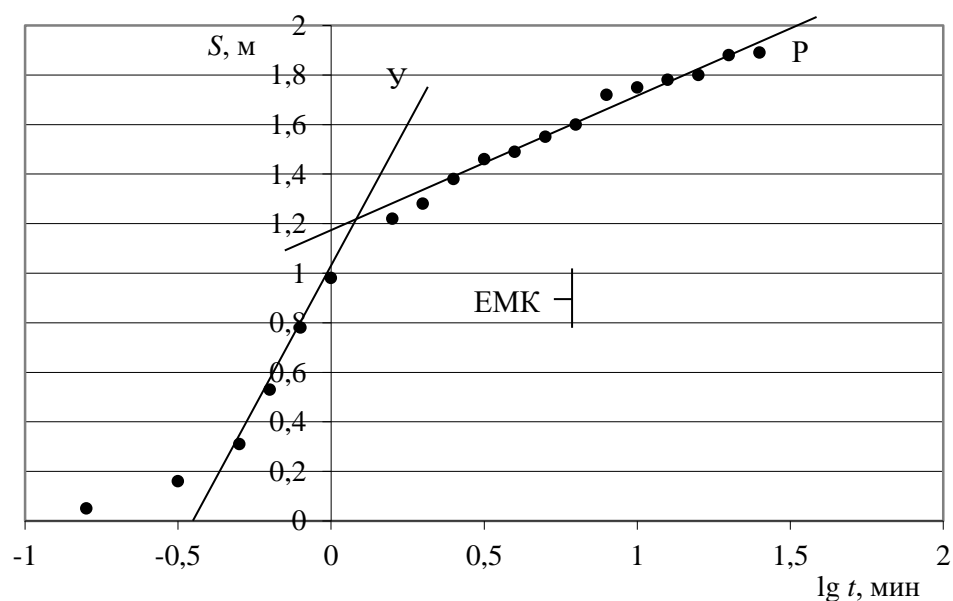
Таблица 5.3

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. 2аРис. 5.2. Зависимость $S \div \lg t$. Налив в скв. 2а

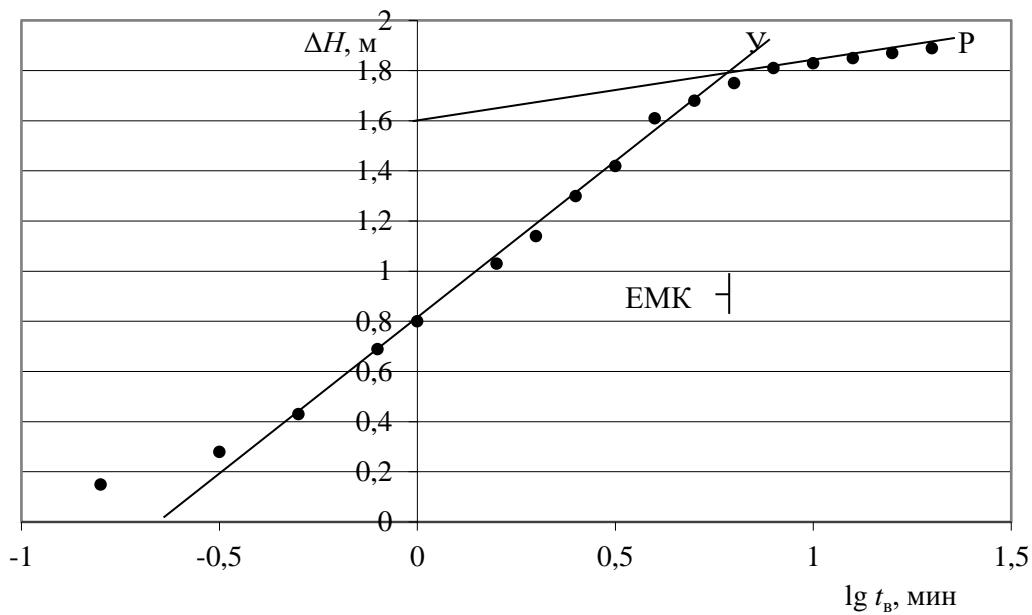


Рис.5.3. Зависимость $\Delta H \div \lg t_B$. Налив в скв. 2а

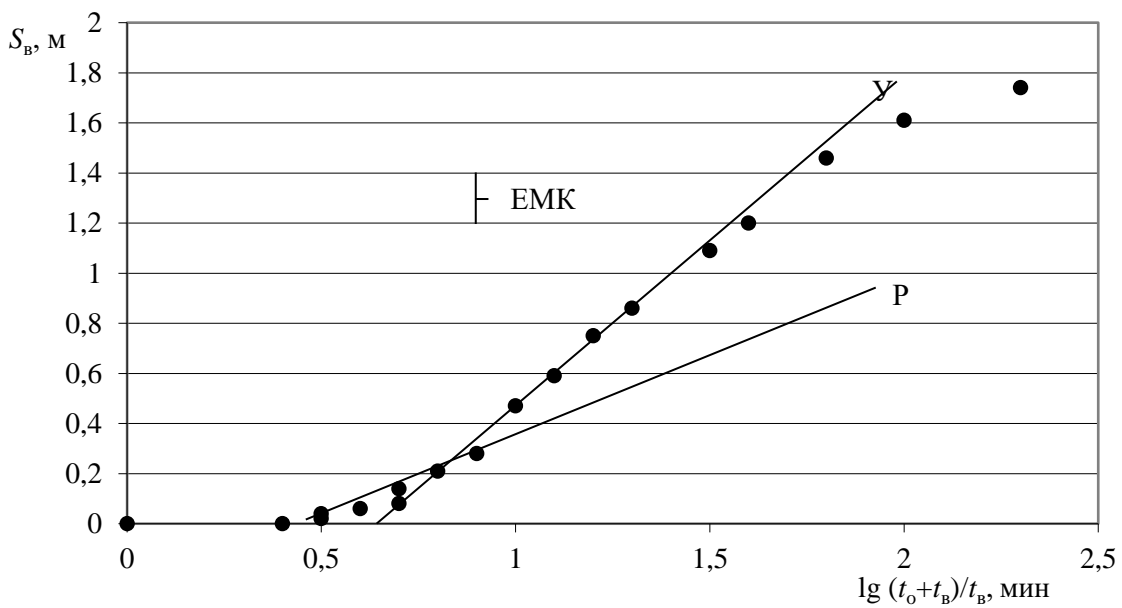


Рис. 5.4. Зависимость $S_B \div \lg (t_0+t_B)/t_B$. Налив в скв. 2а

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 А1, А2, А3, А4, Аcm?
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, обес-

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 рекомендуйте 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

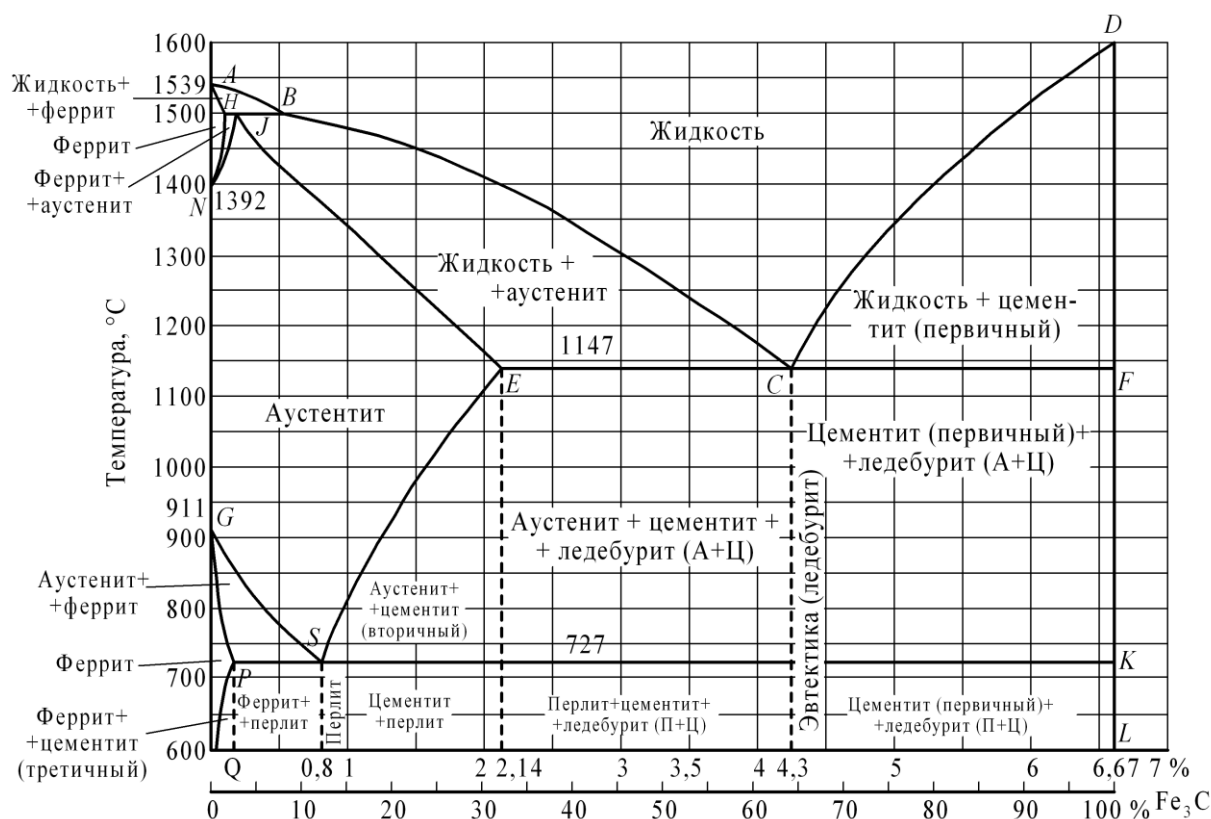


Рисунок 1 – Диаграмма состояния железо-цементит

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

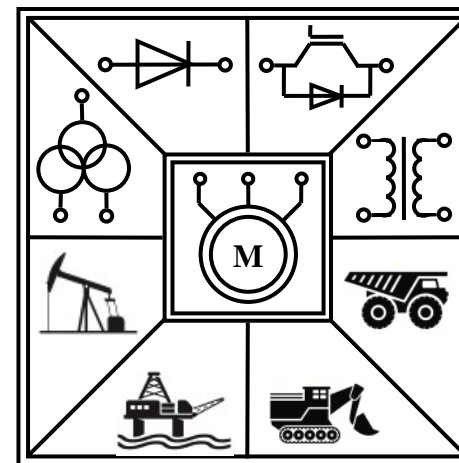


Б. Ю. ВАСИЛЬЕВ

**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.

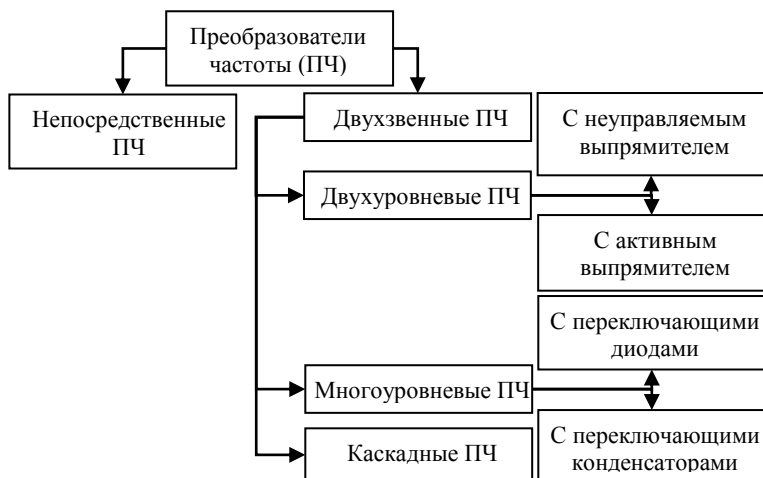


Рис.1.1. Классификация преобразователей частоты

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).

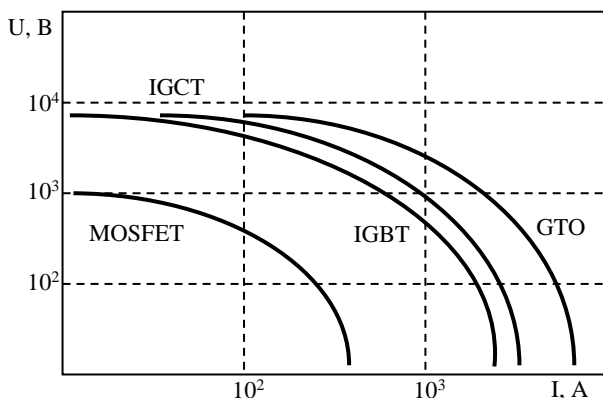


Рис.1.2. Предельные характеристики современных силовых полупроводниковых приборов

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).

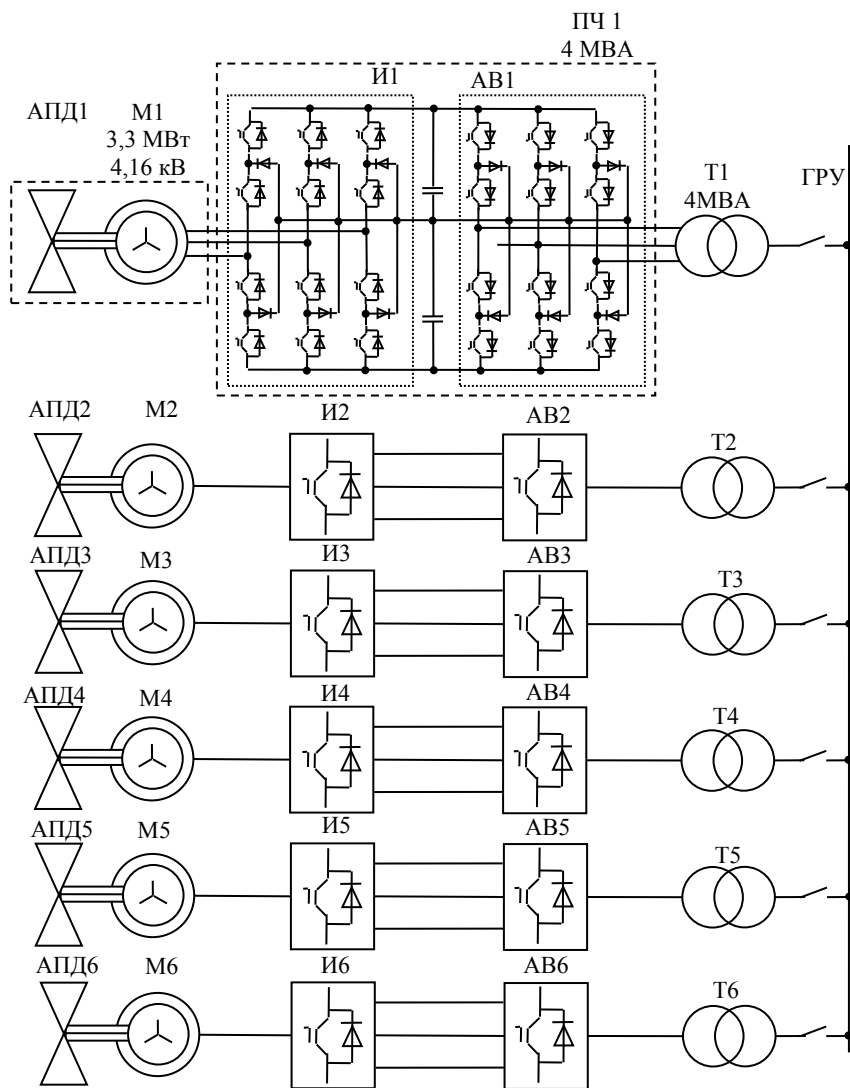


Рис.1.4. Структурная схема системы перемещения и динамического позиционирования буровой платформы

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].

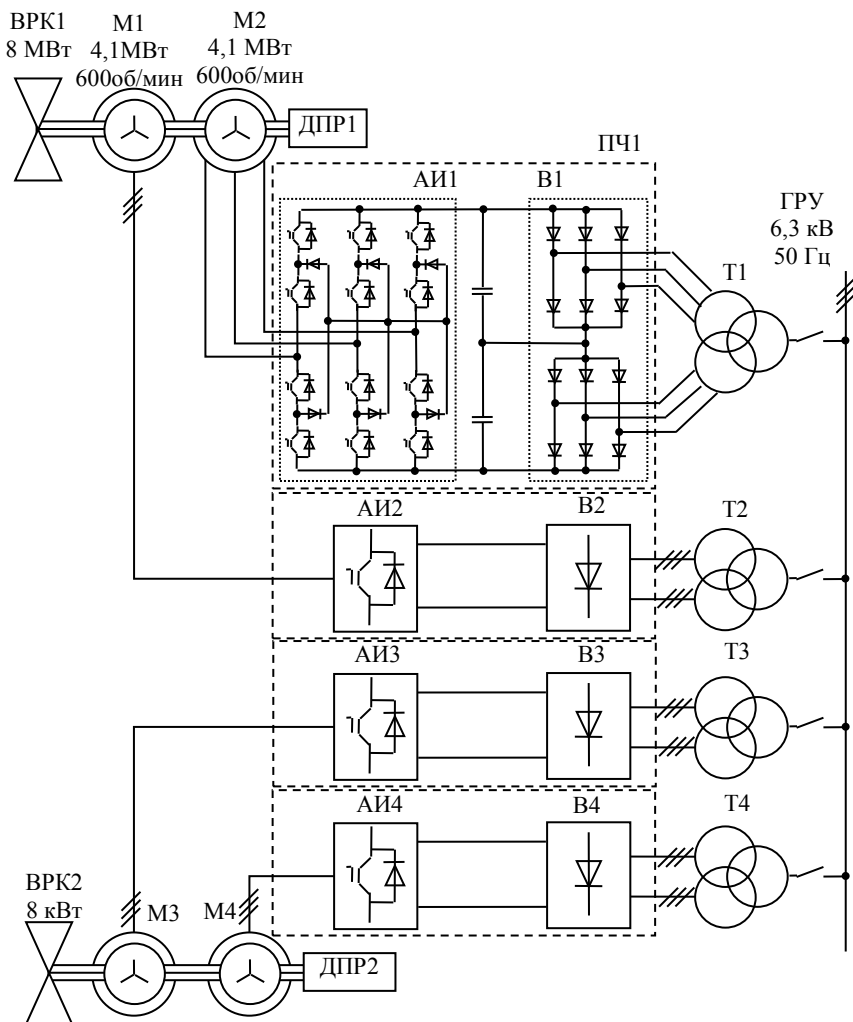


Рис.1.6. Структурная схема гребной установки плавучего добывающего комплекса

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.

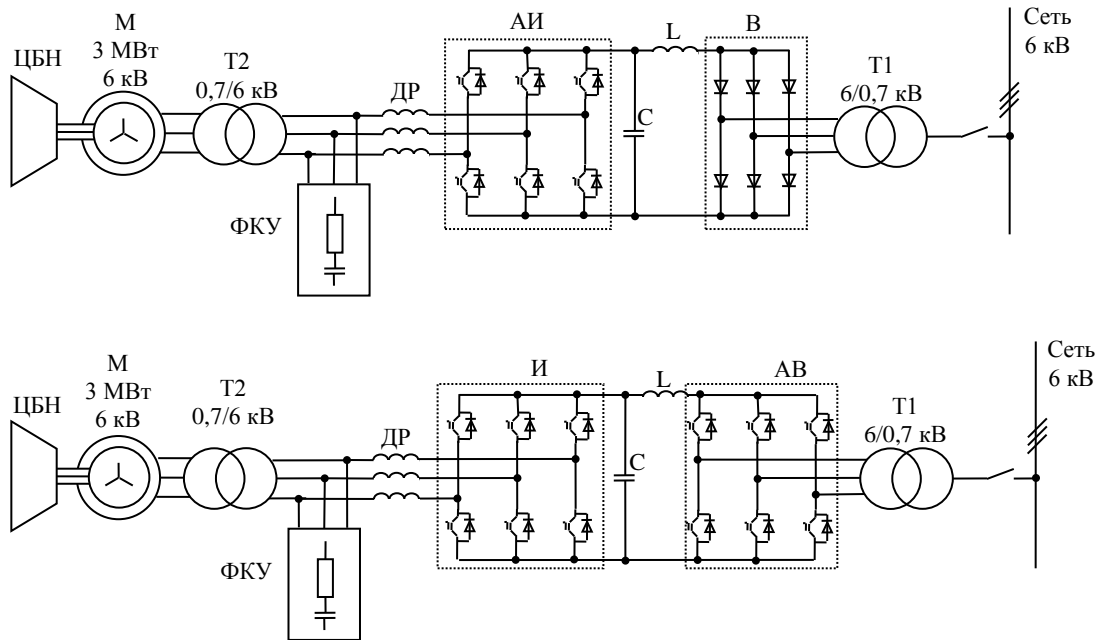


Рис.1.7. Структурные схемы двухтрансформаторных преобразователей частоты электроприводов центробежных нагнетателей

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.

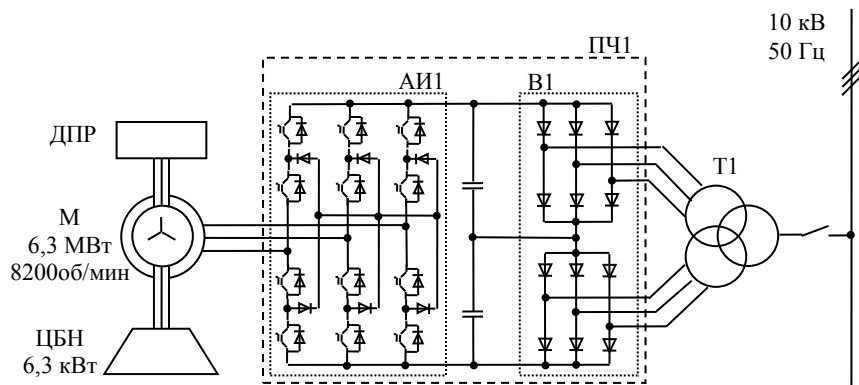
Параметры двигателя
электроприводного газоперекачивающего агрегата

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).

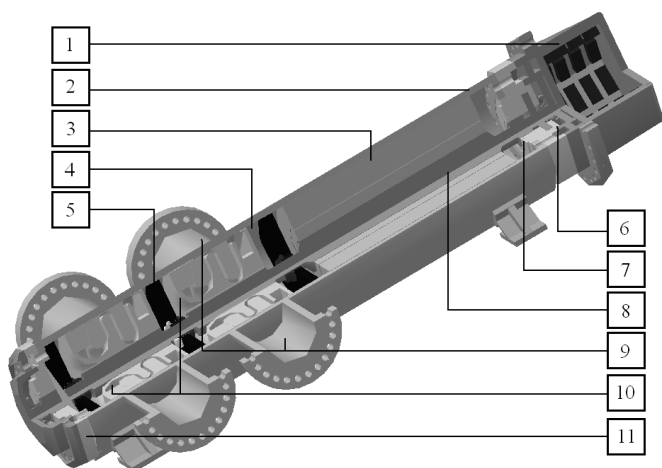
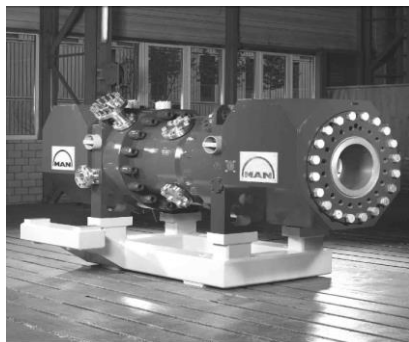


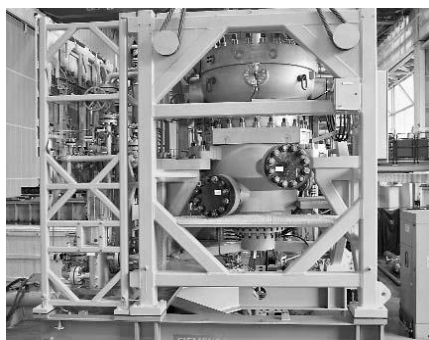
Рис 1.9. Структура подводного перекачивающего комплекса

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.

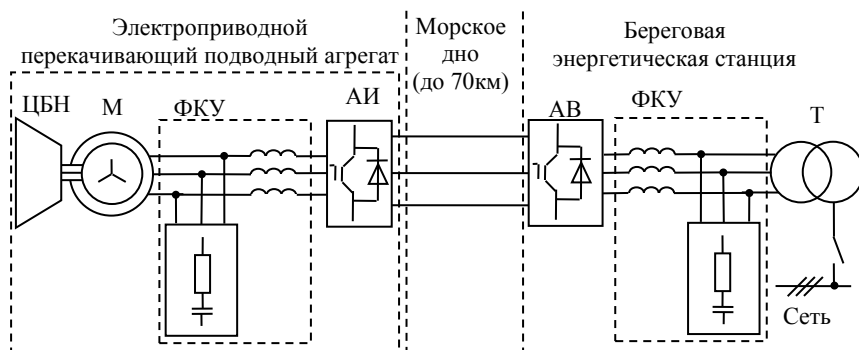


Рис. 1.11. Структура электропривода подводного перекачивающего агрегата

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.

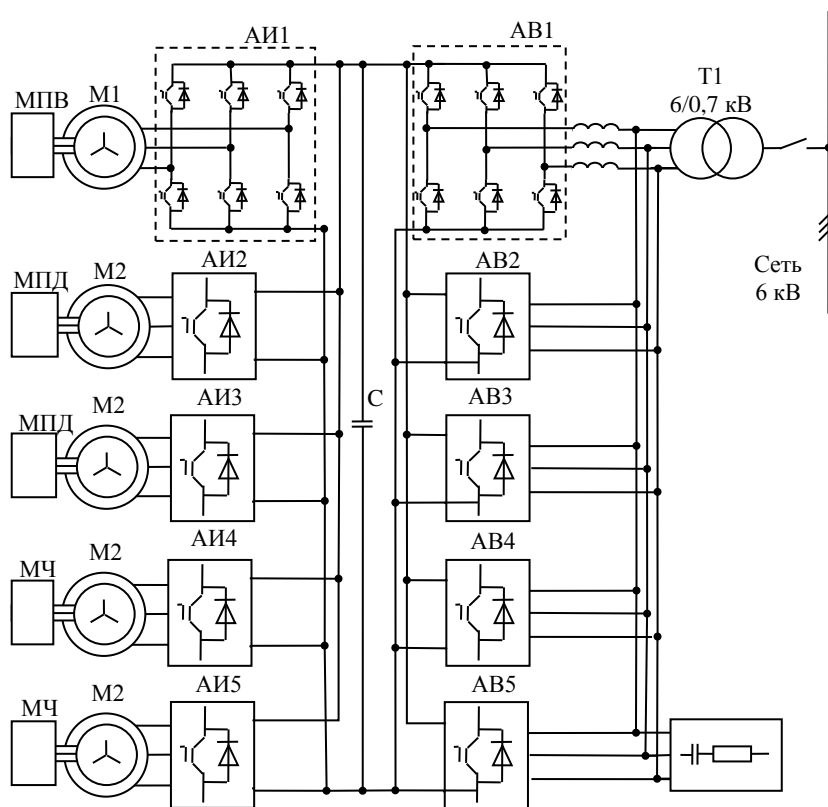


Рис. 1.13. Структурная схема электропривода главных механизмов экскаватора ЭКГ – 32

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.

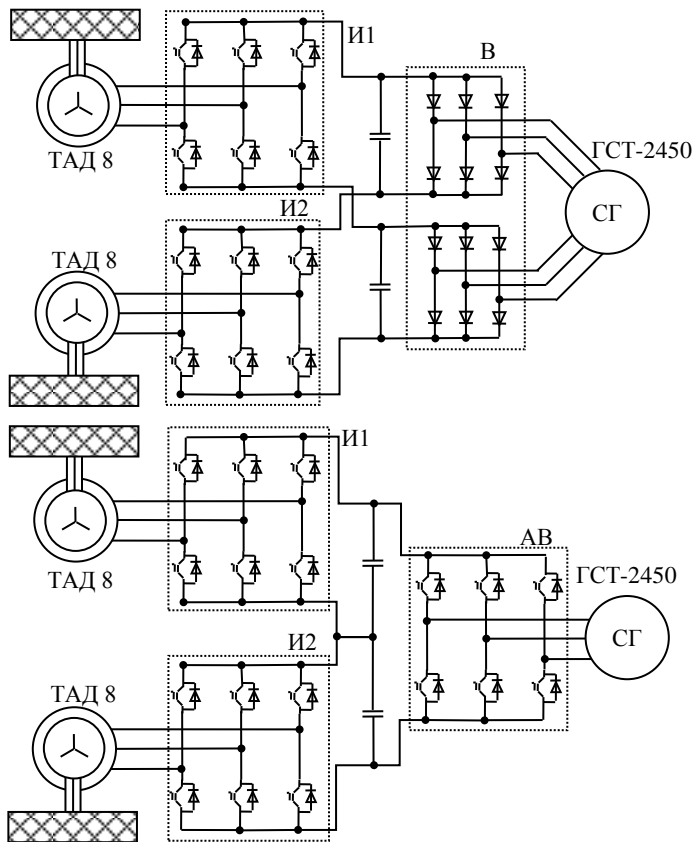


Рис. 1.15 Схема электропривода мотор-колеса самосвала «БелАз»

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 подлажном 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.

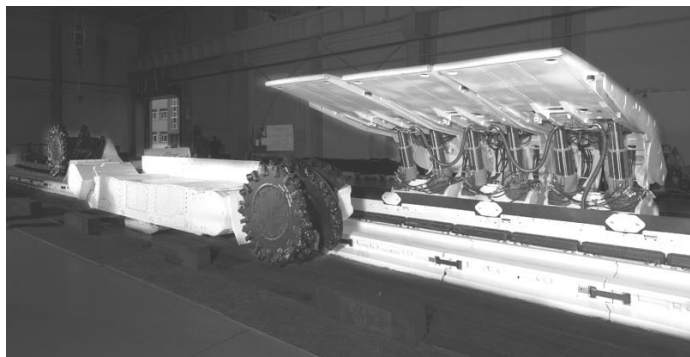


Рис. 1.16. Очистные и проходческие комбайны

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 Vasco. Смонтированный вид преобразователя частоты в раме очистного комбайна представлена на рис.1.17б.

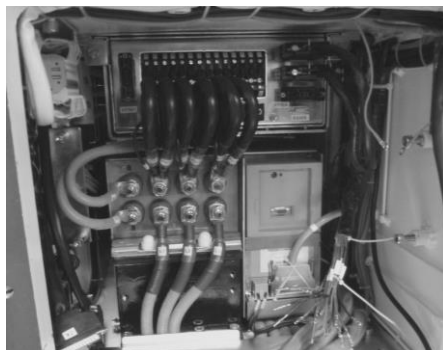
Мощность преобразователя частоты 400 кВт, напряжение 380 В. Перегрузочная способность до 150%.

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).

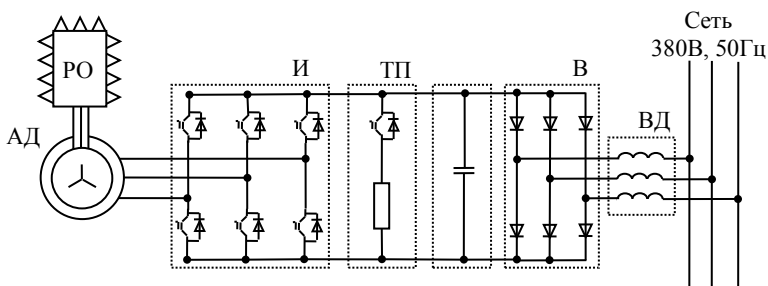


Рис. 1.18. Структурная схема электропривода очистного комбайна

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	Изменяемые 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)	Сопротивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) статора
Rotor Rr (Ohm) Llr' (H)	Сопротивление 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).

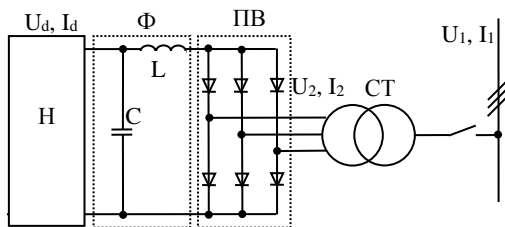


Рис. 2.1. Структурная схема выпрямителя.

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).

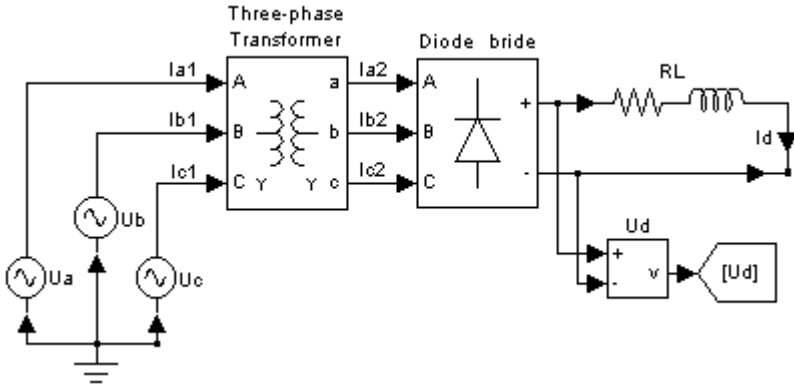


Рис.2.2. Схема имитационной модели 6-пульсного выпрямителя

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.

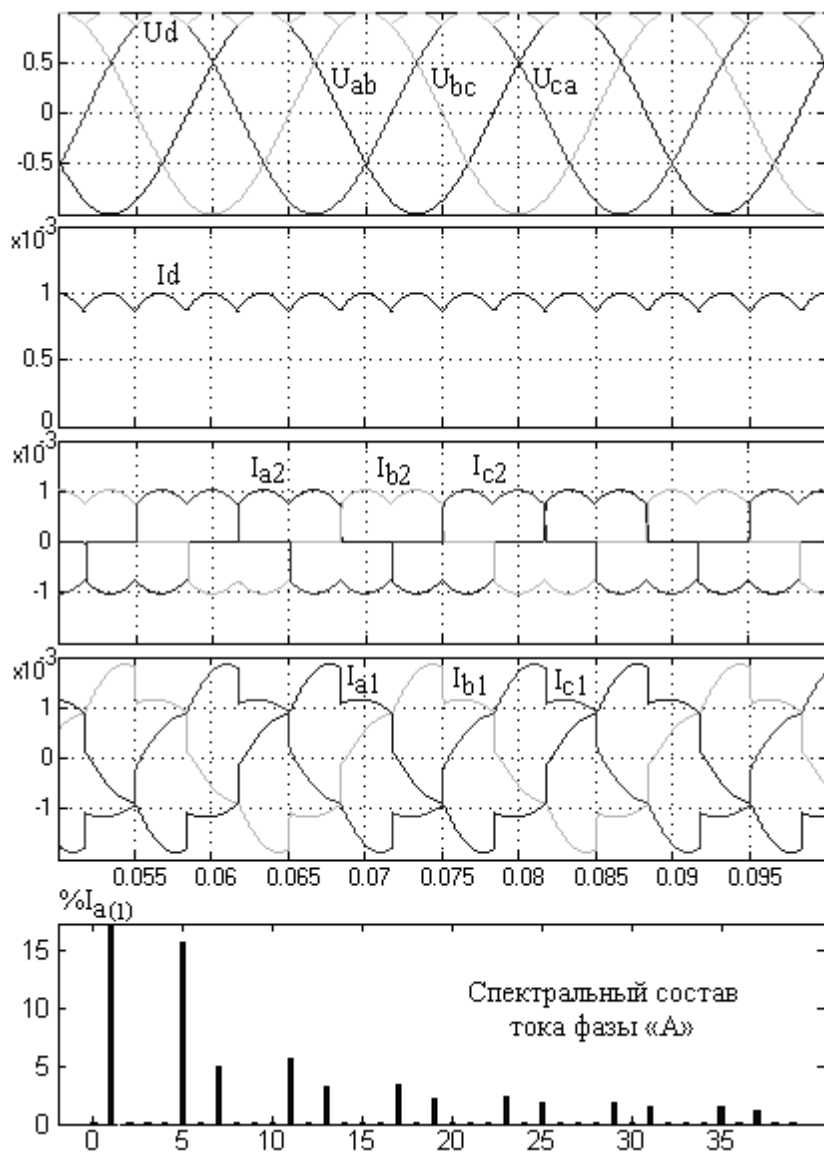


Рис.2.3а. Токи и напряжения 6-пульсного выпрямителя

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 натурального 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.

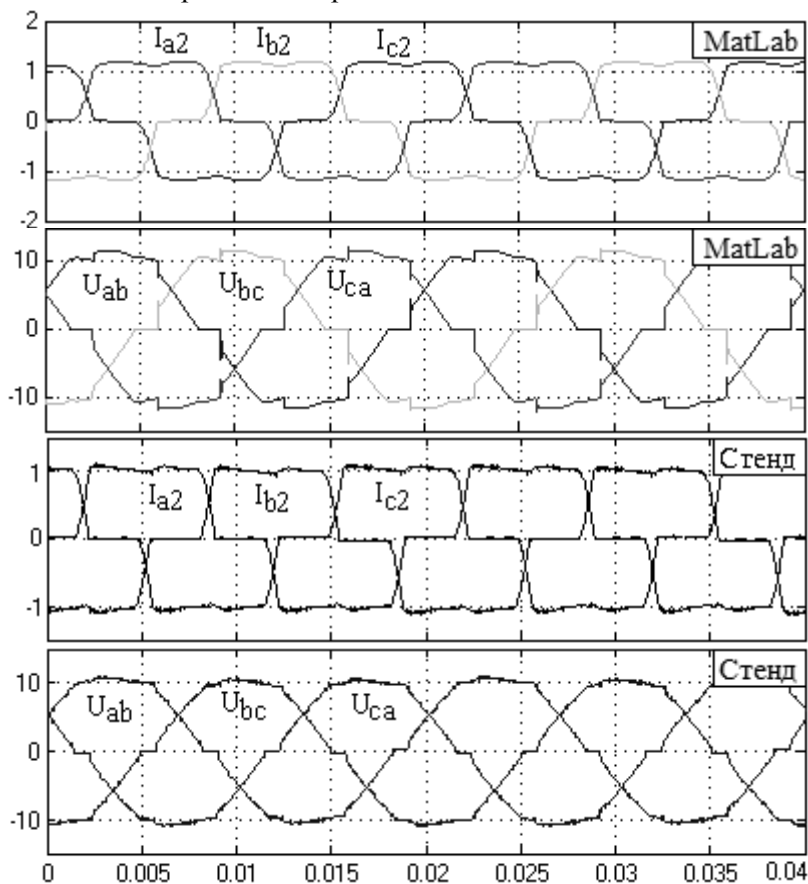


Рис.2.36. Токи и напряжения 6-пульсного выпрямителя, полученные в Mat Lab и в экспериментах

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.

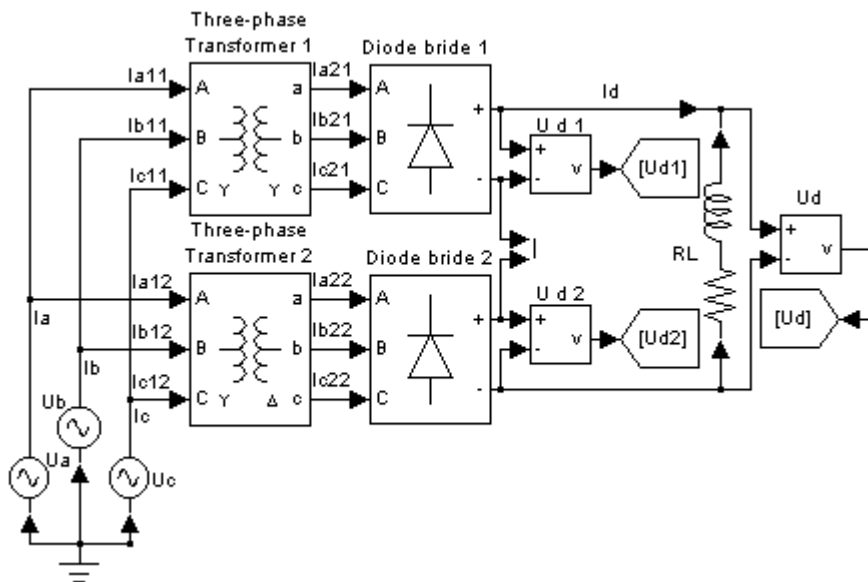


Рис. 2.4. Схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов

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.

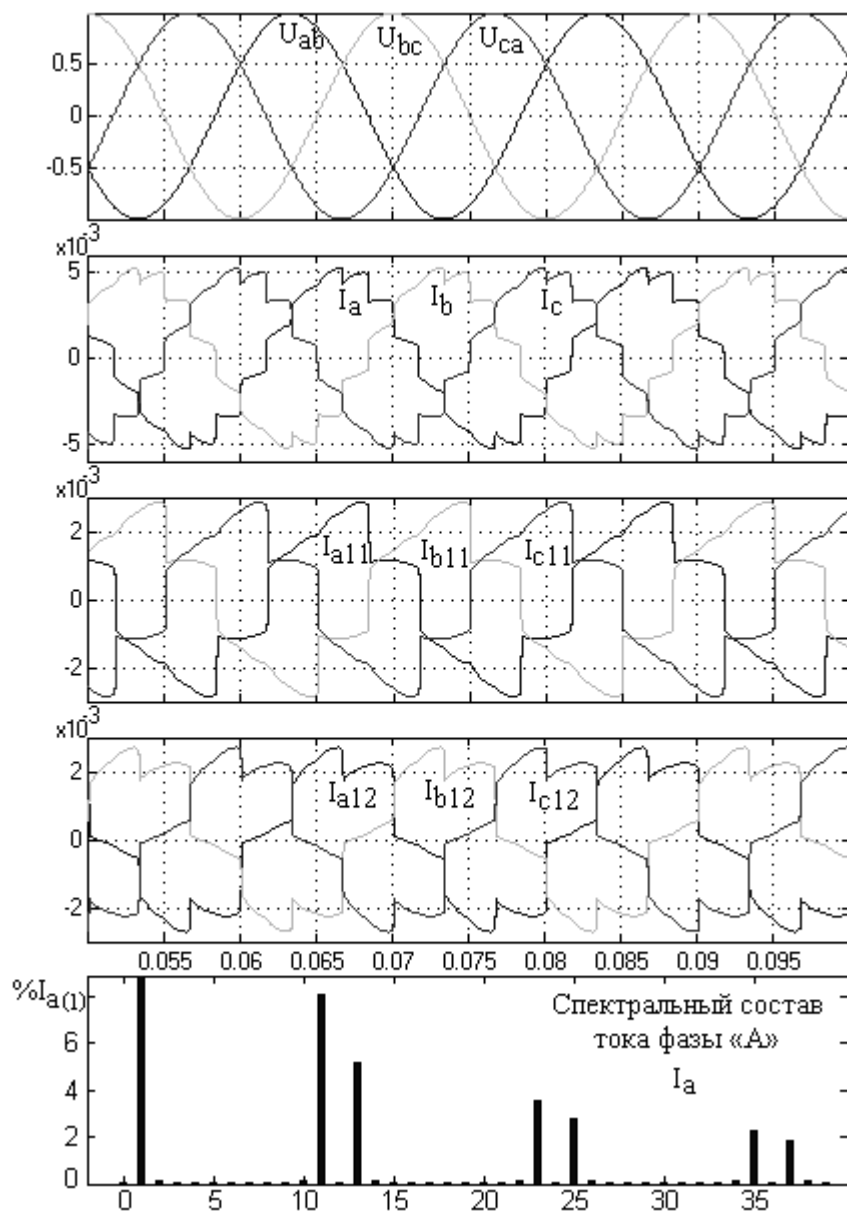
Результаты моделирования 12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов приведены на рис.2.5 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений выпрямителя при работе в установившемся режиме.

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.



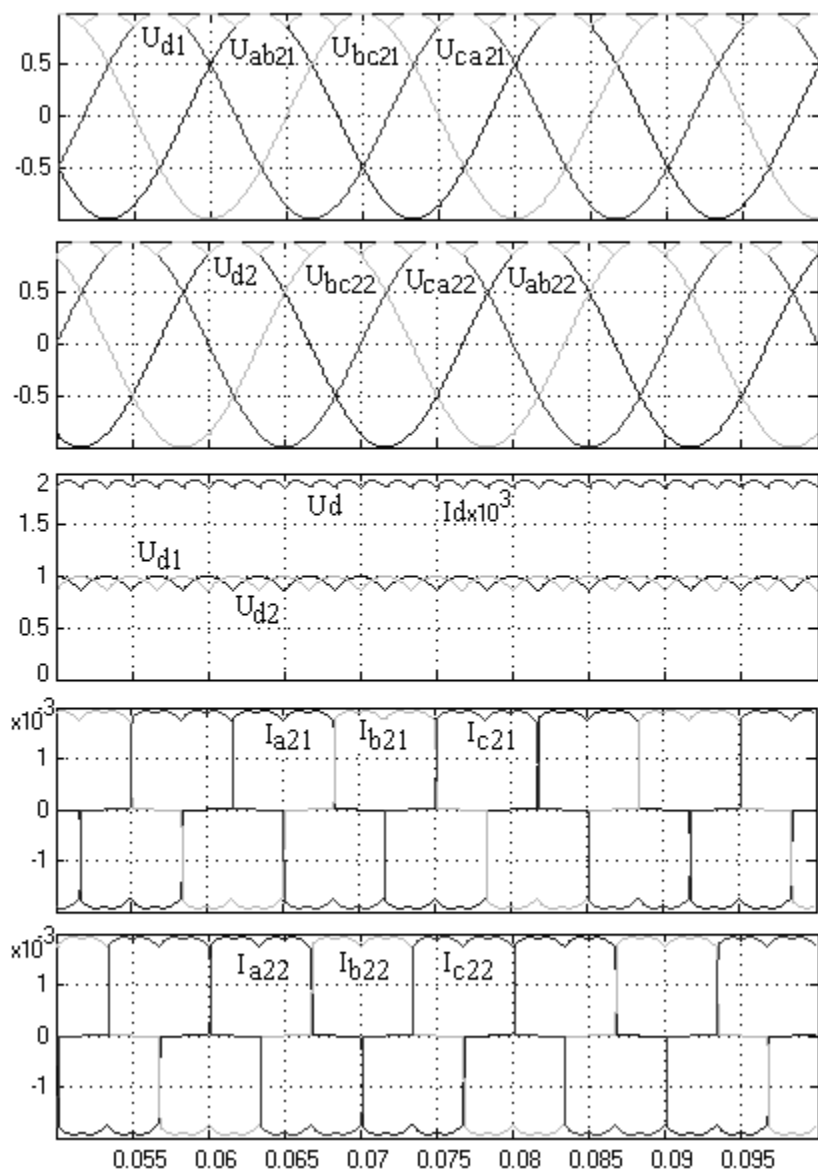


Рис.2.5. Входные и выходные токи и напряжения
12-пульсного выпрямителя с последовательным соединением мостов

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.

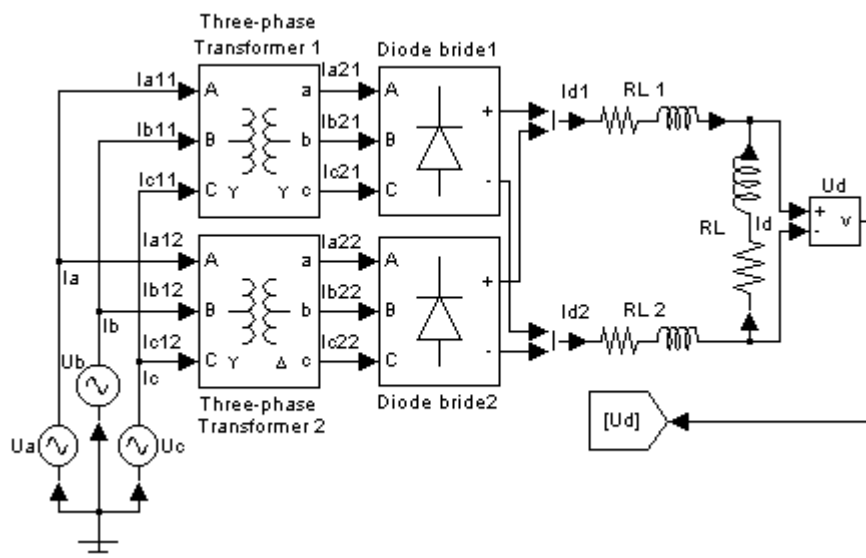


Рис. 2.6. Схема имитационной модели 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов

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.

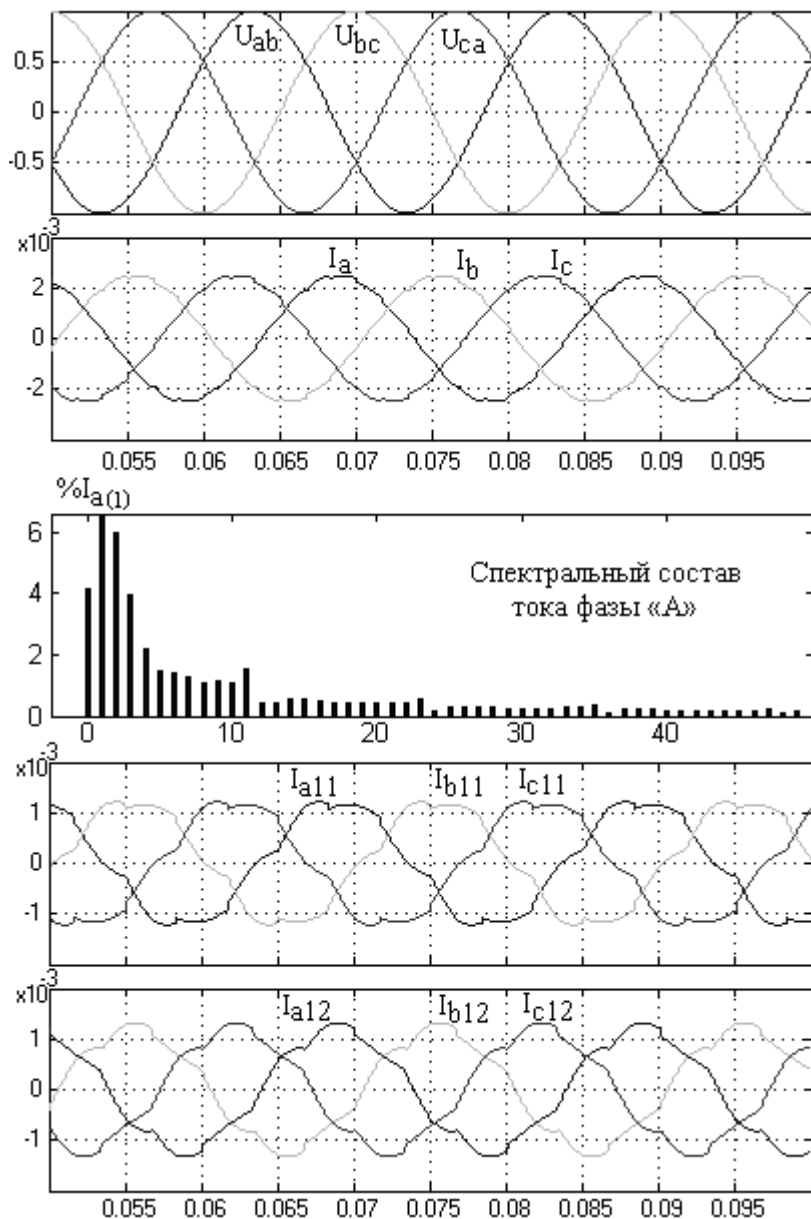
При выполнении моделирования приняты следующие параметры системы: амплитудные значения фазных напряжений источников питания $U_{am}=U_{bm}=U_{cm}=0.577$ В; частота напряжения $f=50$ Гц; коэффициенты трансформации трехфазных трансформаторов $k_T=1$; активные сопротивления и индуктивности уравнильных дросселей $R_{dr}=1000$ 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.



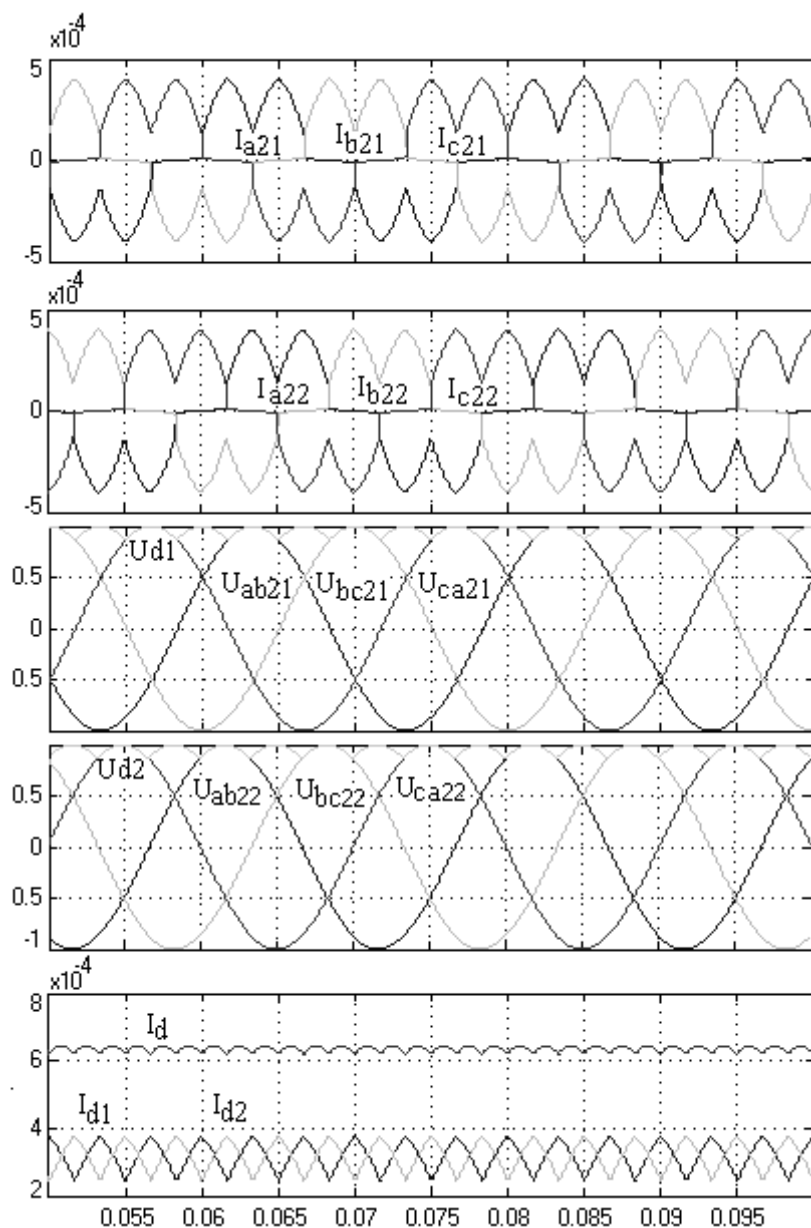


Рис.2.7. Входные и выходные токи и напряжения
12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением

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.

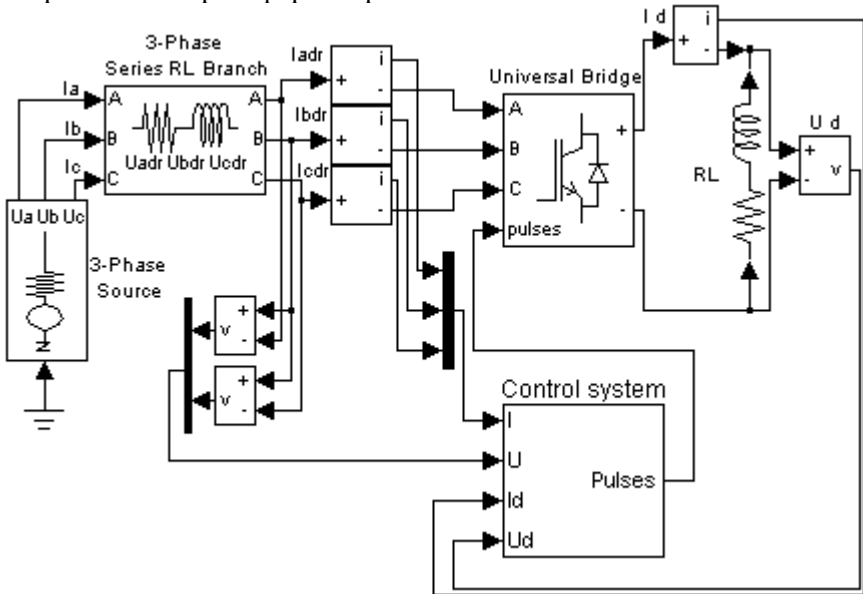


Рис. 2.8. Схема имитационной модели бестрансформаторного двухуровневого активного выпрямителя

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.

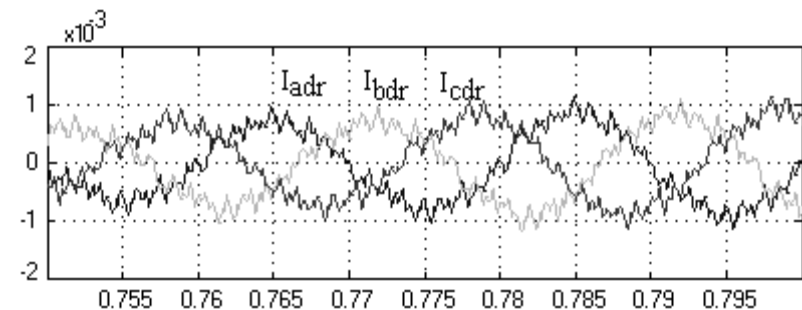
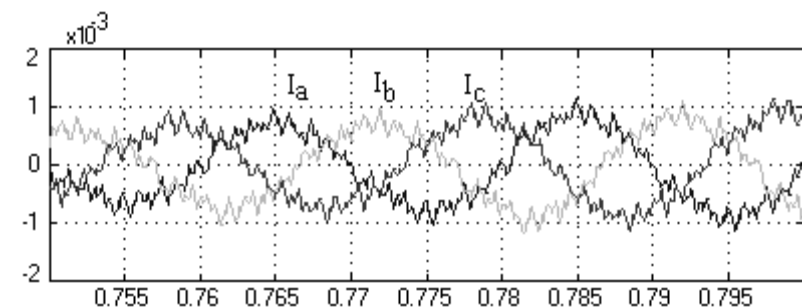
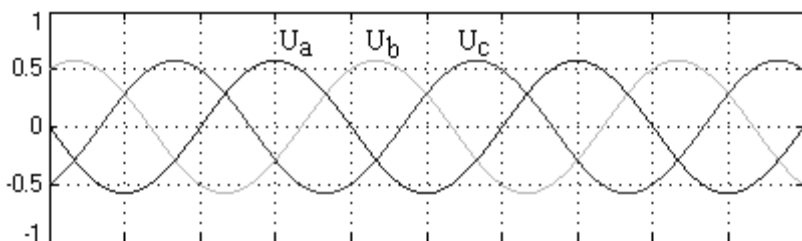
Также их графиков видно, что напряжение на выходе дросселей имеет форму импульсов. Работа активного выпрямителя в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции позволяет регулировать мгновенное значение токов, потребляемых из сети, что позволяет регулировать их синусоидальность.

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		$0,1 \cdot 10^{-3}$



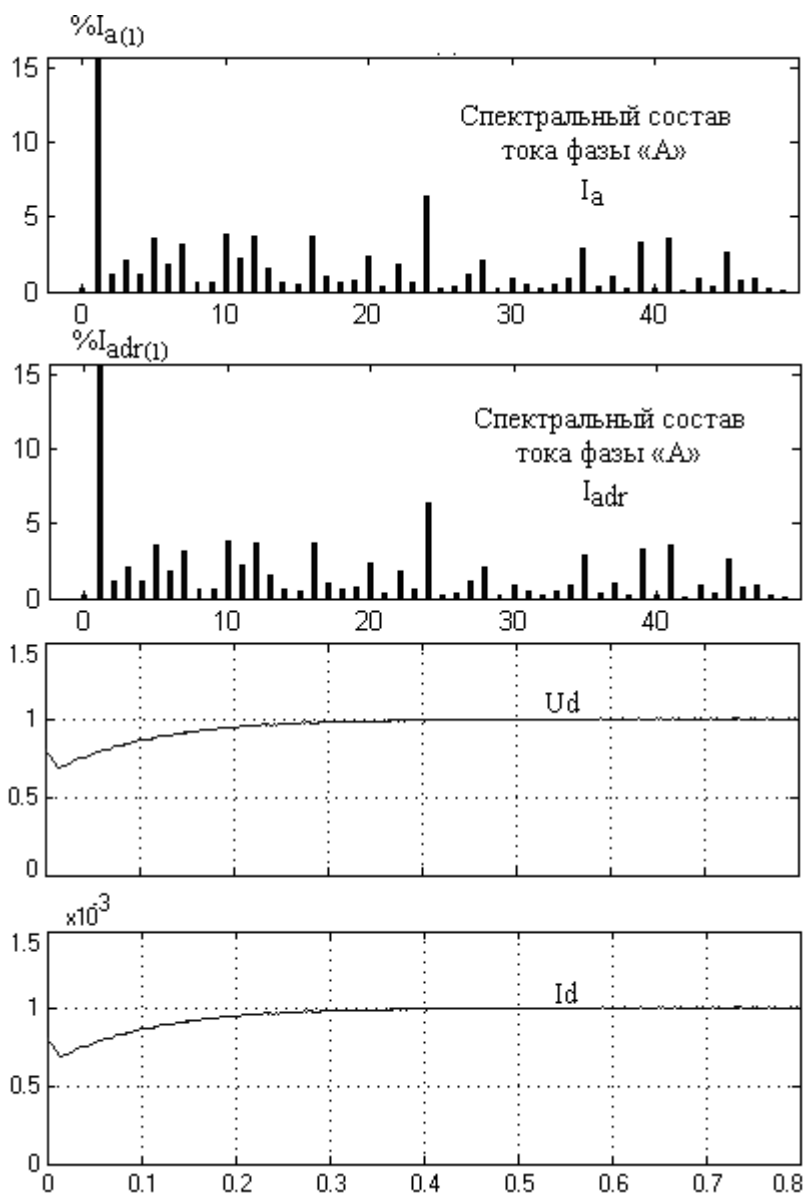


Рис.2.9. Входные и выходные токи и напряжения двухуровневого активного выпрямителя

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.

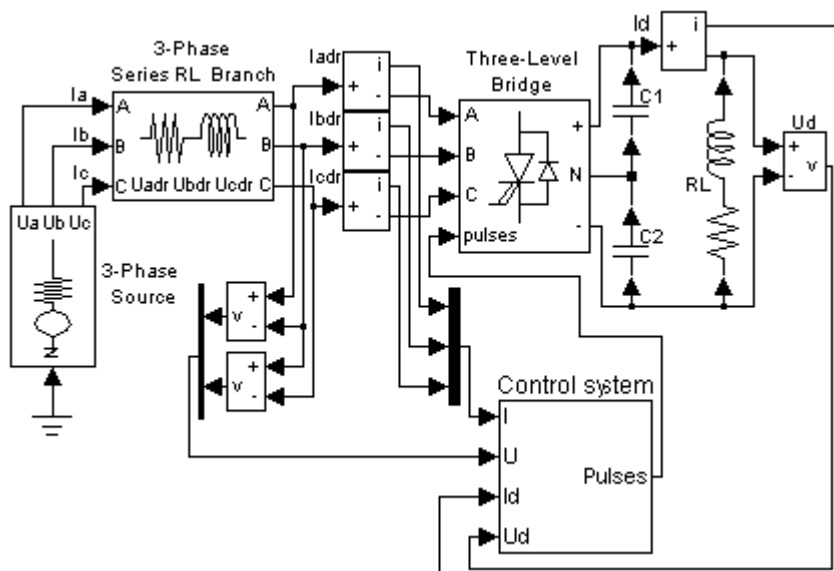


Рис. 2.10. Схема имитационной модели трехуровневого активного выпрямителя

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.

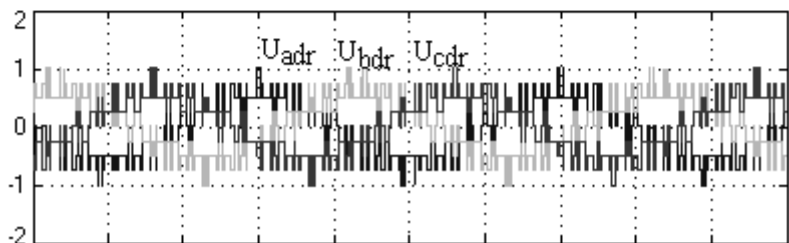
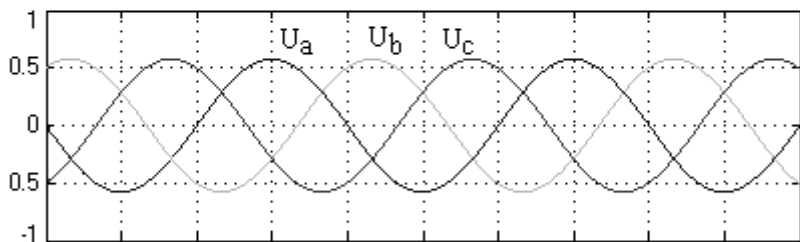
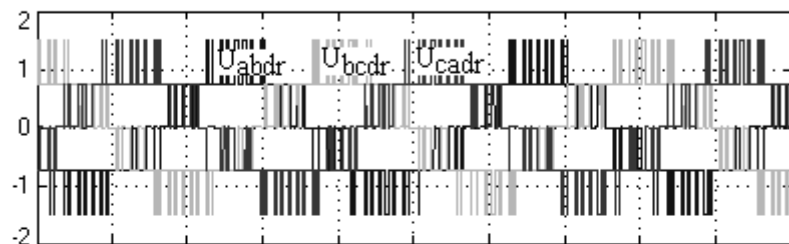
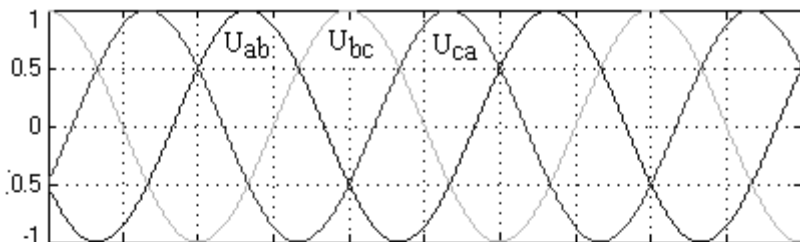
Таблица 2.13

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

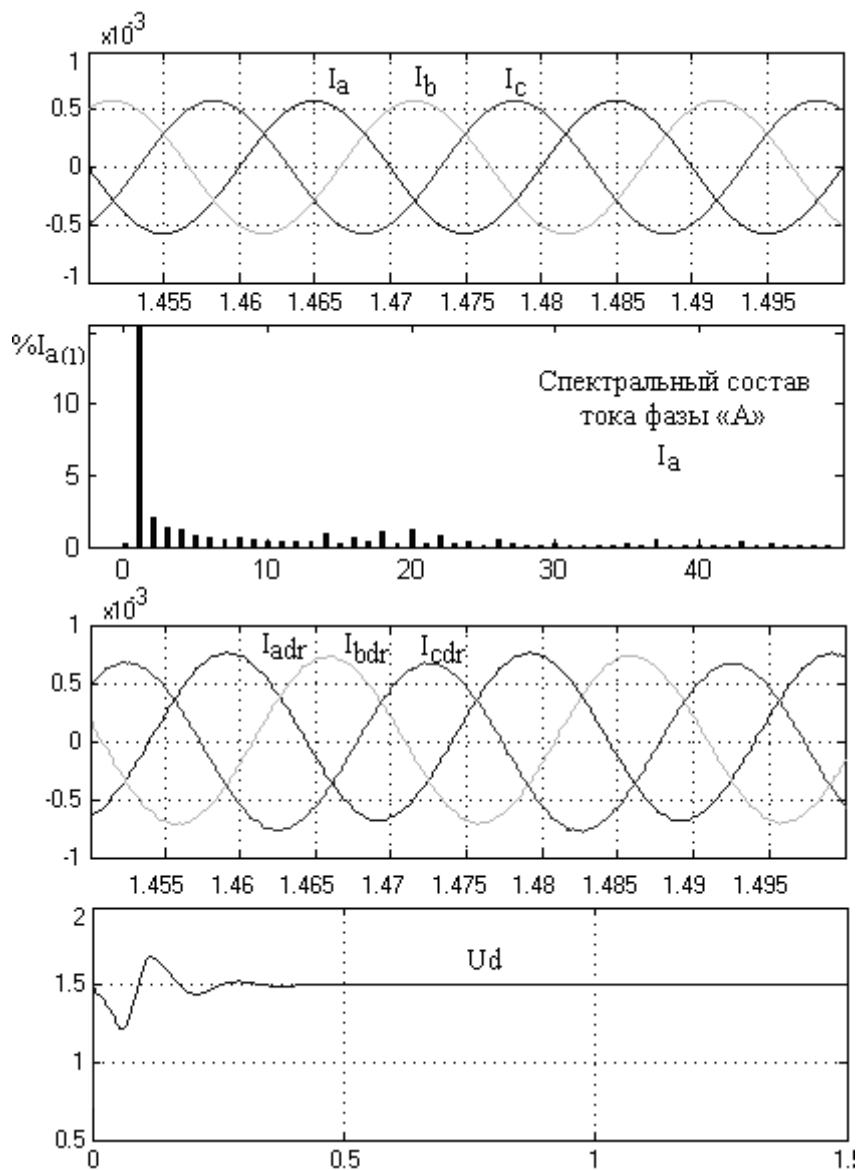


Рис.2.11. Входные и выходные токи и напряжения трехуровневого активного выпрямителя

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).

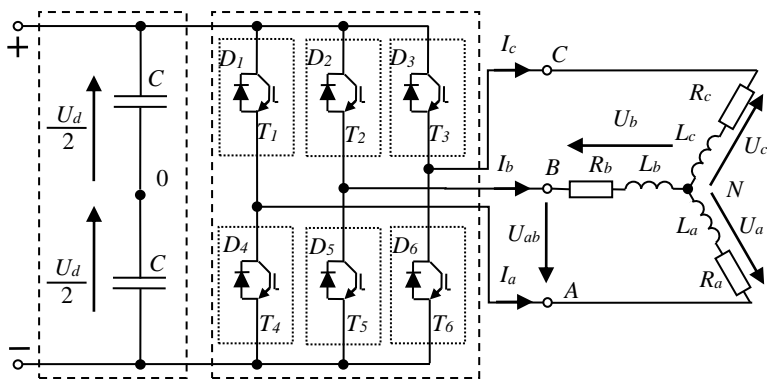


Рис.2.12. Схема автономного инвертора

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

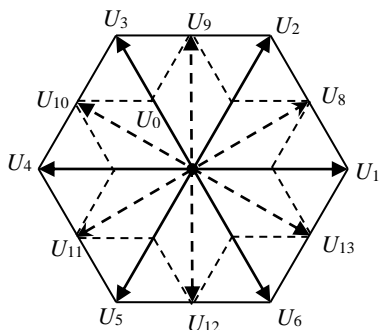


Рис. 2.13. Годограф выходного вектора напряжения

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).

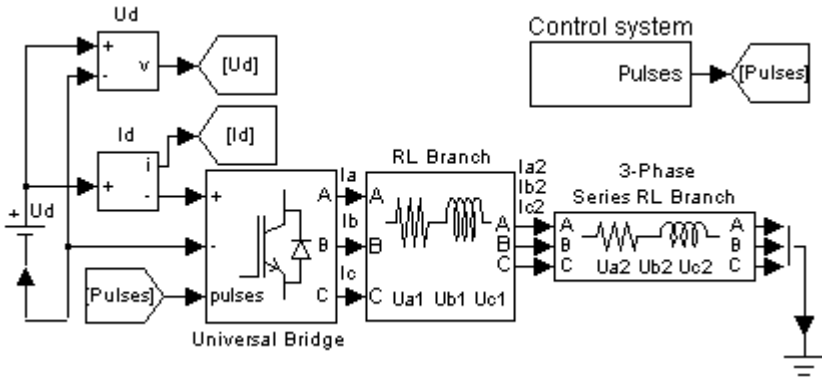


Рис. 2.14. Схема имитационной модели двухуровневого автономного инвертора

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.

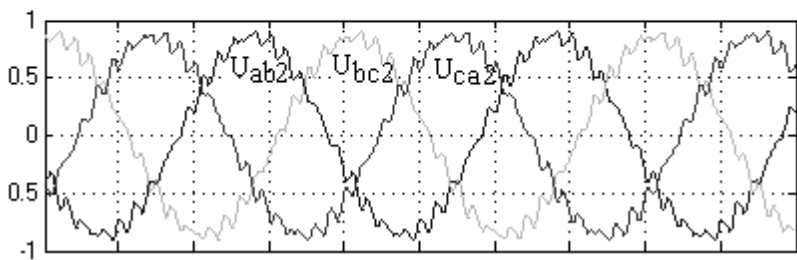
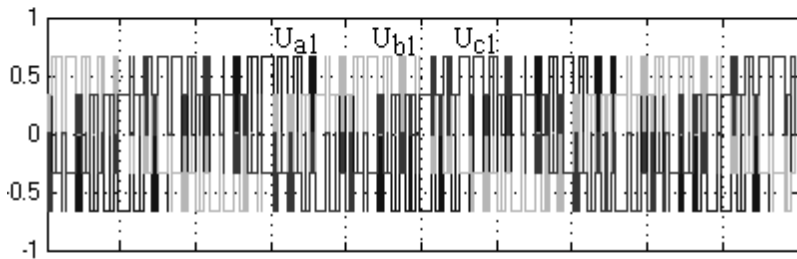
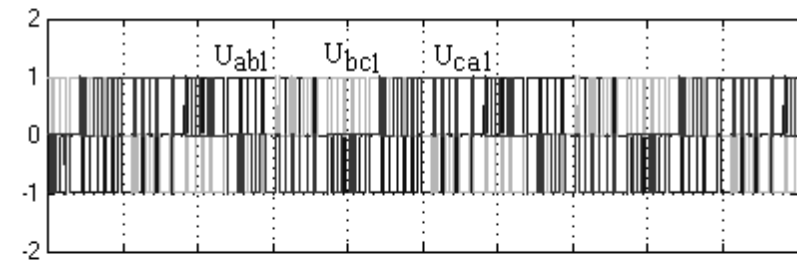
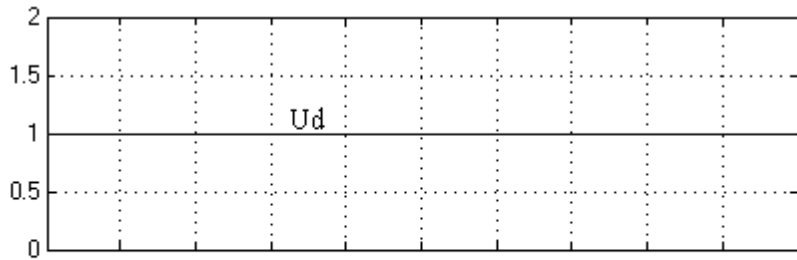
Анализ результатов представлен в таблице 2.15.

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	



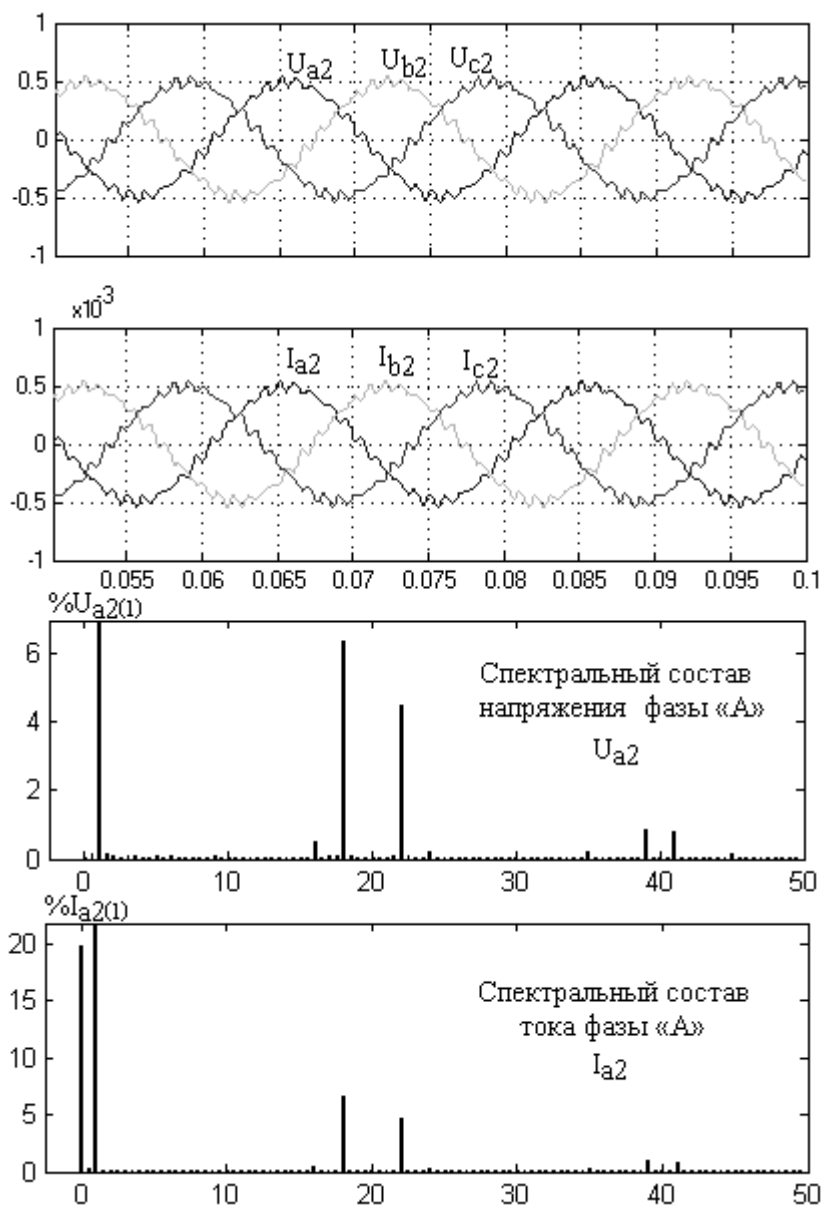


Рис.2.15. Входные и выходные токи и напряжения двухуровневого автономного инвертора

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).

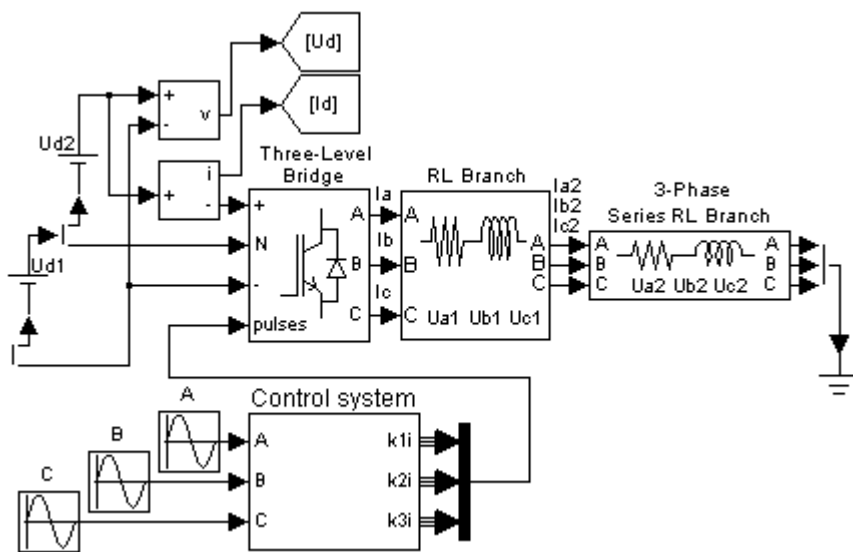


Рис. 2.16. Схема имитационной модели трехуровневого автономного инвертора

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.

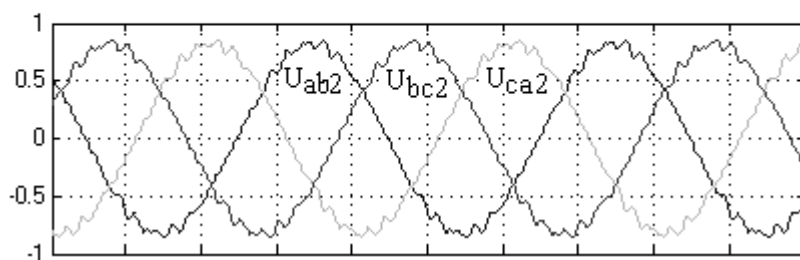
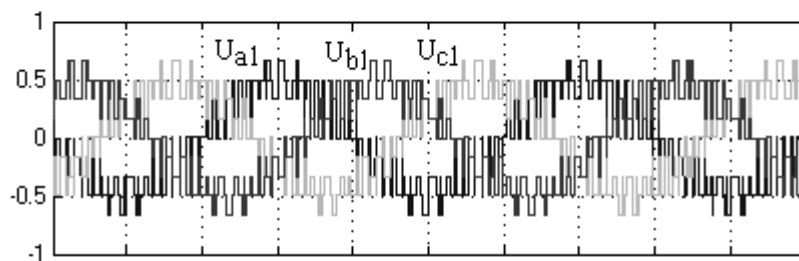
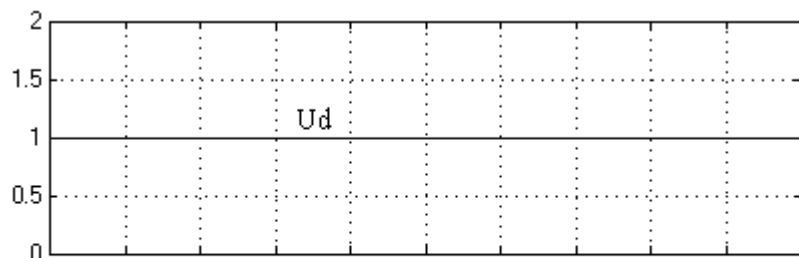
Результаты моделирования трехуровневого автономного инвертора приведены на рис.2.17 в виде диаграмм мгновенных значений токов и напряжений при его работе в установившемся режиме. Анализ результатов представлен в таблице 2.16.

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	



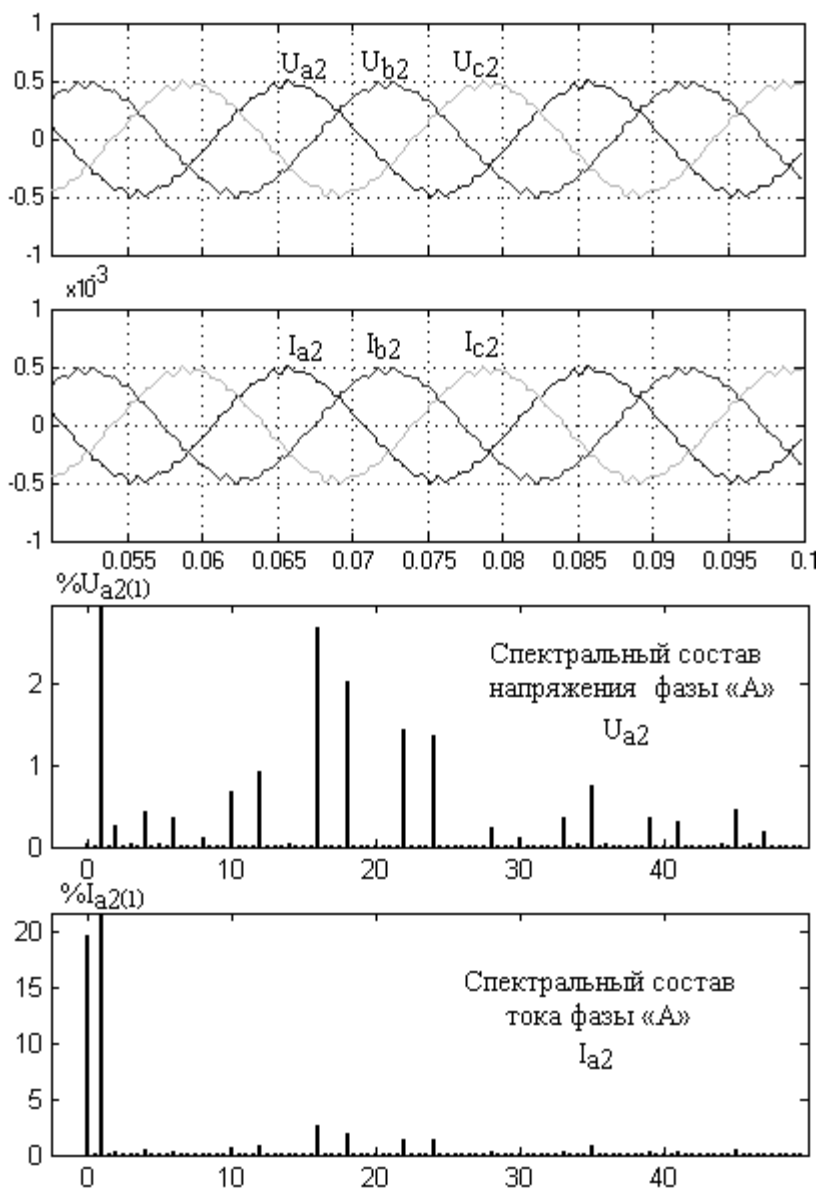


Рис.2.17. Входные и выходные токи и напряжения трехуровневого автономного инвертора

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.

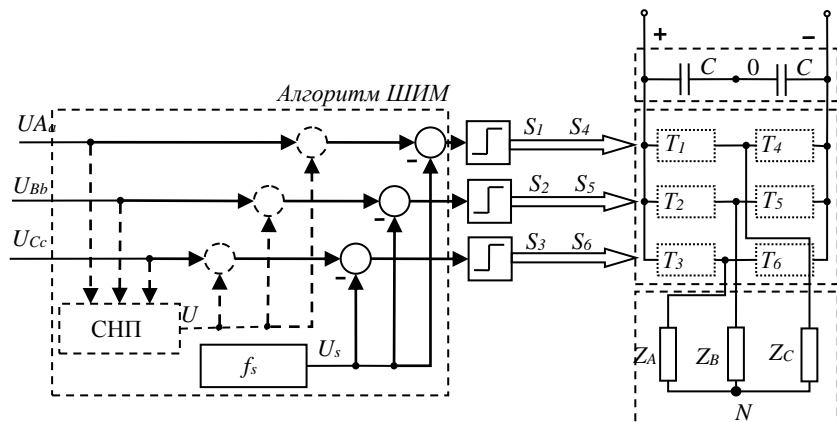
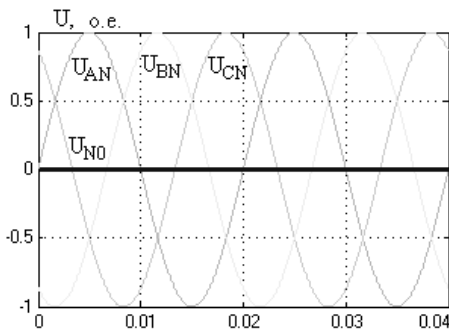


Рис. 2.18. Схема управления автономным инвертором с широтно-импульсной модуляцией

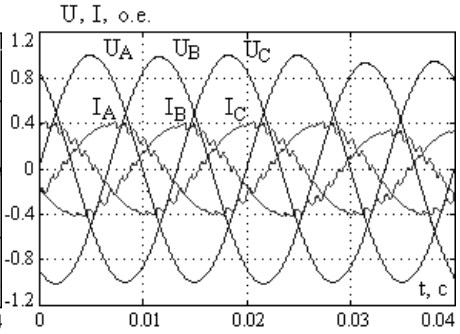
При реализации синусоидальной широтно-импульсной модуляции опорный сигнал U_s , который может иметь различную форму, сравнивается с управляющими сигналами U_a , U_b , U_c . При их сравнении формируются коммутационные функции управления полупроводниковыми ключами S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , S_6 .

На рис.2.19а показан управляющий сигнал синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ).

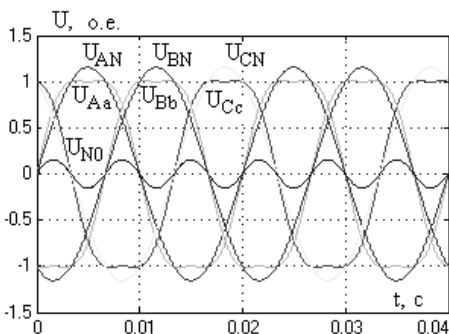
В системе **прямого управления электромагнитным моментом** (*Direct Torque Control - DTC*) результирующий вектор выходного напряжения автономного инвертора и комбинация коммутируемых полупроводниковых ключей выбирается по таблице переключений. В зависимости от структуры электропривода и требований к его динамическим характеристикам таблица переключений может иметь различное внутреннее содержание.



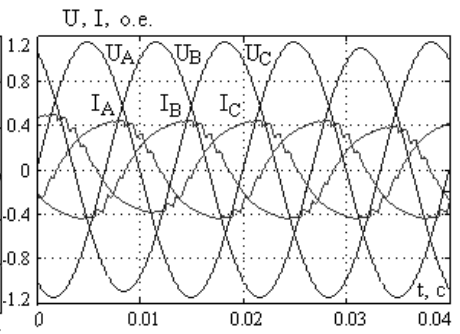
а) синусоидальная ШИМ



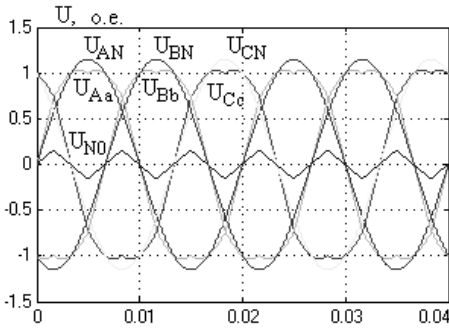
а) синусоидальная ШИМ



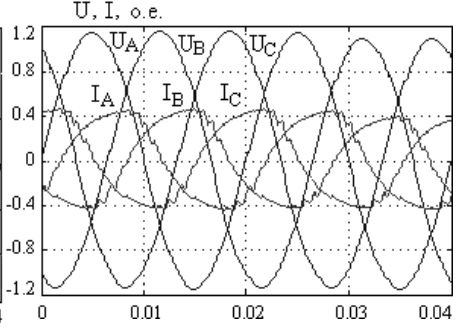
б) ШИМ с синусоидальной
предмодуляцией третьей гармоникой



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 .

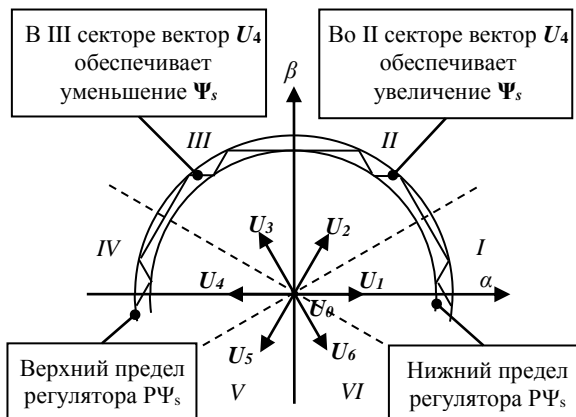


Рис.2.21. Годограф потокосцепления статора асинхронного двигателя

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.

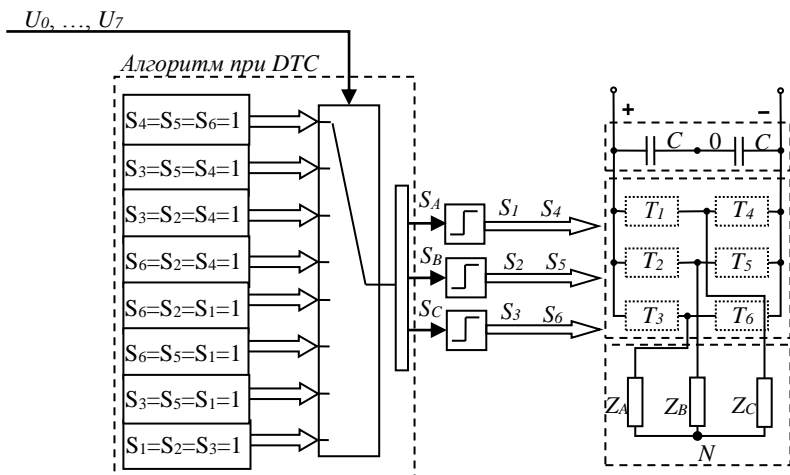


Рис. 2.22. Схема управления автономным инвертором электропривода с прямым управлением

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.

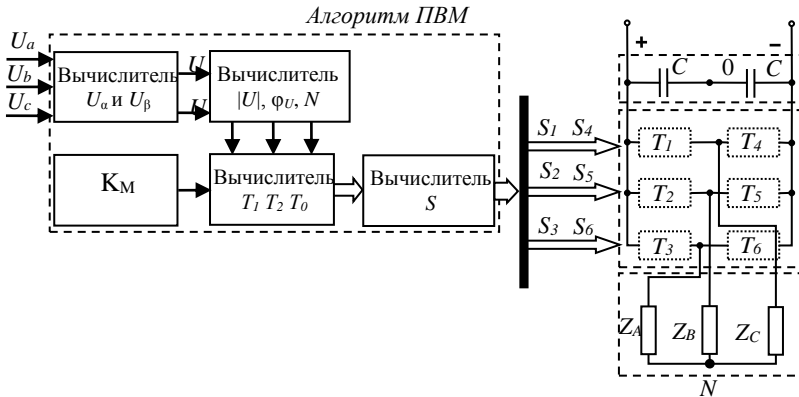


Рис. 2.23. Схема управления автономным инвертором с пространственно-векторной модуляцией

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	$0.5T_c - T_2 - T_1$					

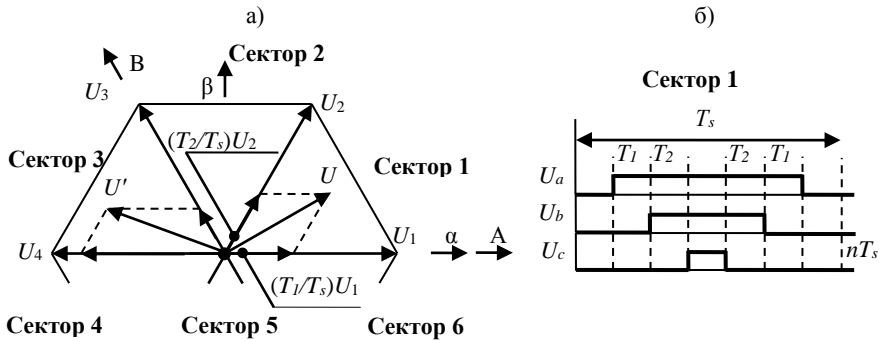


Рис. 2.24. Секторное разбиение координатной плоскости α - β

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 $9,5\%$.

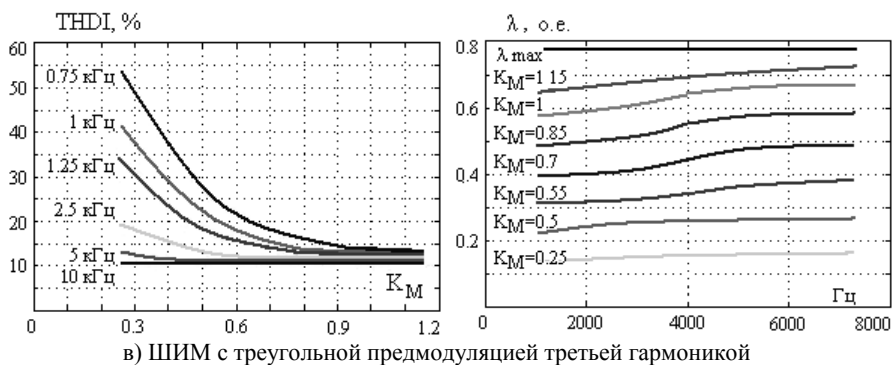
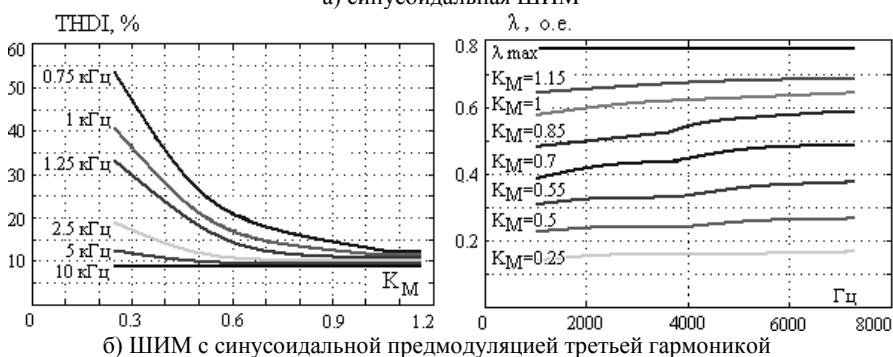
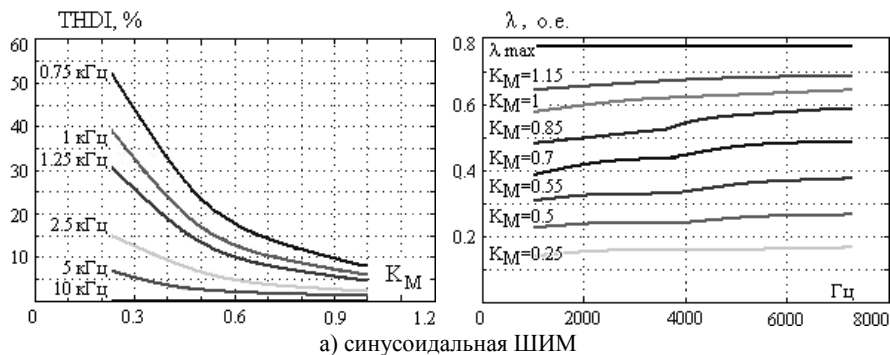


Рис.2.25. Зависимости коэффициента синусоидальных искажений тока от коэффициента модуляции при разных несущих частотах и коэффициента мощности от несущей частоты при разных коэффициентах модуляции

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.

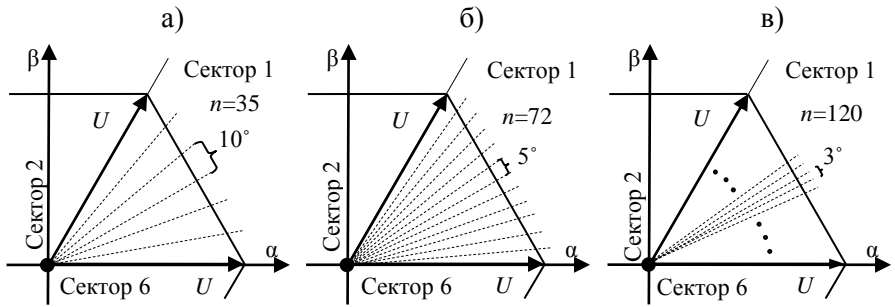


Рис.2.26. Разбиение координатной плоскости α - β на подсекторы

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° .

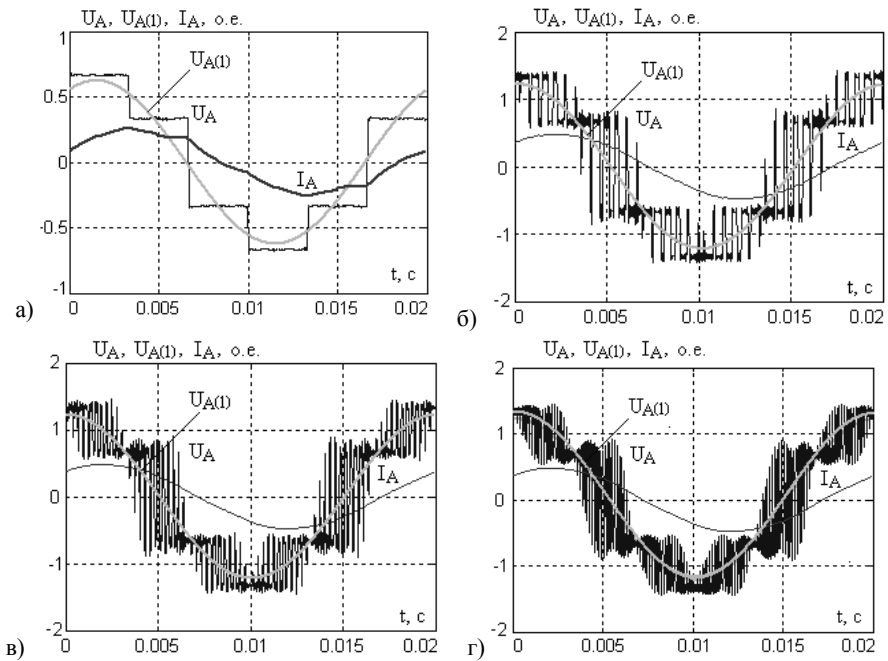


Рис.2.27. Выходной ток автономного инвертора, фазное напряжение и первая гармоника фазного напряжения

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.

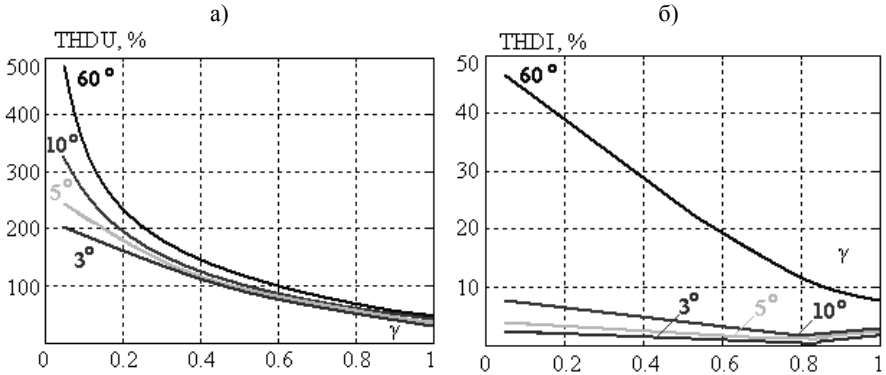


Рис.2.28. Зависимости коэффициента несинусоидальных искажений напряжения ($THDU$) и тока ($THDI$) на выходе автономного инвертора от относительной длительности коммутации (γ) при разной величине подсектора

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%.

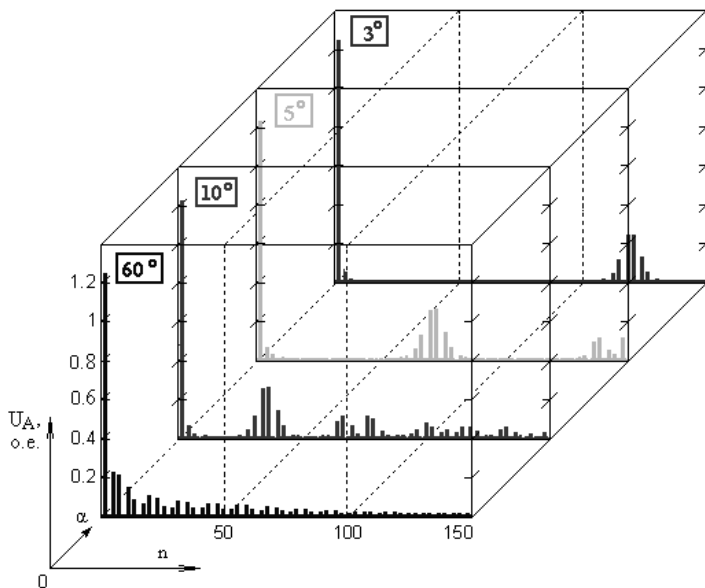


Рис.2.29. Спектры фазного напряжения

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

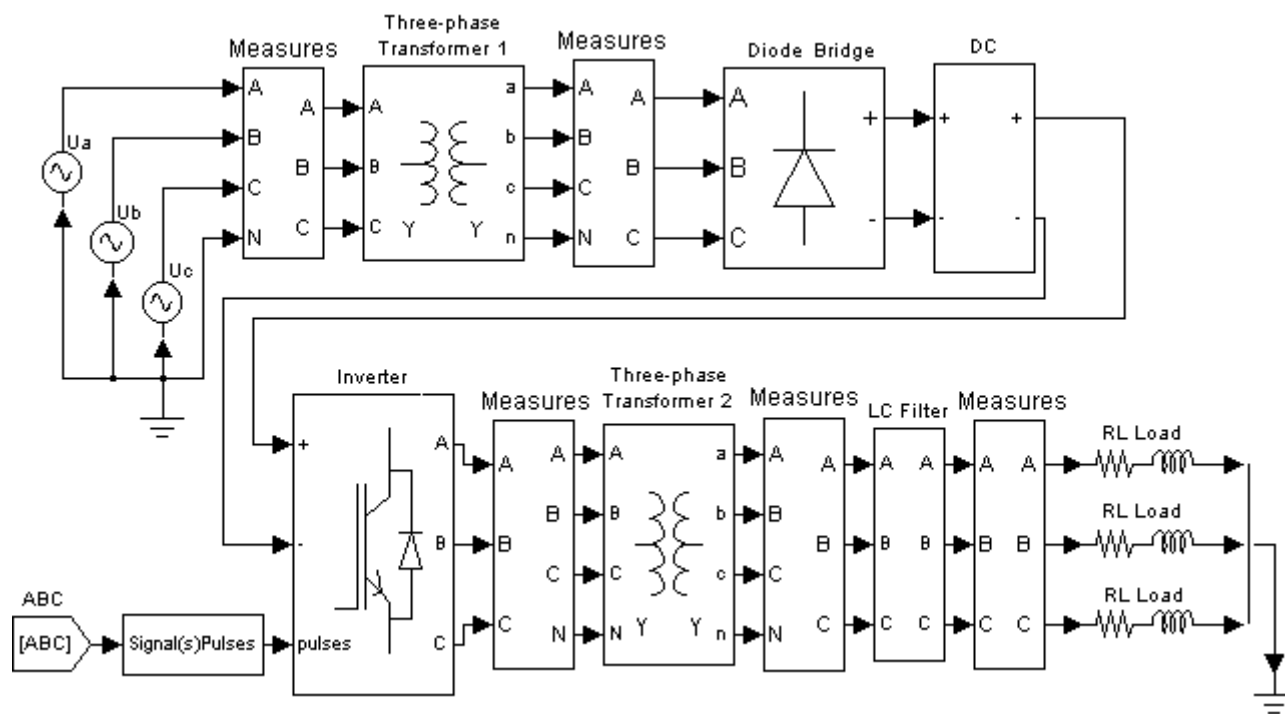


Рис. 3.1. Двухтрансформаторный преобразователь частоты с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

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}).

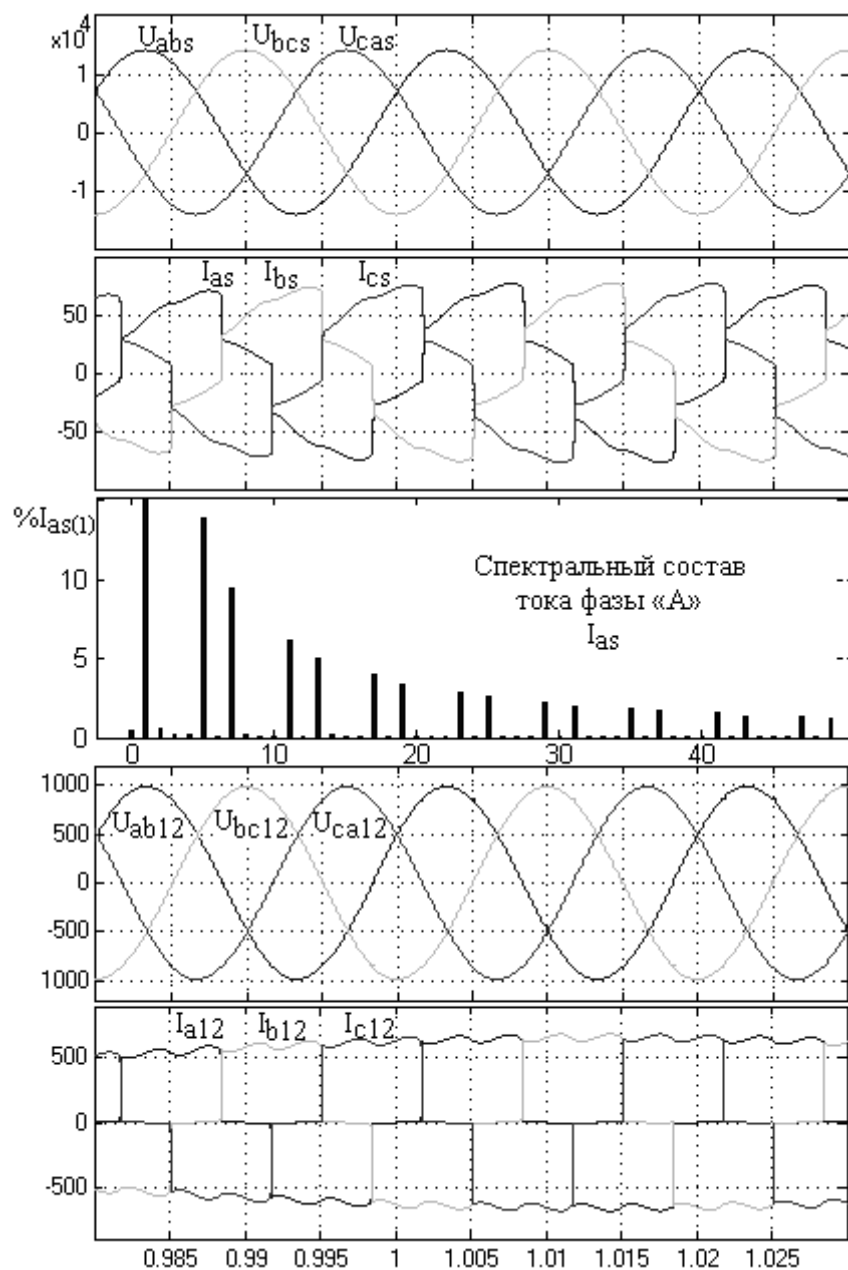
Также, на рис.3.2 приведены спектральные составы токов питающей сети и токов нагрузки, линейных напряжений питающей сети и нагрузки.

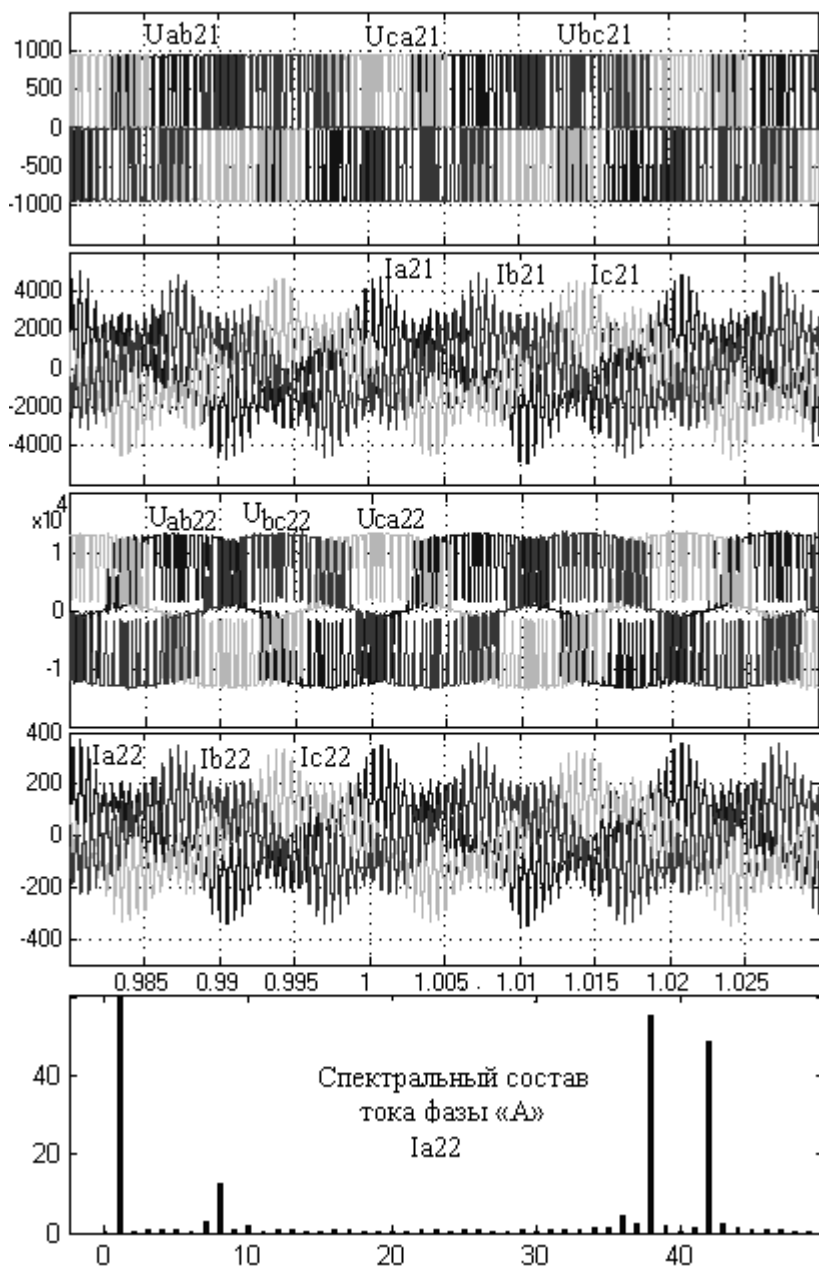
Таблица 3.2.

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	





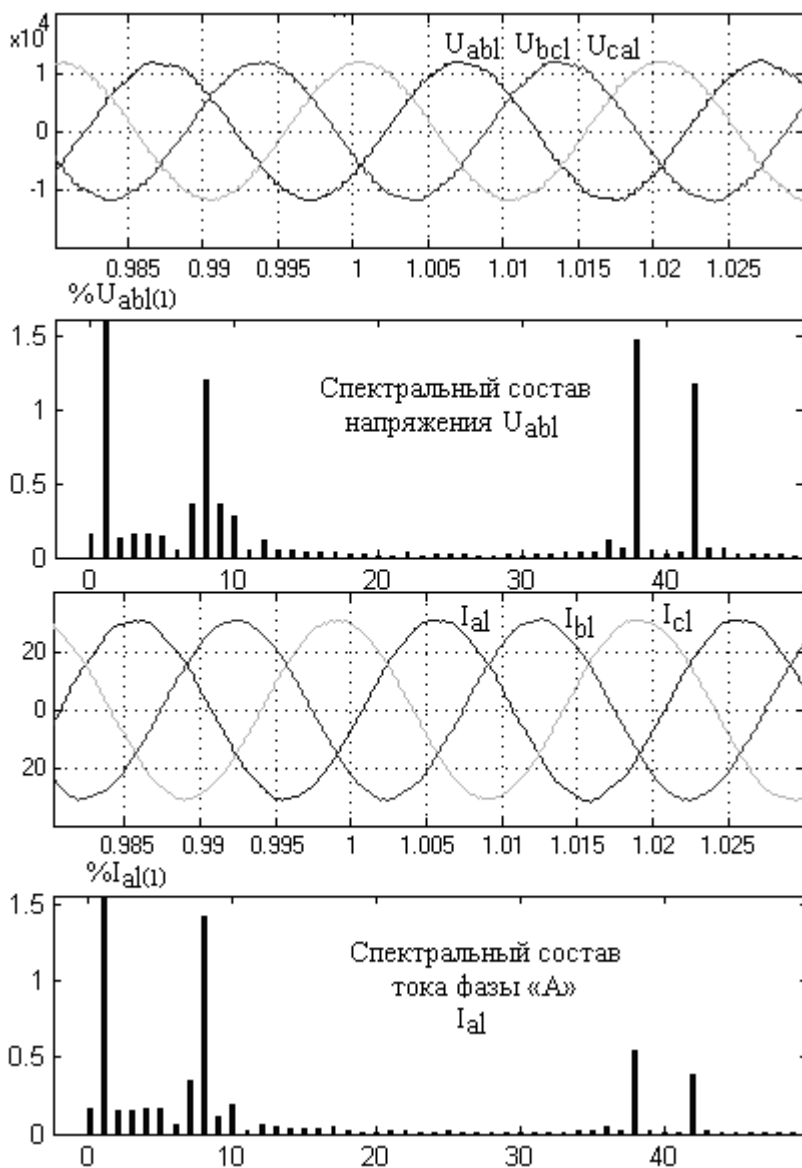


Рис.3.2. Результаты моделирования
двухтрансформаторного преобразователя частоты
с низковольтными полупроводниковыми коммутаторами

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_{abrl} , 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%.

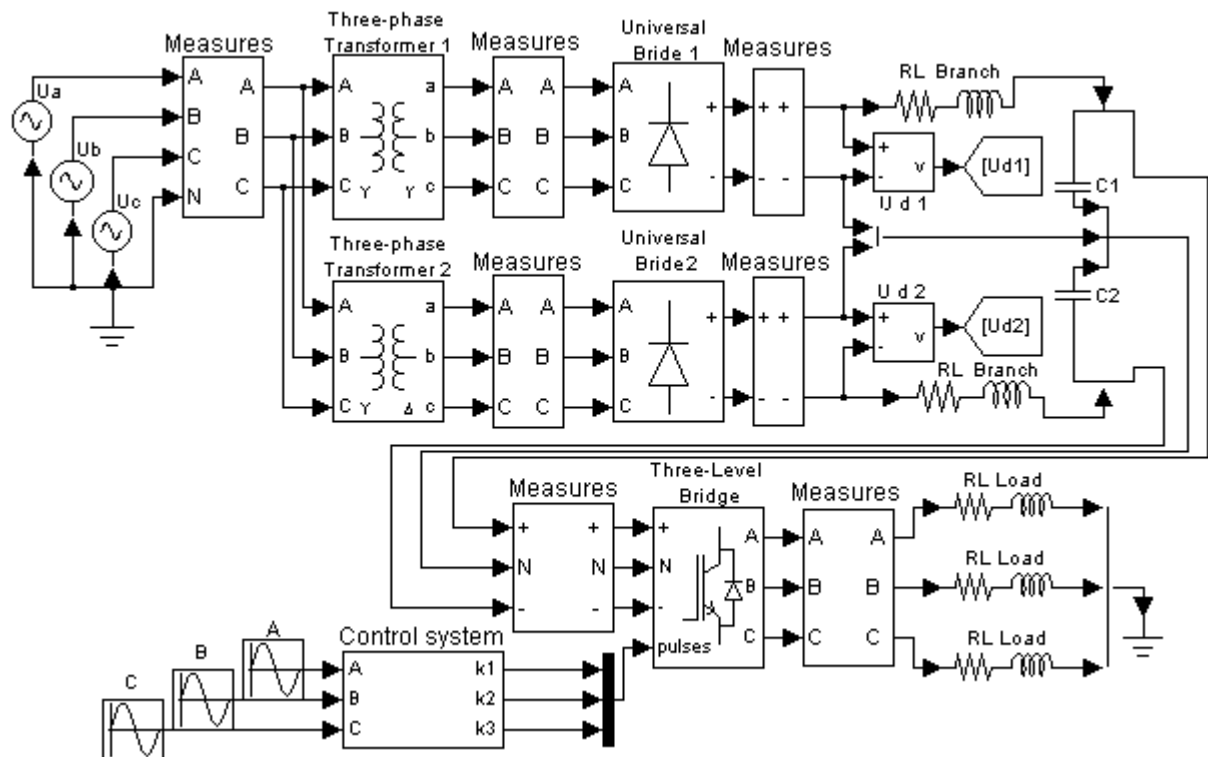
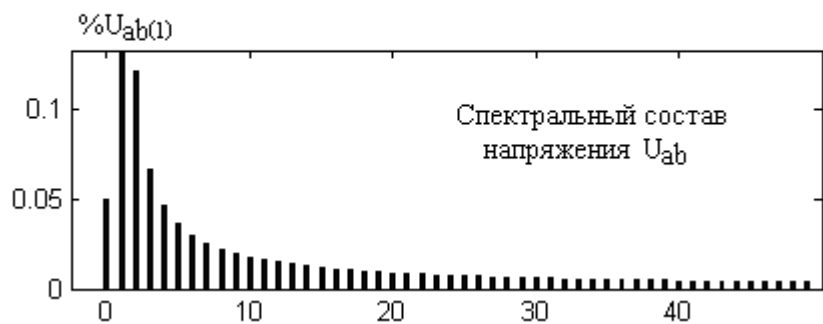
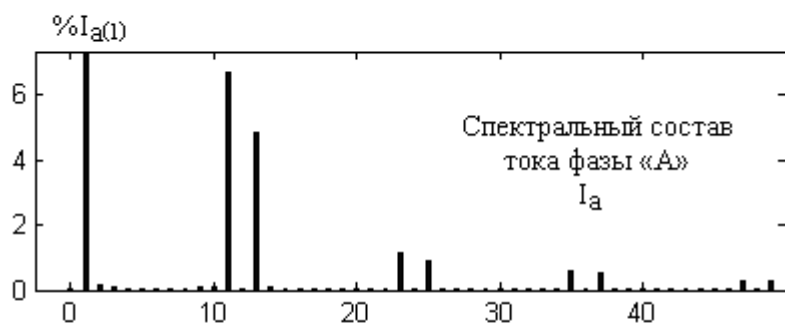
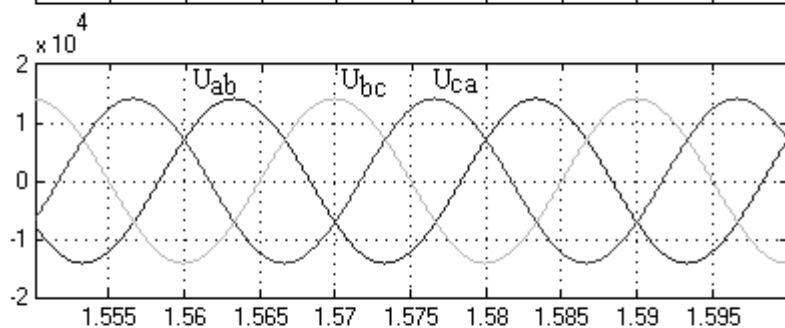
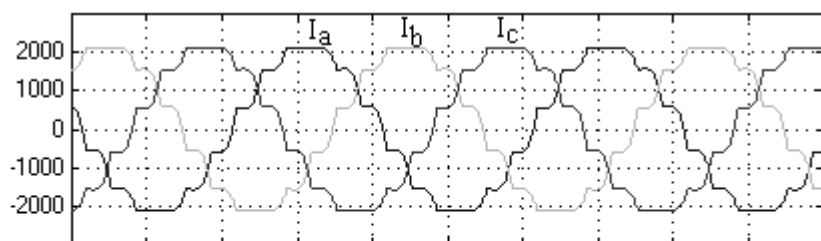


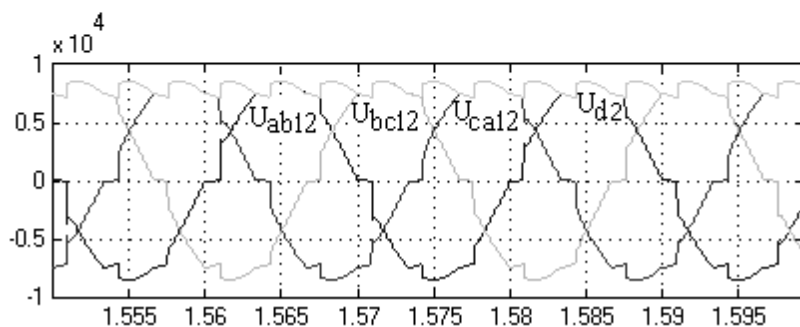
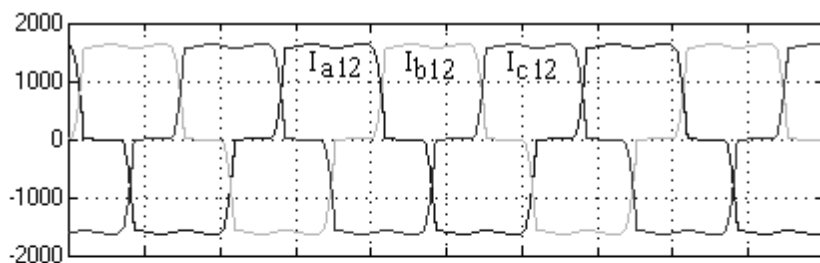
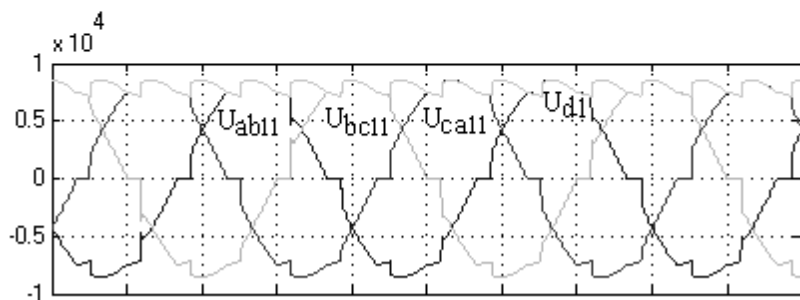
Рис. 3.3. Схема имитационной модели преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

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	





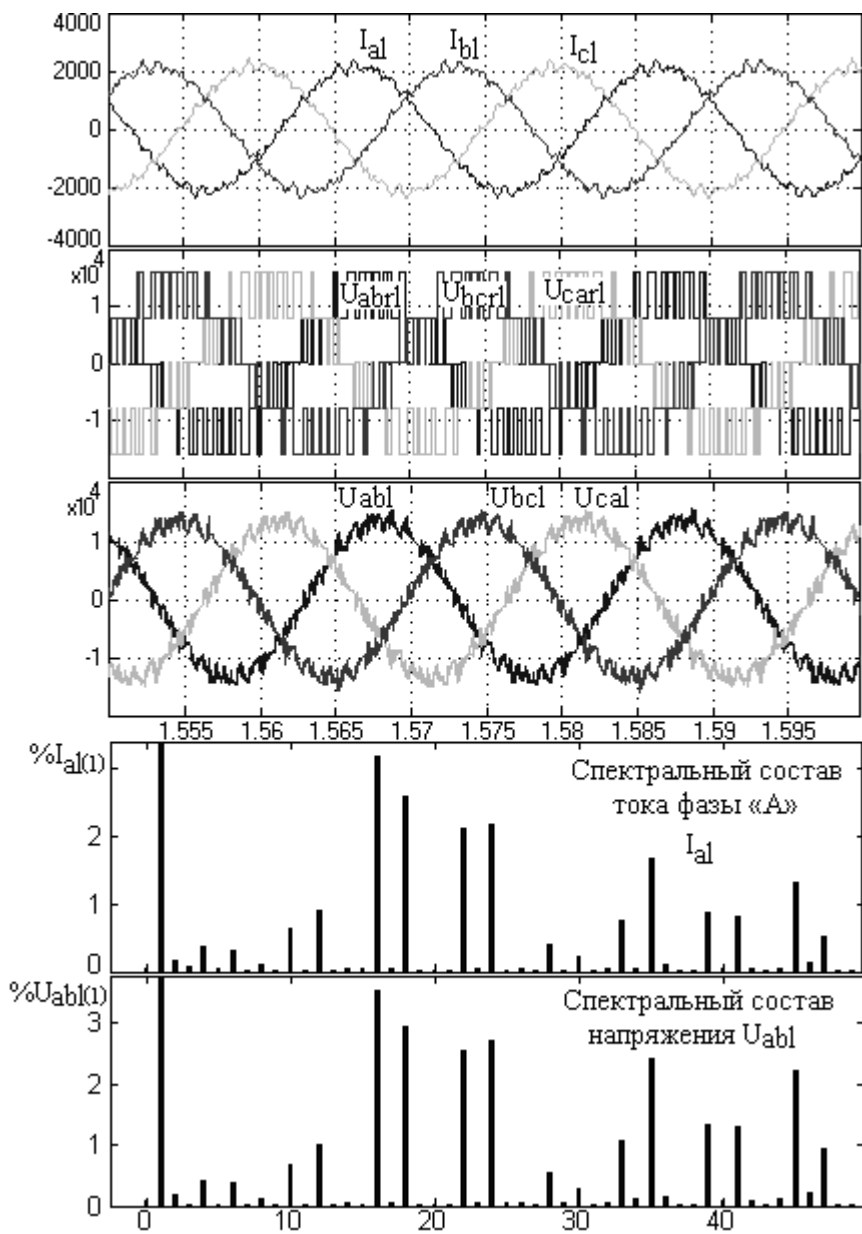


Рис.3.4. Результаты моделирования преобразователя частоты с 12-пульсным выпрямителем и трехуровневым инвертором

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	

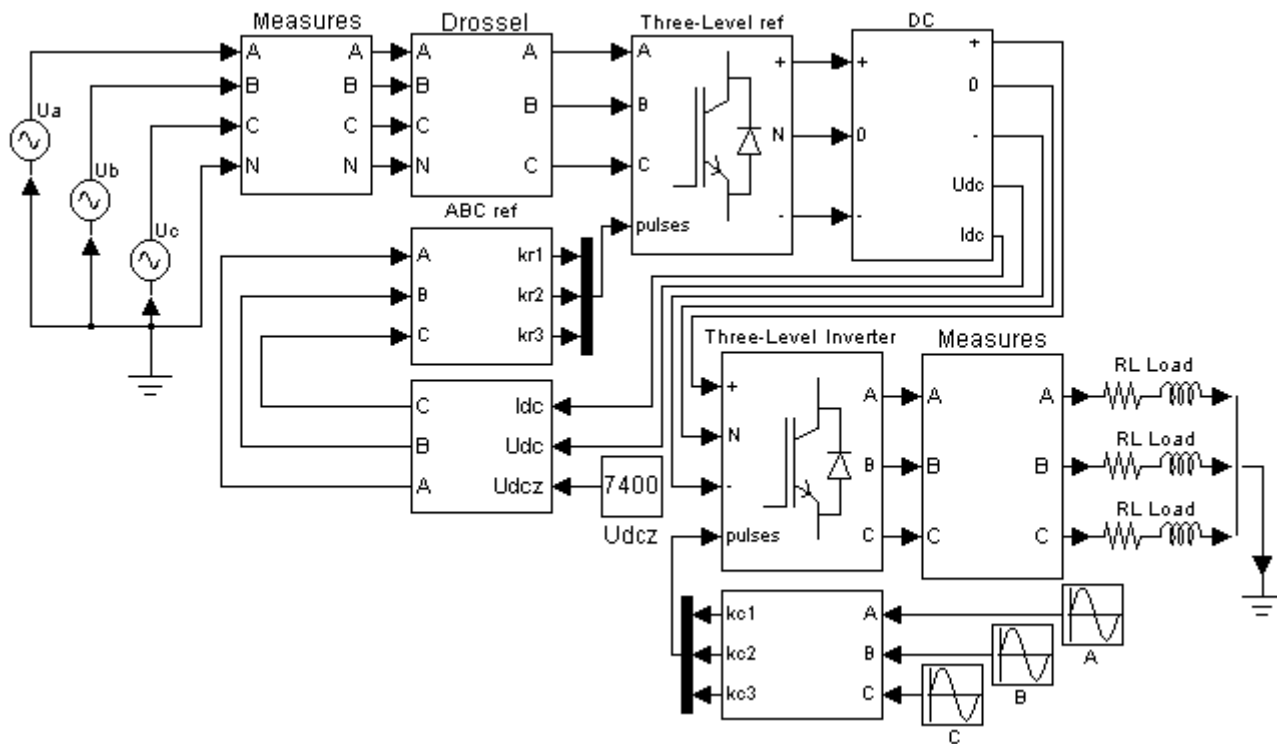
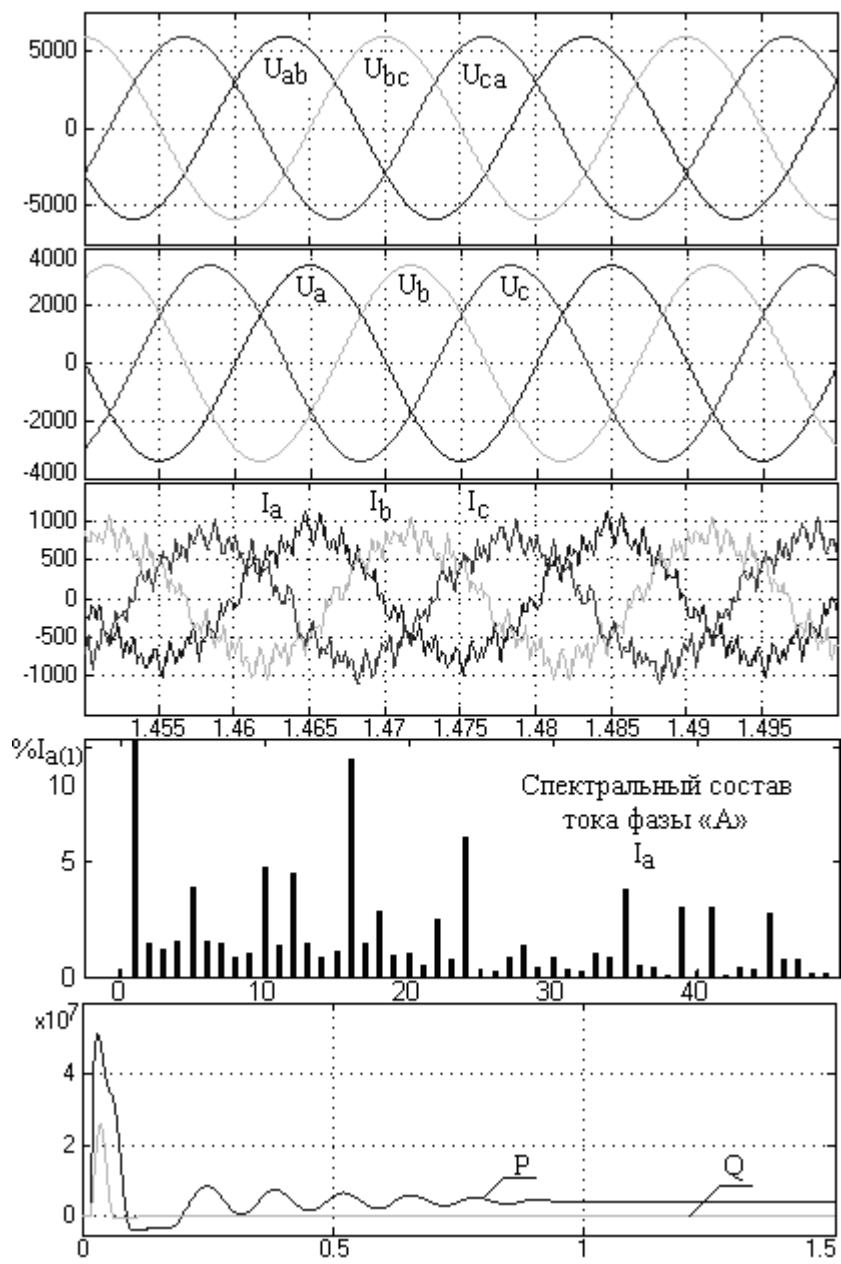
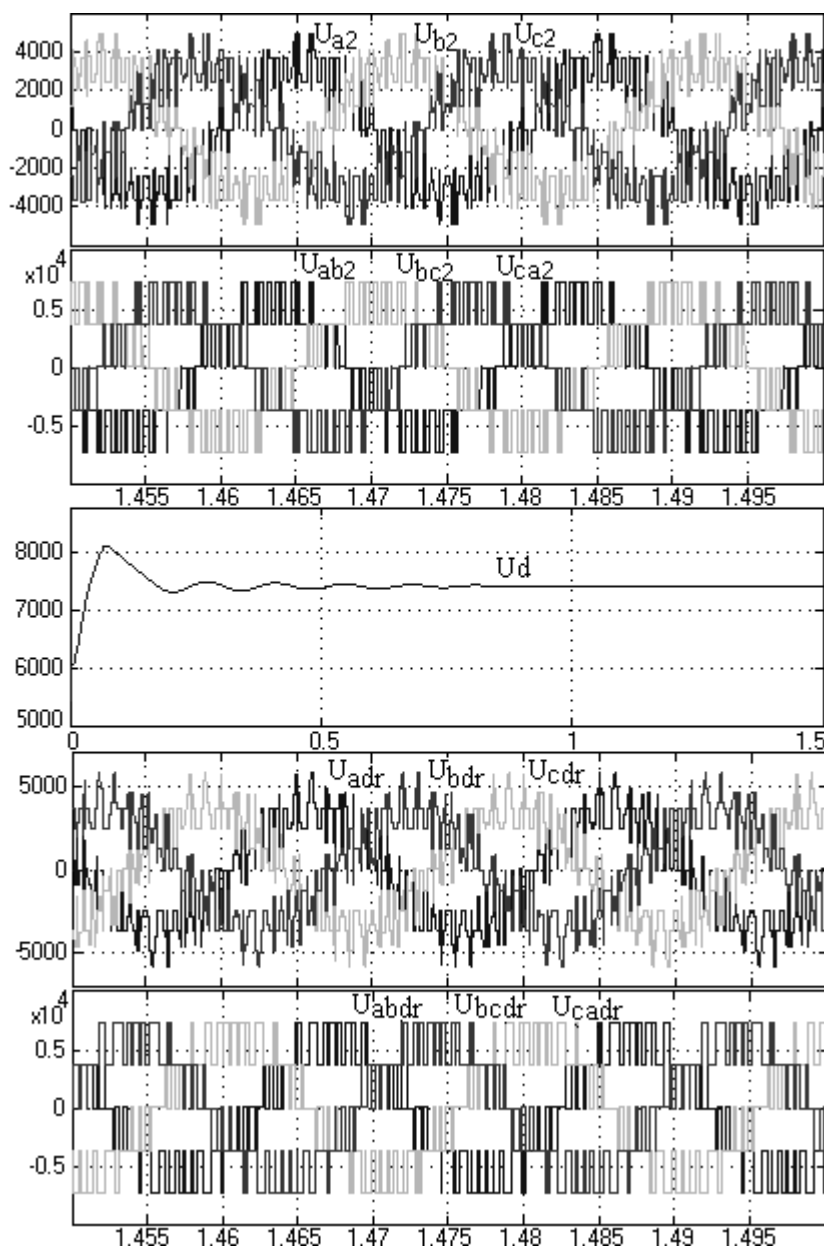


Рис. 3.5. Схема имитационной модели преобразователя частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором





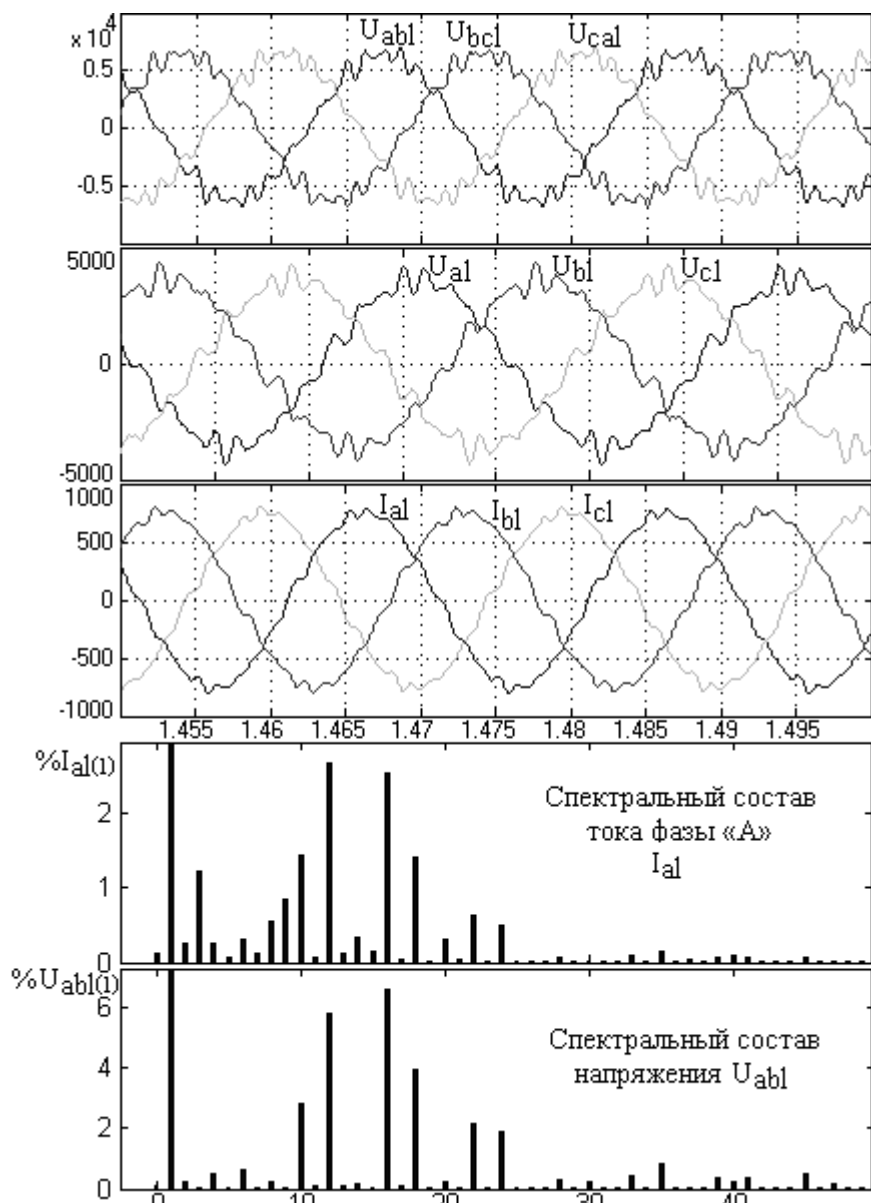


Рис.3.6. Результаты моделирования преобразователя частоты с трехуровневым активным выпрямителем и трехуровневым автономным инвертором

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	$U_{ab}=U_{bc}=U_{ac}=380\text{ В};$ $f_n=50\text{ Гц};$ $P_n=150\text{ кВт}; Q_L=140\text{ кВар}$

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	

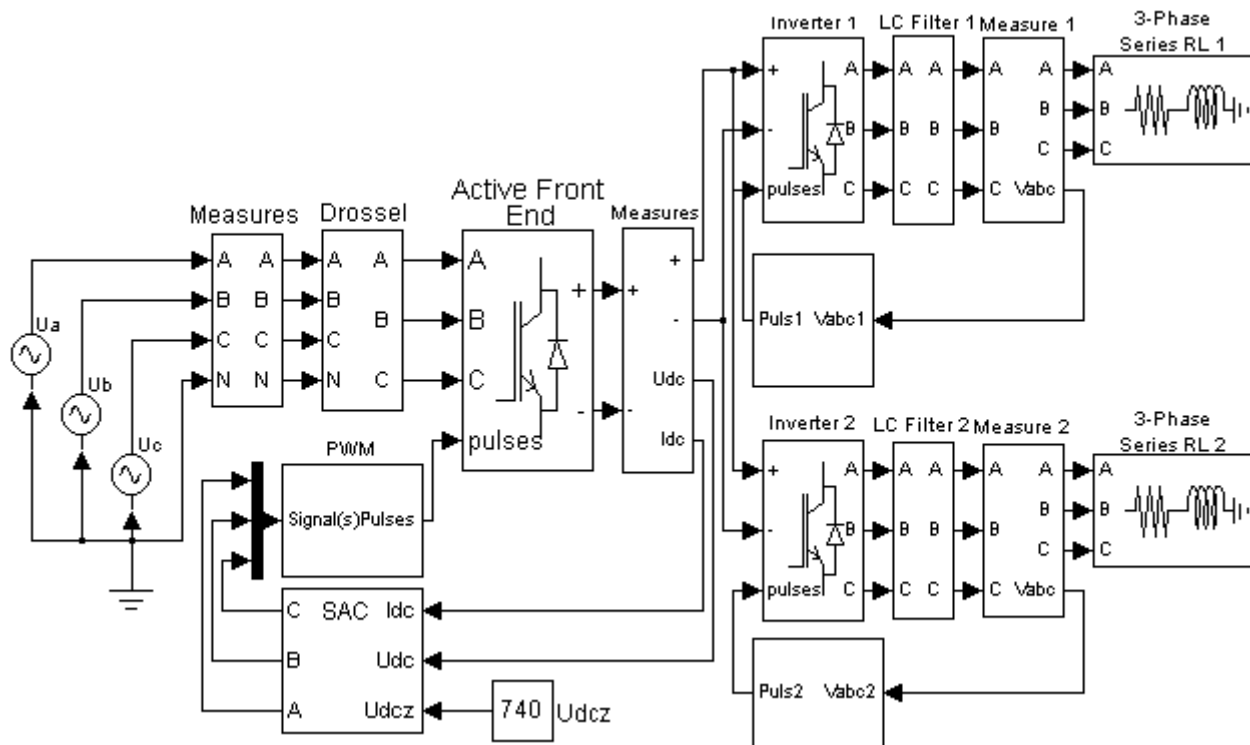
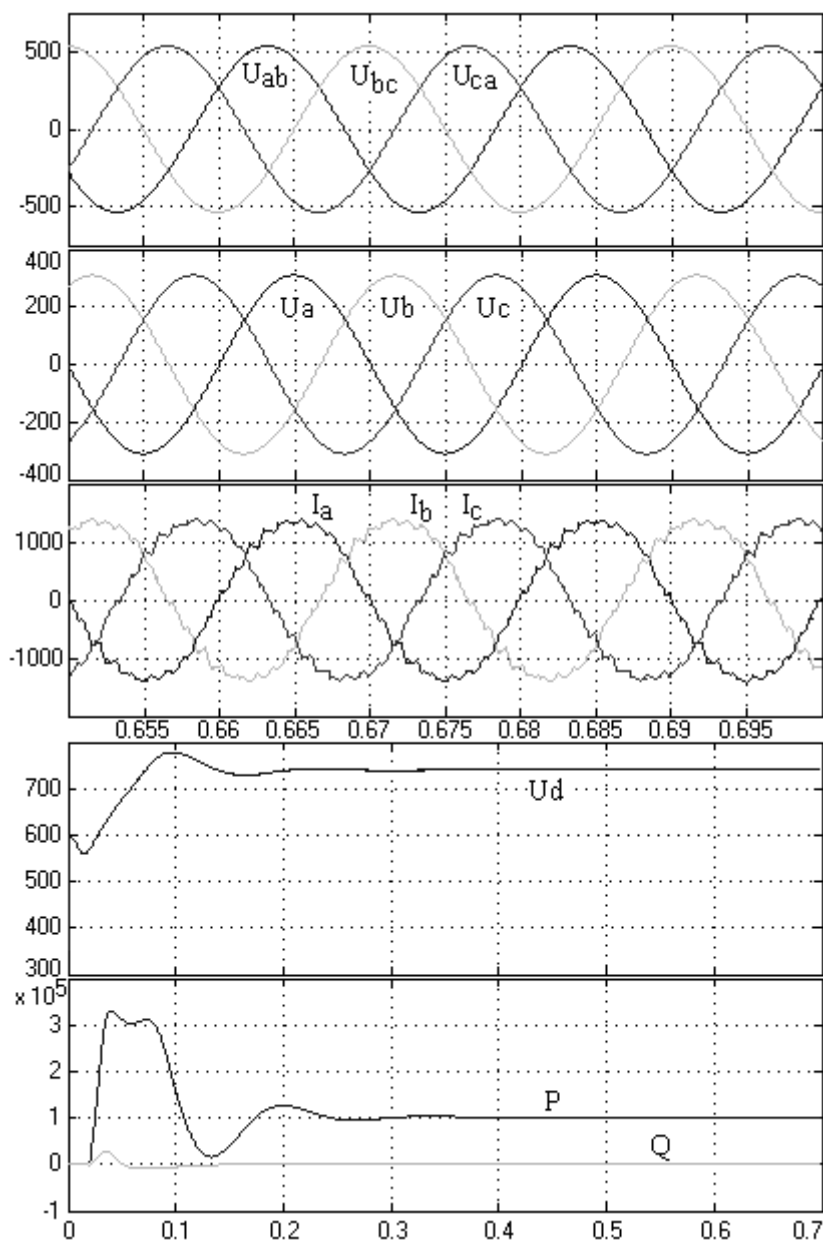
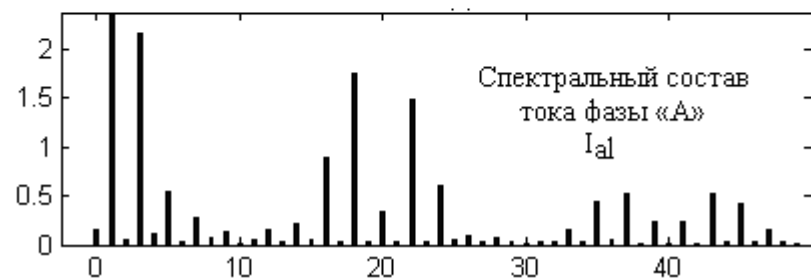
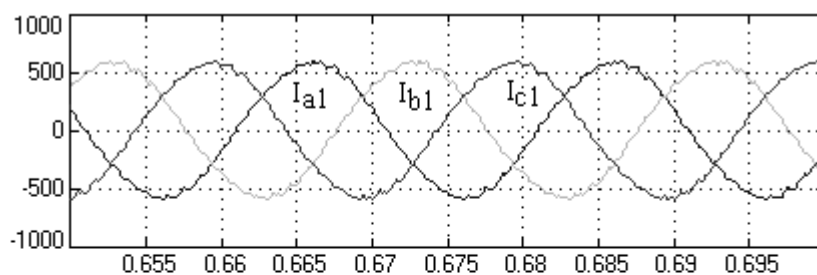
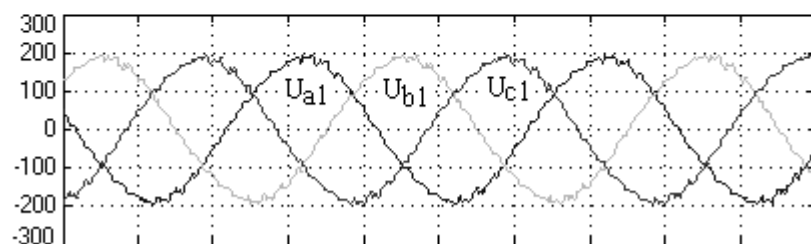
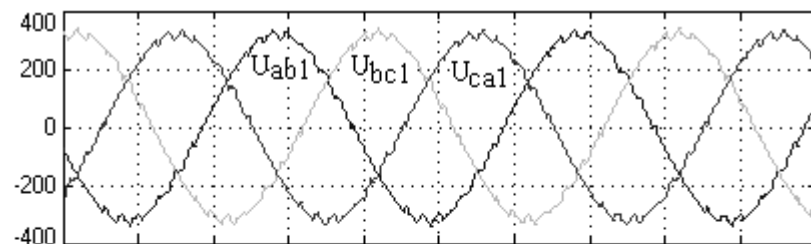


Рис. 3.7. Схема имитационной модели преобразователя частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем





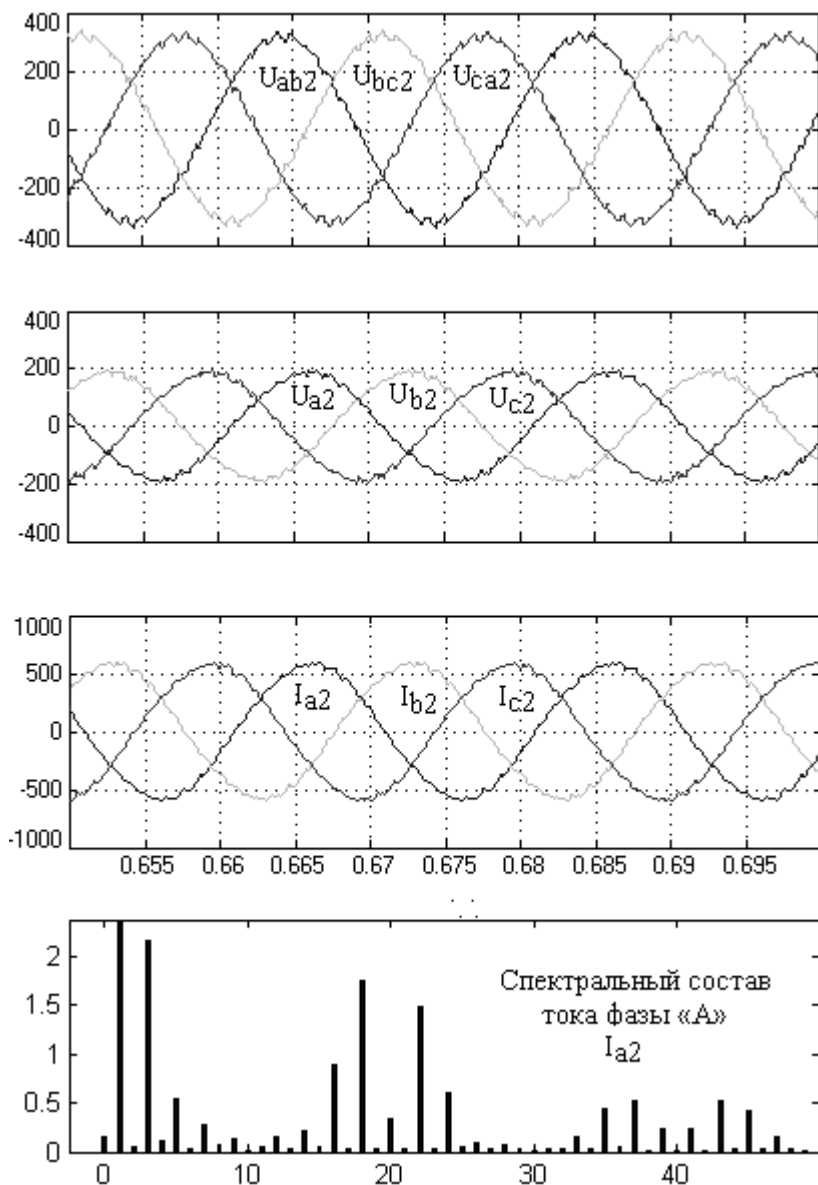


Рис. 3.8. Результаты моделирования преобразователя частоты с параллельным включением автономных инверторов и активным выпрямителем

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.

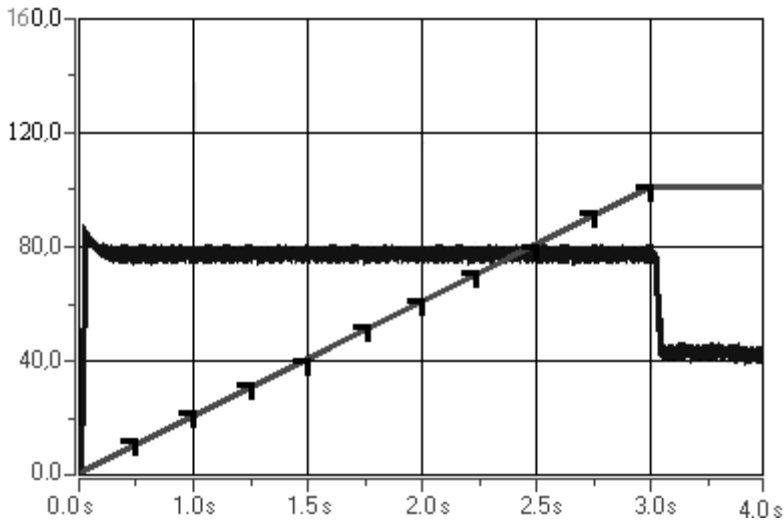


Рис. А.1. Осциллограммы, полученные при пуске асинхронного электродвигателя на испытательной установке

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.

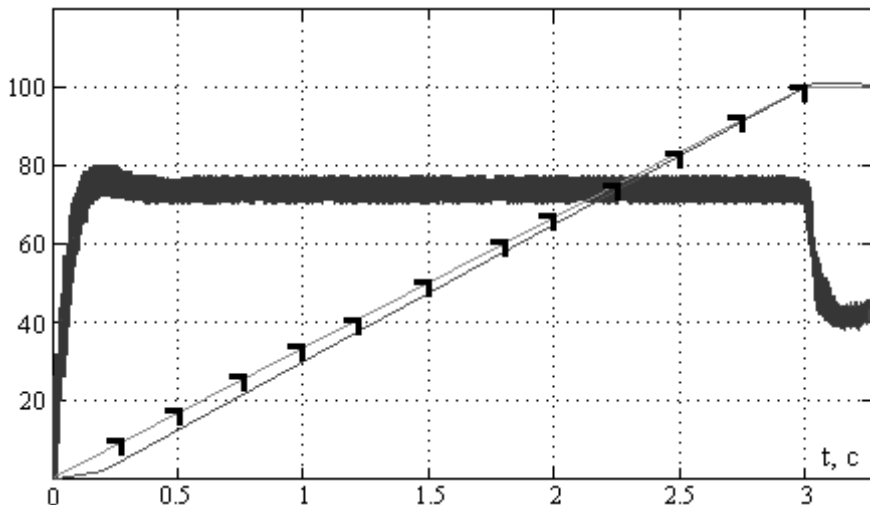


Рис. А.2. Осциллограммы, полученные при пуске асинхронного электродвигателя в MatLab

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.

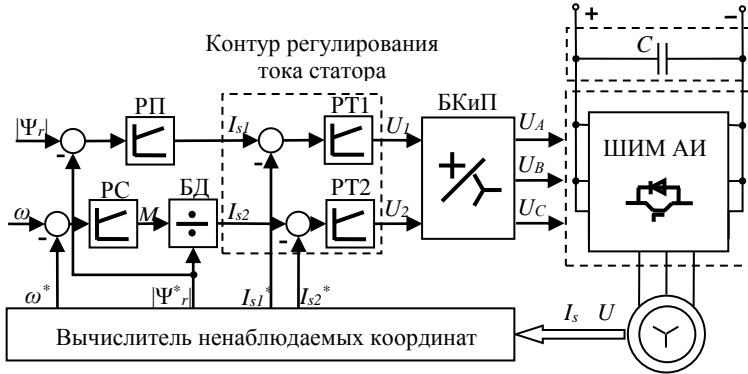


Рис.Б.1. Структурная схема ЭП с векторной САУ, ориентированной по вектору потокоцепления ротора АД: РП – регулятор потока ротора; РС – регулятор скорости; БД – блок деления; РТ1 и РТ2 – регуляторы составляющих тока статора I_{s1} и I_{s2} , соответственно; БКиП – блок компенсации и преобразования координат; ШИМ АИ – автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией.

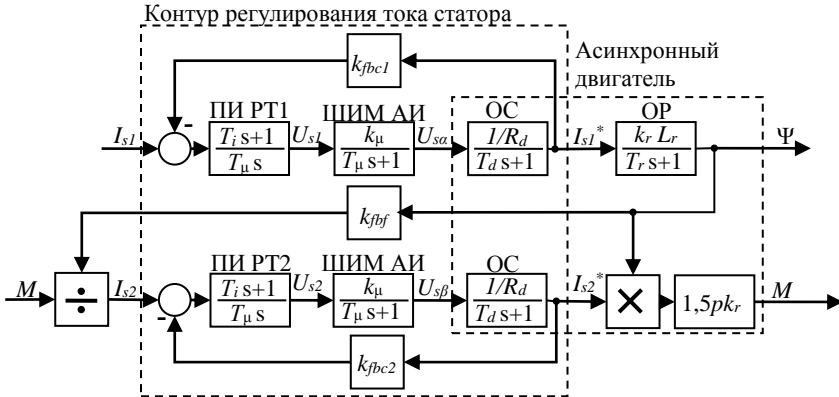


Рис.Б.2. Структурная схема внутренних контуров регулирования векторной САУ

Электромагнитный момент АД для переменных $|\Psi_r|$ и I_{s2} в системе координат, связанной с вектором потокоцепления 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.

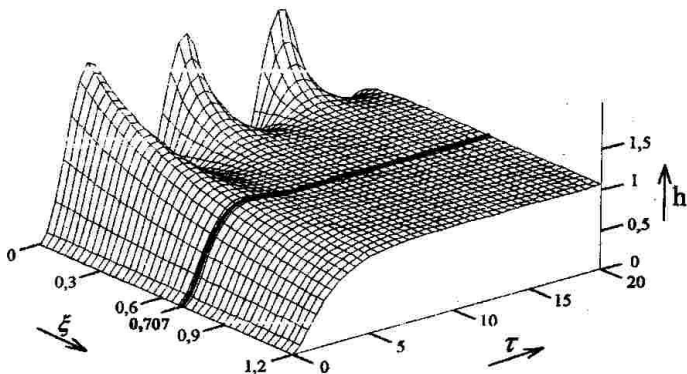


Рис.Б3. Переходные характеристики колебательного звена в зависимости от коэффициента демпфирования ζ (τ – относительное время)

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.

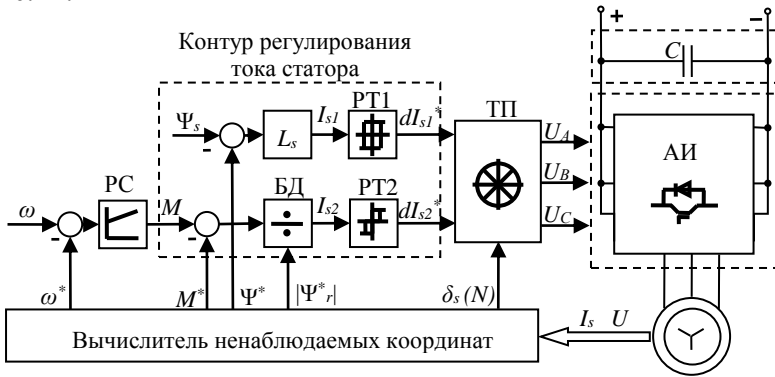


Рис.Б4. Структурная схема ЭП с системой DTC

В САУ установлены следующие регуляторы: регулятор скорости (РС); двухуровневый регулятор потокосцепления статора (РЧ); 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 DTC 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.

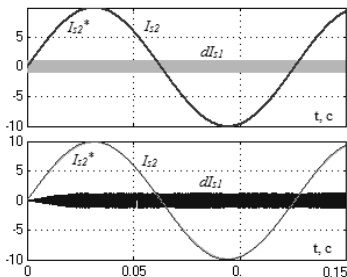
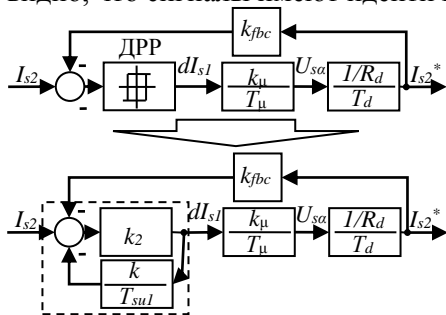


Рис.Б5. Схема линейризованного релейного регулятора

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.

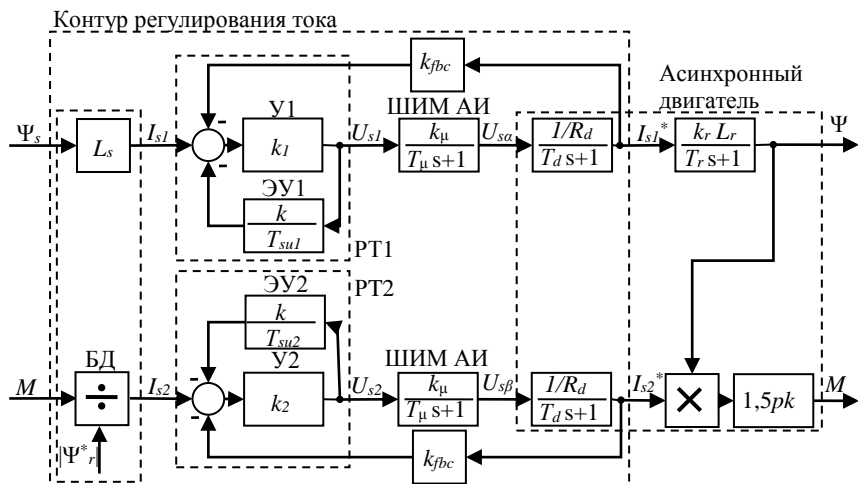


Рис.Б7. Структурная схема контура регулирования тока статора в электроприводе с системой прямого управления моментом

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

$$W_{C1DTC} = \frac{k_{RR1}}{T_d s + k_{C1DTC}}, \quad (Б.15)$$

$$W_{R1DTC}(s) \approx \frac{1}{k_{su1}} (T_{su1} s + 1), \quad (Б.16)$$

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.

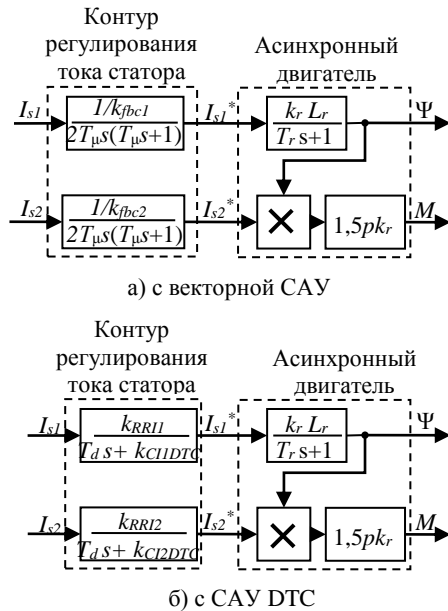


Рис.Б8. Структуры контуров регулирования тока статора

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 eingprägtem 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 содействие развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умения 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 (керны) 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 (керны) 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.

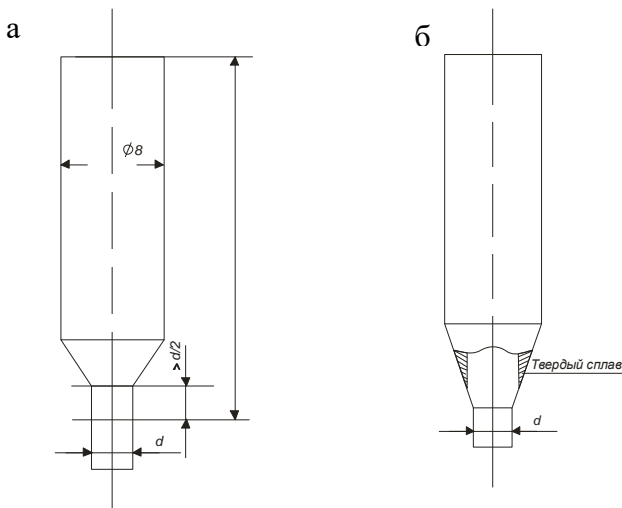


Рис. 1. Виды цилиндрических штампов:

(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).

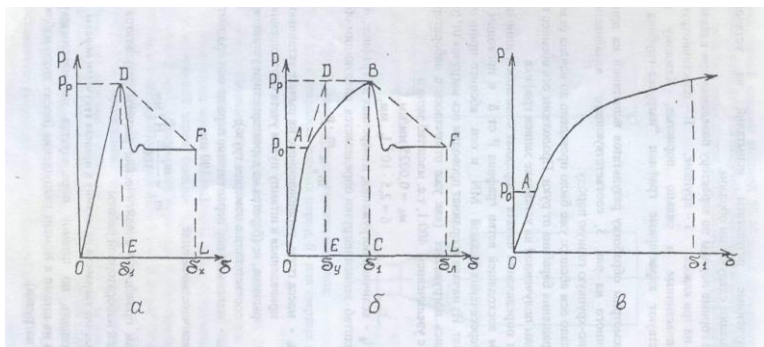


Рис. 2. График «Нагрузка-глубина вдавливания»

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).

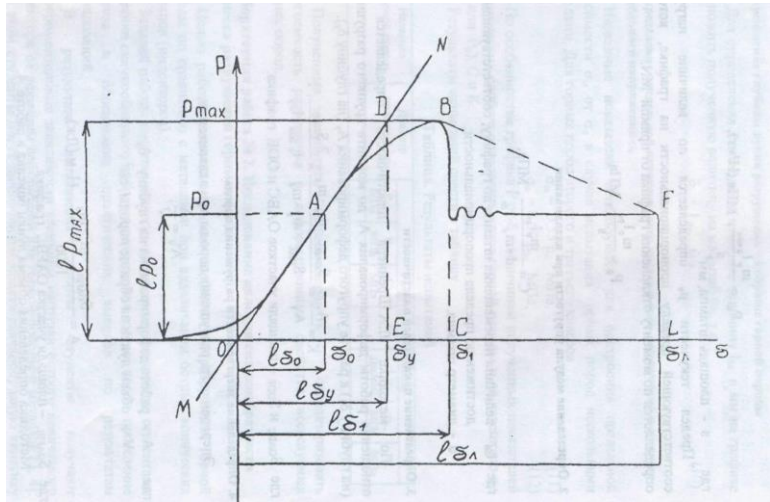


Рис.3. Обработка графика P от δ при вдавлении штампа.

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, мм².

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_{δ_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 P от δ и величинам полученных показателей механических свойств определить класс горной породы и ее категорию по $P_{ш}$ (или P_0), C и K .

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	K	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).

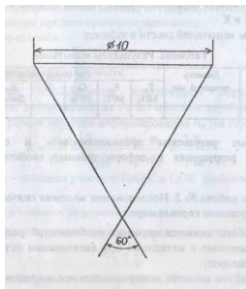


Рис. 4. Острый конус индентора

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].

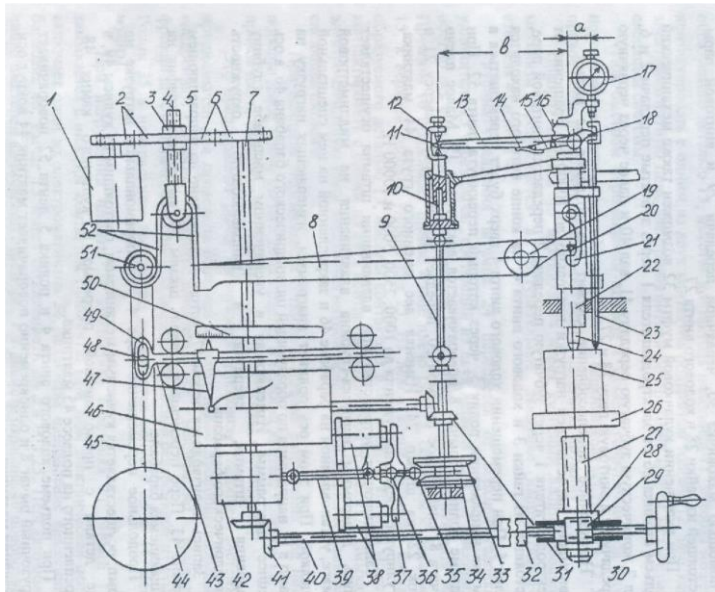


Рис. 5. Схема установки УМГП-3

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.

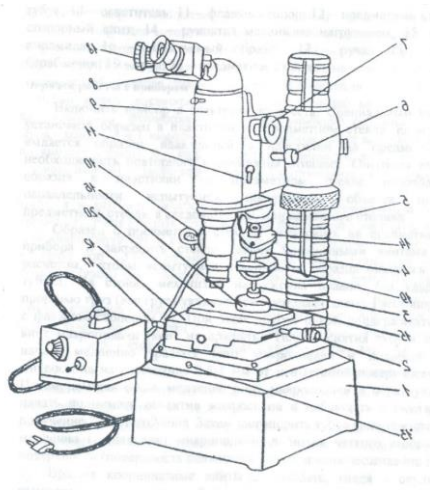


Рис. 6. Прибор ПМТ-3

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 прессы 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 маслонасоса,
- 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.

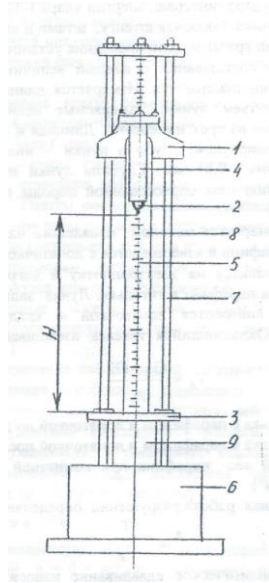


Рис. 1. Копровая установка со свободнопадающим ударником с породоразрушающим наконечником

Выполнение лабораторной работы и обработка результатов исследований проводятся в следующем порядке.

Исследуемый образец устанавливают на основании копра. Крепят плиту, закручивая гайки "от руки". Гайки устанавливают 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 испытуемого 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 испытуемого материала.

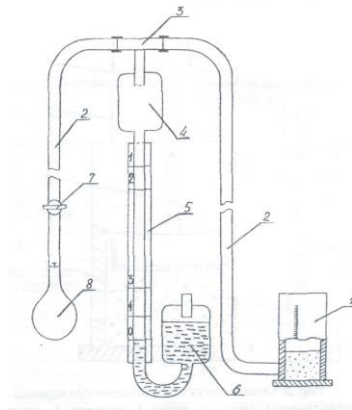


Рис. 1. Общая схема прибора ПСХ-4:

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.

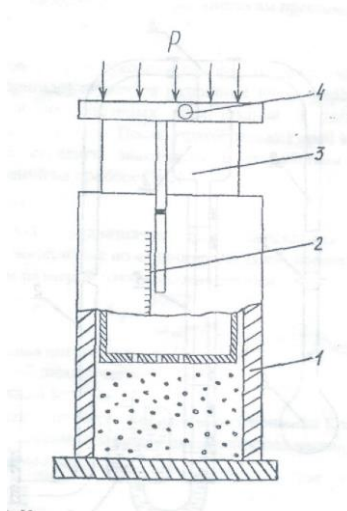


Рис. 2. Кювета для укладки испытываемого порошка:

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 $W_{\text{п}}$ расходуемую на измельчение материала на электроизмерительном комплекте К-540: удельную поверхность измельченного продукта на приборе ПСХ-4 и удельные энергозатраты $l_{\text{уд}}$ на его разрушение.

По полученным данным в ходе эксперимента строят график $l_{\text{уд}}=f(c)$, 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.

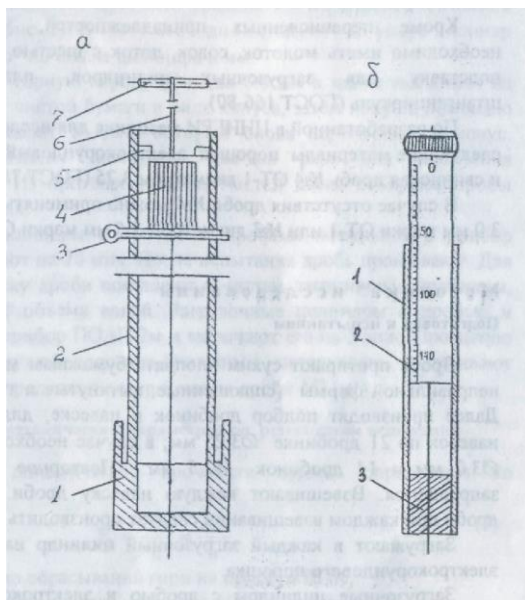


Рис. 1. Прибор ПОК для определения динамической прочности горных пород:

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.

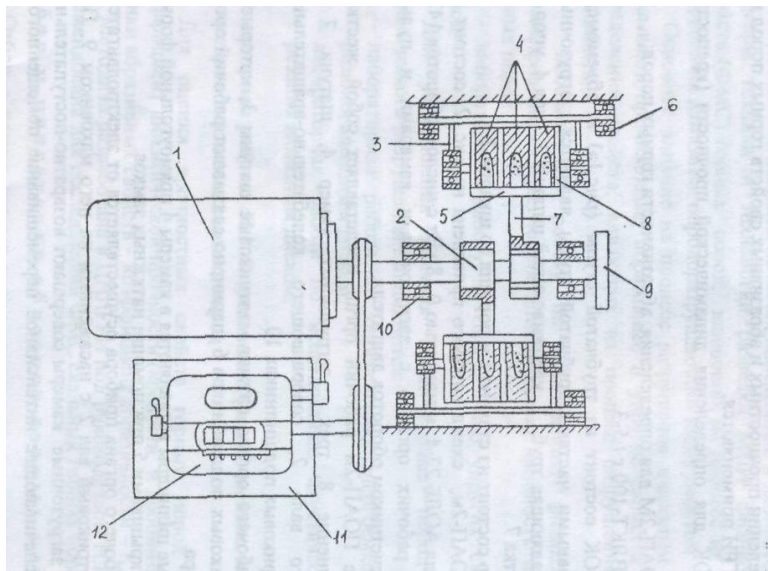


Рис. 2. Схема прибора ПОАП-2М для определения абразивности горных пород:

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 дробы после указанного опыта помещают в сосуд с водой и после перемешивания (всполаскивания) извлекают и протирают насухо чистым хлопчатобумажным материалом.

Промытую дробь взвешивают. Потеря массы дробы в каждой пробирке должна быть 200 ± 10 мг. В случае отклонения потери массы дробы 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 дробы 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).

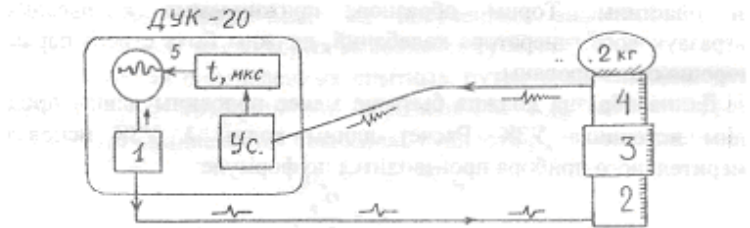


Рис. 3. Схема измерения скорости продольных волн УЗК в образцах горных пород:

1 - генератор УЗК; 2 - датчик; 3 - образец; 4 - приемник; 5 - осциллограф.

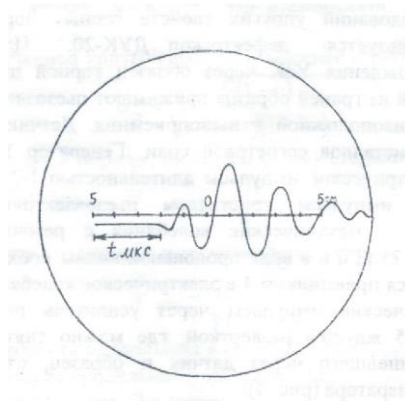


Рис. 4. Вид на экране осциллографа трассы УЗК.

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 x", "смещение y" 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

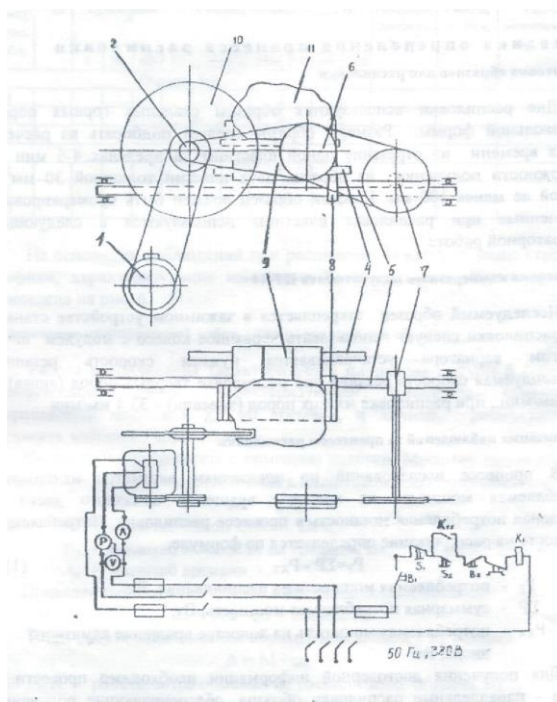


Рис. 5. Электромеханическая схема ПТ-44

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, m^2	Работа, A , Вт·с	Удельная энергоемкость, W , Вт·с/ m^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} .

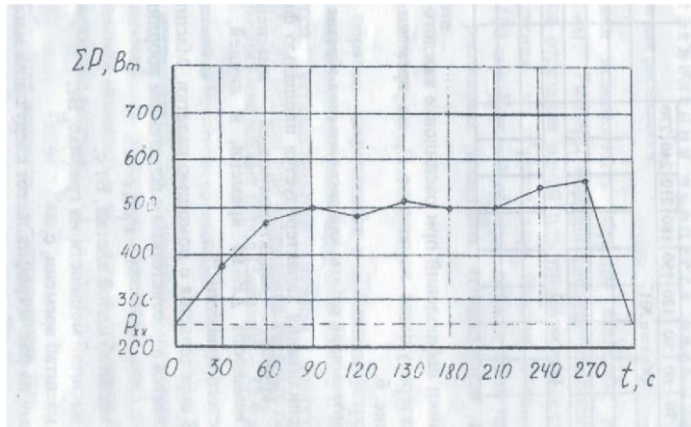


Рис. 6. График изменения потребляемой мощности во времени при распиловке ящмы технической.

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 энергоёмкости процесса распиливания

Удельная энергоёмкость распиливания на единицу площади горной породы рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{A}{S} \quad (6)$$

где W - удельная энергоёмкость распиливания, Вт·с/м²;
 A - работа, Вт·с,
 S - площадь распила, м².

Методика статистической обработки результатов наблюдений

Обобщающими результатами наблюдений, характеризующих энергоёмкость 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.

Энергоёмкость 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:

$$K_{\text{вар}} = \frac{S}{W} 100\% \quad (10)$$

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:

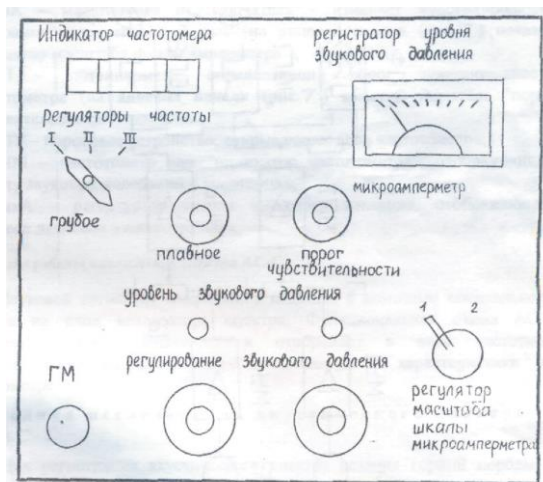


Рис. 7. Схема лицевой панели АС-1

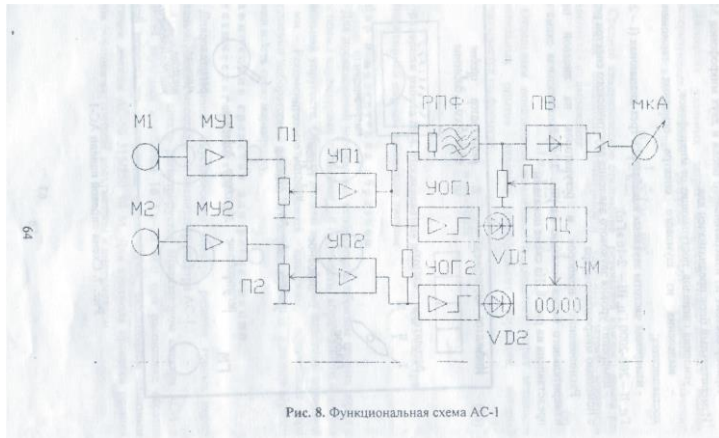


Рис. 8 . Функциональная схема АС-1

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 частотомера (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.

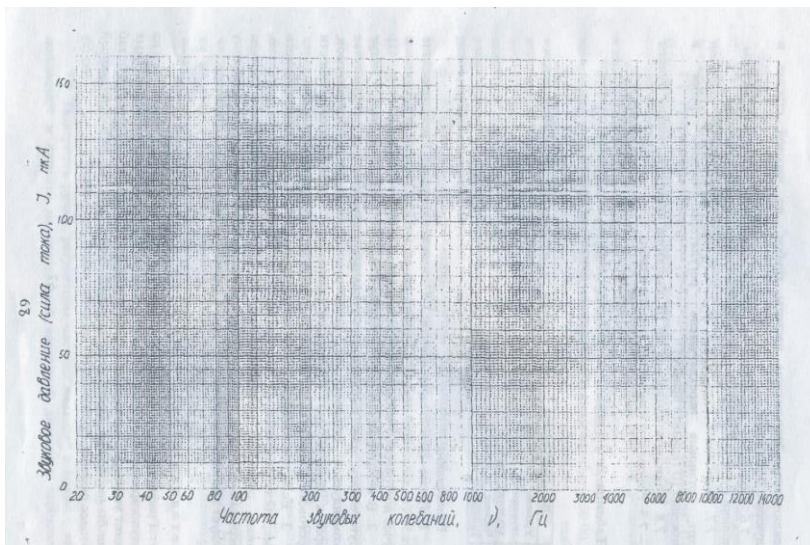


Рис. 9. Спектрограмма звуковых колебаний процесса резания.

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.



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, %.

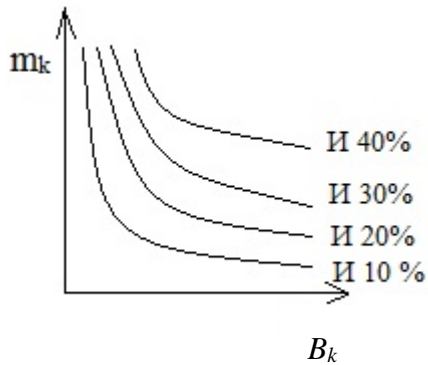
Группировка месторождений по значениям НП и И

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, 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)

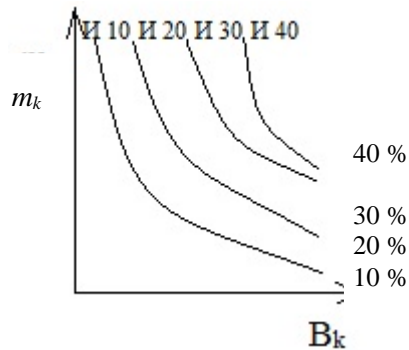
Слабонеоднородные руды **НП=2**

$m_k \backslash I$	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}

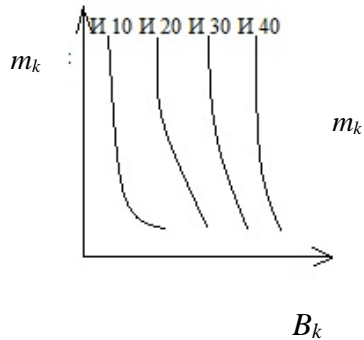


Среднеооднородные руды **НП=6**

$m_k \backslash I$	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}



Сильнонеоднородные 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 И).

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:

$$Q_{кр} = U_p * \frac{\pi(D_{скв}^2 - d_{бур.тр.}^2)}{4}$$

Пара-метр	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 $\{P_{ш}, K_{абр}, X_i, P_б\}$.

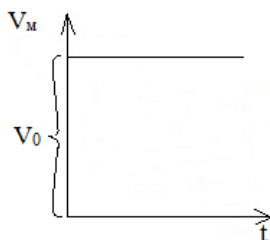
Чем легче условия бурения и лучше инструмент, тем больше V_0 (\uparrow) и меньше γ (\downarrow) - долго не замедляется бурение.

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).

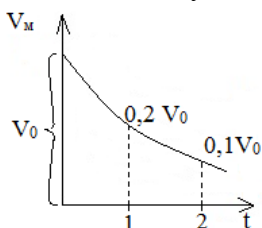
$$\gamma = 0; V_M = V_0$$

Незатупл. инструмент



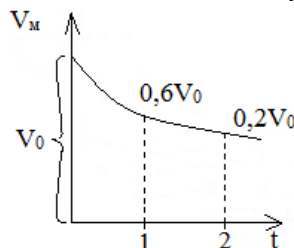
$$\gamma = 1; V_M = V_0 * \left(\frac{1}{2,7}\right)^t$$

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:

$$P' = \frac{\pi \cdot (d^2 - d_t^2) \cdot l \cdot P}{4t}.$$

3. Сила трения, при закреплении ведущей трубы в двух патронах, Н:

$$T = 4P' \cdot f.$$

4. Окружное усилие, передаваемое патроном, Н:

$$P_0 = \sqrt{T_0^2 - Q^2}$$

5. Передаваемая мощность патронами, кВт:

$$N = \frac{P_v \cdot V}{75}.$$

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:

$$Q = \frac{k * P_\phi * \sin \alpha}{f}$$

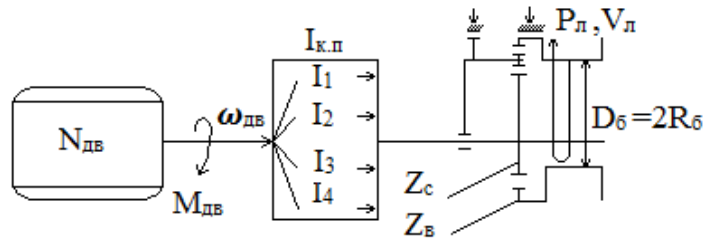
Таблица исходных данных

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:

$$\tau = \frac{M_{\text{б}}}{W_p}.$$

3. Крутящий момент при бурении, Н*м:

$$M_{\text{б}} = \frac{N_{\text{б}}}{\omega}.$$

4. Мощность, затрачиваемая на бурение, кВт:

$$N_{\text{б}} = N_{\text{тр}} + N.$$

5. Первый момент сопротивления, м³:

$$W_p = 0,1 * \frac{d_{\text{н}}^4 - d_{\text{в}}^4}{d_{\text{н}}}.$$

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:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{ос}}}{F}.$$

8. Напряжение изгиба, Н/м²:

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{\pi^2 * E * D * f}{2 * 1^2}.$$

9. Напряжения кручения, Н/м²:

$$\tau = \frac{M_{\text{б}}}{W_p}.$$

10. Мощность, затрачиваемая на бурение, кВт:

$$N_{\text{б}} = 1,5 * N_3.$$

11. Суммарное напряжение в сечении II-II, Н/м²:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{из}})^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma_g].$$

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:

$$n_\Sigma = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 * n_\tau^2}} .$$

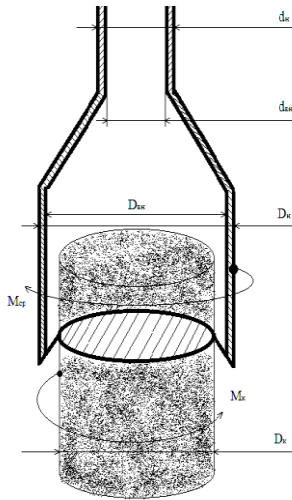
Таблица исходных данных

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.

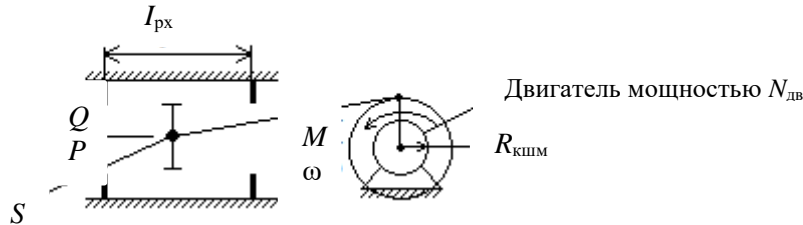
3.6. Задайте диаметры труб, прочность горной породы и постройте график зависимости необходимой прочности труб от диаметра срываемого керна.

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:

$$W_0 = \frac{h_g}{C_0 * \log_{10} \frac{h_g * (K-1) + 10}{10}} ,$$

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, м²;
 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.

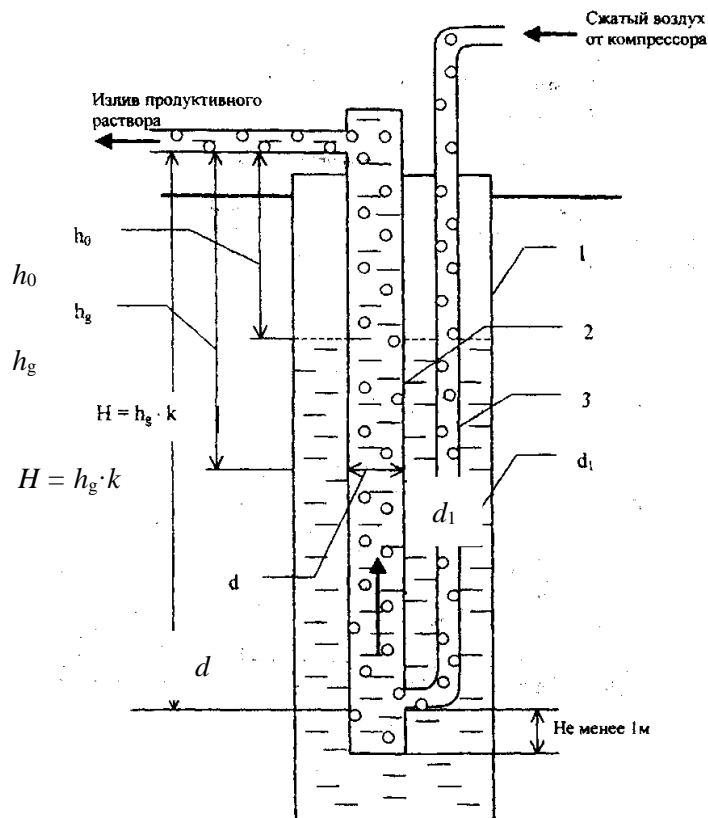


Схема эрлифта с расположением труб «рядом»:

1 – обсадные трубы; 2 – водоподъемные трубы; 3 – воздухопроводные трубы

1.3. Определение потребного количества сухого цемента, т:

$$Q_{ц} = e \cdot \frac{1}{1+m} \cdot \gamma_{ц,р} \cdot V_{ц,р},$$

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:

$$V_{в} = m \cdot Q_{ц}.$$

1.5. Определение объема продавочной жидкости, м³:

$$V_{пр} = \Delta \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{вн.сп}^2 \cdot (L - h_0),$$

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 цементирование, 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					
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 ПОРОДРАЗРУШАЮЩЕГО 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 хлористокarbonатный	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.

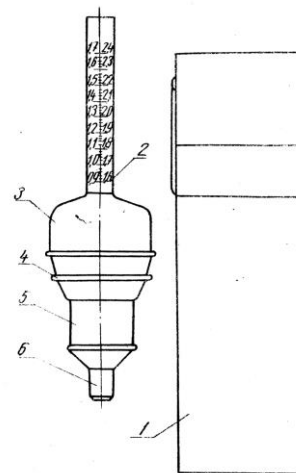


Рис. 1. Ареометр АГ-2 в сборе и ведро-футляр

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 наведенном 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 наведенном съемном грузе отсчет вести по левой шкале с оцифровкой от 0,9 до 1,7 г/см^3 . Если ареометр при наведенном съемном грузе погрузился выше последнего оцифрованного деления на шкале - 1,7 г/см^3 , то следует снять груз и отсчет вести по правой шкале с оцифровкой от 1,6 до 2,4 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

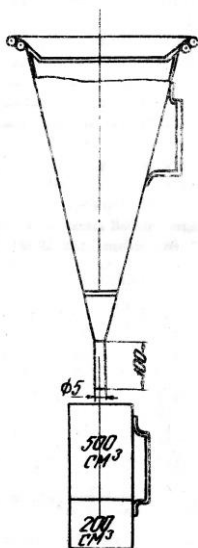


Рис. 2. Вискозиметр СПВ – 5 с кружкой

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.

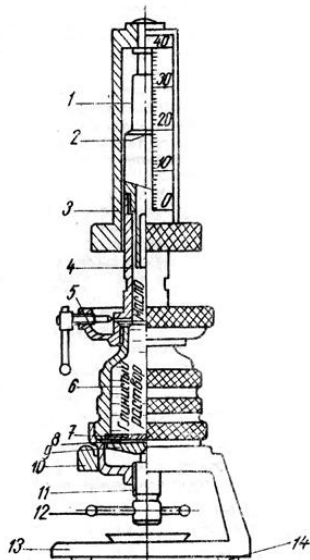


Рис. 3. Прибор ВМ-6 в сборе

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 $\text{Ø} 3 \text{ мм}$.

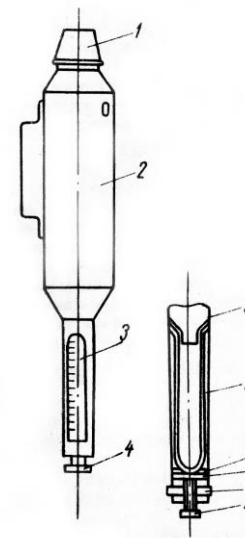


Рис. 4 Отстойник ОМ-2 Крышка отстойника служит для отмеривания раствора.

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.

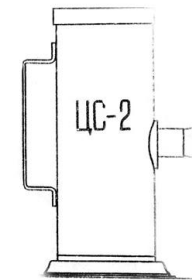


Рис. 5. Цилиндр ЦС-2

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.

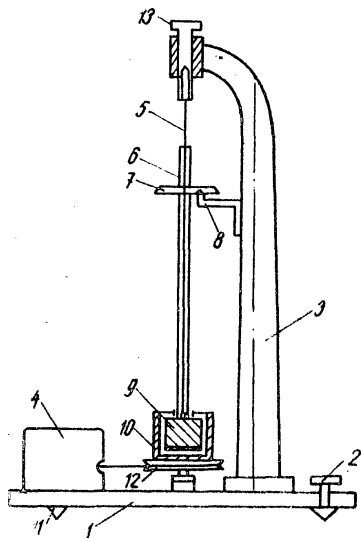


Рис. 6. Прибор СНС-2

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 5 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.

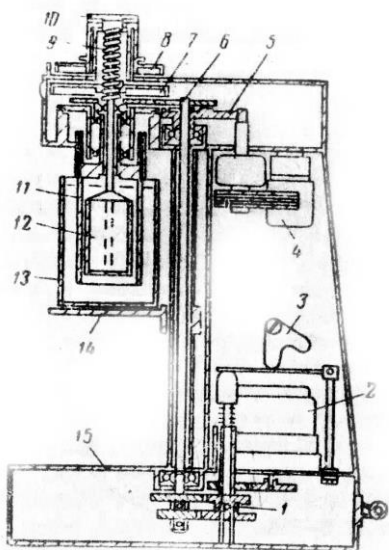


Рис. 7. Вискозиметр ВСН-3

- 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 $n - U_1$, аналогичное изображенному на рис. 3.

Через точки, соответствующие значениям U при различных n проводят плавную линию 1 - реологическую кривую течения. Прямолинейный участок кривой продолжают до пересечения с осью абсцисс в точке U_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

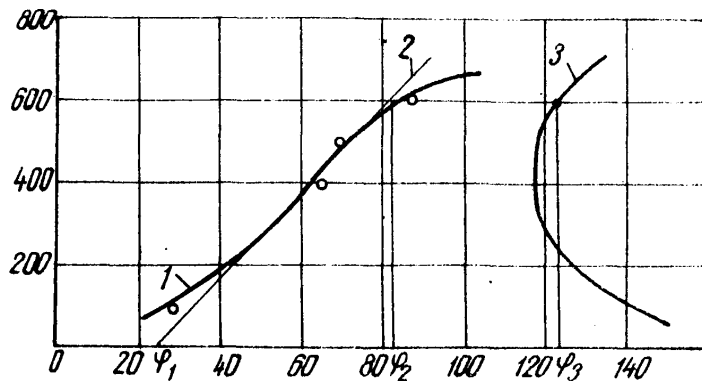


Рис. 8. Типы реологических кривых
1 - кривая, построенная по опытным точкам; 2 - прямая для расчета $\eta_{пл}$ и τ_0 ; 3 – кривая с обратным наклоном.

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 pH 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 Пбк, к/л;
- 5) водородный показатель, pH;
- 6) коэффициент трения, Кт;
- 7) предельная прочность смазочной пленки, $p_{кр}$ Па

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ (pH)

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.

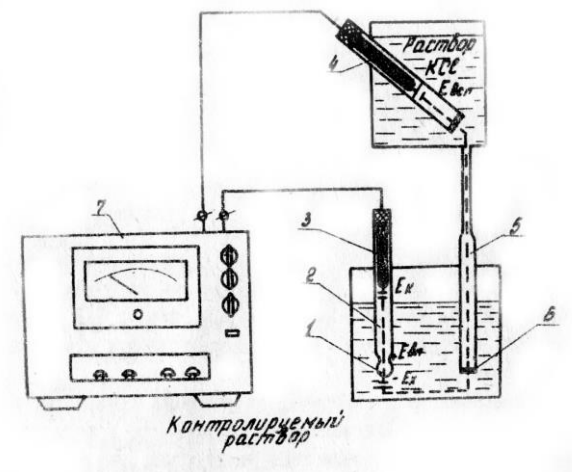


Рис. 9. Схема измерения pH раствора

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 замеряют количество капель, появляющихся при выдвигании 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 выдвигании 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 выдвигании 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.

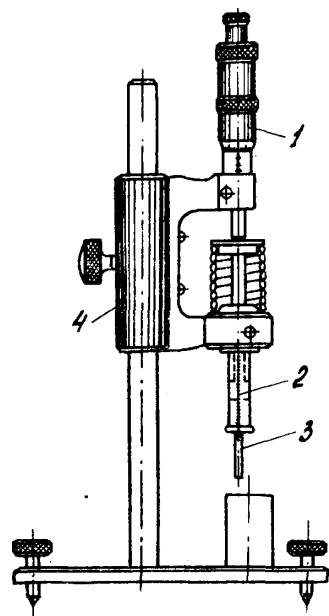


Рис. 10. Сталагмометр
1- микрометр, 2-медицинский шприц;
3-капилляр; 4 - кронштейн

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.

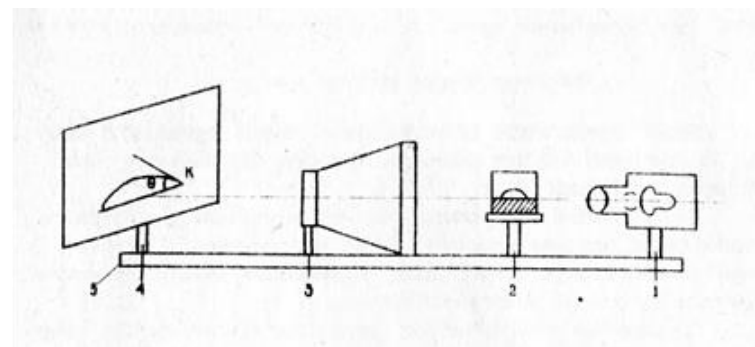


Рис.11. Установка для определения краевого угла смачивания.
источник света; 2 - испытуемая поверхность; 3 -
увеличитель экран-пластинка; 5 - рама.

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.

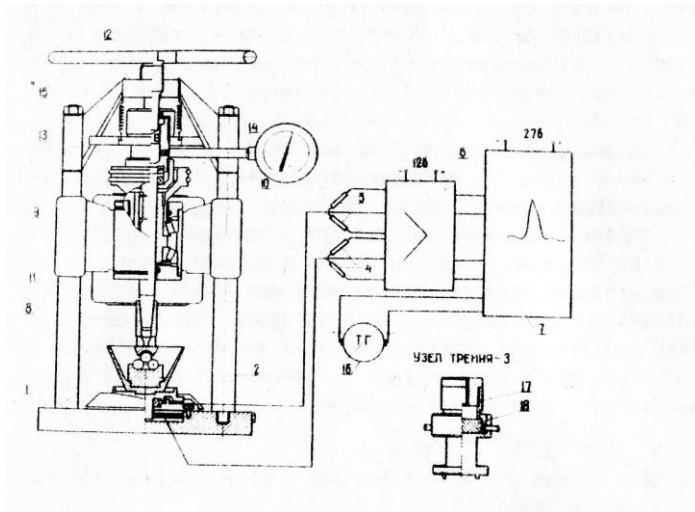


Рис. 12. Установка трения 1 - опорная станина; 2, 3 - узлы трения; 4, 5 - тензодатчик; 6 - тензоусилитель; 7 - осциллограф; 8 - шпиндель; 9 - корпус шпинделя; 10 - шкив; 11 - электродвигатель; 12 - нагрузочный винт; 13 - гидропресс; 14 - манометр, 15 - нагрузочная траверса; 16 - тахогвнератор

Замеры производятся по следующей методике. Стальные шары диаметром 8,5 мм из стали IX, предварительно обезжиривается 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.



**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 геологоразведочных 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 раздельно 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.

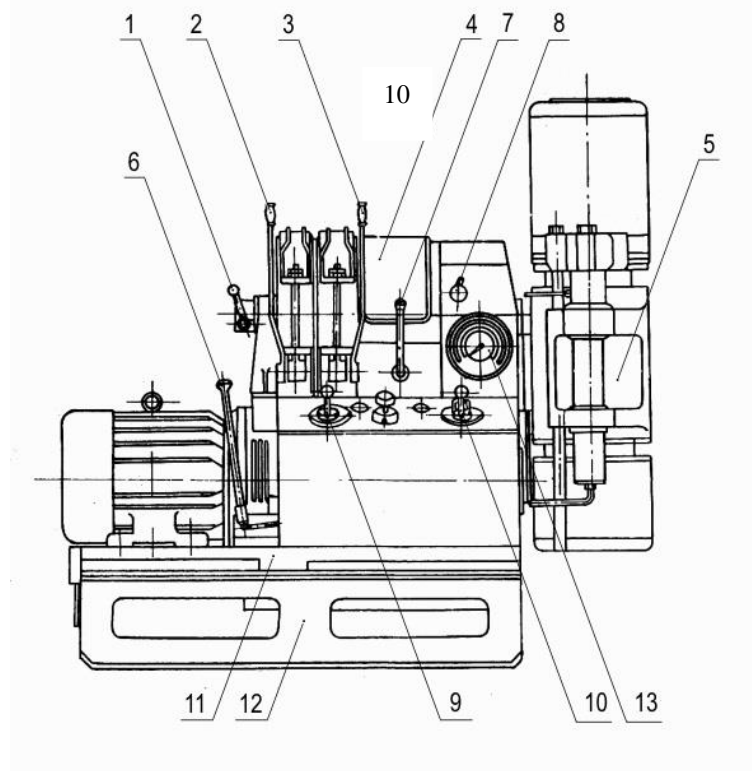


Рис. 2.1. Станок буровой СКБ-4:

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.

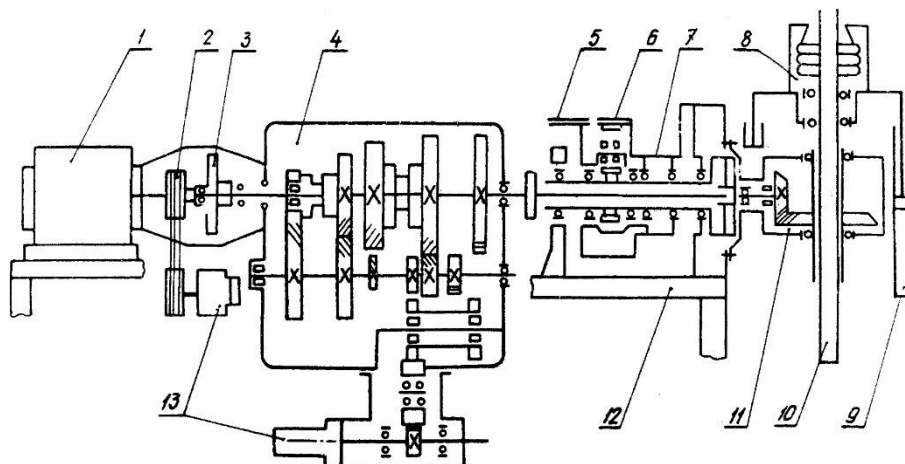


Рис. 3.1. Кинематическая схема станка СКБ-3:

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.

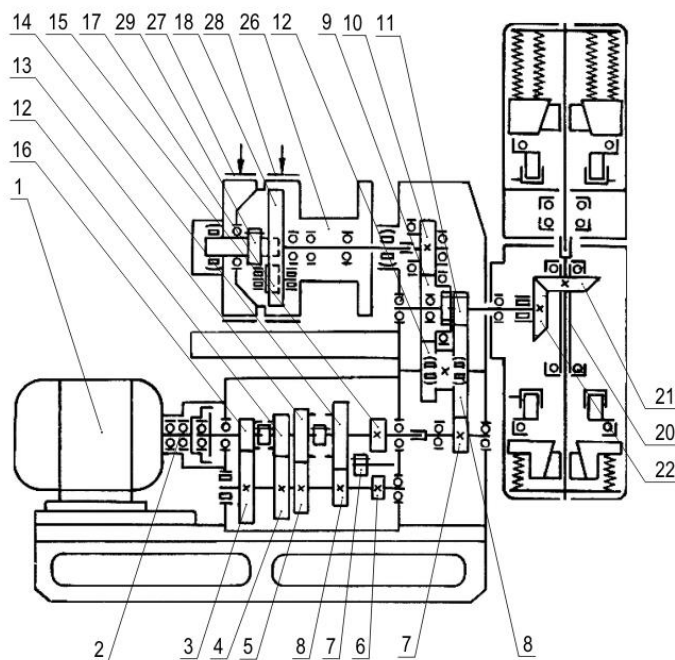


Рис. 3.2. Кинематическая схема станка СКБ-4:

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.

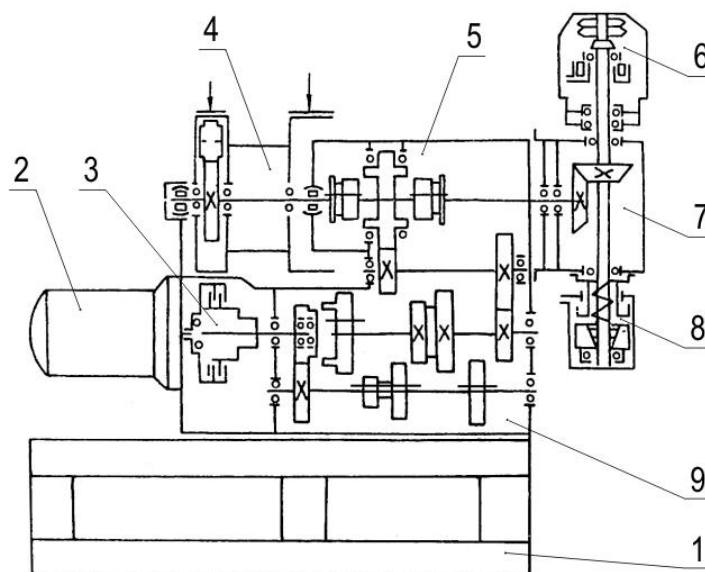


Рис. 3.3. Кинематическая схема станка СКБ-5:

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).

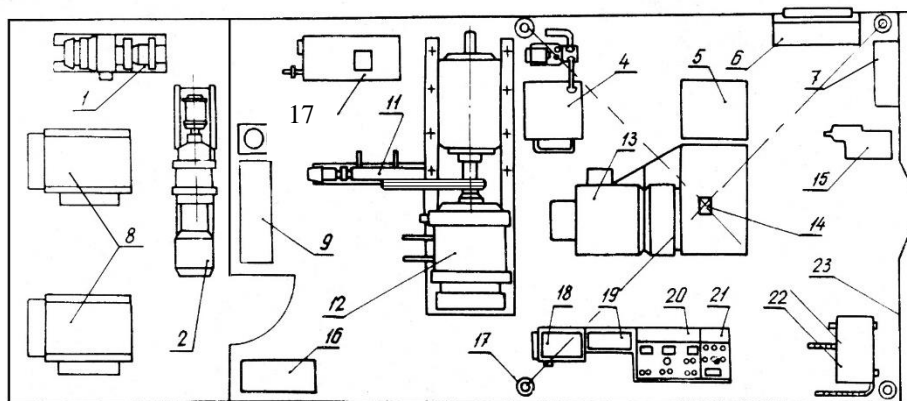


Рис. 3.5. Пример расположения узлов установки с разобщенной компоновкой:

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.

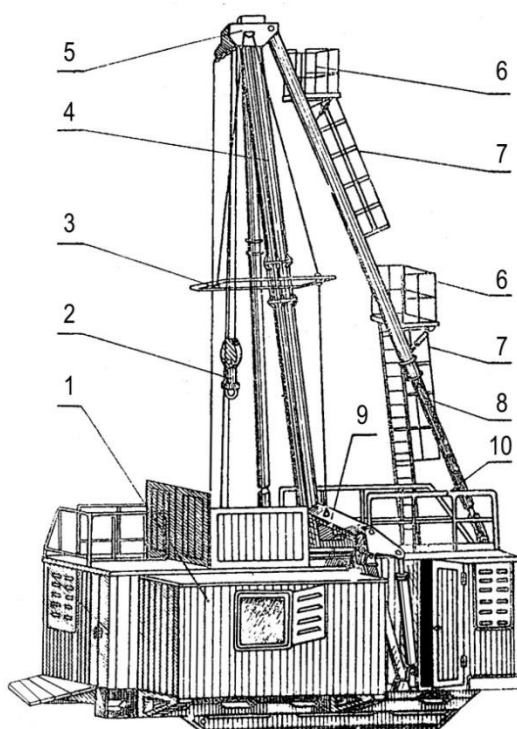


Рис. 4.1. Установка УКБ-4П:

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.

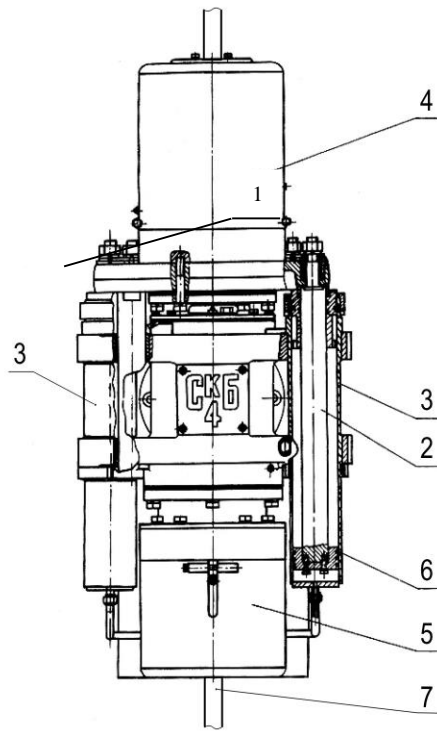


Рис. 4.2. Вращатель. Внешний вид:

1 – траверса; 2 – шток; 3 – гидроцилиндры; 4 – верхний зажимной гидропатрон; 5 – нижний зажимной гидропатрон; 6 – поршень; 7 - ведущая бурильная труба

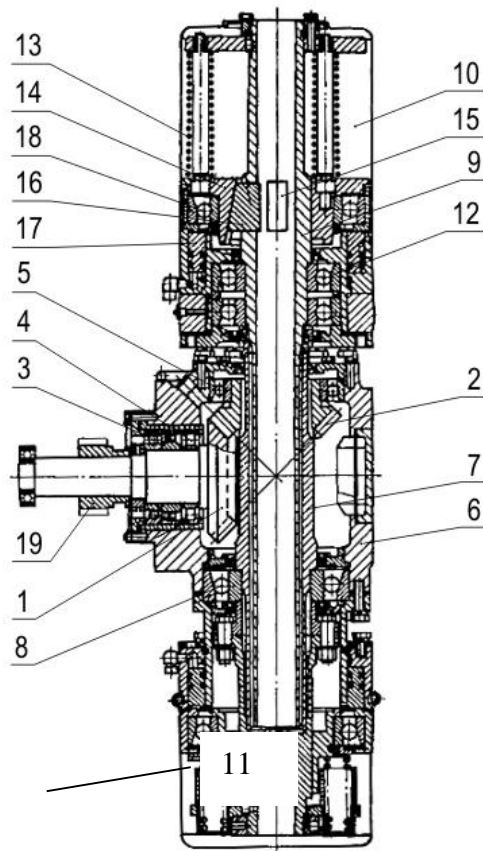


Рис. 4.3. Вращатель. Разрез:

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.

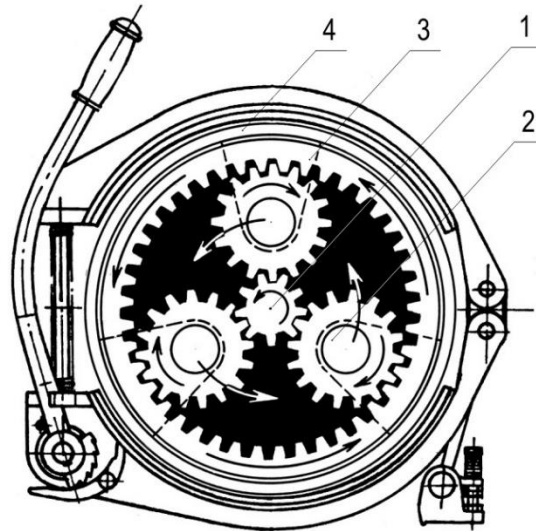


Рис. 4.4. Схема планетарного механизма лебедки:
1 – солнечная шестерня; 2 – сателлит; 3 – зубчатый венец; 4 – шкив водила (шкив тормоза подъема)

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.

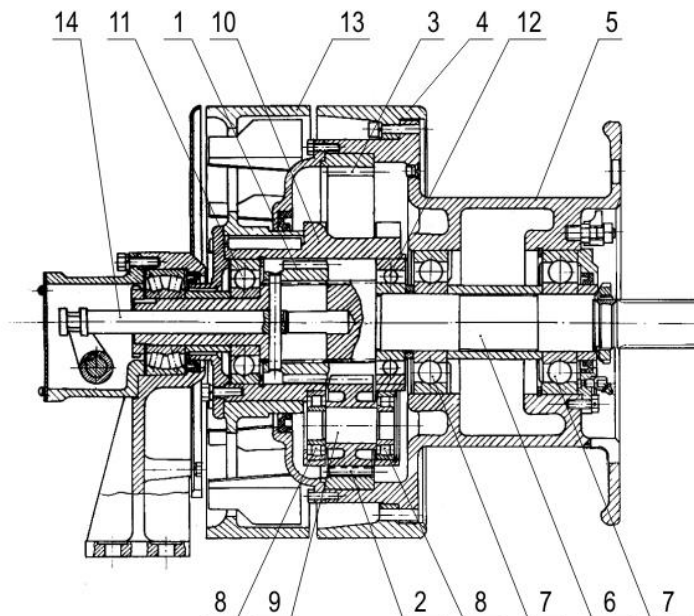


Рис. 4.5. Лебедка:
1 – солнечная шестерня; 2 – сателлит; 3 – зубчатый венец; 4 – шкив тормоза спуска; 5 – барабан; 6 – вал барабана; 7 – подшипник барабана; 8 – подшипник сателлита; 9 – ось сателлита; 10 – водило; 11, 12 – подшипники водила; 13 – шкив тормоза подъема; 14 – шток включения лебедки

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.

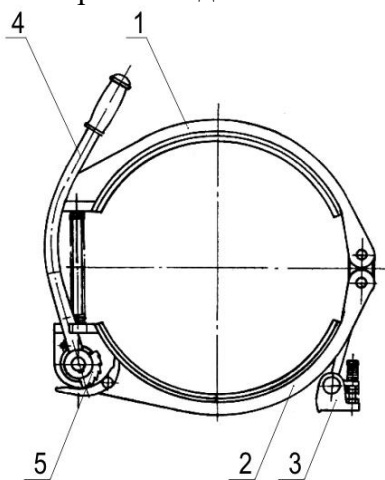


Рис. 4.6. Тормоз лебедки:

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.

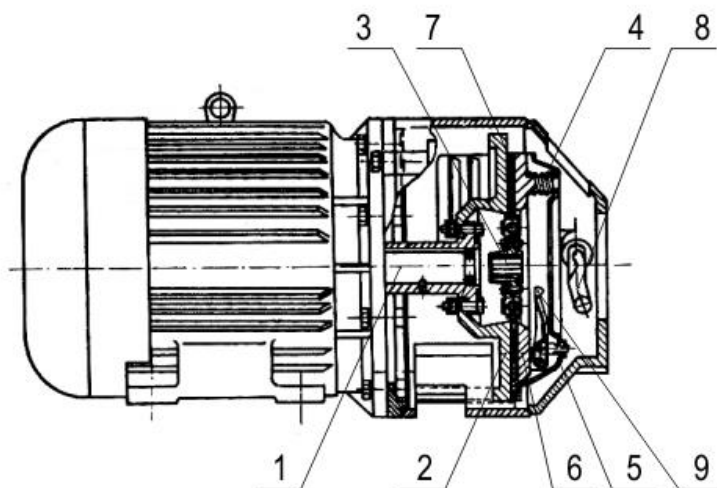


Рис. 4.7. Сцепление станка СКБ-4:
1 – вал электродвигателя; 2 – ведущий диск; 3 – ведомый диск; 4 – пружины нажимные; 5 – корпус нажимного диска; 6 – нажимной диск; 7 – фрикционные накладки; 8 – вилка; 9 – лепестки нажимного диска

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.

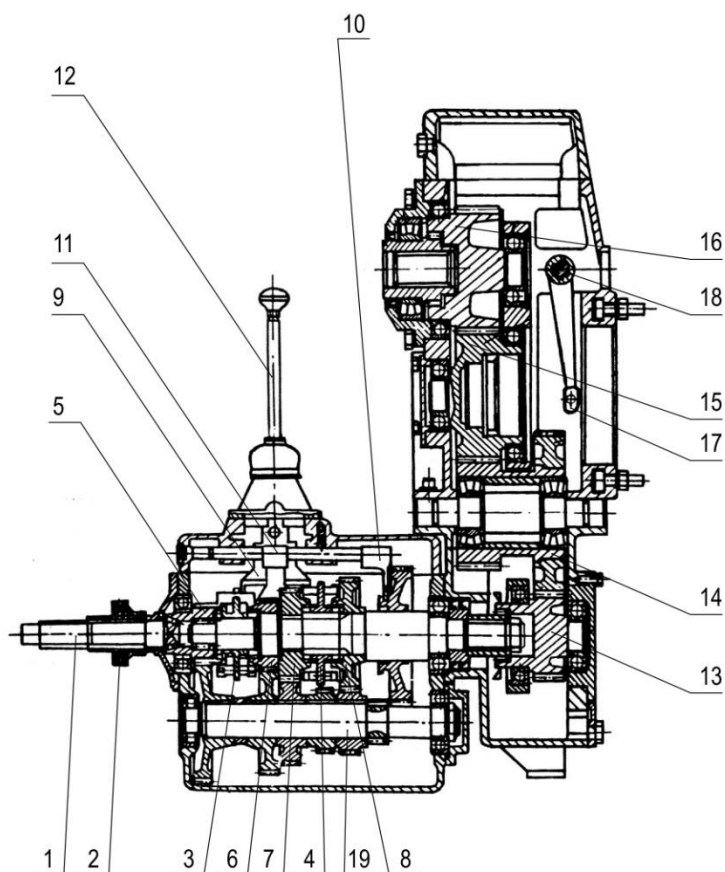


Рис. 4.8. Трансмиссия станка СКБ-4:

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);

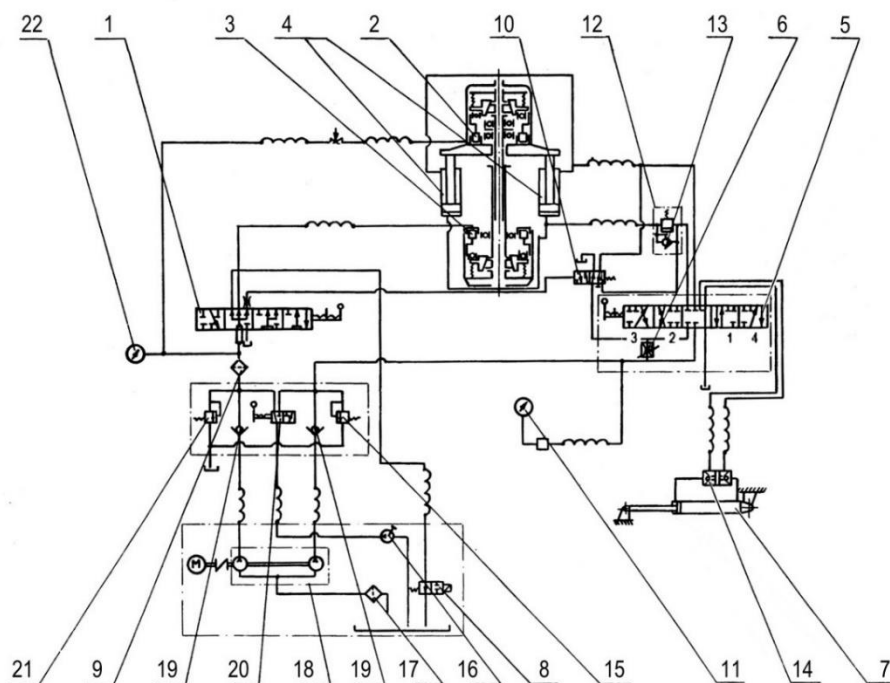


Рис. 4.9. Гидросистема станка СКБ-4:

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».

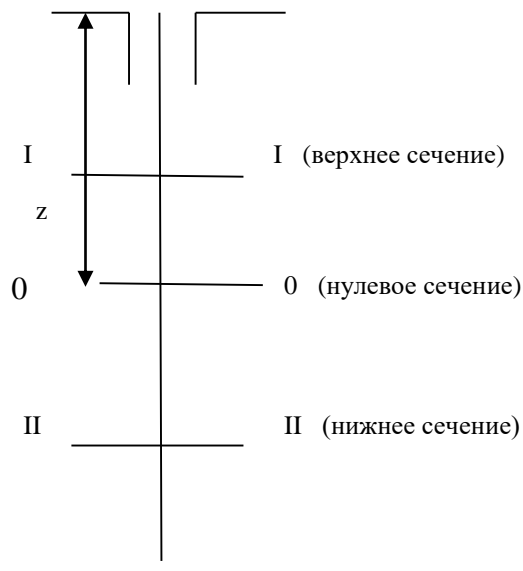


Рис. 1. Характерные сечения колонны бурильных труб. I-I – верхнее сечение; II-II – нижнее сечение; 0-0 – «нулевое сечение»; z – координата рассматриваемого сечения бурильной колонны растянутый участок колонны от нулевого сечения до устья скважины – знак «+», сжатый участок от нулевого сечения до забоя – 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:

$$M_{\delta} = N_6/\omega, \quad (1.5)$$

где N_6 – 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:

$$N_6 = N_{ст} + N_{тр} + N_3, \text{ кВт} , \quad (1.8)$$

где N_6 – 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) 1 м. 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.

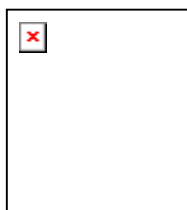
Рекомендованная литература

- 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 проходимым грунтам. Дается краткое описание применяемых способов бурения (колонкового, ударно-канатного 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. Ифтипка
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 84×108/16 — 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-б.

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 (керна), 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 (прессиометрами); 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 солевыми 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 неосыпающихся 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 скрытотечкой 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 наконечника (вибронд 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 слаботрешиноватые), обводненные и необводненные	До 100 и более	Разведочные, зондировочные	Отбираются одинарными колонковыми снарядами
		С промывкой глинистым раствором	Скальные (трешиноватые), 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	шнековый	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 бурирующих 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.

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 виброустановки 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 виброустановки, 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	5080	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 чугушной 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 дробы на больший вначале увеличить вес порции дробы меньшего диаметра, затем бурить до разработки ствола под более крупный диаметр дробы. 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 дробы учитывать дробь, находящуюся на забое;

г) не допускать расхаживание снаряда, особенно при бурении трещиноватых пород.

4.13. Режимы бурения чугунной 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 дробы-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	VII—VIII	600—200	400—150	350—100
	IX—X	400—150	300—100	250—100
Трещиноватые разрушенные	VII—VIII	350—150	350—100	150—80
	IX—X	250—100	150—100	100—80

Количество промывочной жидкости в л/мин

Малоабразивные	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	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 столбники 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

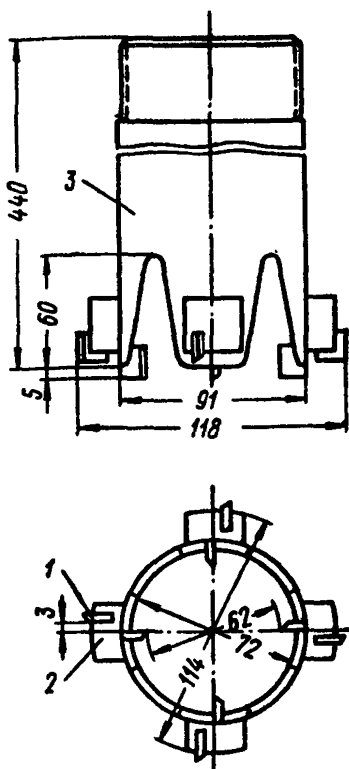


Рис. 1. Твердосплавная коронка для бурения с продувкой воздухом в вязких глинах

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 бурильных 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 солей 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 аэрированные 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 м 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 рас­с­хаживании не должна превышать 10 см. Чем больше ча­стота рас­с­хаживания, тем меньше должна быть высота подъема снаряда над забоем.

4.51. В процессе бурения давление на забой необходимо поддерживать в следующих пределах: в не­с­каль­ных породах — 150—250 кг; в полускальных породах — 200—400 кг и более.

Число оборотов снаряда устанавливают с учетом г­лу­бины и диаметра скважины. С увеличением числа обо­ротов наблюдается повышение скорости бурения, что, в свою очередь, требует увеличения частоты рас­с­хаживания снаряда.

Обычно скорость вращения бурового снаряда уста­навливается из расчета средней окружной скорости ко­ронки 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.

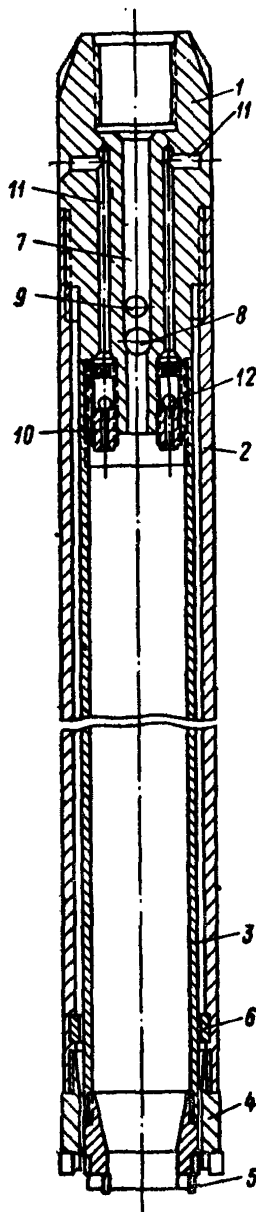
4.52. При проходке пород, дающих тяжелый шлам, перед перекреплением шпинделя необходимо до остано­вки вращения снаряда 3—4 раза его поднять над забоем на небольшую высоту (до 15 см). Перекрепление зажим­ных патронов производят быстро во избежание заклинки керна, а иногда и бурового снаряда. При этом шпиндель станка закрепляется на 5—10 см ниже крайнего верхнего положения. После перекрепления зажимных патронов производят 3—4 рас­с­хаживания, а затем продолжают углубление.

При остановке вращения во избежание зашламова­ния бурового снаряда нельзя прекращать его рас­с­хаживание.

4.53. Показателем прекращения внутренней циркуля­ции жидкости являются торможение вращения и затруд­нения с рас­с­хаживанием снаряда. Если циркуляция жид­кости нарушена и ее невозможно восстановить частым рас­с­хаживанием снаряда без вращения, необходимо не­медленно поднять снаряд из скважины.

4.54. Заклинку керна при безнасосном бурении про­изводят: в мягких породах — затиркой «всухую» на 10—20 см при прекращении рас­с­хаживания снаряда и повы­шенном давлении на забой; в твердых породах — шла­мом, скапливающимся над керном при остановке вра­щения и рас­с­хаживания 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 сильнотрещиноватых 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 стенки 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

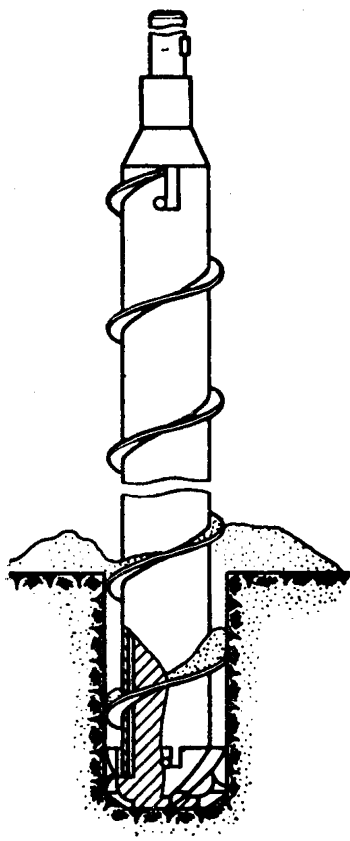


Рис. 4. Шнековый бур для отбора образцов мерзлого грунта конструкции ЦНИИ МПС

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 проходимых 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 проходимых 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 (ти- па Т)	—	—	100—200	200—300	—
Шарошечные (ти- па 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.).

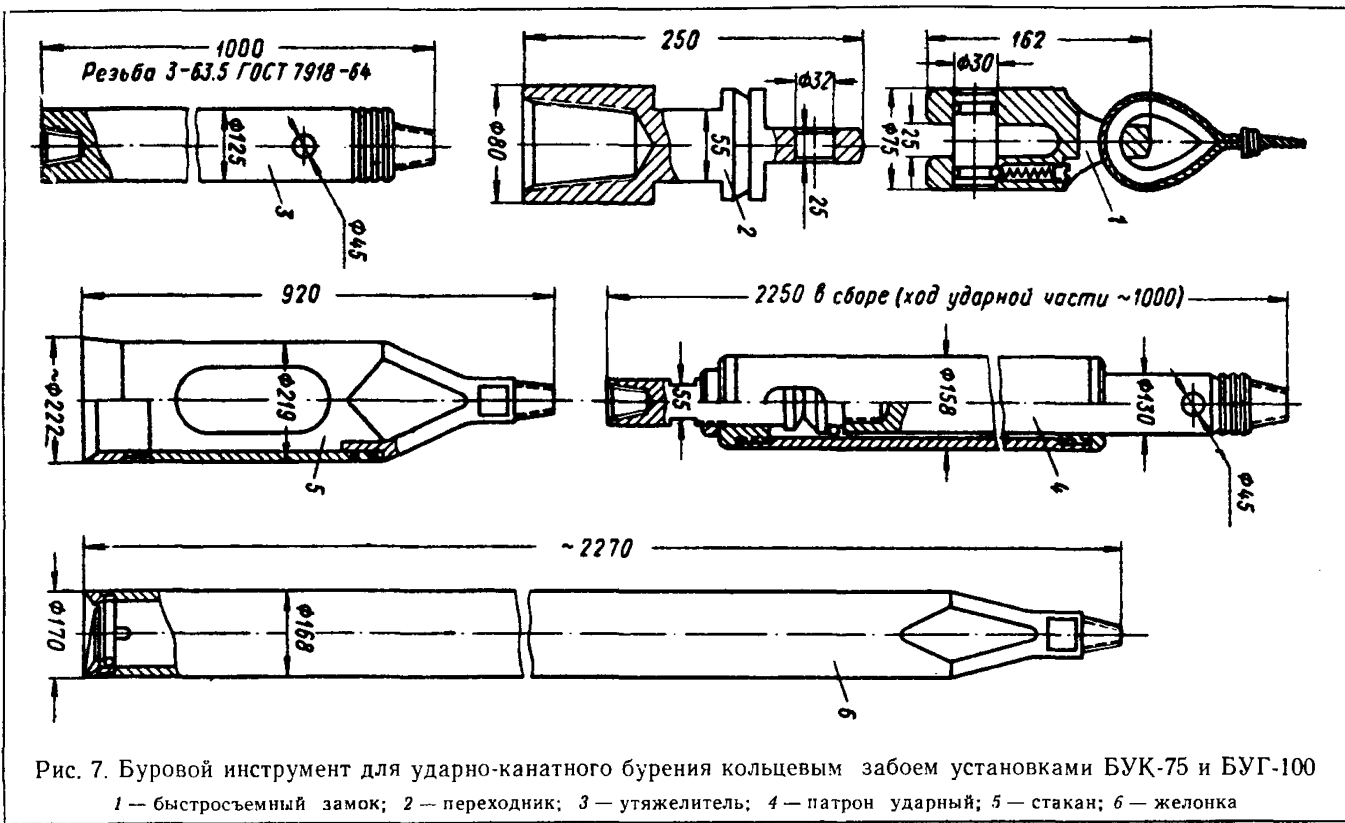
4.84. При желонировании число ударов желонки должно быть 20—30 в мин, а высота ее подъема над забоем 0,15—0,2 м. Желонки применяют с утяжелителями и с таким расчетом, чтобы их вес был равен 50—100 кг. В процессе желонирования скважину необходимо закреплять трубами, при этом желонка не должна выходить 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 мм	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



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 закреплением 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

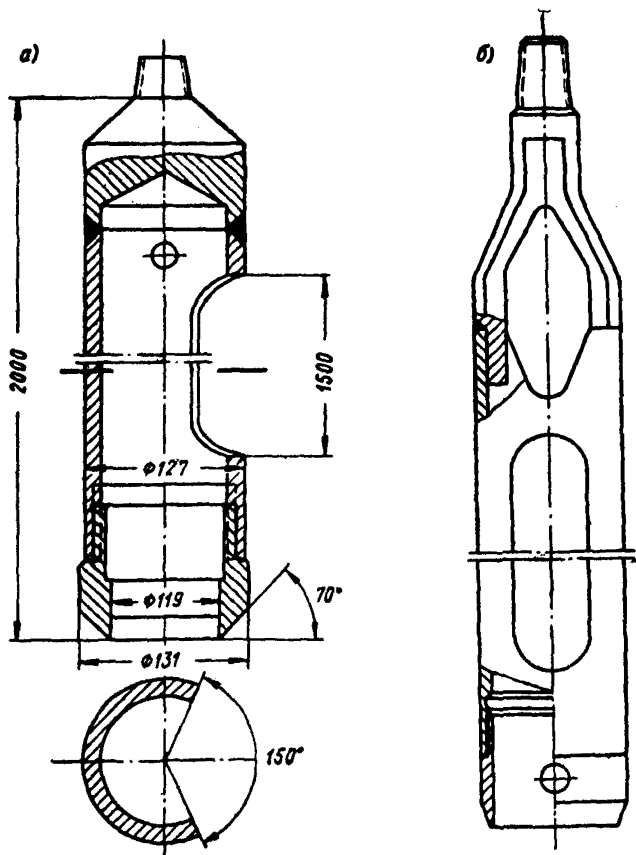


Рис. 8. Инструмент для вибробурения

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 эксцентриков 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 скважин 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 выбуривает 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 обуривающими 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 сцементированных 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-

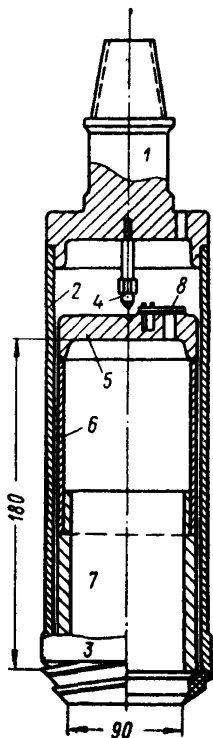


Рис. 9. Грунтонос конструкции Томгипротранса

1 — переходник; 2 — корпус; 3 — коронка; 4 — игла; 5 — головка стакана; 6 — стакан; 7 — подстаканник; 8 — тарельчатый клапан

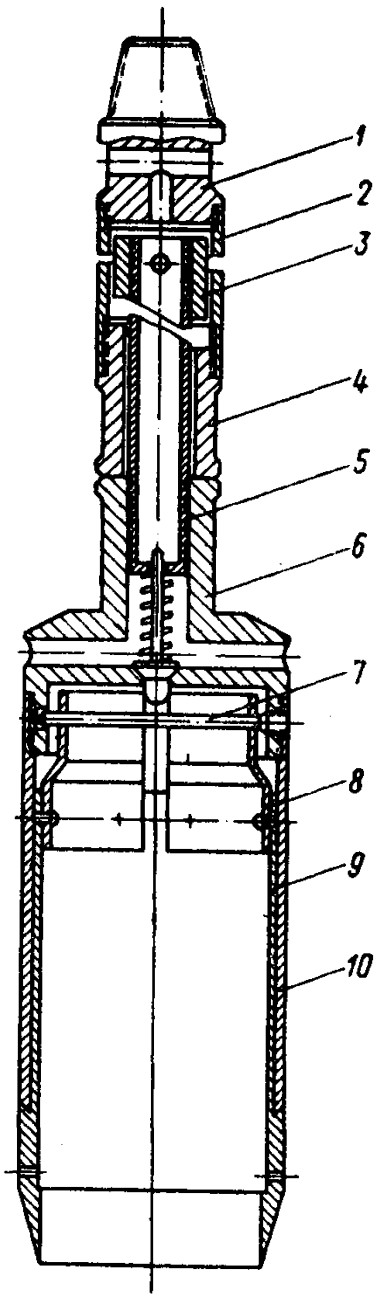


Рис. 10. Забивной грунтонос

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

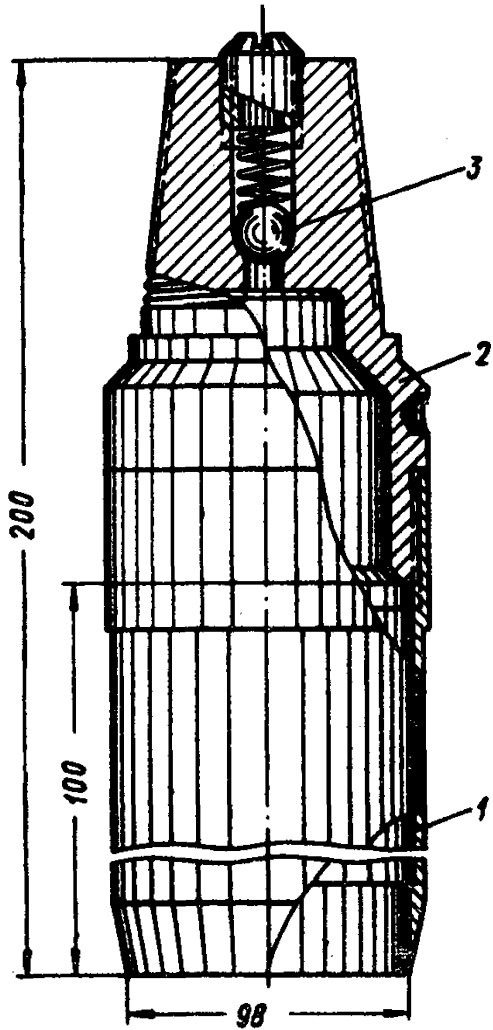


Рис. 11. Грунтонос Д-1 конструкции Днепрогипротранса

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-

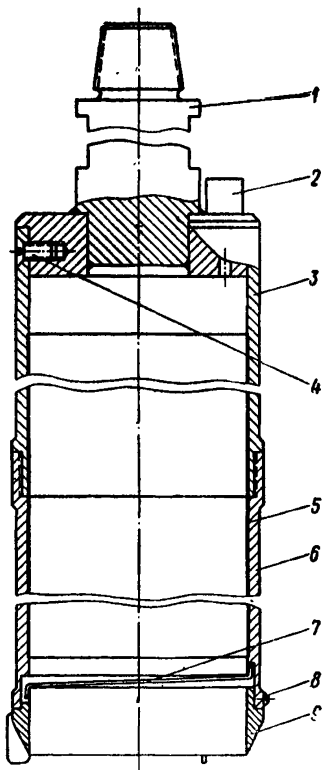


Рис. 12. Задавливаемый грунтонос

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 суженной части башмака в мм	Сужение башмака в %	Общая толщина стенки грунтоноса в мм	Длина стакана в мм	Длина гильзы в мм	Основной способ удерживания монолита породы в грунтоносе
Тугопластичные, мягкопластичные и неуплотненные просадочные	5—6	25	1,5	6	500—600	300—400	Трение породы о внутренние стенки башмака и стакана
Текучепластичные и илистые	7	20	0,5	8	600—700	300—400	В нижней части грунтоноса — запорное устройство; в верхней части — клапан, поршень

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 (ПНИИИС, ХарьковГИИНТИЗ, КуйбышевТИСИЗ, Теплоэлектропроект и др.), для проведения статического зондирования (ПНИИИС, ЦТИСИЗ и др.), испытаний штампами в скважинах, испытаний на срез (ПНИИИС) 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 талевой 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 надевание 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 быстросъемном 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 пробоотборника МП-1 и мотобура Д-10
»	50	Выпускается небольшими партиями мастерскими экспериментального полигона ЦНИИ МПС	—	Чертежи бурового станка и его инструмента можно приобрести в ЦБТИ НИИ организации, механической 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 Днепропетровским 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 СБУДМ-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 м ³ /ч, рабочее давление 40 кг/см ²
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 Кишличским 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 II ГР производительностью 300 л/мин, рабочее давление 50 кг/см ²

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	Автомашина 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 Углицкий 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	1380	—	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 (монокристаллов)	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 геолого-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 ^{1/2} 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, Каляевская, 23а
Подольская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ

И ЭФФЕКТИВНОМУ
ПРИМЕНЕНИЮ
СПОСОБОВ
БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
СКВАЖИН В РАЗЛИЧНЫХ
ПРИРОДНЫХ
И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЯХ



МОСКВА СТРОИИЗДАТ 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, отобранным 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 ключущая 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 гусеничном 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 станки — 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 необходимо 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 бурами) 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 модификациям, диаметрам и способам бурения станки, которые монтируются на плотках 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 рекомендуется 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-мешивание 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 колонковом 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.

полугильзы 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°), 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 пльвунов, 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, расхаживания 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 расхаживания 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 клиноремennую 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 пльвунов 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 $\varepsilon < 1,1$; суглинков с $\varepsilon < 0,9$; супесей с $\varepsilon < 0,7$ 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 грунтов 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 подъема 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 нескальных грунтах. Одним из достоинств медленновращательного бурения является возможность проходки скважин 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 проходе 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 завинчивают 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 рекомендуется 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 скважин.

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-геологически, 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 водонасыщенны.

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 АВБ-1М и АВБ-2М. Применялись вибронды 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 соотношение 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. Обработка 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 ^а 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 извлекае- мого грунта	Случай соотноше- ния слоев по плотности	Объем вы- борки	Показатели точности фиксации положения контактов		Показатель неполноты отражения разреза $K_{\Pi} (K)_{\Pi}$ % $\left(\frac{1}{m}\right)$	Средняя мощность одного пропущен- ного слоя, м	Предлагаемая града- ция 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	$\pm 0,22$	—	—	—
		II	13	+0,09	$\pm 0,20$	14	0,22	
		III	20	-0,03	$\pm 0,24$	(0,19)	—	
Медленновращательный	Комки грун- та с нару- шенным слоением	I	10	-0,13	$\pm 0,27$	—	—	Низкая $(\bar{x} \pm \sigma) =$ $= 0,50-0,75$ м; $K_{\Pi} = 20-30\%$
		II	21	+0,01	$\pm 0,36$	28	0,30	
		III	16	10,17	$\pm 0,38$	(0,38)	—	
Шнековый рейсовый	с грунта нарушенным при- родным слоением	I	16	-0,10	$\pm 0,38$	—	—	Низкая $(\bar{x} \pm \sigma) =$ $= 0,50-0,75$ м; $K_{\Pi} = 20-30\%$
		II	23	+0,20	$\pm 0,41$	20	0,20	
		III	21	+0,13	$\pm 0,33$	(0,20)	—	
Шнековый поточный	Комки грун- та с нару- шенным при- родным слоением	I	12	—	$\pm 0,45$	—	—	Весьма низкая $(\bar{x} + \sigma) >$ $> 0,75$ м; $K_{\Pi} > 30\%$
		II	16	-0,24	$\pm 0,66$	38	0,38	
		III	18	-0,08 +0,19	$\pm 0,47$	(0,51)	—	

Характерным является распределение показателя неполноты отражения разреза K_d . 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. Медленновращательный 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.

Медленновращательное и шнековое рейсовое бурение по точности существенно уступает вибрационному, ударно-канатному кольцевым забоем и колонковому способам. Более предпочтительным из этих двух способов является медленновращательный.

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 содержится 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 15×15×15 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 УБП-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 те пары 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 их 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:					
стирающие	—	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 себестои- мость 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 себестои- мость 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 бурильной 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. Стрэгивающие 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 внутреннего 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

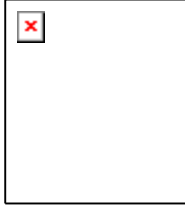
В этом разделе необходимо предусмотреть мероприятия по охране здоровья работающего персонала и средства по оказанию первой медицинской помощи пострадавшим.

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																																							
										Режим бурения										Подъем инструмен-та																													
Стратигра-фический разрез																																																	
Проект 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, %.

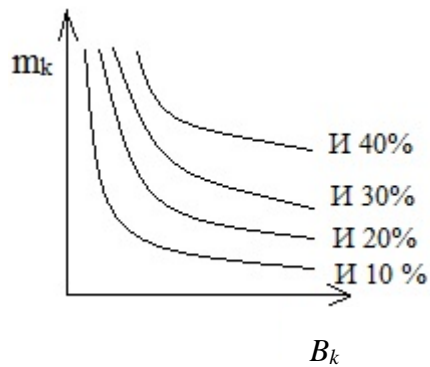
Группировка месторождений по значениям НП и И

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. 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)

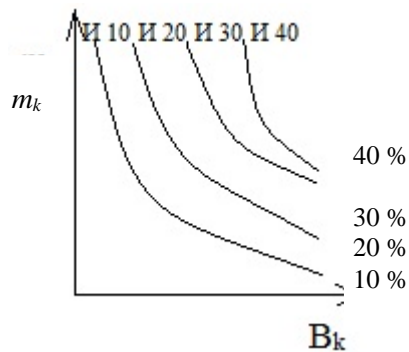
Слабонеоднородные руды **НП=2**

$m_k \backslash I$	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}

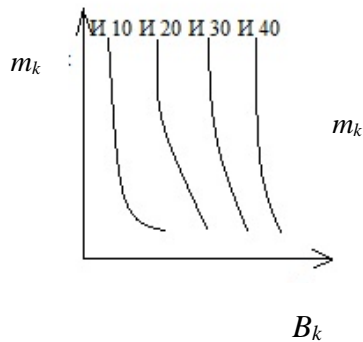


Среднеооднородные руды **НП=6**

$m_k \backslash I$	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}



Сильнонеоднородные 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 $\{P_{ш}, K_{абр}, X_i, P_б\}$.

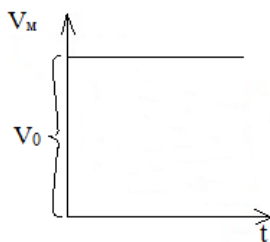
Чем легче условия бурения и лучше инструмент, тем больше V_0 (\uparrow) и меньше γ (\downarrow) - долго не замедляется бурение.

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).

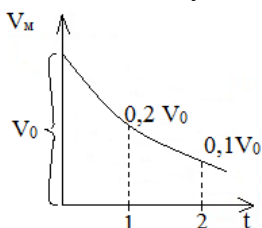
$$\gamma = 0; V_M = V_0$$

Незатупл. инструмент



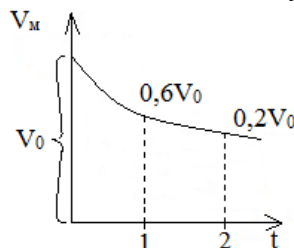
$$\gamma = 1; V_M = V_0 * \left(\frac{1}{2,7}\right)^t$$

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:

$$Q = \frac{k * P_\phi * \sin \alpha}{f}$$

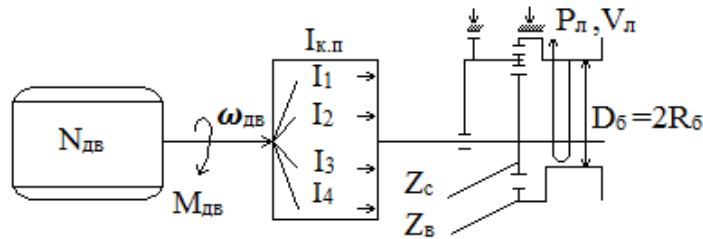
Таблица исходных данных

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:

$$\tau = \frac{M_{\text{б}}}{W_p}.$$

3. Крутящий момент при бурении, Н*м:

$$M_{\text{б}} = \frac{N_{\text{б}}}{\omega}.$$

4. Мощность, затрачиваемая на бурение, кВт:

$$N_{\text{б}} = N_{\text{тр}} + N.$$

5. Первый момент сопротивления, м³:

$$W_p = 0,1 * \frac{d_{\text{н}}^4 - d_{\text{в}}^4}{d_{\text{н}}}.$$

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:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{ос}}}{F}.$$

8. Напряжение изгиба, Н/м²:

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{\pi^2 * E * D * f}{2 * 1^2}.$$

9. Напряжения кручения, Н/м²:

$$\tau = \frac{M_{\text{б}}}{W_p}.$$

10. Мощность, затрачиваемая на бурение, кВт:

$$N_{\text{б}} = 1,5 * N_3.$$

11. Суммарное напряжение в сечении II-II, Н/м²:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{из}})^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma_g].$$

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:

$$n_\Sigma = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 * n_\tau^2}} .$$

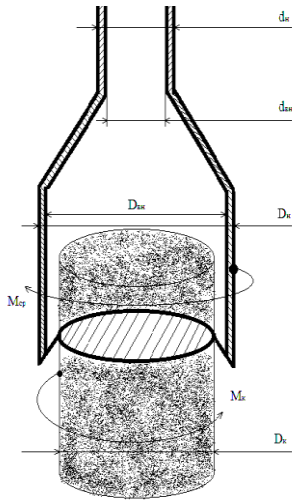
Таблица исходных данных

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_b	Крутящий момент при бурении	Н*м	70	6500
W_p	Полярный момент сопротивления	м ³	$5,4 * 10^{-6}$	$10,6 * 10^{-6}$
N_b	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 полутолны	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_z	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
$d_{н}$	Наружный диаметр бурильных труб	м	$32 \cdot 10^{-3}$	$73 \cdot 10^{-3}$
$d_{вн}$	Внутренний диаметр бурильных труб	м	$22 \cdot 10^{-3}$	$59 \cdot 10^{-3}$
$D_{н}$	Наружный диаметр колонковой трубы	м	$34 \cdot 10^{-3}$	$219 \cdot 10^{-3}$
$D_{вн}$	Внутренний диаметр колонковой трубы	м	$27 \cdot 10^{-3}$	$203 \cdot 10^{-3}$
$D_{к}$	Диаметр керна	м	$23 \cdot 10^{-3}$	$199 \cdot 10^{-3}$
$[\tau_{тр}]$	Прочность материала труб при кручении	МПа	162	284
$[\tau_{к}]$	Прочность горных пород при кручении	МПа	1,5	56,0

2. Основные аналитические зависимости.

Момент срыва керна $M_{ср}$ равен моменту реакции керна $M_{к}$, $H^* \cdot m$:

$$M_{ср} = [\tau_{тр}] * W_{тр} = [\tau_{к}] * W_{к} = M_{к}$$

где $W_{тр}$ - момент сопротивления поперечного сечения труб, $м^3$:

а) бурильных труб:

$$W_{тр}^{б.тр} = \frac{\pi}{16} * \frac{d_{н}^4 - d_{вн}^4}{d}$$

б) колонковых труб:

$$W_{тр}^к = \frac{\pi}{16} * \frac{D_{н.к.т.}^4 - D_{вн.к.т.}^4}{D_{н.к.т.}}$$

$W_{к}$ - момент сопротивления поперечного сечения керна, $м^3$:

$$W_{к} = \frac{\pi * D_{к}^4}{32}$$

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.

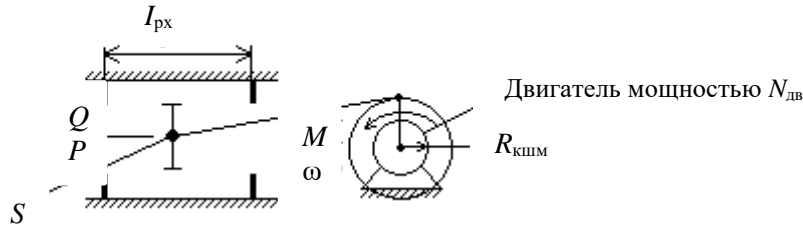
3.6. Задайте диаметры труб, прочность горной породы и постройте график зависимости необходимой прочности труб от диаметра срываемого керна.

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:

$$W_0 = \frac{h_g}{C_0 * \log_{10} \frac{h_g * (K-1) + 10}{10}} ,$$

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.

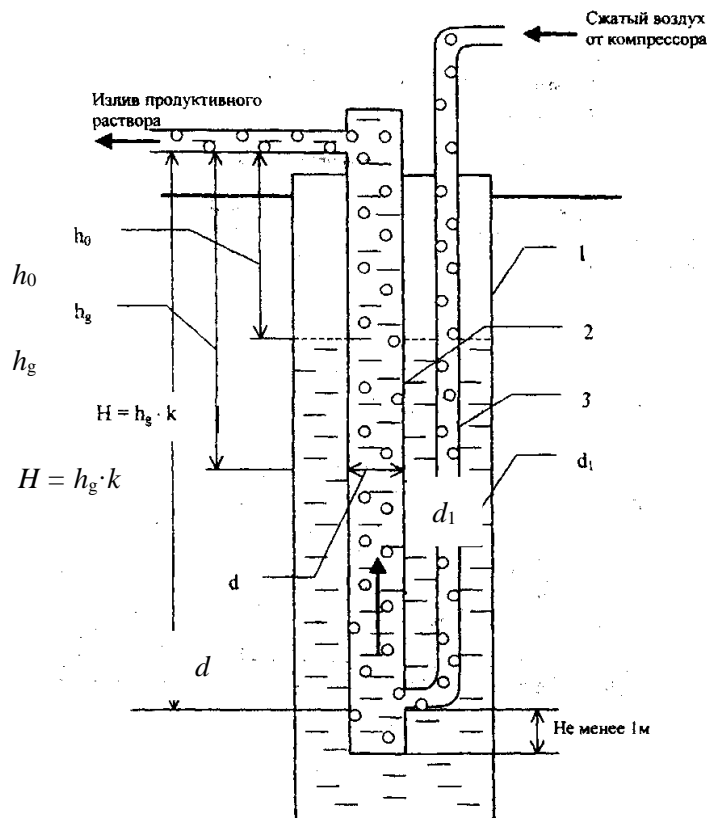


Схема эрлифта с расположением труб «рядом»:

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:

$$I_i^V = \frac{L \cdot (d_{\text{вн}}^2 + k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2) + (k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2) \cdot \frac{10(P_{\text{н}}^V - P_r)}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}} - \frac{4V_{\text{ц,р}}}{\pi}}{(k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2) \frac{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{пр.ж}}}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}} + d_{\text{вн}}^2}.$$

Определяем постоянные элементы для данной формулы:

$$a = L \cdot (d_{\text{вн}}^2 + k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2);$$

$$b = (k^2 \cdot D_c^2 - d_{\text{э.к}}^2);$$

$$c = \frac{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{пр.ж}}}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}};$$

$$Z = \frac{4V_{\text{ц,р}}}{\pi};$$

$$I_1^V = \frac{a + b \cdot \frac{10(P_{\text{н}}^V - P_r)}{\gamma_{\text{ц,р}} - \gamma_{\text{гл,р}}} - Z}{b \cdot c + d_{\text{вн}}^2}.$$

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:

$$V_{пр}^V = e \cdot \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot I_1^V;$$

$$V_{пр}^{IV} = e \cdot \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot (I_1^{IV} - I_1^V);$$

$$V_{пр}^{III} = e \cdot \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot (I_1^{III} - I_1^{IV});$$

$$V_{пр}^{II} = V_{пр} - V_{пр}^I - V_{пр}^{III} - V_{пр}^{IV} - V_{пр}^V;$$

$$V_{пр}^I = 2.$$

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.



**ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕР-
СИТЕТ**



ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Кафедра технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых

М.А. Саламатов, И.В. Малахов

ТЕХНОЛОГИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТАМПОНАЖНЫХ РАБОТ

Методические указания к контрольной работе
для студентов специальности

21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общая характеристика контрольной работы	5
2. Исходные данные для выполнения контрольной работы.....	6
3. Рекомендации по содержанию и методике выполнения контрольной работы7	
3.1 Введение.....	7
3.2 Геологические и гидрогеологические условия сооружения гидроизоляционных ограждений.....	8
3.3 Проектирование технологических параметров и технологических схем сооружения гидроизоляционных ограждений методом тампонажа.....	9
3.3.1 Выбор тампонажного раствора и его физико-механических и реологических параметров	9
3.3.2 Проектирование гидроизоляционных ограждений	9
3.3.3. Определение необходимого количества тампонажных скважин для формирования гидроизоляционного ограждения в водоносном пласте	14
3.3.4. Выбор координат заложения на поверхности земли и профиля тампонажных скважин.....	14
3.3.5. Расчет необходимого количества тампонажных материалов	14
3.4. Технология и технические средства производства тампонажных работ ..	16
3.4.1. Техника и технология бурения тампонажных скважин.....	16
3.4.2. Техника и технология приготовления тампонажного раствора.....	17
3.4.3. Техника и технология тампонажа	17
Список рекомендуемой литературы.....	19
Приложение 1	20
Приложение 2	21
Приложение 3	22

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа является самостоятельной формой изучения теоретических и практических вопросов техники и технологии тампонажа, рассмотренных на лекциях и практических занятиях по дисциплине «Технология специальных тампонажных работ».

Студент должен в контрольной работе самостоятельно разработать технологию тампонажа и технологические схемы производства тампонажных работ, выбрать необходимые технические средства для сооружения гидроизоляционной занавеси в определенных горнотехнических условиях, основываясь на комплексе исходных данных о геологических и гидрогеологических условиях залегания водоносных горизонтов, а также их структурных и фильтрационных параметрах.

Решаемые задачи в контрольной работе по своему содержанию подразделяются на две группы:

- проектирование технологических параметров и технологических схем сооружения гидроизоляционных ограждений способом тампонажа;
- разработка технологии тампонажа и выбор технических средств для производства тампонажных работ.

В соответствии с принятой логической схемой решаемых задач и их взаимной обусловленности рекомендуется следующая структура контрольной работы.

1. Введение
2. Геологические и гидрогеологические условия сооружения гидроизоляционных ограждений
3. Проектирование технологических параметров и технологических схем сооружения гидроизоляционных ограждений методом тампонажа
 - 3.1. Выбор тампонажного раствора и его физико-механических и реологических параметров
 - 3.2. Проектирование гидроизоляционных ограждений
 - 3.2.1. Расчет параметров проницаемости водоносных горизонтов трещиноватых горных пород

- 3.2.2. Расчет геометрических параметров гидроизоляционных ограждений
- 3.2.3. Расчет предельно возможных контуров инъекционных потоков
- 3.3. Определение необходимого количества тампонажных скважин для формирования гидроизоляционного ограждения в водоносном пласте
- 3.4. Выбор координат заложения и профиля тампонажных скважин
- 3.5. Расчет необходимого количества тампонажных материалов
- 4. Технология и технические средства производства тампонажных работ
 - 4.1. Техника и технология бурения тампонажных скважин
 - 4.2. Техника и технология приготовления тампонажного раствора
 - 4.3. Техника и технология тампонажа
 - 4.3.1. Общая технологическая схема тампонажа
 - 4.3.2. Выбор технических средств для тампонажа
 - 4.3.3. Технологические схемы нагнетания тампонажного раствора в водоносные горизонты

Список используемой литературы

Приложения: схема формирования гидроизоляционной занавесы;

схема расположения тампонажных скважин;

общая технологическая схема тампонажа;

технологические схемы нагнетания тампонажного раствора в водоносные горизонты.

Контрольная работа оформляется на бумаге формата 210x297 и брошюруется в следующей последовательности: титульный лист, задание на проектирование, содержание работы, приложения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа выполняется на основании материалов, собранных в период производственной практики или полученных из архивных фондов производственных и проектных организаций, выполняющих тампонажные работы. Содержание контрольной работы определяется индивидуальным заданием, которое составляется руководителем совместно со студентом в соответствии с

учебной программой дисциплины «Технология специальных тампонажных работ».

Задание по контрольной работе «Технология специальных тампонажных работ» должно содержать следующие исходные данные:

- характеристику капитальной горной выработки, для которой сооружаются гидроизоляционные ограждения;
- характеристику геологического разреза с указанием вида, мощности, физико-механических свойств, категории буримости, гидрогеологических и фильтрационных характеристик горных пород;
- глубины, условия залегания, строение и структуру водоносных горизонтов с оценкой их проницаемости и пластового давления.

В задании также указывается способ условия производства тампонажных работ.

Содержание и форма задания по контрольной работе приводятся в приложении 3.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОДЕРЖАНИЮ И МЕТОДИКЕ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1 Введение

Вводная часть контрольной работы содержит сведения о разрабатываемом месторождении полезного ископаемого, а также о географо-климатических и гидрогеологических условиях строительства и эксплуатации капитальных горных выработок в условиях этого месторождения. Дается общая характеристика строящейся капитальной горной выработки (глубина заложения, диаметр), перечисляются водоносные горизонты, пересекаемые горной выработкой, выбираются и обосновываются способы подавления водопритоков. Формулируются задачи, которые необходимо решить в контрольной работе.

3.2 Геологические и гидрогеологические условия сооружения гидроизоляционных ограждений

Проектирование гидроизоляционных ограждений и технологических параметров тампонажа основывается на количественных показателях трещиноватости и гидродинамических характеристиках каждого водоносного горизонта, пересекаемого капитальной горной выработкой. Эти данные устанавливаются путем изучения всех известных геологических документов, а также при проведении специальных гидродинамических исследований методами расходомерии и восстановления давления, определения соотношения проницаемости основных систем трещиноватости горных пород. Для более точной оценки условий производства тампонажных работ, как правило, бурится контрольно-техническая скважина, в которой выполняются геофизические, расходометрические и другие исследования.

При выполнении контрольной работы условия производства тампонажных работ и условия сооружения гидроизоляционных ограждений формулируется на основании материалов, собранных на производственной практике и индивидуального задания на курсовую работу.

Характеристика условий сооружения гидроизоляционных ограждений в водоносном пласте должна содержать следующую информацию:

- глубина залегания кровли водоносного пласта;
- глубина залегания почвы водоносного пласта;
- мощность водоносного пласта;
- структура трещиноватости горной породы;
- коэффициент трещинной анизотропии;
- пластовое давление;
- фильтрационные характеристики водоносного пласта-коэффициент проницаемости и коэффициент фильтрации;
- оценка агрессивности пластовых вод.

3.3 Проектирование технологических параметров и технологических схем сооружения гидроизоляционных ограждений методом тампонажа

3.3.1 Выбор тампонажного раствора и его физико-механических и реологических параметров

При сооружении гидроизоляционных ограждений капитальных горных выработок в водоносных трещиноватых горных породах наиболее целесообразно использовать глиноцементные тампонажные растворы. Состав глиноцементного тампонажного раствора, а также его физико-механические и реологические параметры выбираются с учётом условий производства тампонажных работ на основании лабораторных исследований или справочной литературы. Основные параметры, характеризующие глиноцементные растворы различного состава, приведены в приложении 1.

Для расчета параметров проектируемых гидроизоляционных ограждений необходимо выбрать и обосновать следующие физико-механические и реологические параметры выбранного тампонажного раствора:

- удельная масса, $\gamma \text{ Г/см}^3$;
- пластическая (структурная) вязкость, $\eta \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- динамическое напряжение сдвига, $\tau_0 \text{ Па}$;
- пластическая прочность стабилизировавшегося тампонажного раствора, $P_m \text{ Г/см}^2$.

3.3.2 Проектирование гидроизоляционных ограждений

- Рассмотрим методику проектирования гидроизоляционных ограждений, сооружаемых в трещиноватых водоносных горизонтах для подавления водопритокков при строительстве и эксплуатации шахтного ствола.

Расчет параметров трещиноватости водоносных горизонтов, пересекаемых шахтным стволом

Общая скважность (трещинная пустотность) определяется по формуле:

$$m_T = 49,2 \sqrt[3]{K_{пр}}, \quad (1)$$

где m_T - скважность (трещинная пустотность), долиед;

$K_{пр}$ - коэффициент проницаемости трещиноватого горизонта, m^2 .

При наличии трещинной анизотропии проницаемость в направлении основных двух систем трещиноватости K_{11} и K_{22} определяется из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} K_{пр} = \sqrt{K_{11} K_{22}} ; \\ \varepsilon = \sqrt{K_{11} / K_{22}} ; \end{cases} \quad (2)$$

$$K_{11} = \varepsilon K_{пр}; \quad (3)$$

$$K_{22} = K_{пр} / \varepsilon; \quad (4)$$

где K_{11} ; K_{22} – проницаемость основных систем трещиноватости, m^2 ;

ε - коэффициент трещинной анизотропии;

$K_{пр}$ - коэффициент проницаемости трещиноватого горизонта, m^2 .

Скважность, обусловленная основными системами трещин, можно рассчитать по формулам:

$$m_{т11} = \frac{m_{т}}{1 + \frac{1}{\sqrt{3}}}; \quad (5)$$

$$m_{т22} = \frac{m_{т}}{1 + \sqrt{3}}; \quad (6)$$

где $m_{т11}$; $m_{т22}$ - скважность трещиноватой горной породы, обусловленная основными системами трещин, доли ед.

Раскрытие трещин в каждой основной системе найдем по формулам:

$$h_{11} = 4,83 \sqrt{\frac{K_{11}}{m_{т11}^{2,1}}}; \quad (7)$$

$$h_{22} = 4,83 \sqrt{\frac{K_{22}}{m_{т22}^{2,1}}}; \quad (8)$$

где h_{11} ; h_{22} - среднее раскрытие трещин в главных системах трещиноватости, м.

Расчет геометрических параметров гидроизоляционных ограждений

Гидроизоляционная завеса в водоносном трещиноватом пласте с трещинной анизотропией по простиранию пласта имеет форму эллипса. Поэтому геометрическими параметрами гидроизоляционного ограждения будут полуоси эллипса, направление которых совпадает с направлением основных систем трещин.

Полуоси эллипса, характеризующие размеры гидроизоляционной занавесы относительно вертикальной оси шахтного ствола, определяются по формулам:

$$R_1 = \frac{\alpha h_{11} P_{пл}}{2|P_m|} + R_{ств}; \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{\alpha h_{22} P_{пл}}{2|P_m|} + R_{ств}; \quad (10)$$

где $R_1; R_2$ – полуоси эллипса, м;

$R_{ств}$ – радиус шахтного ствола, м;

$P_{пл}$ – пластовое давление, ;

$h_{11}; h_{22}$ – раскрытие трещин в основных системах (при наличии трещин с аномальным раскрытием в расчетах принимается максимально известное раскрытие h_{max}), м;

α – коэффициент запаса прочности, $\alpha = 3$;

P_m – допустимая пластическая прочность тампонажного камня через 10-12 суток после закачки, Па.

Определяется опытным путем по формуле:

$$|P_m| = \frac{P_m}{K}, \quad (11)$$

где P_m – пластическая прочность тампонажного камня при оптимальном составе компонентов, Па;

K – опытный коэффициент, $K = \frac{P_m}{P_{m \min}}$.

Расчет предельно возможных контуров инъекционных потоков

Контур инъекционного потока, формируемого в водоносном трещиноватом пласте с трещинной анизотропией, имеет форму эллипса. Предельно возможные размеры контура будут характеризоваться предельно возможными радиусами распространения тампонажного раствора по направлению полуосей эллипса. Предельно возможные радиусы распространения тампонажного раствора в проницаемые горные породы обусловлены перепадом давления на интервале стенка скважины – контур инъекционного потока, который определяется из условия:

$$\Delta P = P_{снв} - P_k, \quad (12)$$

где ΔP – перепад давления на радиус распространения тампонажного раствора, Па;

$P_{\text{снв}}$ – давление на стенки скважины в интервале проницаемого горизонта, Па;

$P_{\text{к}}$ – давление на контуре инъекционного потока, $P_{\text{к}} = P_{\text{пр}}$ Па.

Предельно возможный контур инъекционного потока определяется предельно возможным перепадом давления на радиусе распространения при нагнетании выбранным насосом. Поэтому, предельно возможный перепад давления для преодоления гидравлических сопротивлений при формировании инъекционного потока рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{пр}} = P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{тр}} + P_{\text{г}} - P_{\text{к}}, \quad (13)$$

где $\Delta P_{\text{пр}}$ – предельно возможный перепад давления при использовании насоса, создающего давление, Па;

$P_{\text{н}}$ – давление тампонажного насоса, Па;

$\Delta P_{\text{тр}}$ – потери напора при течении тампонажного раствора в нагнетательной системе труб, Па;

$P_{\text{г}}$ – гидростатическое давление столба тампонажного раствора в интервале тампонируемого горизонта, Па;

$P_{\text{к}}$ – давление на контуре инъекционного потока, Па.

Давление тампонажного насоса $P_{\text{н}}$ принимается максимальным согласно его технической характеристике.

Потери напора при течении тампонажного раствора в трубах рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{\text{тр}} = 0,83 \lambda_{\text{т}} \frac{\gamma Q^2 l}{d_{\text{в}}^5}, \quad (14)$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери напора в трубах, Па;

γ – удельный вес тампонажного раствора, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Q – объемный расход тампонажного раствора, $\text{м}^3/\text{с}$;

l – длина труб, м;

$d_{\text{в}}$ – внутренний диаметр труб, м;

λ_T – безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления в трубах.

Для вязкопластичной среды безразмерный коэффициент определяется из условия:

$$\lambda_T = \frac{0,3165}{\sqrt{Re^*}}, \quad (15)$$

где Re^* – параметр Рейнольдса,

$$Re^* = \frac{V D_3 \gamma}{\eta g}, \quad (16)$$

где V – среднеобъемная скорость течения, м/с;

D_3 – эквивалентный диаметр сечения канала для труб $D_3 = d_8$, м;

γ – удельный вес тампонажного раствора кгс/м³;

η – пластическая (структурная) вязкость тампонажного раствора, Па·с;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Потери напора при течении в трубах глиноцементного раствора приведены в приложении 2.

Гидростатическое давление столба тампонажного раствора на стенки скважин в интервале водоносного горизонта определяется из выражения:

$$P_T = \frac{\gamma H}{10}, \quad (17)$$

где P_T – гидростатическое давление, Па;

γ – удельный вес тампонажного раствора, кгс/м³;

H – глубина залегания кровли водоносного горизонта, м

Предельно возможные радиусы распространения тампонажного раствора из скважины по направлению развития основных систем трещиноватости будут:

$$r_1 = \frac{h_{11} \Delta P_{np}}{2\tau_0}; \quad (18)$$

$$r_2 = \frac{h_{22} \Delta P_{np}}{2\tau_0}, \quad (19)$$

где $r_1; r_2$ – радиусы распространения тампонажного раствора из скважины по направлению основных систем трещиноватости, м;

$h_{11}; h_{22}$ – раскрытие трещин в основных системах трещиноватости, м;

$\Delta P_{пр}$ – предельно возможный перепад давления на радиусах распространения,
Па;

τ_0 – динамическое напряжение сдвига тампонажного раствора, Па.

3.3.3. Определение необходимого количества тампонажных скважин для формирования гидроизоляционного ограждения в водоносном пласте

Зная форму и геометрические размеры гидроизоляционного ограждения, характеризующиеся r_0 и r_1 , а также форму и геометрические размеры инъекционных потоков, которые характеризуются предельно возможными радиусами распространения тампонажного раствора и r_2 из скважины, определяется оптимальное число тампонажных скважин и рациональное их расположение для формирования гидроизоляционного ограждения разрабатывается графическим методом.

3.3.4. Выбор координат заложения на поверхности земли и профиля тампонажных скважин

Координаты заложения тампонажных скважин определяются на плане строительства шахтного ствола, совмещенного с технологическими схемами формирования гидроизоляционных ограждений во всех водоносных горизонтах, пересекаемых стволом.

Для совмещения строительных работ по сооружению гидроизоляционных ограждений закладываются наклонно направленные скважины с заложением на определенном расстоянии от шейки шахтного ствола. Профиль наклонно направленных скважин должен обеспечить подсечение водоносных горизонтов строго в соответствии с разработанными технологическими схемами формирования гидроизоляционных ограждений в каждом водоносном пласте. Профиль и схема расположения наклонно направленных тампонажных скважин разрабатываются на основе геологического разреза.

3.3.5. Расчет необходимого количества тампонажных материалов

Объем нагнетаемого тампонажного раствора через одну скважину для формирования инъекционного потока с предельно возможным контуром определяется из условия

$$V_k = \pi r_1 r_2 M m_T, \quad (20)$$

где V_k – объем тампонажного раствора для нагнетания в одну скважину, ;
 r_1 ; r_2 – радиусы распространения тампонажного раствора из скважины, м;
 M – мощность водоносного горизонта, м;
 m_T – скважность водоносного горизонта.

Объем тампонажного раствора для формирования гидроизоляционного ограждения шахтного ствола в одном водоносном горизонте

$$V_i = V_k \cdot n, \quad (21)$$

где V_i – объем тампонажного раствора для формирования ограждения в том пласте, м³;
 V_k – объем тампонажного раствора для нагнетания в одну скважину, м ;
 n – количество тампонажных скважин для формирования ограждения в готовом пласте.

При формировании ограждений в нескольких водоносных пластах рассчитывается суммарный объем тампонажного раствора

$$\sum V_{т.р.} = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (22)$$

Потребный объем базового глинистого раствора для приготовления необходимого объема глиноцементного тампонажного раствора ориентировочно принимается равным его суммарному объему, т.е. $\sum V_{г.р.} = \sum V_{т.р.}$. Тогда потребное количество глины для приготовления необходимого глинистого раствора с заданной плотностью определится по формуле:

$$Q_{г.} = \rho_2 \frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \sum V_{г.р.}, \quad (23)$$

где $Q_{г.}$ – вес глины, т;

ρ – заданная плотность глинистого раствора, Т/м³;

ρ_1 – плотность воды, $\rho_1 = 1$ Т/м³;

ρ_2 – плотность сухой глины, $\rho_2 = 2,3 - 2,6$ Т/м³;

$\sum V_{г.р.}$ – потребный объем глинистого раствора, м³;

Необходимое количество цемента при расходе 100 кг/м^3 глинистого раствора будет

$$Q_{\text{ц}} = \sum V_{\text{г.р.}} \cdot 100, \quad (24)$$

где $Q_{\text{ц}}$ – вес цемента, кг;

$\sum V_{\text{г.р.}}$ – потребный объем глинистого раствора, м^3 .

Потребное количество жидкого стекла при расходе 10 кг/м^3 определится из условия

$$Q_{\text{ж.с.}} = \sum V_{\text{г.р.}} \cdot 100, \quad (25)$$

где $Q_{\text{ж.с.}}$ – вес жидкого стекла, кг;

$\sum V_{\text{г.р.}}$ – потребный объем глинистого раствора, м^3 .

3.4. Технология и технические средства производства тампонажных работ

3.4.1. Техника и технология бурения тампонажных скважин

Технологическая схема производства тампонажных работ предусматривает бурение наклонно-направленных тампонажных скважин с поверхности земли. Глубина скважин определяется профилем скважины и глубиной залегания почвы водоносного пласта, в котором сооружается гидроизоляционное ограждение. Диаметр скважины принимается 76 или 93 мм. Устье скважины обязательно закрепляется кондуктором, который цементируется и оборудуется герметизирующим устройством для производства расходометрических работ и, при необходимости, нагнетания тампонажного раствора.

Бурение тампонажных скважин осуществляется техническими средствами для вращательного бурения без отбора керна. Выбор буровых установок, бурового инструмента и технологических параметров режима бурения необходимо производить в соответствии с методикой проектирования бурения геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые [1]. При этом необходимо выбрать технологические средства и технологию для корректировки профиля тампонажных скважин в процессе их бурения в случае их отклонения от проектного профиля.

3.4.2. Техника и технология приготовления тампонажного раствора

При использовании для сооружения гидроизоляционных ограждений глиноцементного тампонажного раствора целесообразно тампонажный раствор готовить путем введения цемента и структурообразователя в глинистый раствор с необходимыми заданными свойствами. Поэтому оборудование для приготовления тампонажного раствора целесообразно скомпановать в два независимых технологических комплекса: комплекс для приготовления глинистого раствора из комовой глины и технологический комплекс для приготовления и нагнетания под давлением тампонажного раствора. Необходимо выбрать технические средства и разработать технологические схемы для каждого комплекса. Технологический комплекс для приготовления глинистого раствора следует располагать на площадке с хорошими подъездными путями для доставки глины и с надежной системой водоснабжения. Производительность глинистого комплекса должна соответствовать суточному расходу тампонажного раствора.

При разработке технологии приготовления глинистого и глиноцементного тампонажного растворов согласно [2] необходимо:

- определить источник и дать характеристику исходного глинистого сырья;
- выбрать марку цемента и привести его характеристику;
- в качестве структурообразователя принять жидкое стекло и привести его характеристику;
- выбрать и обосновать параметры исходного глинистого раствора;
- выбрать и обосновать состав глиноцементного тампонажного раствора;
- привести физико-механические и реологические параметры выбранного тампонажного раствора.

3.4.3. Техника и технология тампонажа

При разработке общей технологической схемы тампонажа необходимо прежде всего выбрать способ приготовления тампонажного раствора непосредственно на площадке производства тампонажных работ. Возможны два вари-

анта: раздельное приготовление и нагнетание тампонажного раствора двумя независимыми технологическими комплексами и совмещенный процесс приготовления и нагнетания, реализуемый одним технологическим комплексом [2].

Технические средства для тампонажа выбираются в соответствии с принятой общей технологической схемой тампонажа. При этом необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- максимальное давление цементировочного агрегата или цементировочного насоса должно быть не меньше, чем принято при расчёте предельного контура инъекционного потока;
- расход тампонажного раствора при нагнетании в тампонажную скважину устанавливается из условия минимизации потерь напора и предупреждения гидро-разрыва;
- производительность комплекса для приготовления тампонажного раствора должна соответствовать производительности цементировочного агрегата или цементировочного насоса;
- система нагнетательных труб, состоящая из манифольдного комплекса и колонны бурильных труб, должна обеспечивать процесс тампонажа при максимальном давлении нагнетательного насоса.

Для контроля процесса тампонажа необходимо регистрировать следующие основные технологические параметры: плотность нагнетаемого тампонажного раствора, расход нагнетания и давление нагнетания. Эта задача успешно решается станцией контроля цементирования СКЦ-2М. Возможно также использование отдельных приборов типа манометров, расходомеров, плотнометров и др.

Нагнетание глиноцементных тампонажных растворов при тампонаже трещиноватых горных пород наиболее эффективно производить по зажимной технологической схеме нагнетания, которая позволяет осуществлять формирование инъекционных потоков при заданном высоком давлении в строго определенные водоносные горизонты. Изоляция тампонируемых горизонтов в скважинах осуществляется с помощью съёмных пакетирующих устройств или тампонажных

пробок. Верхние водоносные горизонты тампонируются по зажимной схеме с помощью герметизирующего устройства на устье скважины.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: в 2х томах. /Под общей ред. проф. Е.А. Козловского – М.: Недра, 1984 – 512 с. 489 с.
2. Справочник по сооружению шахтных стволов специальными способами /Под общей ред. проф. Н.Г. Трупака. – М.: Недра, 1980. – 390 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Физико-механические и реологические параметры глиноцементных тампонажных растворов

Состав тампонажного раствора	Удельная масса, γ г/см ³	Θ , мг/см ²		P_M , г/см ²			η , Па·с	τ_0 , Па
		1 мин	240 мин	1 мин	240 мин	12 суток		
Глинистый раствор ($\gamma = 1,18$ г/см ³) + цемент (100 кг/м ³) + жидкое стекло	1,23	4100	31000	4,7	116,0	1660	$24,10^{-3}$	88
Глинистый раствор ($\gamma = 1,20$ г/см ³) + цемент (100 кг/м ³) + жидкое стекло	1,25	4350	35000	5,7	132,0	2150	$42,10^{-3}$	140
Глинистый раствор ($\gamma = 1,23$ г/см ³) + цемент (100 кг/м ³) + жидкое стекло	1,28	4870	41000	8,4	262,0	2600	10^{-3}	192

Потери напора при движении тампонажного раствора в бурильных
трубах диаметром 50 мм

Расход раствора, л/с	Потери напора (кгс/см ² 100м труб) при движении тампонажного раствора: цемента (100 г/л), жидкого стекла (10 г/л), глинистого раствора плотностью гс/см ³		
	$\gamma = 1,18$	$\gamma = 1,20$	$\gamma = 1,23$
1,0	9,4	12,0	14,7
1,5	9,8	12,7	15,0
2,0	10,3	13,1	15,5
2,5	10,8	13,5	16,0
3,0	11,7	14,1	16,6
3,5	12,5	15,0	17,6
4,0	13,3	16,0	18,9
4,5	14,8	17,6	20,5
5,0	16,8	20,0	23,1
5,5	19,4	22,7	26,1
6,0	22,9	26,0	29,8
6,5	26,3	29,6	33,4
7,0	30,7	33,7	37,9
7,5	35,3	37,3	42,3
8,0	40,1	42,2	47,0

Задание по контрольной работе по дисциплине «Технология специальных тампонажных работ»

студенту группы ТТР_ _ _ _

1. Характеристика геологического разреза с указанием названия, мощности, физико-механических свойств, категории буримости и гидрогеологических условий залегания горных пород.
2. Основные параметры капитальной горной выработки для которой сооружаются гидроизоляционные ограждения
3. Условия залегания водоносных пластов, пересекаемых капитальной горной выработкой:
 - глубина залегания кровли-
 - глубина залегания почвы-
 - угол падения пласта-
4. Характеристика структуры трещиноватости водоносного пласта:
 - характеристика систем трещиноватости –
 - коэффициент трещинной анизотропии –
5. Гидродинамические и фильтрационные параметры водоносного пласта:
 - коэффициент проницаемости –
 - коэффициент фильтрации –
 - пластовое давление –
6. Обязательные графические приложения:
 - 1) схемы формирования гидроизоляционных ограждений капитальной горной выработки;
 - 2) схема расположения тампонажных скважин;
 - 3) общая технологическая схема производства тампонажных работ;
 - 4) технологические схемы нагнетания тампонажного раствора в трещиноватые водоносные горизонты.

Задание получил «_ _ _» _ _ _ студент

задание выдал «_ _ _» _ _ _ _руководитель

Методическое пособие по выполнению контрольной работы по дисциплине «Технология специальных тампонажных работ» для студентов специализации «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых».

Автор: Саламатов М.А., проф., к. т. н.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»

Г. А. Усов

Промывочные жидкости

Методические указания
к практическим занятиям
по дисциплине

«Очистные агенты и тампонажные смеси»
для студентов специальности
21.05.03 Технологии геологической разведки

очного и заочного обучения

Екатеринбург
2020

ВВЕДЕНИЕ

Практические занятия - важнейший элемент подготовки молодого специалиста - предусматривают выполнение студентами под руководством преподавателя самостоятельных заданий, включающих экспериментальные исследования по результатам непосредственного наблюдения изучаемых объектов и процессов.

Главной целью методических указаний является знакомство с теоретическими положениями изучаемой дисциплины, приобретение навыков экспериментальной деятельности, обеспечение глубокого понимания студентами изучаемых явлений, закономерностей и форм их проявления, формирование у будущих специалистов практических умений и навыков в области общинженерной деятельности и овладения специальностью.

В соответствии с требованиями УМС практические работы должны содержать следующие основные элементы:

- теоретическую часть работы, помогающую понять изучаемые процессы или явления, цели и задачи, стоящие перед студентами при выполнении работы;

- методическую часть, целью которой является изучение применяемых и исследуемых образцов и материалов, методик экспериментов, оборудования, приборов, используемых в практической работе;

- экспериментальную часть, в которой осуществляются процессы подготовки образцов (проб), технологические процессы их обработки, снятие характеристик процесса, определение параметров после завершения процесса;

- обсуждение результатов и составление выводов по работе, что позволяет установить, достигнута ли цель, в краткой форме сформулировать основные сведения об изучаемом материале, процессе, явлении.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед проведением практических работ студенты должны изучить правила безопасного ведения работ и противопожарной безопасности и после инструктирования их преподавателем расписаться в журнале инструктажа.

Практическая работа выполняется по теме, по которой начитан теоретический материал. Для успешного проведения работы студенты должны обладать минимальным запасом теоретических знаний. Контроль этих знаний проводится преподавателем в виде опроса (в устной или письменной форме), на основе новых информационных технологий (тестов).

Студенты, не получившие допуск, отстраняются от выполнения практической работы, а её выполнение проводится студентом после проверки его знаний индивидуально.

Допуск студентов на последующие практические работы производится после контроля знаний по этой работе, сдачи отчёта и защиты по предыдущей работе.

Подгруппа может разбиваться на бригады по 2-3 человека.

Отчёт должен оформляться по каждой практической работе титульным листом и содержать следующие основные разделы:

- цель и основные задачи;
- теоретическая часть;
- описание установок, приборов, инструмента, материалов, реагентов;
- методика выполнения работы;
- результаты наблюдений;
- анализ результатов исследований и выводы;
- список литературы.

Отчёт должен иллюстрироваться таблицами, графиками, рисунками.

Защита практической работы осуществляется каждым студентом отдельно на очередном занятии после представления отчёта.

Практическая работа 1.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГЛИНЫ И ВОДЫ.

Цель работы: Изучить методики определения качества глины, как структурообразователя бурового раствора.

Теоретическая часть

Структурированные промывочные жидкости представляют собой дисперсные системы, состоящие из дисперсионной среды и дисперсной фазы.

В качестве дисперсной среды чаще всего используют воду, а в качестве дисперсной фазы структурообразователи: глинистые минералы, полимеры, конденсированную твёрдую фазу. Наиболее доступным и дешёвым структурообразователем являются глинистые минералы: монтмориллонит, иллит, каолинит. Эти листовые силикаты, легко диспергируют вследствие их листовой структуры и гидрофильности в воде на тонкие частицы размером в микрон и менее.

Благодаря наличию нескомпенсированного поля межмолекулярных сил и функциональных (полярных) групп с отрицательный зарядом на поверхности частиц происходит адсорбция молекул воды (гидратация частиц) с образованием общей гидратной структуры промывочной жидкости. Прочности структуры (прочность адсорбированного слоя) глинистого раствор, а значит и качество глины определяется суммарно поверхностью частиц (дисперсностью глины) количеством и активностью (гидрофильностью) функциональных групп $\equiv SiO$
 $\equiv SiOH$.

Благодаря огромной суммарной поверхности глинистых частиц таких минералов, как монтмориллонит, почти вся вода бурового раствора становится адсорбированной (гидратированной). Дисперсная система превращается в гель.

Наиболее легко диспергирует в воде натриевый монтмориллонит, представляющий собой совокупность глинистых частиц, состоящих из пакетов двухлистных кремнекислородных тетраэдров, связанных гидроаргилитовым слоем $Al(OH)^{2+}$. Пакеты

между собой слабо связаны обменными ионами Na которые в воде легко диссоциируют, глинистые частицы расщепляются на более мелкие частицы.

Кальциевые монтмориллониты в связи с более прочными связями пакетов диспергируют значительно труднее, поэтому считаются менее качественными.

Ещё хуже диспергируют в воде (вследствие более прочных связей между пакетами) иллиты и каолиниты.

Существенное влияние на диспергирование глинистых частиц оказывают минеральные компоненты воды, в первую очередь ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} . При значительном содержании в воде они способствуют дегидратации (нейтрализации заряда, снижению гидрофильности) частиц и их сшиванию. Поэтому для приготовления глинистых растворов используют воду с общей жёсткостью не более 12-15° (1° жёсткости соответствует 10 мг СаО в 1 л воды). Жёсткость воды определяют титрованием воды с добавкой 2,5 мл аммиачного раствора раствором олеата калия.

$$H^\circ = 20 \Pi \cdot \delta, \quad (1.1)$$

где Π - количество раствора олеата калия, израсходованного на титрование, мл, δ - титр олеата калия (количество г в 1 мл).

Таким образом, наиболее качественными глинистыми структурообразователями являются монтмориллонитовые (бентонитовые) глины.

Оценку качества глины для приготовления раствора производят визуальным методом, методом смачивания (по Н. А. Максимовичу) и по выходу раствора (количеству м³ раствора, вязкостью 25 с).

$$Q_p \gg 630 / (\delta_p - 1000), \quad (1.2)$$

где δ_p - плотность глинистого раствора при условной вязкости 25 с.

Визуальный метод используют для оценки качества комовой глины. Глина считается пригодной, если при естественной влажности и воздушно сухом состоянии:

а) характеризуется большим сопротивлением излому; б) при изломе образует острые края; в) не поддаётся раздавливанию пальцами даже в мелких кусочках; г) даёт тёмную полированную поверхность при резании ножом; д) в эластичном (смоченном

водой) состоянии раскатывается в длинные шнуры, диаметром 1 мм и менее.

Метод смачивания используют для определения качества порошкообразной глины. С помощью этого метода примерно можно определить и минеральный состав глины.

За показатель качества глины принимают условную величину

$$K = t d, \quad (1.3)$$

где L - время впитывания 1 мл весьма гидрофильного (с высокоэлектроотрицательными атомами) раствора, например, 4 % раствора пиррофосфорнокислого натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), d – диаметр смоченной раствором глины, мм.

Благодаря высокой гидрофильности раствор интенсивно всасывается глинопорошком. Чем выше дисперсность и гидрофильность частиц глины, тем быстрее и на более значительное расстояние (большой объём) распространяется раствор. При $K > 300$ глина считается монтморилонитовой, при $K = 300 - 100$ - иллитно-каолинитовой, при $K = 100 - 50$ - каолинитоиллитовой, при $K < 50$ - каолинитовой.

Методическая часть

Для определения качества комовой глины необходимо иметь: исследуемую глину в воздушно сухом состоянии, линейку, перочинный нож.

Для определения качества порошкообразной глины: сито с отверстиями 0,5 мм, фарфоровую чашку с пестиком, 4% раствор пиррофосфорнокислого натрия, пипетку, секундомер.

Для определения качества воды: аммиачный раствор, раствор олеата калия, мензурку 250мл.

Экспериментальная часть

Подгруппа разбивается на четыре бригады. Одна бригада исследует качество комовой глины. Для этого глину подвергают излому, раздавливанию, режут ножом, в пластичном состоянии раскатывают в шнуры. Затем после размельчения глины в фарфоровой чашке определяют показатель K подобно рассмотренному ниже

$$K = t d ,$$

Результаты испытаний заносят в табл.1.

Вторая бригада исследует качество глинопорошка. Для этого порошок просеивают через сито; 40-50 г просеянного глинопорошка высыпают в фарфоровую чашку, уплотняют пестиком и выравнивают его поверхность.

С помощью пипетки в центр чашки вводят по каплям (по мере впитывания) 1 мл 4 % раствора пирофосфата натрия и засекают время впитывания по секундомеру.

Расстояние нижнего конца пипетки от поверхности глинопорошка должно быть не более 2 см, каждая капля должна направлена в одну точку.

После впитывания последней капли раствора секундомер выключают и линейкой определяют диаметр смоченной поверхности. При неравномерном распространении раствора определяют диаметр в различных направлениях и рассчитывают среднее значение d .

По полученным результатам вычисляют показатель K :

$$K = t d .$$

Одновременно с этим оценивают характер смоченной поверхности: набухание, усадку, толщину увлажнённого слоя.

По показателю K определяют минеральный состав глины. Глины с показателем $K = 100$, а также при явно выраженной усадке смоченной поверхности для приготовления бурового раствора не пригодны.

Полученные результаты необходимо занести в табл.1.

Таблица 1

Визуальный метод				Метод смачивания			
Сопротив. излому	Сопротив. раздавлив.	Характер поверх. разреза	Диаметр и длина шнура	t , мин	d , мм	$K =$	Характер смоченной поверхности

Третья бригада определяет качество воды (её жёсткость).

Для этого: в мензурку ёмкостью 250 мл заливают 50 мл исследуемой воды; добавляют 2,5 мл аммиачного раствора; проводят медленное титрование раствором олеата калия (титр которого известен) до образования стойкой (мелкопузырчатой) пены, сохраняющейся 4-5 мин.

При титровании после очередного прибавления раствора обязательно нужно встряхивать содержимое мензурки.

После образования стойкой пены вычисляют жёсткость воды

$$H^{\circ} = 20 \text{ П } \delta$$

Результаты испытаний занести в табл.2.

Таблица 2

Проба воды	П, мл	δ , град	H° , град	Примечание

Четвёртая бригада определяет качество глины по выходу раствора. Для этого необходимо приготовить 0,5 л глинистого раствора с условной вязкостью 25 с, измерить его плотность и по формуле (2) определить выход раствора

$$Q_p = 630 / (\delta_p - 1000).$$

Анализ результатов исследований. Выводы

На основании заполненных таблиц необходимо определить минеральный состав, сделать выводы о качестве глины и её пригодности для приготовления глинистых растворов, то же Сделать и по отношению к воде.

Практическая работа 2.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОФИЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БУРОВЫХ (ГЛИНИСТЫХ) РАСТВОРОВ

Цель лабораторной работы - экспериментально раскрыть теоретические положения о природе структурирования глинистых растворов, получить навыки экспериментальной деятельности, обеспечить глубокое понимание явлений структурирования глинистых растворов.

Структурированные промывочные жидкости при бурении скважин применяют с целью кольтматации пор и трещин горных пород, закрепления стенок скважин, представленных рыхлыми и неустойчивыми горными породами, создания противодействия на стенки скважин неустойчивых пород. Структурированные жидкости обладают малой водоотдачей, что предотвращает набухание глинистых пород и их обвалы; обладают высокой несущей способностью, что позволяет выносить с забоя тяжёлый шлам.

Теоретическая часть

"Структура - это совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающая его целостность, т.е. сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях".

В коллоидной химии понятию структура придаётся более широкий смысл. По классификации П. А. Ребиндера для дисперсных систем выделяют два типа структур: кристаллизационный (конденсационный) и коагуляционный (тиксотропный). Если первый тип структур соответствует вышеописанному определению, т. е. представляет собой совокупность устойчивых связей твёрдых частиц с образованием жёсткого каркаса, то второй тип структур представляет собой совокупность неустойчивых связей твёрдых частиц, обеспечивающих устойчивые связи только в состоянии покоя. При течении эти временные структуры (пространственные каркасы) разрушаются.

Таким образом, под структурой дисперсных систем понимают совокупность межмолекулярных связей частиц твёрдой фазы.

Коагуляция частиц (межмолекулярное взаимодействие) возможна лишь на незначительных расстояниях между частицами, измеряемых чаще всего десятками нанометров (т. е. в весьма концентрированных твёрдых дисперсных системах или растворах с гидрофобной твёрдой фазой).

В промывочных жидкостях расстояния между частицами значительно превышают названную величину. В этих системах с гидрофильной твёрдой фазой прочность структуры осуществляется за счёт гидратных слоёв. В зависимости от гидрофильности твёрдой фазы и характера структуры (за счёт коагуляции частиц или за счёт гидратных, адсорбционных слоёв) структуры буровых растворов можно разделить на гидрофобные и гидрофильные. Задачей лабораторной работы является изучение гидрофильной структуры. В качестве структурированных промывочных жидкостей в практике бурения чаще всего применяют глинистые растворы.

Прочность структуры глинистых растворов зависит от количества глинистых частиц в единице объёма (концентрации и дисперсности глины) и их активности (гидрофильности).

Глина - это совокупность глинистых частиц различных фракций и различных минералов (силикатов), чаще всего листовых. Поверхность частиц силикатов представлена кремнекислородными группами (силанольными анионами) $\equiv\text{SiO}^-$. Кислород, как известно, обладает весьма высокой электроотрицательностью, поэтому поверхность частиц оказывается полярной с отрицательным зарядом и способна взаимодействовать с различными катионами, наиболее активно (по исследованиям академика Гедройца) с ионами водорода, который способен вытеснить даже трёхвалентные катионы. В результате нейтрализации полярной группы водородом $\equiv\text{SiOH}^+$ заряд частиц, а следовательно, её активность понижаются.

Под воздействием заряда частиц вокруг *них* образуется плотный гидратный слой четко соориентированных и прочно связанных молекул-диполей воды. Гидратный слой обладает высокой прочностью, в результате чего и промывочная жидкость становится более вязкой с прочной структурой. Прочность

гидратного слоя (прочность межмолекулярных связей воды) зависит от его толщины

$$f = \frac{c}{r^7} \quad (2.1)$$

где r - толщина слоя.

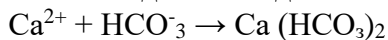
Чем больше глинистых частиц и меньше расстояния между ними (тоньше гидратный слой), тем прочнее структура промывочной жидкости.

Качество глины определяется как её способностью диспергировать в воде, так и количеством функциональных групп ($\equiv\text{SiO}^-$; $\equiv\text{SiOH}^-$) и их активностью. Наиболее интенсивно диспергируют в воде натриевые монтмориллониты, пакеты которых связаны слабыми одновалентными катионами Na^+ , легко диссоциирующими в воде. Труднее диспергируют кальциевые монтмориллониты.

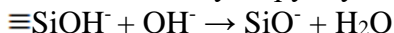
С целью удаления или замены натрием обменных катионов Ca^{2+} , сшивающих пакеты глинистых частиц в глинистый раствор добавляют щелочные электролиты, способные взаимодействовать с катионами Ca^{2+} и образовывать нерастворимые соли. Наряду с удалением ионов Ca^{2+} щёлочи способны удалять водородный экран и переводить малоактивные функциональные группы $\equiv\text{SiOH}^-$ более активные $\equiv\text{SiO}^- \text{Na}^+$.

Пример: В воде кальцинированная сода диссоциирует на ионы

$\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{OH}^- + \text{Na}^+ \text{HCO}_3^-$ взаимодействует с обменными катионами и выпадает в осадок



Оксигруппа OH^- взаимодействует с водородом функциональной группы и образует воду, а функциональная группа OH переходит в более активную группу $\equiv\text{SiO}^-$



Вследствие этого при обработке глинистого раствора щёлочью стабильность (агрегативная и седиментационная устойчивость) раствора повышается.

Однако с увеличением щёлочи увеличивается не только концентрация оксигруппы OH^- , но и концентрация катионов (в

частности Na^+), которые при избытке щёлочи способствуют нейтрализации (снижению) гидрофильности глинистых частиц. Поэтому щёлочность глинистого раствора должна контролироваться специальными приборами.

Кроме качества глины, на прочность структуры оказывает влияние её концентрация. Суммарная энергия взаимодействия молекул воды с поверхностью глинистой частицы определяется суммой энергий ориентационного и электростатического взаимодействий.

$$U = \frac{m e \mu}{2} + \frac{2 n \mu^4}{3 r^6 R T}, \quad (2.2)$$

где e – заряд иона частицы, μ – дипольный момент частиц, m – число взаимодействующих ионов.

Для разбавленных растворов (при расстояниях, превышающих действие межмолекулярных сил) между частицами и молекулами воды действуют только электростатические силы

$$f = \frac{m e \mu}{r^3} = \frac{m e \mu C}{V_{\text{ср}}}, \quad (2.3)$$

где

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{n}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\phi} V}{V_{\text{ср}}}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{ср}}}{C}}$$

Здесь V – объём раствора, n – число глинистых частиц, $V_{\text{ср}}$ – объём одной усреднённой частицы, V_{ϕ} – объём всех частиц, C – концентрация глины в растворе.

Из формулы (2.3) следует, что для разбавленных растворов прочность структуры прямо пропорциональна концентрации глины и обратно пропорциональна объёму частиц.

В концентрированных растворах (при расстояниях действия межмолекулярного взаимодействия r)

$$f = \frac{2 n \mu^4}{r^7} = 2 n \mu^4 \left(\frac{C}{V_{\text{ср}}}\right)^{7/3}, \quad (2.4)$$

Методическая часть

Основными показателями гидрофильной структуры глинистых растворов являются величина статистического напряжения сдвига (прочность структуры), водоотдача и стабильность.

Статистическое напряжение сдвига определяют по прибору СНС-2, представляющему из себя два соосных цилиндра (стакана, устанавливаемого на вращающемся столике и боба с рифлённой боковой поверхностью, подвешенного внутри стакана на упругой нити к кронштейну). Стакан через редуктор с частотой вращения 0,2 об/мин приводится в движение от электродвигателя.

Водоотдачу бурового раствора определяют по прибору ВМ-6, имеющему фильтрационный и напорный узлы. Фильтрационный узел состоит из фильтрационного стакана и основания, между которыми устанавливают фильтр. В основании просверлен канал, перекрываемый пробкой.

Напорный узел состоит из напорного цилиндра с тарелкой и клапаном для слива масла и плунжера - груза со шкалой.

Стабильность раствора определяют по суточному отстою в мензурке (в % осветлённой части раствора) и разности плотностей раствора в нижней и верхней частях цилиндра ЦС-I после отстоя его в течение суток

$$C = \rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}$$

Порядок измерения статистического напряжения сдвига: 1) с помощью регулировочных винтов добиваются соосности подвешенного на кронштейне цилиндра и стакана; 2) подвесную головку нити приподнимают и поворачивают до полного совмещения нуля риски с риской указателя (закрепленного на кронштейне); 3) заполняют стакан раствором (при этом не следует смачивать верхний торец цилиндра); 4) путём поворота цилиндра в стакане перемешивают раствор и оставляют его в покое на 1 мин; 5) через минуту включают двигатель и после полной остановки поворота лимба берут отсчёт угла поворота; 6) таким образом, (после перемешивания раствора и минутной выдержки) берут три замера и определяют среднее значение угла поворота $\varphi_{\text{ср}}$; 7) вычисляют СНС по формуле $\theta = K\varphi_1$; 8) аналогичным способом измеряют СНС через 10 мин покоя $10 = K\varphi_{10}$. Коэффициент упругости нити $K = 1,26$.

Порядок измерения водоотдачи: 1) насухо протереть все детали прибора; 2) смочить два листа фильтровальной бумаги и отжать влагу между листами; 3) уложить фильтром (а сверху них резиновую прокладку) в гнездо основания; 4) закрепить стекай в

основании; 5) установить пробку; 6) заполнить стакан раствором; 7) закрепить напорный цилиндр на стакане; 8) закрыть клапан напорного цилиндра; 9) заполнить цилиндр маслом; 10) вставить плунжер; 11) с помощью клапана спустить масло в тарелку до совпадения нуля шкалы с риской на верхней части цилиндра, после чего клапан закрыть; 12) извлечь пробку в основании прибора; 13) включить секундомер, через 30 мин взять отсчёт по шкале прибора; 14) с помощью клапана слить масло в тарелку; 15) снять плунжер; 16) отсоединить напорный цилиндр от стакана и слить масло из тарелки в ведро; 17) вылить масло и раствор из стакана, ополоснуть стакан; 18) нельзя ополаскивать детали напорного узла.

Щелочность бурового раствора определяют по лакмусовой бумаге или с помощью специального прибора рН-метра, основанного на способности одного из его электродов в зависимости от концентрации водородных ионов изменять потенциал. Потенциал другого электрода (электрода сравнения) остаётся постоянным.

В результате изменения потенциала измерительного электрода создаётся меняющаяся с изменением рН разность потенциалов, которая с помощью электронного усилителя усиливается и фиксируется прибором со шкалой, протарированной в единицах рН.

В качестве измерительного электрода используют стеклянную трубочку с толщиной стенки 0,01 мм, заполненную 0,1N раствором HCl, в которую помещён вспомогательный хлорсеребряный электрод. Стеклянный электрод имеет отрицательный заряд. С увеличением концентрации катионов водорода заряд постепенно нейтрализуется, потенциал электрода понижается.

В качестве электрода сравнения используют каломельный электрод, состоящий из металлической ртути, покрытой каломелью Hg_2Cl_2 , и погруженный в насыщенный раствор KCl.

Экспериментальная часть

Для проведения лабораторной работы заранее приготавливают пасту из бентонитового глинопорошка на пресной воде при соотношении бентонита и воды 1:1 по массе.

Из приготовленной пасты студенты на миксере готовят 15 % глинистый раствор на водопроводной воде.

Подгруппа разбивается на 3-6 бригад. Каждой бригаде выдаётся задание:

1-й бригаде - измерить статическое напряжение СНС «водоотдачу В и рН необработанного раствора;

2-й бригаде – 15 % раствор обработать кальцинированной содой из расчёта 2 % соды от содержания глины, раствор перемешать (в течение 5 мин) и после этого измерить СНС, В и рН;

3-й бригаде - разбавить 15 % глинистый, обработанный щёлочью раствор до 10 % и после перемешивания измерить СНС, В и рН;

4-й бригаде - разбавить 15 % глинистый, обработанный щёлочью раствор, до 5 % и после перемешивания измерить СНС, В и рН;

5-й бригаде разбавить 15% глинистый обработанный раствор до 2% и после перемешивания измерить СНС, В и рН.

Полученные бригадами замеры занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№	Необраб. 15 % глинистый раствор	15 % обраб. щелочью глинистый раствор	10 % обраб. щелочью глинистый раствор	5 % обраб. щелочью глинистый раствор	2 % обраб. щелочью глинистый раствор	Примечание
ПаН						

По экспериментальным данным необходимо построить графики зависимости статического напряжения сдвигу (прочности структуры) от концентрации глины $\theta = \varphi(C)$, $V = \varphi(C)$, $pH = \varphi(C)$.

Обсуждение результатов. Выводы

На основании таблицы и графиков необходимо сделать выводы о целесообразности обработки глины кальцинированной содой, о влиянии концентрации глины в растворе на статическое напряжение сдвига, водоотдачу, а также выводы о соответствии экспериментальных результатов теоретическим.

Практическая работа 3.

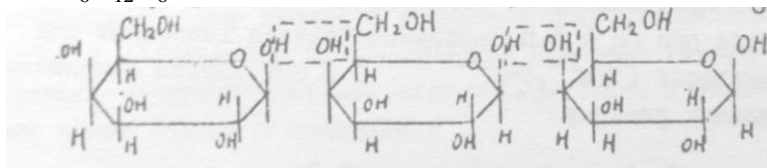
ИЗУЧЕНИЙ ГИДРОФИЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БУРОВЫХ (ПОЛИМЕРНЫХ) РАСТВОРОВ.

Цель работы: экспериментально доказать теоретические положения о природе структурирования полимерных растворов, получить навыки экспериментальной деятельности, обосновать глубокое понимание явление структурирования полимерных растворов.

Теоретическая часть

Полимерами называют соединения, молекулы которых состоят из большого числа атомных групп (звеньев), соединённых химическими связями в длинные цепи и сетки. Полимеры обладают гибкостью цепи, т.е. способностью звеньев под воздействием силового электрического поля какого-либо тела или соседних цепей вращаться относительно друг друга. Все полимеры, в зависимости от состава, подразделяют на органические и неорганические, органические - на природные и синтетические. К неорганическим полимерам можно отнести листовые силикаты. Наиболее широкое применение для приготовления промысловых жидкостей из органических природных полимеров получили производные целлюлозы, а из синтетических производные полиакриловой кислоты.

Целлюлоза (клетчатка) $C_6H_7O_2(OH)_3$ - природный полисахарид, образованный в результате поликонденсации Д - глюкозы $C_6H_{12}O_6$



Это главная составная часть клеточных стенок растений, обуславливающая их прочность. Получают целлюлозу путём растворения древесины и выделения из неё лигнина при сульфидной, сульфатной или щелочной варке. В промышленности целлюлоза используется для получения химических волокон (вискозного, ацетатного), пластмасс, целлофана, бумаги, пороха, лаков и др.

В чистом виде целлюлоза в воде не растворяется вследствие наличия в макромолекуле большого количества оксигрупп, способных с атомами водорода соседних макромолекул образовывать прочные водородные связи. Для возможности растворения целлюлозы в воде часть оксигрупп замещают гидрофобными группами (что позволяет снизить прочность их молекулярных водородных связей) или более гидрофильными (полярными) функциональными группами.

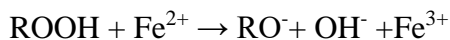
*поликонденсация - процесс образования макромолекул с выделением воды.

По первому варианту путём замещения части оксигрупп OH^- гидрофобной метиловой группой $^-\text{OCH}_3$ получают метилцеллюлозу (ММЦ) $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_3)_x$ оксиэтильной группой – оксиэтилцеллюлозу и т. д.

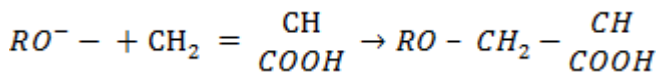
По второму варианту путём замещения части оксигрупп OH^- гидрофильной карбоксиметильной группой $^-\text{OCH}_2\text{COONa}$ получают карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_2\text{COONa})_x]_n$, сернокислой группой $^-\text{OSO}_3\text{Na}$ -сернокислый эфир целлюлозы (СЭЦ) $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OSO}_3\text{Na})_x]_n$ и т. д.

Путём комбинаций первого и второго вариантов получают метилкар-боксиметилцеллюлозу (МКМЦ) $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x-y}(\text{OCH}_3)_x(\text{OCH}_2\text{COONa})_y]_n$ и т.д. Группа $^-\text{COONa}$ КМЦ так же, как и соли Na_2CO_3 активно взаимодействует с двухвалентными металлами Ca^{2+} , Mg^{2+} с образованием нерастворимой КМЦ (соли), поэтому в агрессивных средах при наличии катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} КМЦ не применяется. Более устойчивы в этих средах ММЦ, СЭЦ, ОЭЦ, МКМЦ.

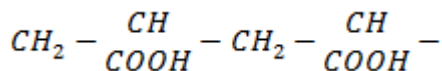
Полиакриловая кислота $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{COOH})]_n$. - синтетический карбоцепной полимер, который получают путём радикальной полимеризацией акриловой кислоты в воде при $\text{pH} \leq 6,5$. Свободный радикал возникает под воздействием инициаторов (Fe^{2+} , CR^{2+}) в результате окислительно-восстановительных реакций



Этот радикал реагирует с двойной связью молекулы мономера и образует более сложный радикал

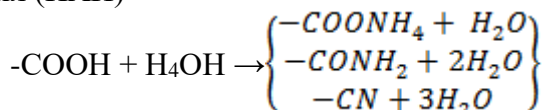


способный взаимодействовать со следующей молекулой мономера и т.д.



Как и все кислоты, полиакриловая кислота ухудшает качество промывочных жидкостей (в первую очередь структурно-механические свойства), повышает водоотдачу, поэтому для обработки буровых растворов полиакриловая кислота не применяется.

В качестве структурообразователей используют соли полиакриловой кислоты, которые получают путём этерификации (нейтрализации) полиакриловой кислоты спиртом. Так, при этерификации полиакриловой кислоты нашатырным спиртом получают полиакриламмонит, полиакриламид (ПАА), полиакрилонитрил (ПАН)



Хорошими структурообразователями являются и сополимеры: метас, М-14, лакрис 20. Метас - термостойкий сополимер метакриловой кислоты и метакриламида, М-14 - термостойкий сополимер метакриловой кислоты и метилметакрилата, лакрис - модификация сополимера М-14.

Качество полимера, как структурообразователя, определяется длиной макромолекулы (степенью полимеризации - количеством звеньев мономеров в цепи), количеством функциональных групп и их гидрофильностью (полярностью).

Полярность функциональной группы обусловлена величиной электроотрицательности её атомов. Под воздействием электроотрицательности электронное облако атомов группы с меньшей электроотрицательностью смещается в сторону атомов с большей электроотрицательностью, что и приводит к поляризации группы. Энергия полярной группы определяется разностью электроотрицательностей отрицательно и положительно заряженных ионов группы в квадрате

$$E = \frac{(n\Theta_1 - \Theta_2)^2}{2},$$

где Θ_1 - электроотрицательность отрицательно заряженного, а Θ_2 - положительно заряженного атома, n - число отрицательно заряженных атомов в группе.

Функциональные группы с малой разностью электроотрицательностей атомов являются гидрофобными.

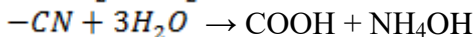
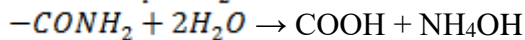
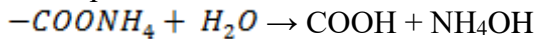
Наиболее высокой электроотрицательностью обладают анионы фтора ($\Theta_1 = 4$), кислорода ($\Theta_1 = 3,5$), азота ($\Theta_1 = 3,07$), хлора ($\Theta_1 = 3$). Наиболее низкой электроотрицательностью - одновалентные катионы калия ($\Theta_2 = 0,91$) и натрия ($\Theta_2 = 0,93$). Следовательно, полимеры, имеющие в функциональных группах кислород и азот, весьма гидрофильны.

Причём, чем больше их атомов в группе, тем более гидрофилен полимер. Поэтому для приготовления промывочных жидкостей чаще всего применяет полимеры с кислородо- и азотосодержащими функциональными группами.

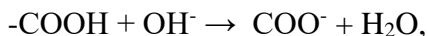
Повысить гидрофильность функциональной группы можно путём устранения экрана катионов или их замены на менее электроотрицательные катионы.

С этой целью прибегают к гидролизу (разложению воды) полимера с образованием кислоты и спирта - процессу этерификации.

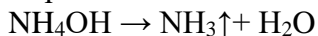
Так, при гидролизе производных полиакриловой кислоты (в щелочной среде) получают полиакриловую кислоту, которая в щелочной среде теряет водород и превращается в весьма гидрофильный полимер



В щелочной среде карбоксильная группа переходит в более активную группу



а гидроксид аммония разлагается на аммиак и воду



Так, в результате гидролиза ПАА получают более активный полимер ГПАА и его разновидности РС-1, РС-2, РС-4. В результате гидролиза полиакрилонитрила - ГиПАН и его разновидности: К-4, К-9, "нитрон"



Методическая часть

Основными показателями прочности структуры полимерных растворов, так же, как и для глинистых растворов, являются статическое напряжение сдвигу, водоотдача и рН. Приборы для определения этих показателей рассмотрены в предыдущей работе.

Экспериментальная часть

Подгруппа разбивается на 3-5 бригад. Каждой бригаде выдаётся индивидуальное задание.

1-й бригаде - приготовить миксером 0,5; 1,0; 1,5% растворы КМЦ, определить СНС, водоотдачу и рН растворов.

Результаты занести в табл.1.

Таблица 3.1

	1-я бригада			2-я бригада			3-я бригада			4-я бригада			5-я бригада		
	КМЦ %			ПАА %			ОЭЦ %			Метас %			Гипан %		
	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2
θ , Па V, см ³ /30мин рН															

2-й бригаде - приготовить 0,5; 1,0;2% растворы ПАА, определить показатели СНС, водоотдачу и рН, результаты занести в табл.1.

3-й бригаде - приготовить 1,0;2,0;3% растворы метаса, определить СНС, водоотдачу и рН, результаты занести в табл. 3.1.

4-й бригаде - приготовить 0,5;1,0;2% растворы метаса, определить СНС, водоотдачу и рН, результаты занести в табл. 3.1.

5-й бригаде - приготовить 0,5;1,0;2% растворы гипана, определить СНС, водоотдачу и рН растворов, результаты занести в табл. 3.1.

По экспериментальным данным необходимо построить графики зависимости СНС, водоотдачи и рН от концентрации полимера

Обсуждение результатов. Выводы

На основании таблицы и графиков необходимо сделать выводы о влиянии концентрации полимеров на показатели θ , В, рН, о соответствии зависимостей с теоретическими положениями, о возможности использования полимерных растворов в качестве промывочных жидкостей при следующих условиях СНС = 0,5 ±1 Па, В = 5-10 см³/30 мин.

Практическая работа 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Цель работы: экспериментально определить зависимость вязкости буровых растворов от концентрации твёрдой фазы, скорости течения плотности и сечения потока.

Теоретическая часть

Вязкость (внутреннее трение) - свойство жидкостей оказывать сопротивление при её течении.

Вязкость - один из важнейших показателей промывочных жидкостей - существенно влияет на эффективность бурения горных пород. Вязкие структурированные растворы способствуют кольматации пор и трещин в горной породе, закреплению стенок скважин в рыхлых и неустойчивых горных породах; вязкие растворы имеют малую водоотдачу, а, следовательно, предотвращают насыщение пористой глинистой породы водой, её набухание и обвалы стенок скважин. Вязкие растворы обладают высокой несущей способностью и применяются при бурении горных породообразующих шлам высокой плотности.

Природа вязкости промывочных жидкостей та же, что и прочность структуры - межмолекулярное взаимодействие молекул воды и частиц твердой фазы. Поэтому зависимости

вязкости от концентрации твёрдой фазы, температуры и размеров сосудов (диаметра труб, зазора между трубами и стенками скважин, в котором находится или протекает жидкость) те же, что зависимости прочности структуры от этих величин. Однако вязкость не всегда соответствует статическому напряжению сдвига. Так, например, в малоглинистых, активированных растворах, растворах с гидрофильной структурой вязкость значительно ниже, чем СНС, так как при движении жидкости вследствие дезориентации молекул взаимодействие между ними снижается, а в растворах с гидрофобной структурой вязкость значительно выше, чем СНС, так как при течении воды вследствие дезориентации молекул толщина гидратных оболочек уменьшается, а сила межмолекулярного взаимодействия частиц возрастает.

При обработке малоглинистых растворов гибкими полимерами (например, метасом) при повышении концентрации полимера в небольших объёмах СНС понижается (за счёт повышения толщины гидратного слоя), а вязкость повышается. Дело в том, что полярные (функциональные) группы полимера (по закону полярностей Ребиндера) поворачиваются в сторону фазы с большей полярностью. При течении раствора молекулы воды дезориентируются (движутся более хаотично) полярность воды понижается и полярные группы поворачиваются в сторону более полярной поверхности глинистых частиц, а гидрофобной в сторону воды. В результате частицы становятся более гидрофобными и, как следствие, вязкость раствора сначала возрастает (до некоторого предела концентрации полимера, а затем при образовании второго слоя полимера понижается.

За единицу вязкости принимают касательные усилия при течении жидкости, приходящиеся на единицу площади (касательные напряжения, Па) при разности скоростей между слоями равно $dv = \text{м/с}$ и расстояние между ними $dr = 1 \text{ м}$.

Для ньютоновских жидкостей

$$\tau = \eta \frac{dv}{dr} = |\eta|, \quad (4.1)$$

где η - коэффициент вязкости.

Для бингамовских (вязкопластичных) жидкостей (глинистых растворов)

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr} \quad (4.2)$$

где τ_0 - динамическое напряжение сдвига, η - коэффициент пластической вязкости.

Коэффициент пластической вязкости при использовании вискозиметра ВСН-3 определяют из соотношения

$$\eta = (\varphi_{600} - \varphi_{300}), \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (4.3)$$

а динамическое напряжение сдвига

$$\tau_0 = 0,3(2\varphi_{300} - \varphi_{600}), \text{ Па} \quad (4.4)$$

где φ - угол поворота лимба, град, вискозиметра ВСН-3.

Вязкость структурированных жидкостей можно определить и по формуле

$$\tau = \eta_{\text{эф}} \frac{dv}{dr}, \text{ Па}, \quad (4.5)$$

где

$$\eta_{\text{эф}} = \eta + \tau_0 / \frac{dv}{dr}, \quad (4.6)$$

Вязкость (касательные напряжения сдвига) псевдопластичных жидкостей (активированных малоглинистых, полимерных, полимерглинистых растворов) при $\eta = 600$ об/мин определяют по степенному закону

$$\tau_{600} = \eta_c \frac{v^n}{r}, \quad (4.7)$$

С другой стороны касательные напряжения можно выразить через коэффициент трения и радиальное давление жидкости

$$\tau_{600} = fP \quad (4.8)$$

В соответствии с законом Бернулли у стенок внутреннего цилиндра (боба) вискозиметра ВСН-3, где $V = 0$

$$P_0 = \text{const} - \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \quad (4.9)$$

у стенок вращающегося внешнего цилиндра $v = v_{\text{ц}}$

$$P_{\text{ц}} = \text{const} - \frac{\rho v_{\text{ц}}^2}{2} \quad (4.10)$$

тогда радиальное давление

$$P = P_0 - P_{II} = \frac{\rho v_{II}^2}{2} \quad (4.11)$$

При $V_0 = V_{II}$ $P = 0$

Из уравнений (4.7), (4.8) и (4.11)

$$f = \frac{\eta_c \left(\frac{v}{r}\right)^n}{\rho \Delta v^2} = \frac{\eta_c}{\rho \Delta v^{2-n} r^n} = \frac{\eta_0 C^{7/8}}{\rho \Delta v^{2-n} r^n}, \quad (4.12)$$

где η_0 - показатель вязкости.

Таким образом касательные напряжения сдвига определяются двумя показателями коэффициентом трения f , (межмолекулярного взаимодействия молекул воды и частиц твёрдой фазы), зависящим от концентрации твёрдой фазы, скорости течения и размеров труб с одной стороны и радиального давления $P = \rho v^2 / 2$ с другой стороны.

При повышении скорости течения коэффициент трения понижается и тем интенсивнее, чем меньше показатель степени (чем ниже гидрофильность глинистых частиц, выше глиноёмкость раствора). При некоторой значительной концентрации, когда молекулярные связи между частицами окажутся выше, чем с поверхностью частиц, скорость течения по всему сечению потока окажется одинаковой $V = V_{II}$ радиальное давление снизится до нуля, следовательно, взаимодействие молекул воды со стенками трубы возрастает, и раствор будет перемещаться в трубе как твердое тело. Энергия затрачивается только на трение раствора о трубу $\tau = f r P_0$, и касательные напряжения не будут зависеть от скорости течения ($n=0$, $\tau = \tau_0 = const$).

Методическая часть

Таким образом, основными показателями вязкости бурового раствора являются: для бингамовских (глинистых) растворов - динамическое напряжение сдвигу τ_0 и пластическая вязкость, для псевдопластичных (полимерных) растворов - эффективная вязкость.

Все эти показатели определяют по прибору - вискозиметру ВСН-3.

В полевых условиях пользуются условной величиной вязкости, определяемой по времени истечения 500 см^3 раствора из воронки через трубку с внутренним диаметром 5 мм.

Вискозиметр ВСН-3 состоит из станины, внутри которой в нижней части установлен двигатель для привода (через редуктор) гильзы для измерения вязкости раствора, а в верхней части - двигатель для вращения этой же гильзы при определении СНС (с частотой 0,2 об/мин). Внутри гильзы на стержне, установленном в станине на подшипниках, подвешивается подпружинный цилиндр с рифлёной поверхностью (боб). В процессе измерения гильза вводится в стакан с исследуемым буровым раствором при подъёме телескопического столика. На стержне боба закреплён лимб с делениями (в градусах). Редуктор нижнего двигателя с помощью переключателя позволяет менять частоту вращения гильзы (200,300,400,600 об/мин).

П о р я д о к и з м е р е н и я в я з к о с т и .

1. Заполнить стакан исследуемым раствором до риски, установить его на подъёмном столике, поднять столик до упора и зафиксировать его поворотом по часовой стрелке. 2. Установить переключатель в положение 600 об/мин и включить двигатель. 3. Выждать 2-3 мин (до полной остановки лимба), взять отсчёт по лимбу f_{600} и отключить двигатель. 4. Переключатель установить в положение $n=300$ об/мин и включить двигатель. 5. После полной остановки лимба взять отсчёт f_{300} .

По полученным значениям в соответствии с формулами (4.3-4.6) определяем пластическую вязкость, динамическое напряжение сдвига, эффективную вязкость и вязкость раствора при 600 об/мин. Вязкость раствора при других числах оборотов гильзы можно определить по формуле

$$T = K \cdot \varphi_n \quad (4.13)$$

коэффициент K приводится в паспорте вискозиметра.

Статическое напряжение сдвига определяют при 0,2 об/мин после перемешивания раствора при $n = 600$ об/мин и выдержки после перемешивания в течение 1 мин и 10 мин.

Показания шкалы снимают в момент максимальных знамений перед разрушением структуры

$$\theta = K \cdot \varphi_n \quad (4.14)$$

Экспериментальная часть:

Из приготовленной заранее пасты черногорского глинопорошка миксером приготавливают 2 л 20 % глинистого раствора, обработанного (2 % от веса с чистой глины) кальцинированной содой.

Группа студентов разбивается на 3-6 бригад. Каждой бригаде выдаётся индивидуальное задание.

1-й бригаде: определить зависимость вязкости глинистого раствора от концентрации глины. Для этого отлить из общей ёмкости 0,3 л. раствора и разлить его в пять частей: 120, 90, 60, 30 мл, разбавить водой четыре последних до 120 мл, получив таким образом по 120 мл: 20, 15, 10, 5 и 2%-х глинистых растворов.*

Для каждого раствора определить по формуле (4.6) значение τ_{600} и формуле (4.14) значения θ .

Полученные значения занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Показатели τ_{600} и θ глинистого раствора при концентрации глины								
20%		15%		10%		5%		2%
	600		600		600		600	

По полученным данным построить график зависимости $\tau_{600} = \varphi(C)$, $\theta = \varphi(C)$.

2-й бригаде: определить зависимость вязкости глинистого раствора от скорости вращения цилиндра вискозиметра. Для этого из общей ёмкости отлить 150 мл 20 %-го глинистого раствора, определить по формулам (4.13) и (4.14) значения τ и θ при различной скорости вращения цилиндра: 0,2; 200; 300; 400; 600 об/мин. Затем в 2 раза разбавить раствор водой (до 10 %) и вновь замерить эти показатели.

*Для сокращения времени приготовления растворов получить требуемые растворы можно путём последовательного разбавления одного и того же 20 %-го раствора после определения τ_{600} до 15, затем 10,5 и 2 %.

Полученные результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Концентрация раствора %	θ , Па	Вязкость, Па			
		τ_{200}	τ_{300}	τ_{400}	τ_{600}
20					
10					

По экспериментальным данным построить графики зависимости $\tau = \varphi(n)$ для 20 и 10%-х растворов.

3-й бригаде: определить зависимость вязкости и СНС глинистого раствора от зазора между вращающимся цилиндром и бобом.

Для этого из общей ёмкости отлить 150 мл 20 %-го глинистого раствора, определить по формулам (4.7) и (4.16) и τ_{600} при установке различных цилиндров, позволяющих получать зазор..... мм. Разбавить в 2 раза раствор и вновь определить значения θ и τ

Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Концентрация глины, %	Значения θ и τ_{600} при					
	$\delta =$		$\delta =$		$\delta =$	
	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}
20						
10						

По экспериментальным данным построить график зависимости $\tau_{600} = \varphi(\delta)$ и $\theta = \varphi(\delta)$.

4-й бригаде: определить зависимость вязкости и СНС глинистого раствора от его плотности.

Для этого отлить из общей ёмкости 150 мл 20 %-го глинистого раствора, в который добавить 10 % барита и определить на вискозиметре значения θ и τ_{600} и ареометре значения ρ . Затем добавлять по 5 % барита и также определять значения ρ , θ , τ_{600} при 15 и 20 % барита.

Результаты занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Показатели θ и τ_{600} при					
10 % барита		15 % барита		20 % барита	
θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}

По полученным результатам построить график зависимости $\tau_{600} = \omega(\delta)$, $\theta = \omega(\delta)$.

5-й бригаде: определить зависимость вязкости глинистого раствора от температуры. Для этого отлить 150 мл 20%-го глинистого раствора, замерить его температуру и определить показатели θ и τ_{600} на вискозиметре ВСН-3. Подогреть раствор до 40 °С и определить показатели θ и τ_{600} . Затем подогреть до температуры 60 и 80 °С и замерить значения θ и τ_{600} .

Результаты занести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Показатели θ и τ_{600} при							
20 °С		40 °С		60 °С		80 °С	
θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}

По полученным данным построить графики зависимости $\tau_{600} = \varphi(T^{\circ}\text{C})$, $\theta = \varphi(T^{\circ}\text{C})$.

Обсуждение результатов. Выводы

Полученные различными бригадами исследования обобщить, составить отчёт, сделать выводы.

Практическая работа 5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ПРОЧНОСТЬ СТРУКТУРЫ И ВЯЗКОСТЬ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ (ГИДРОФОБНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ)

Цель работы: экспериментально раскрыть теоретические положения о гидрофобных структурах промывочной жидкости, обеспечить более глубокое понимание происходящих в растворах физико-химических процессов при обработке их электролитами.

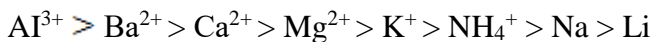
Теоретическая часть

Гидрофобная структура промывочной жидкости обусловлена межмолекулярным взаимодействием частиц твёрдой фазы, которые возможны только на незначительном удалении частиц друг от друга. Сближение частиц возможно в двух случаях: при повышении количества частиц твёрдой фазы (повышении концентрации или их диспергировании) и при гидрофобизации частиц (снижении их потенциала электролитами или гидрофобизация гидрофобными полимерами).

Все структурообразователи промывочных жидкостей обладают отрицательным зарядом, поэтому нейтрализацию заряда производят катионоактивными электролитами. В процессе насыщения бурового раствора электролитами вокруг частиц твёрдой фазы образуется двойной электрический слой (ДЭС), состоящий из заряженной поверхности самих частиц и слоя катионов, нейтрализующих этот заряд.

Интенсивность снижения потенциала частиц зависит от заряда катионов, с увеличением заряда она растёт. С помощью одновалентных катионов заряд частиц нейтрализуется частично, с помощью двухвалентных катионов потенциал может быть понижен до нуля, а трёхвалентными катионами можно даже изменить заряд на противоположный.

По адсорбционной способности (способности катионов вытеснять с поверхности частиц силанольного типа $\equiv \text{SiO}^-$) катионы располагаются в следующем порядке



Ионы водорода с радикалами $\equiv \text{SiO}^-$ образуют прочные водородные связи и поэтому способны вытеснять все вышеприведённые катионы.

При нейтрализации потенциалы частиц твёрдой фазы сила взаимодействия с ними молекул воды понижается, понижается толщина гидратного слоя, частицы получают возможность сблизиться на расстояние их межмолекулярного взаимодействия, что резко повышает прочность структуры (связей частиц). При повышении концентрации катионов может произойти полная нейтрализация заряда, агрегатирование (слипание) частиц и их седиментация.

При снижении толщины гидратного слоя увеличивается и кулоновское взаимодействие катионов с частицами твёрдой фазы. Особенно интенсивно оно проявляется при наличии поливалентных катионов, способных “сшивать” частицы уже при малых концентрациях.

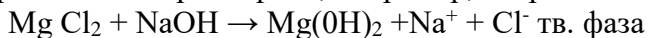
Гидрофобизация частиц сопровождается повышением водоотдачи. Гидрофобное структурирование раствора можно определить по повышению прочности структуры и водоотдачи. При агрегатировании твёрдой фазы водоотдача также растёт, но прочность структуры понижается. При флокуляции частиц (образовании хлопьев) прочность структуры растёт, водоотдача остаётся постоянной.

Для повышения прочности структуры промывочных жидкостей электролиты используют редко. Чаще электролиты добавляют в раствор с целью ингибирования (ограничения, предотвращения), набухания глинистых пород. В этом случае катионы из раствора за счёт кулоновских сил по порам проникают в глинистую породу, нейтрализуют заряд глинистых частиц, в результате чего предотвращается всасывание воды и набухание породы. Глинистые частицы без гидратного слоя повышают свою прочность за счёт межмолекулярного взаимодействия.

Наиболее эффективными ингибиторами являются поливалентные катионы. Однако поливалентные катионы при высокой их концентрации повышают положительный заряд бурового раствора, что приводит к диспергированию глинистой породы (засасыванию раствором отрицательно заряженных глинистых частиц породы, слагающих стенки скважин), кавернообразованию, авариям и ухудшению качества бурового раствора. Поэтому ингибирующие растворы готовят с использованием солей одновалентных металлов (NaCl, KCl) или слаборастворимых в воде соединений поливалентных металлов, вследствие чего обеспечивающих раствор незначительным количеством поливалентных катионов: известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$, гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Легко растворимые соли поливалентных металлов CaCl_2 , AlCl_3 могут использоваться только для приготовления ингибирующих растворов при бурении недиспергирующихся глинистых пород: микротрещиноватых аргиллитов, глинистых сланцев с целью "сшивания" кусков горной породы.

Электролитами насыщают буровые растворы при бурении соленосных отложений с целью предотвращения их растворения при бурении. Обычно насыщают буровой раствор теми же солями, которые присутствуют в геологическом разрезе: при бурении галита - поваренной солью, а бишофита и корналита - раствором бишофита.

Наконец, электролиты применяют для получения конденсированной твёрдой фазы, например, гидрогеля магнезия



В глинистых растворах электролиты вызывают коагуляцию, агрегатирование и седиментацию глинистых частиц, ухудшают качество бурового раствора. Для предотвращения агрегатирования и седиментация глинистых частиц, а также роста кристаллов конденсированной твёрдой фазы раствор стабилизируют солестойкими полимерами (например, КМЦ КССБ и др.).

Методическая часть

Основными показателями гидрофобной структуры буровых растворов являются прочность структуры (статическое напряжение сдвига), вязкость, водоотдача и стабильность.

Статическое напряжение сдвига и вязкость бурового раствора предусматривается определять на вискозиметре ВСН-3, водоотдачу на приборе ВМ-6, стабильность по суточному отстою в мензурке (%) и в цилиндре ЦС-2 по разности плотности раствора в верхней и нижней половине цилиндра $s = \rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}$. Для приготовления бурового раствора предусматривается использовать миксер, для нагревания раствора - кипятильник.

Экспериментальная часть

Подгруппа разбивается на пять бригад. Каждой бригаде выдается задание.

1-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи глинистого раствора от концентрации поваренной соли. Для этого из заранее приготовленной пасты черногорского глинопорошка (в соотношении глина - вода 1:1) приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработанного кальцинированной содой (2 % от веса глины). Из общей ёмкости отлить в четыре ёмкости по 250 мл 15 %-го глинистого раствора, добавить в три из них 5,15,25 % поваренной соли, тщательно перемешать и определить показатели, для каждого раствора. Результаты занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	В см ³ /30 мин
0			
5			
15			
25			

По экспериментальным данным построить графики зависимости $\theta = \varphi(C)$, $\tau_{600} = \varphi(C)$, $V = \varphi(C)$.

2-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи от концентрации хлористого кальция. Для этого приготовить 1л 15 %-го глинистого раствора, обработанного

кальцинированное содой (2 % от веса глины), разлить раствор в четыре ёмкости по 250 мл, добавить в три из них хлористого кальция: 0,5; 1,5; 2,5 %, тщательно перемешать и определить для каждого раствора показатели θ , τ_{600} , В. Результаты занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	В см ³ /30 мин
0			
0,5			
1,5			
2,5			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), В = \varphi(C).$$

3-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи глинистого раствора, стабилизированного КМЦ-600 от концентрации хлористого калия. Для этого приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от веса глины) и 1,5 %-го КМД. Раствор разлить в четыре ёмкости по 250 мл. В три из них добавить хлористого калия 5, 15, 25 %. Для каждого раствора определить θ , τ_{600} и В. Результаты занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	В см ³ /30 мин
0			
5			
15			
25			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), В = \varphi(C).$$

4-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи, стабилизированного КМЦ-600 глинистого раствора от концентрации хлористого кальция. Для этого приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработать его кальцинированной содой (1 % от веса глины) и 1,5 %-го КМЦ-600. Раствор разделить и разлить в 4 ёмкости по 250 мл. В три из них добавить 0,5; 1,5; 2,5 % CaCl₂.

Растворы тщательно перемешать и определить для каждого из них показатели θ , τ_{600} и V . Результаты занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	V см ³ /30 мин
0			
0,5			
1,5			
2,5			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), V = \varphi(C).$$

5-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкость и водоотдачи от концентрации поваренной соли. Для этого приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от веса глины) и КМЦ-600. Разлить раствор в 4 ёмкости по 250 мл. В три из них добавить поваренной соли 5, 15, 25 %. Для каждого раствора определить θ , τ_{600} и V . Результаты занести в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	V см ³ /30 мин
0			
5			
15			
25			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), V = \varphi(C).$$

Обсуждение результатов. Выводы

Полученные результаты обобщить всей подгруппой, оделить выводы о влиянии электролитов на свойства глинистых растворов и целесообразности обработки ими буровых растворов.

Практическая работа 6.

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ РАЗЖИЖЕНИЯ (ДЕСТРУКТИРОВАНИЯ) БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Цель работы: экспериментально раскрыть теоретические положения о влиянии различных способов деструктурирования и снижения вязкости промывочных жидкостей.

Теоретическая часть

В процессе бурения соленосных отложений или при наличии агрессивных подземных вод в результате гидрофобизации катионами электролитов частиц твёрдой фазы прочность структуры и вязкость буровых растворов резко возрастают. Прочность структуры и вязкость буровых растворов возрастают также и вследствие насыщения промывочных жидкостей тонким шламом. Резкое повышение вязкости раствора вызывает ряд нежелательных явлений осложняющих процесс бурения. В первую очередь вязкие растворы существенно снижают механическую скорость бурения.

$$V_{\text{мех}} \approx V_0 (1 - \kappa \tau)$$

где V_0 - механическая скорость бурения при промывке водой, τ - вязкость раствора.

Высокая вязкость раствора вызывает необходимость дополнительного расхода энергии на вращение снаряда, затрудняет очистку раствора от шлама, повышает содержание в растворе абразивного шлама, что ведёт к интенсивному износу снаряда, осложняет спуско-подъёмные операции, создаёт антисанитарные условия.

При повышении концентрации твёрдой фазы в растворе повышается его плотность ρ , что также резко снижает механическую скорость бурения

$$V_{\text{мех}} = \frac{V_0}{\rho^n}$$

Снижение прочности структуры и вязкости раствора на практике осуществляют путём уменьшения частиц тонкодисперсной твёрдой фазы в растворе (разбавления водой,

удаления части твёрдой фазы флокулянтами, агрегации и седиментации частиц). Удаление грубой твёрдой фазы (шлама) осуществляет в очистной системе с помощью вибросит, гидроциклонов, желобов, отстойников. Эти методы используют в тех случаях, когда требуется одновременно со снижением СНС и вязкости понизить и плотность раствора.

В тех случаях, когда нужно понизить прочность структуры, но сохранить плотность раствора на прежнем уровне растворы разжижают (путём удаления из раствора катионов в первую очередь, поливалентных металлов Ca^{2+} , Mg^{2+}) с солями с поливалентными анионами, способными образовывать с Ca и Mg нерастворимые соединения Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , путём активации твёрдой фазы: щелочными реагентами (УЩР, ТЩР, фосфатами, щелочными электролитами Na_2CO_3 , NaOH , KOH и др.), полимерами - стабилизаторами (в первую очередь олигомерами).

В результате активации твёрдой фазы между частицами твёрдой фазы образуются толстые гидратные оболочки, межмолекулярное взаимодействие между частицами снижается, прочность структуры, вязкость и водоотдача понижаются.

Для разжижения растворов и снижения водоотдачи чаще всего используют активированный щёлочью гидролизный лигнин и его производные, активированные щёлочью бурый уголь и торф.

Лигнин является отходом гидролизного производства спирта, дрожжей, целлюлозно-бумажного производства. Это составная часть древесины, связывающая фибриллы целлюлозы в единое целое. Активированный лигнин и его производные - ароматические соединения, обладают высокой адсорбционной способностью, способны образовывать на поверхности частиц твёрдой фазы достаточно плотную и гидрофильную полимерную плёнку. Ароматические полимеры - разжижители обладают высокой солестойкостью, при большой концентрации (выше 2-3 %) могут повышать прочность структур.

В практике бурения для разжижения глинистых растворов применяют почти все отходы гидролизного производства: гидролизный лигнин, шлам - лигнин, активные илы,

лигносульфонаты (сульфитспиртовая барда - ССБ, сульфит-дрожжевая бражка - СДБ, нитратный сульфатный щёлок НСЩ). К производным лигнина относятся нитролигнин - продукт окисления и нитрования гидролизного лигнина в 10 % азотной и 4 % серной кислоте, и г е т а н - продукт дальнейшей активации нитролигнина в каустической соде и кислороде; с у н и л - продукт активации нитролигнина гидросульфитом натрия. Производными ССБ являются о к з и л - продукт обработки кальциевой ССБ хромпиком в щелочной среде, феррохромлигносульфонат - продукт взаимодействия ССБ (СДБ) с серноокислым железом и бихроматом натрия, конденсированная сульфитспиртовая барда (КССБ, КССБ-1, КССБ-2, КССБ-4) – продукт обработки ССБ формальгидом и фенолом в кислой среде с последующей нейтрализацией щелочью. Цифра указывает на содержание фенола КССБ-4 кроме того содержит хромпик и по свойствам (термостойкости) близок окзилу.

Помимо целлюлозы и лигнина древесина содержит значительное количество гемицеллюлоз (примерно равное содержанию лигнина), среди которых выделяют древесную смолу. Экстракционная (нерастворимая в воде, но растворимая в этилацетате) смола наполовину состоит из фенолов. При конденсации фенолов с помощью формальдегидов и формаль сульфитов получают реагент - полифеноллесохимический - ПФЛХ.

Помимо перечисленных реагентов из растений, за рубежом применяют экстракты из различных деревьев и других растений — таннины, представляющие собой конденсированные фенолы. Одним из представителей таннинов является сулькор, получаемый из щелочной вытяжки отходов дубильного экстракта.

Широкое распространение в качестве разжижителей получили УЩР,

ТЩР - продукты активации бурого угля и торфа щелочами и их производные: НГР - (нитрогуматный реагент) - бурый уголь, окисленные 8 %-й азотной кислотой при температуре 50-60 °С, СНГР - сульфированный нитрогуматный реагент, который получают сульфированием бурого угля бисульфатом натрия, ХГР - хромгуматный реагент - бурый уголь, окисленный хромпиком.

В практике бурения для выбора способа структурирования или разжижения на графике определяет оптимальную зону (рис.1) в системе координат θ, T .

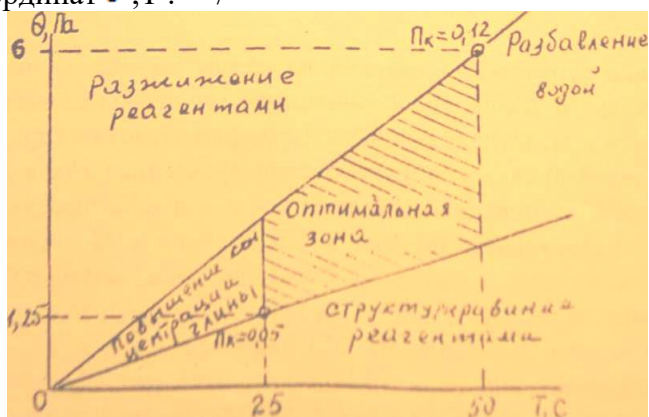


Рис. 6.1. Схема регулирования вязкости раствора

Для этого определяют минимальный и максимальный показатель консистенции - отношение СНС к условной вязкости

$$П_k = \frac{\theta}{T}$$

отмечают точки на графике и через эти точки проводят прямые.

В практике нефтяного бурения за оптимальные показатели принимают $\theta = 1,25 \div 6$ Па, $T = 25-50$ с, максимальный показатель консистенции $П_k = \frac{6}{50} = 0,12$ Па/с, минимальный $П_k = \frac{1,25}{25} = 0,05$ Па/с. Тогда оптимальной областью консистенции будет область, расположенная между прямыми, проведёнными через максимальный и минимальный $П_k$, в пределах - от 1,25 до 6 Па и T от 25 до 50 с.

Если вязкость T будет меньше 25 с раствор структурируют введением дополнительного количества твёрдой фазы, больше 50 с - буровой раствор разбавляют водой. При $П_k < 0,05$, раствор структурируют реагентами, при $П_k > 0,12$, раствор обрабатывают разжижителями (табл. 6.1).

В оптимальной области регулируют только показатель фильтрации.

Таблица 6.1

P _к раствора Па/с	Обработка	Тип реагента			
	Растворами реагентами	Пресный раствор	Слабоминер аз. NaCl раствор	Минерали з. NaCl раствор	Минерал из. CaCl ₂ раствор
P _к =0,05- 0,12	Понизителям и фильтрации	УЩР, ТЩР	УЩР, ТЩР	КССБ, КМЦ, гипан, К- 4, метас	КССБ, КМЦ
P _к <0,05	Структурооб разователям и	NaCl, Na ₂ SiO ₃ , кальц. глина	Ca(OH) ₂ CaSO ₄ натр.глина	Асбест солест. глина	CaCl ₂ , Ca(OH) ₂ CaSO ₄ кальц. глина
P _к >0,12	разжижителя ми	УЩР, ТЩР, нитролигнин , игетан, окзил, бур.уголь	ССБ, нитролигни н, окзил, ПФЛХ, бур.уголь	ССБ, окзил	ССБ, окзил

Методическая часть

Основными показателями качества разжижения являются вязкость, статическое напряжение сдвига и водоотдача. Статическое напряжение сдвига, как известно, определяют на приборе СНС-2, вязкость можно определять как по вискозиметру СПВ-5, так и вискозиметру ВСН-3.

Экспериментальная часть

Из заранее приготовленной пасты черногорского глинопорошка приготавливают 25 %-й глинистый раствор. Подгруппа разбивается на пять бригад.

1-й бригаде необходимо отлить из общей ёмкости 0,5 л 25 %-го раствора, определить показатель P_к и при необходимости наметить пути дальнейшей обработки раствора. При необходимости разжижения раствора определить методы разжижения и дать оценку эффективности выбранного метода.

2-й бригаде отлить 0,5 л 25 %-го раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от веса глины), определить по показателю P_к необходимость дальнейшей обработки раствора.

Если требуется разжижение раствора, выбрать метод разжижения и после его реализации определить эффективность метода.

3-й бригаде отлить 0,5 л 25/6-го раствора, обработать его кальцинированной содой (2% от массы глины) и полимерами (КМЦ-600, 1,5 % от массы раствора) и определить по показателю θ необходимость дальнейшей обработки. При необходимости разжижения определить метод разжижения и после его реализации определить эффективность метода.

4-й бригаде отлить 0,5л 25 %-го глинистого, раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от массы глины) и полимерами (КМЦ-600 1,5 % от массы раствора), а затем поваренной солью (5 % от массы раствора). Определить необходимость дальнейшей обработки раствора по показателю P_k . При необходимости разжижения раствора выбрать его метод и после реализации определить эффективность метода.

5- й бригаде отлить 0,5 л 25 %-го глинистого раствора, разбавить его в 2 раза водой, обработать кальцинированной содой (2% от массы глины) метасом (0,5 % от массы раствора) и хлористым кальцием (1 % от массы раствора). По показателе P_k определить необходимость дальнейшей обработки. При необходимости разжижения выбрать метод, а после его реализации определить эффективность метода.

Результаты экспериментов бригады заносят в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Состав раствора				Показатели			Разжижитель и показатель после разжижения			
Глина %	Na ₂ CO ₃	КМЦ метас	NaCl, CaCl ₂	θ_{10} , Па	T, с	P_k	Разж.	θ_{10} , Па	T, с	P_k

Анализ результатов исследований и выводы

На основании экспериментальных данных необходимо проанализировать влияние различных компонентов промывочной жидкости на показатели θ , T, P_k и сделать вывод об эффективности разжижения различными методами.

Практическая работа 7.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

Цель работы: ознакомить студентов с методами регулирования плотности бурового раствора.

Теоретическая часть

При бурении скважин неперенным условием предупреждения водопроявлений обвалов стенок скважин и связанных с ними осложнений является регулирование гидростатического давления столба бурового раствора в зависимости от давления водоносных пластов и норového давления глинистых пород. В зонах аномально высоких пластовых давлений, зонах неустойчивых горных пород, чтобы не допустить водопроявлений и обвалов .необходимо поддерживать плотность раствора, при которой давление на стенки скважин было бы несколько больше пластового давления флюида.

С другой стороны повышенное давление столба жидкости способно вызвать гидравлический разрыв пластов, что может повлечь потери промывочной жидкости и другие последствия. Повышенная плотность бурового раствора резко понижает механическую скорость бурения

$$V_{\text{мех}} = \frac{V_0}{\rho^n}$$

где V_0 - механическая скорость бурения при промывке водой, ρ - плотность раствора, n - показатель степени, равный 2-3.

Следовательно, при бурении скважин необходимо постоянно регулировать плотность бурового раствора.

Для повышения плотности раствора повышают концентрацию глины, вводят специальные утяжелители.

Буровые растворы, приготовленные на основе бентонитовых глин, имеют невысокую плотность 1059-1080 кг/м³. Каолиновые и иллитовые глины в зависимости от их качества позволяют получать растворы плотностью 1180—1300 кг/м³, а за счёт повышения концентрации и обработки химреагентами - разжижителями - 1400 -

1450 кг/м³. Однако опыт показывает, что выгоднее использовать утяжелители с высокой плотностью, т. к. они позволяют уменьшить концентрацию твёрдой фазы в растворе, а значит, повысить механическую скорость бурения и расход утяжелителя.

Основной показатель качества утяжелителя - утяжеляющая способность, которая определяется плотностью раствора после введения 300% утяжелителя (по массе к исходному раствору) для создания раствора с условной вязкостью 60 с, водоотдачей 5-6 см³ за 30 мин.

Утяжеляющая способность материала зависит от его плотности, дисперсности, гидрофильности и химического состава. Высокая степень дисперсности утяжелителя способствует повышению вязкости, а вязкость не позволяет повышать концентрацию утяжелителя и плотность раствора. Низкая степень дисперсности утяжелителя снижает седиментационную устойчивость.

В зависимости от минерального состава утяжелители делят на четыре группы: карбонатные (мергель, $\rho = 2650$ кг/м³, известняк и мел $\rho = 2700$ кг/м³, доломит, $\rho = 2900$ кг/м³, сидерит $\rho = 3900$ кг/м³), баритовые (баритовые концентраты производства обогатительных фабрик цветной металлургии КБ-1, КБ-2, КБ-3, КБ-4, КБ-5, плотностью 4050-4250 кг/м³), железистые (гематит $\rho = 5300$ кг/м³, магнетит $\rho = 4900-5200$ кг/м³, ильменит $\rho = 4790$ кг/м³) и свинцовые (галанит $\rho = 7400-7500$ кг/м³). Железистые утяжелители вследствие их абразивности применяют редко.

При добавках галенита получают буровые растворы плотностью более 3000 кг/м³.

Для промывки скважин в устойчивых горных породах и особенно в трещиноватых зонах с целью повышения механической скорости бурения и снижения поглощения плотность промывочной жидкости понижают (чаще всего за счет аэрации). Аэрация позволяет уменьшить плотность любых промывочных жидкостей в широких пределах. При этом возрастает вязкость раствора; при концентрации воздуха $C = 0 \div 54$ % она равна

$$\mu_a = \mu_n (1 + 3,6 C)$$

где μ_n - исходная вязкость.

При концентрации воздуха $C = 54 \div 96 \%$

$$\mu_a = \frac{\mu_{из}}{I} - C^{0,49}$$

Плотность азрированной жидкости определяется по формуле

$$\rho_0 = \frac{(I - a)\rho}{I - a + a\rho_0/\rho}$$

где ρ_0, ρ - плотность азрированной и исходной жидкостей, a - количество воздуха в единице объёма азрированной жидкости, ρ_0, ρ - атмосферное и заданное давление.

Гидростатическое давление азрированной жидкости ρ на глубине h для статических условий определяют из соотношения

$$P + \frac{a}{I-a} \lg \rho - \rho_0 = \rho h$$

Для придания промывочной жидкости закупоривающей способности в неё вводят наполнители. Для надёжного закупоривания трещин размеры частиц наполнителя должны быть в 2 раза меньше величины раскрытия трещин.

Для азрации промывочных жидкостей применяют специальные азраторы, а для стабилизации азрированных растворов - пенообразователи.

Методическая часть

Плотность бурового раствора чаще всего определяют с помощью ареометра АГ-ЗПП или АБР-1, состоящего из поплавка с двумя рабочими и одной поправочной шкалами, мерного стакана с балластом и съёмного груза.

Перед измерением плотности раствора проверяют правильность его показаний. Для этого в стакан заливают пресную воду, подсоединяют его к поплавку и опускают вместе с поплавком в ведёрко с водой. Если по рабочей шкале 0,8-1,7 уровень воды ведёрка окажется выше или ниже 1, 0, нужно определить причину (наличие засохшей глины в стакане, его деформация, попадание воды в поплавок) и устранить ее. При невозможности этого сделать по поправочной шкале определить поправку.

После определения поправки стакан заполняют исследуемым раствором и опустив его вместе с поплавком в ведёрко с водой, по

шкале 1,6-2,6 определяют плотность раствора; к этому показанию добавляют ее личину поправки. Если поплавков не погружается в воду, к стакану подсоединяют груз и отсчёт ведут по шкале 0,8-1,7.

Для измерения плотности могут быть использованы также рычажные весы - плотномер ВРП-1. Плотномер состоит из стойки и рычага со стаканом. На рычаге имеются две призмы, с помощью которых рычаг устанавливается на стойке, и две шкалы, соответствующие этим призмам. Для определения плотности стакан заполняют раствором до отверстия и закрывают крышкой «рычаг устанавливают на правую призму, с помощью подвижного груза стакан с раствором уравнивают и снимают показания по верхней шкале. Если плотность окажется больше предела измерения, рычаг устанавливают на левую призму и показания снимают по нижней шкале.

Для более точного измерения плотности раствора используют пикнометр, представляющий собой стеклянный сосуд с притёртой пробкой и меткой на шейке.

Для определения плотности раствора вначале взвешивают пустой пикнометр P_1 . Заполняют его до метки исследуемым раствором, закрывают пробкой и вновь взвешивают P_2 .

Плотность бурового раствора рассчитывают по формуле

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

где V - объём пикнометра.

Экспериментальная часть

Для приготовления утяжелённых глинистых растворов заранее готовят пасту из черногорского глинопорошка в соотношении 1:1 по массе.

Подгруппа разбивается на четыре бригады. Каждое бригаде выдаётся задание:

1-й бригаде: а) определить зависимость плотности глинистого раствора от концентрации глины; б) определить концентрацию глинистого раствора максимальной плотности.

Для этого приготовить из глинистой пасты 1 л глинистого раствора с концентрацией 30 %. Разлить его в три ёмкости: 460, 310 и 230 мл.

Во вторую ёмкость добавить 150 мл , в третью 230 мл воды. Определить концентрацию и плотность каждого раствора. По результатам замеров построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$.

Повышая концентрацию глины раствора и регулируя реагентами - разжижителями, добиться максимальной плотности при $T_c = 60$ с и $V = 6$ см/30 мин.

2-й бригаде: а) определить зависимость плотности раствора от концентрации барита; б) определить уплотняющую способность барита. Для этого приготовить 0,6 л 7 %-го(по массе) глинистого раствора, разлить в три ёмкости по 200 мл, добавить в первую 200 г, во вторую 400 г, в третью 600 г барита, после перемешивания измерить плотность каждого раствора, построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$. Для раствора 600г/200 мл определить показатель условной вязкости T_c и водоотдачу. При $T_c > 60$ с и $V > 6$ см/30 мин обработать раствор реагентами до нужных параметров $T_c > 60$ с, $V \approx 6$ см/30 мин и вновь измерить плотность раствора. По результатам замеров построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$.

3-й бригаде: определить зависимость плотности бурового раствора от концентрации мела и определить уплотняющую способность мела.

Для этого приготовить I кг мелового раствора следующего состава по массе: 250 г воды, 750 г мела и 20 г КМЦ. Разлить тщательно перемешанный раствор в три ёмкости: 460 г, 310 г, 230 г. Разбавить водой раствор во второй ёмкости в 1,5 раза, а в третьей ёмкости- в 2 раза. После дополнительного перемешивания раствора определить концентрацию мела и плотность каждого раствора.

Построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$. Определить вязкость T_c к водоотдачу V . При необходимости добавить глины до получения вязкости $T_c = 60$ с и водоотдачи $V = 6$ см/30 мин. Замерить плотность раствора.

4-й бригаде: определить зависимость плотности цементного раствора от концентрации цемента (или $V/ц$) и определить его уплотняющую способность. Для этого приготовить I кг цементного раствора следующего состава: 250 г воды, 750 г цемента ($V/ц = 0,33$). После тщательного перемешивания раствор разлить в три ёмкости: 450 г, 310 г и 230 г. Раствор второй ёмкости

разбавить в 1,5 раза, а в третьей ёмкости в 2 раза. Определить концентрацию цемента (или В/ц) и плотность каждого раствора, построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$. Определить вязкость и водоотдачу раствора первого сосуда, добавить глины и полимеры до величины $T_c < 60$ с и $V < 6$ см/30 мин. Замерить плотность раствора.

Обсуждение результатов. Выводы

На основании полученных результатов сделать выводы о целесообразности использования различных утяжелителей.

Практическая работа 8.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Цель лабораторной работы: экспериментально доказать теоретические положения осложнений при бурении глинистых пород, получить навыки экспериментальной деятельности, обеспечить более глубокое понимание явлений набухания, размягчения и диспергирования глинистых пород.

Теоретическая часть

Глинистые горные породы представляют собой совокупность минеральных обломков различного состава и различных фракций, связанных между собой плёнками воды (в глинах) или кремнекислоты (в аргиллитах). Поэтому глинистые породы называют с вязными. Со ставными частицами «определяющими основные свойства глинистых пород, являются глинистые (размером в микрон и менее) и пылеватые (размером 2-5 мкм) частицы - продукты механического и химического выветривания магматических пород.

По минеральному составу глинистые частицы могут быть представлены различными минералами. Но преобладающими из них являются листовые силикаты: монтмориллонит, гидрослюда (чаще всего иллит и каолинит. Реже встречаются палыгорскит, хлорит, вермикулит и другие листовые силикаты.

Плотные метоморфизованные породы (например, глинистые сланцы, роговики) с непосредственным межмолекулярным взаимодействием глинистых частиц весьма устойчивы. Трещиноватые при насыщении их водой распадаются на кусочки (по трещиноватости). Глины с неустойчивыми и слабоуплотнёнными частицами легко насыщаются водой, набухают, теряют свою прочность и разрушаются.

Степень набухания (отношение объема набухшей породы к объёму сухой породы) обусловлена структурой кристаллов горной породы, дисперсностью и гидрофильностью глинистых частиц. С увеличением дисперсности частиц (увеличением их суммарной поверхности) и гидрофильности (заряда частиц, обусловленного количеством гидрофильных функциональных $\equiv\text{SiO}^-$; $\equiv\text{SiOH}^-$ на их поверхности). Степень набухания возрастает.

Кристаллическая решётка монтмориллонита представляет собой пакетиз двух слоёв кремнекислородных тетраэдров $\text{SiO}_2\text{O}_5^{2-}$, связанных гидраргиллитовым слоем $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. Пакеты между собой связаны обменными катионами: K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} . С увеличением заряда катиона прочность связи повышается, поэтому кальциевые монтмориллониты значительно труднее набухают и диспергируют в воде, по сравнению с натриевыми.

Кристаллическая решётка иллита сходна с кристаллической решёткой монтмориллонита, отличается лишь тем, что в поверхностном слое пакета часть атомов кремния замещена атомами алюминия, в результате чего некомпенсированный заряд поверхности пакетов активнее взаимодействует с катионами (в частности с катионами калия К) и связь между пакетами оказывается значительно выше, чем в пакетах монтмориллонита. Иллиты значительно слабее набухают и труднее диспергируют в воде.

Кристаллическая решётка каолинита имеет только два слоя: слой кремнекислородных тетраэдров и гидраргиллитовый слой. Пакеты каолинита за счёт большого количества гидроксильных групп OH^- сказываются прочно связанными между собой. Глина весьма слабо набухает и диспергирует в воде.

Молекулы воды состоят из атомов кислорода и двух атомов водорода. Атомы кислорода и водорода обладают разной

электроотрицательностью, поэтому орбитали кислорода подвергаются гибридизации (вытягиваются). Молекула воды принимает форму тетраэдра и поляризуется (образует диполь). В двух вершинах тетраэдра (в вершинах орбиталей кислорода с неподелёнными электронными парами) возникает отрицательный заряд, а в двух других вершинах (с атомом водорода) - положительный заряд.

В результате такой поляризации молекул воды осуществляется межмолекулярная связь. Помимо межмолекулярных сил между молекулами воды и поверхностью твёрдого тела возможна и водородная связь, обусловленная способностью атома водорода воды взаимодействовать с высокоотрицательными атомами твёрдого тела: *O*, *N*, *Cl*, *F*. Водородная связь прочнее межмолекулярной в 5-6 раз, но в 15-20 раз слабее химической.

В результате взаимодействия отрицательного заряда глинистых частиц (обусловленного наличием на их поверхности огромного количества высокоотрицательного кислорода) и положительных полюсов молекул (диполей) вода (за счёт межмолекулярных и водородных связей) вокруг частиц образуется плотный адсорбированный гидратный слой, прочно связывающий глинистые частицы друг с другом.

Прочность глинистой породы зависит от толщины плёнки воды между глинистыми частицами.

У самой поверхности глинистых частиц силы взаимодействия молекул воды с частицами достигают тысяч и десятков тысяч кг/см². С удалением от поверхности межмолекулярные силы быстро убывают обратно пропорционально седьмой степени расстояния (от молекул до частиц). Таким образом, чем тоньше плёнка воды, тем выше прочность породы.

Суммарную поверхностную энергию всех частиц горной породы называют объёмной электрической энергией. Плотность объёмное электрической энергии определяется главным образом дисперсностью и гидрофильностью (зарядом) частиц. С увеличением толщины плёнок воды между частицами эта плотность понижается.

Под воздействием объёмной электрической энергии горной породы последняя насыщается водой и набухает. Глина насыщается водой до тех пор, пока толщина гидратного слоя не достигнет некоторого критического значения при котором сила взаимодействия молекул воды с частицами будет меньше силы давления извне или когда межмолекулярные силы снизятся до нуля.

В лабораторных условиях пользуются тремя характеристиками набухания: степенью набухания $K_1 = V_n / V_0$, показателем набухания $K_2 = V_{ж} / \rho$ и скоростью набухания $\omega = K_2 / t$, где $V_{ж}$ - объём воды в горной породе, V_0 - объём сухой породы, V_n - объём насыщенной водой породы, P - вес сухой породы, t - время набухания.

В результате насыщения глины водой толщина плёнок воды между частицами возрастает, вследствие чего прочность глины падает (глина размягчается).

В атмосферных условиях прочность глины понижается обратно пропорционально её влажности в третьей степени

$$f_i = \frac{f_0 K_0^3}{K_i^3} \quad (8.1)$$

где f_0 и f_i пластическая прочность глины исходного образца и образца, насыщенного водой, K_0 , K_i - влажность глины. Характеристикой снижения прочности глинистой породы является коэффициент размягчения $K_p = f_i / f_0$ который зависит от дисперсности глины и гидрофильности ее частиц.

Прочность глины, находящаяся под давлением σ_i обратно пропорциональна её влажности W_i

$$\sigma_i = \frac{W_0 \sigma_0}{W_i}, \quad (8.2)$$

где σ_0 и W_0 - прочность и влажность «сухого» образца глины.

В контакте глины с водой за счёт поверхностной энергии частиц происходит не только "всасывание" молекул воды глиной, но и "всасывание" водой глинистых частиц, т. о. диспергирование глины.

Эффективность диспергирования зависит как от дисперсности и гидрофильности глины, так и от наличия количества и заряда в воде катионов.

За критерий диспергирования глины можно принять скорость диспергирования породы.

Скорость диспергирования - это объём (ΔV) или вес (ΔP) глины, перешедшей с единицы площади образца S в промывочную жидкость за единицу времени

$$D = \frac{\Delta P}{St} . \quad (8.3)$$

Методическая часть

1. Для изучения процессов набухания, размягчения и диспергирования глины предусматривается использовать образцы из кальциевых бентонитов, которые студенты получают из заранее приготовленного глинопорозка на водопроводной воде в соотношении 1:1 по массе.

В настоящее время существует целый ряд методик определения набухания глины.

Наиболее простой является методика визуального наблюдения М. Х. Фишера, заключающаяся в следующем.

Исследуемый образец помещается в градуированный сосуд, фиксируется его начальный объём. Затем в сосуд заливается вода и через некоторое время измеряется объём набухшего образца. Отношением объёма набухшего образца к его первоначальному объёму и характеризуется величина набухания.

Для проведения исследований по этой методике необходимо иметь: 2 мензурки, корзинку для опускания образца, весы и часы.

Для изучения процесса размягчения глины (определения пластической прочности) используют различные методы.

Наиболее часто замер пластической прочности осуществляют по методу П. А. Ребиндера на приборе ВИКа, у совершенство ванному М. С. Винарским. Вместо иглы прибор снабжается комплектом конусов из стали или алюминия с углами при вершине $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

Пластическая прочность определяется по формуле

$$P_m = K_\alpha (P/h^2), \text{ Па}, \quad (8.4)$$

при K_α – коэффициент зависящий от угла конуса

$$K\alpha = \frac{I}{\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (8.5)$$

при $\alpha = 60^\circ$, $K\alpha = 0,413$; P - вес погружаемой системы, H ; h - глубина погружения конуса, м.

Коэффициент размягчения определяют по отношению пластическое прочности набухшего образца к пластической прочности исходного образца

$$K_p = \frac{P_m}{P_{исх}}$$

Скорость диспергирования глины в воде невелика, и определить её вследствие сложности происходящих в растворе процессов можно лишь с большой погрешностью, поэтому на практике её не измеряют. Тем не менее этот показатель (особенно при использовании в качестве промывочной жидкости растворов электролитов) имеет важное значение при выборе буровых растворов. Исследования предполагается проводить с использованием 5-10 %-го раствора $Al_2(O_4)_3$.

Скорость диспергирования можно определить приближённо по разности весов образцов глины, выдержанных в воде, и испытуемом буровом растворе, делённой на площадь поверхности образца и время выдержки

$$V_g = \frac{P_{н.в.} - P_{н.р.}}{S t}$$

Экспериментальная часть

Исследования набухания и размягчения глины. 1. Из заранее приготовленного замеса глины на воде (в соотношении 1:1 по весу) готовят образцы в виде шариков или цилиндров, диаметром 4-5 см. 2. Определяют вес образцов P_0 . 3. Определяют пластическую прочность (среднюю из трёх измерений).

4. В мензурку заливают 150 мл воды. 5. С помощью корзинки в мензурку опускают образцы глины и измеряют их объём (по изменению уровня воды в мензурке) V_0 . 6. Через каждые 0,5 часа выдержки в воде образцы извлекают из мензурки и измеряют объём набухшей глины V_n . 7. Замеряют вес набухшего образца P_n . 8. Замеряют пластическую прочность глины P_m . 9. Определяют степень набухания $K_1 = \frac{V_n}{V_0}$. 10. Определяют объём жидкости в глине

По полученным данным строят графики зависимости от времени.

Обсуждение результатов. Выводы.

Общие выводы о характеристиках горной породы, о зависимостях показателей и скорости набухания, размягчения и диспергирования от времени. Прогноз поведения горной породы при её перебурировании. Требования к промывочной жидкости при бурении глины.

Литература

1. Ивачёв Л. М. Промывочные жидкости и тампонажные смеси. М.: Недра, 1987.
2. Зварыгин В. И. Регулирование технологических свойств суровых растворов. Красноярск: КИЦМ, 1994.
3. Лекции.



Министерство образования и науки
Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Г. А. Усов, Ф. П. Сердюков, С. В. Холкин

Методическое пособие
к комплексу практических работ
по дисциплинам «Очистные агенты и тампонажные смеси»
«Бурение скважин»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
очного и заочного обучения

Приборы, методика оценки параметров

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.

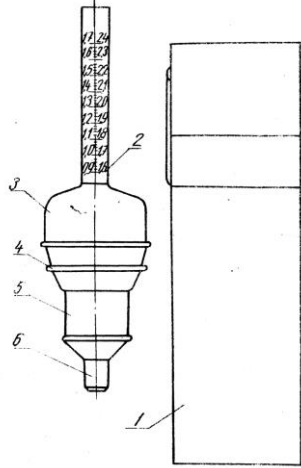


Рис. 1. Ареометр АГ-2 в сборе и ведро-футляр

Техническая характеристика

Ареометр АГ-2 имеет два предела измерения: от 0,90 до 1,70 г/см³ - при навернутом 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 поплавка 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 поплавка, 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 поплавка 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 500см ³ воды, с.....	15+0,4
Объем мерной кружки, см ³ :	
первого отделения.....	500
второго отделения.....	200
Размеры кружки, мм.....	70x190

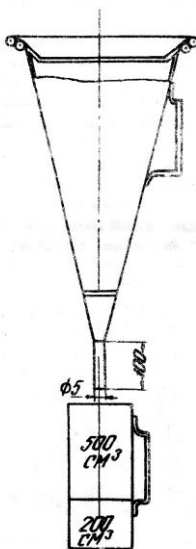


Рис. 2. Вискозиметр СПВ – 5 с кружкой

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
- подставить кружку объемом 500 см³ под трубку вискозиметра, слить в нее часть раствора и влить обратно его в воронку. Повторить эту операции два-три раза;
- подставить кружку объемом 300 см³ под трубку вискозиметра и одновременно открыть отверстие трубки, убрать палец, и пустить левой рукой секундомер;
- в момент заполнения кружки до края остановить секундомер, закрыть отверстие трубки пальцем и прочесть показание секундомера;
- 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 ;
- вымывать 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/см³ 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 закрытой 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, см ³	40
Цена деления шкалы при диаметре фильтра 75 мм, см ³	1
Точность измерения, см ³	+0,5
Давление фильтрации, Па	9,81*10 ⁴
фактический диаметр фильтра, мм	53
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 навернут цилиндр 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:

- точное определение момента, начала фильтрации при помощи запорного клапана на решетке фильтра;
- точное измерение количества фильтрата, которое выделяется за любой промежуток времени;
- постоянство давления с момента начала фильтрации.

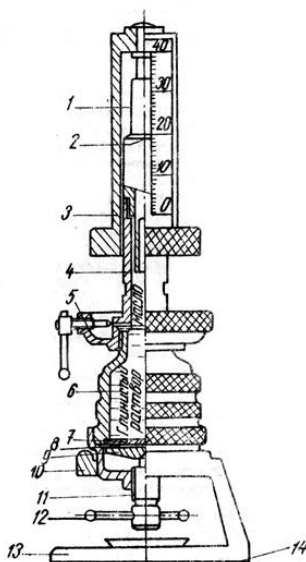


Рис. 3. Прибор VM-6 в сборе

Подготовка прибора к работе

Для предупреждения ржавления прибор VM-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;
 - в) 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;
- в) 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 навертывается цилиндр без плунжера;
- в) цилиндр заполняется маслом до верха, после чего в него вставляется плунжер;
- г) с помощью иглы из цилиндра спускается масло, и нулевое деление на шкале подводится к риску на цилиндре. При такой операции плунжер следует вращать рукой;
- д) места резьбовых соединений и поверхность цилиндра должны быть насухо вытерты, чтобы можно было обнаружить места утечки;
- е) 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 обнаруживаются 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 пере-мешать 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 23см³ 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 веять 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 фильтрата 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, отстоянного 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 $\text{Ø} 3 \text{ мм}$.

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 прикладкой 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 см^3 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;

- d) 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

- e) 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.

- f) вылить из отстойника содержимое, промыть его водой, вытереть и вложить на место в ящик лаборатории.

СМЕНА БЮРЕТКИ

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, вернуть 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 отстоянной 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.

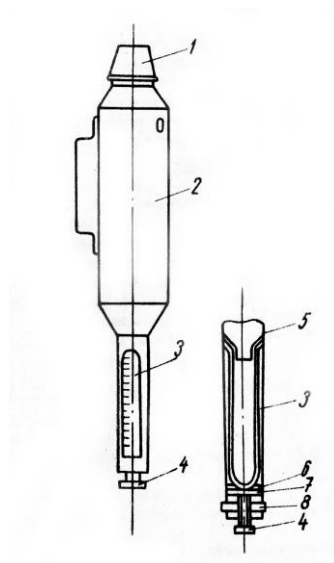


Рис. 4 Отстойник ОМ-2

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) черев 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.

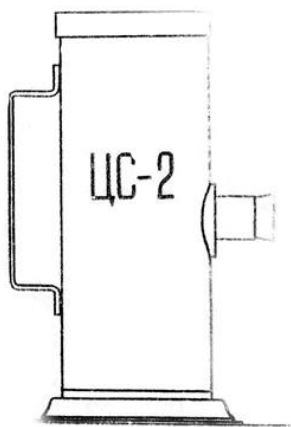


Рис. 5. Цилиндр СНС-2

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 погрешности 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 ну 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 регулируемыми опорами 2 и одной неподвижной 11. Измерительная часть состоит из двух узлов: узла внешнего подвижного цилиндра и узла подвешенного 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 подвешенного 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 нуль 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 "0" 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, прилагаемой к прибору, и влить 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 "0" 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 вклочить 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.

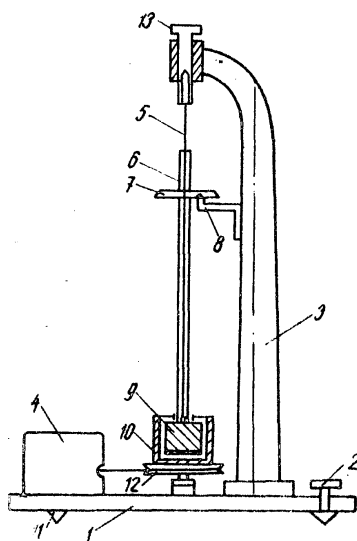


Рис. 6. Прибор СНГ-2

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 подвешенного 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 5 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 τ_0 , условная величина, характеризующая предел текучести в потоке промывочной жидкости.

Реологические показатели измеряются с помощью ВСН-3 по величине усилия, возникающего на подвешенном 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 подвешенного 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.

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:

$$\eta_{\text{эф}(n)} = \beta \frac{y_2}{n};$$
$$\eta_{\text{пл}} = \beta \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{n};$$
$$\tau_0 = A \cdot y_1$$

где:

$\eta_{\text{эф}}$ - эффективная вязкость, спз;

$\eta_{\text{пл}}$ - 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

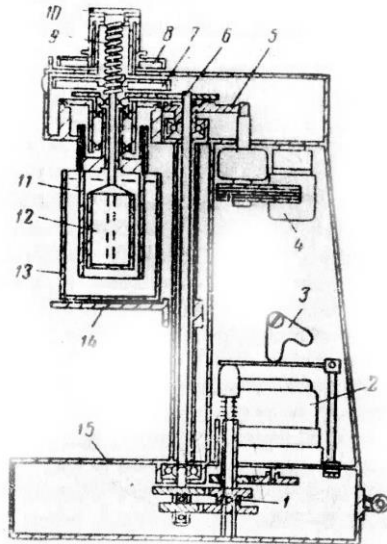


Рис. 7. Вискозиметр ВСН-3

- 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; 3 - шкала крутильной головки; 9 - пружинный динамометр; 10 - наружный цилиндр; 11 - внутренний цилиндр, 13 - стакан с раствором; 14 - кронштейн; 15 - корпус.

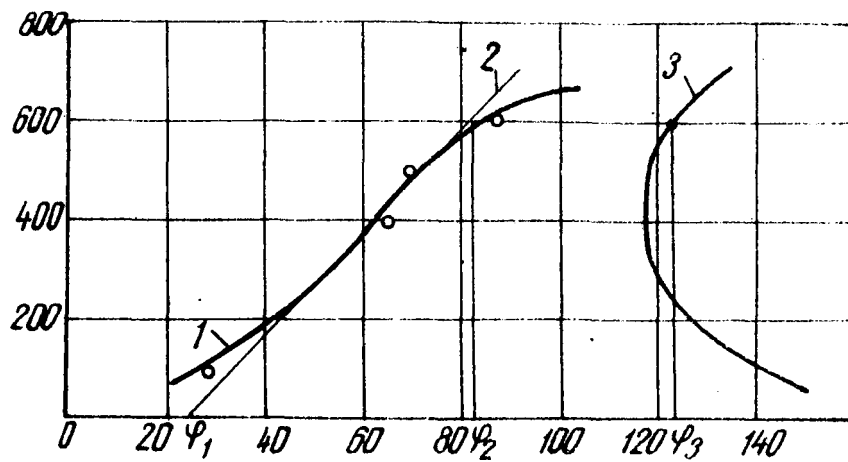


Рис. 8. Типы реологических кривых

- 1 - кривая, построенная по опытным точкам; 2 - прямая для расчета η 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, $B = \text{Cos } \theta$;
- 3) стабильность, %;
- 4) порог быстрой коагуляции Пб·к, к/л;
- 5) водородный показатель, рН;
- 6) коэффициент трения, Кт;
- 7) предельная прочность смазочной пленки, $p_{кр} \text{ Па}$

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 десятимиллионная 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 рН.

$$\text{pH} = - \lg \text{H}^+$$

В нейтральных растворах $\text{pH} = 7$ и уменьшается с ростом кислотности. В щелочных растворах $\text{pH} > 7$ 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 рН в лабораторных условиях применяют специальные приборы рН-метры. Для измерения величины рН в этих приборах используется система со стеклянным электродом, электродвижущая сила которой зависит от активности ионов водорода в растворе.

Схема для измерения величины рН 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 рН 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

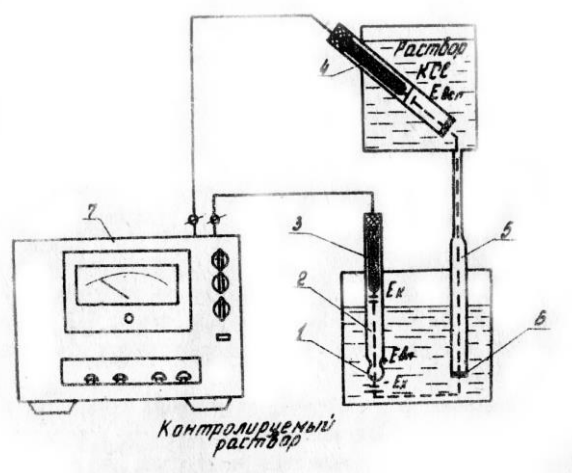


Рис. 9. Схема измерения рН раствора

1- полый шарик из электродного стекла; 2- стеклянный электрод; 3- внутренне контактный электрод; 4- вспомогательный электрод; 5- электролитический ключ; 6- пористая перегородка; 7- рН-метр - рН-262 (измерительный прибор).

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.14). 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:

$$K = \sigma_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}}$$

где: $\sigma_{\text{в}}$ - поверхностное натяжение воды при данной температуре Н/м

$n_{\text{в}}$ - 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.

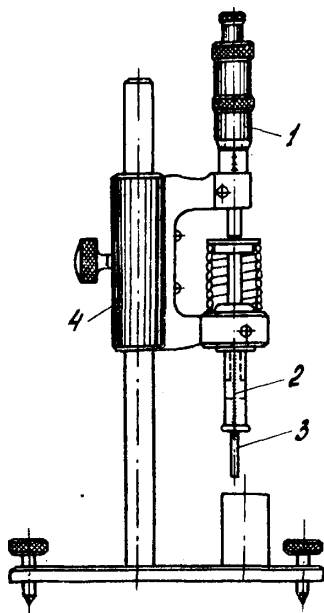
Поверхностное натяжение фильтрата определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{\sigma_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}}}{n_{\text{и}}} = \frac{K}{n_{\text{и}}}$$

где: $n_{\text{и}}$ - число капель исследуемой жидкости;

K - постоянная капилляра.

Рис. 10. Сталагмометр
1- микрометр, 2-медицинский шприц;
3-капилляр; 4 - кронштейн



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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ АПЖ

Способность АПЖ смачивать твердые поверхности характеризуется косинусом краевого угла смачивания, которая навивается смачиваемостью ($W = \cos \theta$)

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.

Установка состоит из источника света 1, испытываемой поверхности 2, увеличителя с длинно-фокусной линзой 3, экрана 4, рамки 6.

Для измерения краевого угла смачивания исследуемых поверхностей готовится АШ 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 краевого 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:

$$\text{при } \theta < 90^\circ \quad C_{\sigma\theta} = \frac{r_k^2 - h^2}{r_k^2 + h^2}$$

$$\text{при } \theta > 90^\circ \quad C_{\sigma\theta} = 1 - \frac{h}{r_k}$$

Полученные расчетные данные заносятся в таблицу, на основании которых строятся графики $\cos\theta=f(c)$. Данные графики позволяют оценить смачиваемость АПЖ поверхности горных пород и буровых труб в зависимости от концентрации ПАВ. На основании полученных данных вычисляется работа адгезии, которая характеризует энергию сцепления смазочной пленки с трущимися поверхностями.

$$W_a = \sigma_{жг}(1 + C_{\sigma\theta})$$

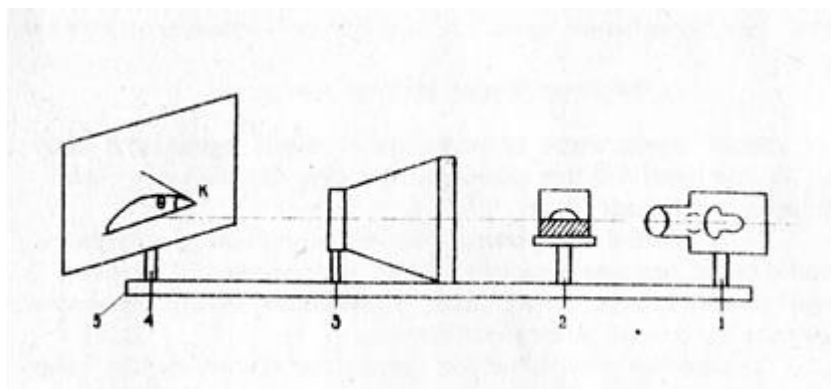


Рис.11. Установка для определения краевого угла смачивания.
источник света; 2 - испытываемая поверхность; 3 - увеличитель экран-пластинка; 5 - рама.

W_a - работа адгезии, Н/м ;

$\sigma_{ж.г}$ - поверхностное натяжение на границе раздела жидкость-газ, Н/м ;

$\cos \theta$ - смачиваемость.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ АПЖ

Под стабильностью, или устойчивостью понимается способность АПЖ сохранить свое агрегативное состояние, не расслаиваться в течение продолжительного времени.

Проба АПЖ 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 лампы. 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.

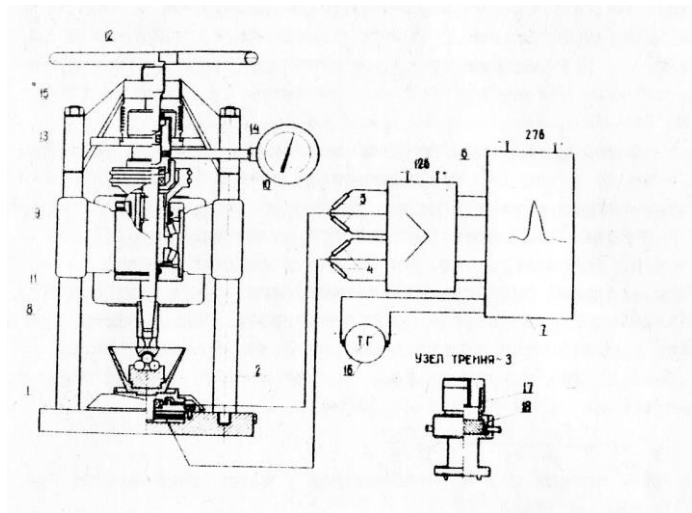


Рис. 12. Установка трения 1 - опорная станина; 2,3 - узлы трения; 4,5 - тензодатчик; 6 - тензоусилитель; 7 - осциллограф; 8 - шпиндель; 0 - корпус шпинделя; 10 - шкив; 11 - электродвигатель; 12 - нагрузочный винт; 13 - гидропресс; 14 - манометр, 15 - нагрузочная траверса; - тахогенератор

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 траверсе 15.

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:

$$K_T = \frac{F_{тр} \cdot R}{P \cdot r} = \frac{M_{кр}}{P \cdot r}$$

где: $F_{тр}$ - 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 замеряется 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 $P_{мах}$.

Величина предельной прочности смазочной пленки в месте контакта определяется по формуле Герца-Беляева:

$$P_{кр} = 0,388 \sqrt{\frac{1,64P_k E^2}{r^2}}$$

Где $P_{кр}$ - критическое давление на площадь контакта, $кг \cdot м^2$,

P_k - контактная нагрузка, Н;

E - модуль упругости, $кг/мм^2$ (для стали $E = 2,1 \cdot 10^4$ $кг/мм^2$);

r - радиус шара, м;

$P_k = 0,41 P$;

где $P_{мах}$ - 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.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»

Г. А. Усов

***Промывочные жидкости
(Глинистые растворы)***

Методические указания по самостоятельной работе
по дисциплине

«Очистные агенты и тампонажные смеси»

для студентов специальности

21.05.03 Технологии геологической разведки

очного и заочного обучения

Екатеринбург

2020

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время при бурении разведочных скважин большое внимание стало уделяться повышению качества промывочных жидкостей путем обработки их различными видами химических реагентов.

В частности, при алмазном бурении стали широко использоваться активные промывочные жидкости, малоглинистые и безглинистые растворы, получаемые на основе эмульсолов и коллоидных ПАВ. Поэтому возникает необходимость регулярного контроля качества промывочных жидкостей, который регламентируется требованиями технологии и геологических условий бурения скважин.

Задачей настоящих методических разработок является оказание помощи студентам в вопросах выбора исходного сырья для приготовления промывочных жидкостей, ознакомление с основными физико-химическими процессами коагуляционного структурообразования и получения дисперсных систем с заданными технологическими свойствами. Приводится достаточно полная характеристика основных химических реагентов, применяемых для получения различных видов промывочных жидкостей и регулирования их свойств, даются рекомендации по рациональной области их применения.

Методические разработки предусматривают оказание помощи студентам в:

- 1) приобретении навыков в определении основных параметров промывочных жидкостей;
- 2) изучении влияния различных химических реагентов на свойства промывочных жидкостей и усвоение методики определения их оптимальных концентраций;
- 3) овладение методами управления свойствами различных промывочных жидкостей: глинистого раствора, безглинистых промывочных жидкостей, аэрированных, утяжеленных растворов.

Содержание методических разработок составлено согласно программе лабораторных работ по промывочным жидкостям для студентов специальности «технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых» с целью облегчить использование их в процессе занятий.

Глинистые растворы – это коллоидно-дисперсные системы, в которых глина в виде мельчайших частиц (дисперсная фаза) равномерна распределена в воде, являющейся дисперсионной средой. Структурно-механические свойства глинистых растворов во многом зависят от минералогического и химического составов глин и воды.

Рассмотрим кратко характеристику основных глинообразующих минералов и воды, которые используются для получения глинистых растворов.

1. Характеристика основных глинообразующих минералов

Глинистыми породами называются группа осадочных неметаморфизированных и слабометаморфизированных горных пород, состоящих в основном из тонких (< 0,01 мм) фракций преимущественно глинистых минералов.

Глина характеризуется следующими признаками.

Первый признак – частицы, слагающие глины минералов в преобладающей массе имеют малые размеры. К глинам относят породы, в которых более 50 % частиц характеризуются размерами < 0,01 мм. Среди последних в глинах присутствуют не менее 25 % частиц размером < 0,001 мм.

Вторым признаком глины является обязательное присутствие в них высококоллоидальных глинистых минералов, которые в основном сосредоточены во фракции < 0,001 мм глинистой породы.

Третий основной признак глин – пластичность, т.е. способность давать с водой пастообразные массы различной консистенции. Пластичность зависит от степени

дисперсности и связанной с ней удельной поверхности глин, а также от наличия глинистых минералов, имеющих малые размеры и обладающих пластинчатой формой, увеличивающей способность глин удерживать воду.

Четвертая особенность глин – способность к обмену основаниями, которая зависит главным образом от присутствия глинистых минералов. Состав поглощенных катионов оказывает существенное влияние на пластические и другие свойства глин.

К основным глинообразующим минералам относятся минералы группы каолинита, гидрослюда, монтмориллонита и палыгорскита.

Каолинит. Эмпирическая формула каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. В весовом соотношении SiO_2 составляет 46,3 %, Al_2O_3 - 39,8 %, H_2O - 13,9 %. В структурном отношении каолинит представлен чередованием кремнекислородного и алюмокислородного слоев, последний из которых гидратирован, что обеспечивает прочную связь между структурными слоями. Отличается малой емкостью поглощения катионов, до 15-20 мг-экв на 100 г глины. Поэтому каолинит плохо набухает в воде. Удельный вес каолинита 2,57-2,60. В глинистых породах каолинит представлен мелкими чешуйками. Цвет белый, иногда светло-серый, желтоватый, голубоватый.

Гидрослюда – минералы, напоминающие по форме листочков слюда, но содержащие меньше щелочей и больше воды, чем слюда. Свойства гидрослюдистых глин определяются составляющими их структурами. Для них характерны смешанно-слоистые структуры, в которых алюмосиликатные пакеты одного глинистого минерала переслаиваются с пакетами другого.

Весьма распространены смешанные структуры различных гидрослюдов (иллита, хлорита и др.) с монтмориллонитом или каолинитом. Для них характерны – высокая коллоидальность, сравнительно большие емкости обмена (10-40 мг-экв на 100 г глины), хорошие адсорбционные свойства. Является очень широко распространенным глинообразующим минералом.

Монтмориллонит. Эмпирическая формула $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 3H_2O$. Алюминий в монтмориллоните частично замещен магнием и окисным железом, в случае полного замещения образуются соответственно минералы сапонит и нонтронит.

Монтмориллонит образует чрезвычайно мелкие листочки, чешуйки и волокнообразные выделения. Особенностью минералов монтмориллонитовой группы является способность их кристаллических решеток к расширению. Эта особенность тесно связана с атомной структурой минерала. Обе поверхности пакетов монтмориллонита заряжены электрически отрицательно и между ними действуют главным образом отталкивающие силы, благодаря чему вода или другие полярные жидкости могут легко проникать в межпакетное пространство и происходит расширение или «разбухание» решетки. При удалении поглощений воды пакеты сжимаются. Глины группы монтмориллонита отличаются повышенной емкостью катионного обмена, 80-150 мг-экв на 100 г глины. Из глин группы монтмориллонита получают высококоллоидальные глинистые растворы с достаточно прочной структурой и высокими структурными свойствами.

Палыгорскит представляет водный силикат магния и относится к магнезиальным глинистым минералам. Для него характерна игольчатая структура частиц и ленточно-слоистое строение кристаллической структуры минерала. Палыгорскит обладает высокой удельной поверхностью, суммарная емкость обмена составляет 20-30 мг-экв на 100 г глины. Адсорбционная способность и теплота смачивания палыгорскитовой глины увеличивается в результате освобождения каналов от связанной воды и увеличения эффективной поверхности /4/.

2. Характеристика вод

Вода представляет сложную динамическую систему, меняющуюся от взаимодействия воды и горных пород, от состава, степени активности распространенных в ней компонентов, термодинамических условий и т. д.

Состав горных пород, слагающих водоносные горизонты, их растворимость в воде является основным фактором в формировании химического состава подземных вод.

Вода обладает растворяющей способностью. Если самые сильные кислоты и щелочи обладают избирательной растворяющей способностью, то вода, содержащая углекислоту, в состоянии растворить все минералы, начиная от галоидных и сульфатных и кончая силикатами, что объясняется полярностью молекул воды. Поэтому химический состав подземных вод определяется в основном составом горных пород, слагающих водоносные горизонты.

На степень минерализации подземных вод оказывают влияние и другие факторы: климат, температура, время года, глубина залегания водоносного горизонта и др.

Природные воды имеют различную реакцию – от кислой до щелочной, в зависимости от состава растворимых солей, присутствия свободных кислот и щелочей. Так, например, при значительных концентрациях в воде карбонатов калия и натрия она будет иметь щелочную реакцию ($pH = 8-10$).

Присутствие кислот, особенно в рудничных водах, связанных с сульфидными месторождениями, железа, меди и цинка снижают величину pH в сторону кислой реакции ($pH < 7$).

Другим важным показателем воды является жесткость.

Жесткость – свойство, обусловленное присутствием в воде солей щелочно-земельных металлов – кальция и магния. Причем, в зависимости от состава солей, выделяют карбонатную жесткость, вызываемую наличием карбонатных ($CaCO_3$, $MgCO_3$) и гидрокарбонатных $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, солей. Некарбонатную жесткость, связанную с некарбонатными солями $CaCl_2$, $MgCl_2$.

Кроме того, еще выделяют два вида жесткости: постоянную (неустраняемую) и временную (устраняемую).

Постоянная жесткость обусловлена присутствием в воде карбонатных и сульфатных солей щелочно-земельных металлов. Удаление этих солей из воды сопряжено с ее дистилляцией, сложными химическими реакциями.

Временная жесткость обусловлена присутствием гидрокарбонатных солей кальция и магния, которые легко удаляются из воды при ее кипячении, благодаря распаду гидрокарбонатов.

Степень жесткости воды выражается в мг-экв на литр и вычисляется по формуле:

$$Ж = \frac{[Ca^{2+}]}{20,04} + \frac{[Mg^{2+}]}{12,16},$$

где $[Ca^{2+}]$ и $[Mg^{2+}]$ концентрация ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в мг/л; 20,04 и 12,16 мг – вес 1 мг-экв. ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} .

В некоторых случаях жесткость воды выражают в немецких градусах (Н). Один немецкий градус (1°Н) соответствует 10 мг CaO на 1 л воды или 7,2 мг MgO на 1 л воды. Для перехода от градусов жесткости к мг-экв/л надо число градусов умножить на 0,35.

Для перехода от мг-экв/л к градусам надо число мг-экв/л умножить на 2,8.

По предложению О. А. Алекина природные воды, в зависимости от величины жесткости, подразделяются на несколько типов:

Тип	Градусы	Мг-экв
Очень мягкие	0-4,2	1,5
Мягкие	4,2-8,4	1,5-3,0
Умеренно жесткие	8,4-16,8	3,0-6,0

Жесткие	16,8-26,2	6,0-9,0
Очень жесткие	> 25,2	>9,0

К числу широко применяемых способов улучшения качества воды относится химическая обработка. Количество химикатов (г/м³), необходимое для смягчения воды на 1,00 мг-экв/л с жесткостью свыше 4,2 мг-экв/л, определяется из расчета:

для кальцинированной соды (Na_2CO_3).....54

для каустической соды ($NaOH$).....42

для тринатрийфосфата (Na_3PO_4).....126

Пример: по данным анализа вода имеет жесткость 22 мг-экв/л. Следует смягчить 5 м³ воды кальцинированной содой. На 1 м³ воды требуется $(22-4,2) \cdot 54 = 961 Na_2CO_3$, на 5 м³ воды: $961 \cdot 5 = 4806$ г Na_2CO_3 .

Количество химикатов для смягчения воды можно взять из табл. 1.

Таблица 1

Количество химикатов для смягчения воды

Жесткость воды		Содержание катионов, мг/л		Удельное количество химикатов, г/м ³		
Н	$\frac{\text{МГ} - \text{ЭКВ}}{\text{Л}}$	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>NaOH</i>	<i>Na_2CO_3</i>	<i>Na_3PO_4</i>
5	1,78	35,8	21,7	71,4	94,6	226
10	3,57	71,5	43,4	124,9	189,2	456
15	5,35	107,3	65,0	214,3	283,8	679
20	7,14	143,0	86,8	285,7	378,5	904
25	9,00	178,8	108,5	357,2	473,0	1131
30	10,70	214,5	130,0	428,6	567,0	1358
35	12,5	250,3	152,0	500,0	662,3	1583
40	14,3	286,0	174,0	571,4	757,0	1808
45	16,0	321,8	195,0	643,0	851,6	2035
50	17,85	358,0	217,0	714,0	946,0	2262
55	19,6	395,0	238,0	786,0	1041,0	2489
60	21,4	430,0	260,0	837,0	1135,5	2716
70	25,0	500,0	304,0	1000,0	1324,0	3166
80	28,6	571,5	348,0	1143,0	1514,0	3616
90	32,3	644,0	390,2	1286,0	1703,0	4170
100	35,7	715,0	434,0	1429,0	1892,0	4524

Химический состав подземных вод зависит от состава и количества растворенных в ней компонентов. По данным О.А.Алекина природные воды по преобладающему аниону разделяются на классы: гидрокарбонатный, сульфатный и хлоридный. В пределах каждого класса выделяются группы: кальциевая, магниевая, натриевая.

По общей минерализации (содержание солей в г/л) воды подразделяются на несколько типов:

пресные – 1,5 г/л; слабоминерализованные – до 10г/л; минерализованные от 10 до 40 г/л; сильно минерализованные > 40 г/л.

Контрольные вопросы

1. Что такое глинистый раствор?
2. Основные признаки глинообразующих минералов.

3. Особенности структуры каолинита.
4. Особенности структуры гидрослюд, палыгорскита.
5. Особенности структуры монтмориллонита.
6. Что такое жесткость воды?
7. Классификация воды по жесткости.
8. Способы устранения жесткости воды.

3. Физико-химические основы формирования структур глинистых растворов

Основные свойства глинистых растворов – кинетическая и агрегативная устойчивость, их вязкость, дисперсность, набухание, структурообразование и тиксотропия связаны с физико-химическими взаимодействиями в системе глина-вода.

Характер этого взаимодействия особенно увеличивается в момент приготовления раствора, когда происходит диспергирование глинистых частиц и повышается их активность к ионному обмену и процессу гидратации.

При приготовлении глинистого раствора происходит разделение кристалла глины прежде всего в местах наименьшего сопротивления, т. е. на плоскостях спайности, где действуют слабые молекулярные силы между одноименно заряженными алюмосиликатными слоями.

Разрушение кристаллической решетки в направлении перпендикулярном плоскости спайности, т.е. на плоскостях спайности требует значительных затрат энергии для разрыва валентных связей между ионами. Поэтому поверхностная энергия у частиц глины распределена неравномерно: на ребрах кристалла, в местах разрыва валентных связей она значительно больше, чем на плоскостях спайности. Следовательно, чем больше площадь ребер у глинистых частиц, тем больше некомпенсированных валентных связей находится на поверхности частиц и тем больше сумма обменных катионов глин. В глинистых минералах группы каолинита, гидрослюд и палыгорскита нарушение связи является главной причиной ионообменной способности. Емкость катионного обмена монтмориллонитов является главным образом результатом замещения внутри кристаллической решетки и в незначительной мере до 20 % - результатом нарушения связи /3/.

Наличие обменных катионов внутри кристаллической решетки монтмориллонита, является специфическим свойством бентонита, свидетельствующим об активности плоскостей его частиц и высокой их способности адсорбировать воду.

Состав обменных катионов, насыщающих глину, может изменяться под действием солей, содержащихся в воде, на которой готовится глинистый раствор.

В воде ионогенные группы, расположенные на поверхности глинистых частиц, диссоциируют. На катионы ионогенного комплекса действует электростатическое притяжение отрицательно заряженной поверхности минерала. Они удерживают катионы у глинистой частицы, а диполи воды увлекают катионы в окружающую среду. В результате диссоциации ионогенного комплекса частицы глин приобретают отрицательный заряд, а вокруг них в воде диффузно распределяются обменные катионы. Так образуется двойной электрический слой из отрицательного заряда поверхности глинистых частиц и положительного заряда катионов диффузного слоя.

Наличие двойного электрического слоя вокруг глинистых частиц определяет коллоидные свойства глинистого раствора и является важным фактором их агрегативной устойчивости.

При помещении глины в воду происходит процесс адсорбции воды на поверхности глинистых частиц. Первой стадией механизма адсорбции влаги является гидротация обменных катионов. Второй стадией процесса является гидротация поверхности силикатных слоев. Вода, гидратирующая эту поверхность, связана с глинистой частицей

менее прочно, чем вода, идущая на гидротацию обменных катионов. Степень гидротации глинистых частиц зависит от степени их ионизации. Например, частицы натриевого монтмориллонита имеют большую степень ионизации и сильнее гидротированы, чем частицы кальциевого бентонита.

Адсорбция большого количества воды на поверхности многочисленных высокодисперсных частиц приводит к уменьшению остаточного объема воды, поэтому высокодисперсные глины образуют высоковязкие суспензии. Таким образом, каждая частица глины представляет собой мицеллу, которая несет в себе гидратную оболочку и диффузно распределенный двойной электрический слой. Наличие двойного электрического слоя и гидратной оболочки вокруг глинистой частицы определяет агрегативную устойчивость и стабильность глинистого раствора.

Однако глинистые частицы находятся в непрерывном броуновском движении. В результате движения заряженной частицы в системе формируется электрокинетический потенциал, величина которого определяет кинетическую устойчивость глинистой суспензии.

В результате движения глинистые частицы могут соударяться ребрами и гранями (плоскостями). На ребрах глинистых частиц величина некомпенсированных молекулярных сил значительно выше, чем на гранях. Поэтому при благоприятном соударении частиц ребрами гидратные оболочки деформируются и под действием молекулярных некомпенсированных сил происходит соединение глинистых частиц и формирование сетчатого коагуляционного каркаса структуры глинистого раствора. Если глинистый раствор не перемешать и оставить в покое, то силы молекулярного взаимодействия между частицами в течении времени увеличиваются и происходит упрочнение структуры раствора во времени. Это свойство глинистого раствора называется тиксотропией. Прочность структуры глинистого раствора при измерении технологических параметров обычно характеризуются величиной статического напряжения сдвига (СНС). Очевидно, разность величин СНС во времени (через 1 и 10 мин) будет определять степень тиксотропии глинистого раствора.

Структурно-механические параметры промывочных жидкостей.

Промывочные жидкости характеризуются следующими параметрами, определяющими их качество: удельный вес, вязкость, водоотдача, толщина корки, статическое и динамическое напряжение сдвига, стабильность, содержание песка, содержание водородных ионов.

Водоотдача определяет фильтрационные свойства промывочных жидкостей. Статическое и динамическое напряжение сдвига, эффективная и пластическая вязкостиреологические свойства.

Удельный вес- вес единицы объема промывочной жидкости. Удельный вес зависит от содержания твердой фазы выбуренной породы. С увеличением удельного веса возрастает гидростатическое давление промывочной жидкости на стенки скважины, что способствует повышению их устойчивости, и предотвращению нефте-газо водопроявлений.

Условная вязкость характеризует гидравлическое сопротивление промывочной жидкости прокачиванию, ее текучести. Вязкость зависит от состава и содержания глины, химических реагентов и минеральных солей, поступающих в раствор в процессе бурения.

С увеличением вязкости возрастают гидравлические сопротивления в циркуляционной системе, повышается способность раствора закупоривать поры и трещины в стенках скважины.

Водоотдача характеризует фильтрационные свойства промывочных жидкостей, их способность отфильтровывать жидкую фазу под действием перепада давления.

Водоотдача зависит от состава твердой фазы, присутствия химических реагентов и минеральных солей в промывочной жидкости. С уменьшение водоотдачи повышается устойчивость малосвязанных и сильно трещиноватых пород, слагающих стенки скважин.

Реологические характеристики.

Статическое напряжение сдвига – величина касательного напряжения, возникающие на боковой поверхности внутреннего цилиндра, погруженного в промывочную жидкость наружного цилиндра, вращающегося во времени измерения со скоростью 0,2 об/мин.

Характеризует прочность тиксотропной структуры, возникающей в покоящемся растворе, и интенсивность упрочнения во времени (тиксотропность, равную θ_{10}/θ_1 , где θ_{10} и θ_1 - статическое напряжение сдвига через 10 минут и 1 минуту).

С увеличением статического напряжения сдвига повышается гидравлическое сопротивление и прокачиваемость промывочной жидкости и ее способность удерживать буровой шлам во взвешенном состоянии, ухудшается очистка промывочной жидкости от шлама.

Повышение СНС улучшает закупорку пор и трещин промывочной жидкостью и предотвращает ее поглощение.

Динамическое напряжение сдвига (τ_0 в мгс/см²) – постоянная составляющая касательных напряжений (не зависящая от градиента скорости). Характеризует прочность структуры, разрушение которой необходимо для поддержания потока.

Пластическая вязкость ($\eta_{пл}$) в сантипаузах- коэффициент пропорциональности между переменной составляющей касательных напряжений ($\tau - \tau_0$) и градиентом скорости сдвига (не зависит от скорости сдвига). Характеризует вязкостное сопротивление бурового раствора в потоке.

Эффективная вязкость ($\eta_{э}$) в сантипаузах – коэффициент пропорциональности между суммой переменной и постоянной составляющих касательных напряжений и градиентом скорости сдвига. Характеризует полное (прочностное и вязкостное) сопротивление промывочной жидкости в потоке, зависит от скорости сдвига.

Стабильность- способность раствора сохранять частицы твердой фазы во взвешенном состоянии и характеризует агрегативную устойчивость промывочной жидкости. Стабильность определяется разностью удельных весов промывочной жидкости, в верхней и нижней частях мерного цилиндра, во времени (по истечению суток).

Содержание песка характеризует степень загрязнения промывочных жидкостей грубодисперсными фракциями различного минерального состава. Песком (П в %) считают все мелкие обломки выбуренной породы (в том числе комочки переспустившейся глины).

Водородный показатель рН или концентрация водородных ионов характеризует щелочность или кислотность промывочной жидкости. Величина рН промывочной жидкости (или фильтрата) влияет на эффективность обработки химическими реагентами и регулированию ее свойств. Поэтому перед проведением химической обработки следует знать величину рН промывочных жидкостей.

Контрольные вопросы

1. Что такое двойной электрический слой?
2. Необходимое условие агрегативной устойчивости глинистого раствора.
3. Принципы формирования структуры глинистого раствора.
4. Что такое тиксотропия?
5. Основные структурно-механические параметры глинистого раствора.
6. Реологические характеристики глинистого раствора.

Химические реагенты для регулирования структурно-механических параметров промывочных жидкостей.

Для получения промывочных жидкостей с требуемыми свойствами их обрабатывают химическими реагентами. Необходимость таких обработок определяется геологическими условиями разреза скважин. Основными факторами, ухудшающими свойства промывочных жидкостей, является минерализация, увеличение твердой фазы, высокие забойные температуры и давление.

Минерализация промывочных жидкостей происходит в следствие проявления пластовых вод, при разбурировании солей хлоридов натрия калия (каменная соль, карналлит и др.), сульфатов (ангидритов, гипсов) и др. минерализация вызывает изменение большинства параметров промывочных жидкостей. Увеличение твердой фазы (обогащение выбуренной породы) происходит при бурении глинистых пород и при алмазном бурении скальных пород, образующих высокодисперсный шлам. Это приводит к увеличению удельного веса, вязкости, снс.

Забойные температуры и давление, влияют как на фильтрационные, так и на структурно-механические свойства промывочных жидкостей.

Химические реагенты, применяемые для обработки промывочных жидкостей, можно разделить по их основному действию и назначению на следующие группы:

1. Защитные коллоиды;
2. Электролиты;
3. Понижители вязкости;
4. Поверхностно активные вещества;
5. Смазочные добавки.

Защитные коллоиды.

Защитные коллоиды – это высокомолекулярные соединения органического (УЩР, ТЩР, КМЦ, ССБ, крахмал) и неорганические (К-4, РС-2, гипан, метас, М-14), происхождения, обладающие высокими гидрофильными свойствами. Эти реагенты хорошо растворяются в воде и при адсорбции на частицах твердой фазы промывочной жидкости образуют сольватные защитные слои, которые предохраняют частицы от слипания и способствуют стабилизации промывочной жидкости (реагенты стабилизаторы).

Образуемые в элементарных частицах глины защитные слои, а также коллоидные частицы реагентов снижают проницаемость (пористость) фильтрационных корок, повышается их плотность, в связи с чем снижается водоотдача промывочных жидкостей (реагенты – понизители водоотдачи).

Защитные коллоиды, адсорбируясь на активных участках глинистых частиц (гранях и ребрах), уменьшают их связь (сцепление) друг с другом снижая вязкость и статическое напряжение сдвига (понижители вязкости).

Защитные коллоиды органического происхождения

УЩР – углещелочной реагент состоит из 100-150 кг сухого бурового угля и 10-30 кг каустической соды ($NaOH$). Для малоколлоидных кальциевых глин содержание бурового угля составляет 10 %, а $NaOH$ – 2,5 %, а для высококоллоидных натриевых глин содержание бурового угля- 10-15 % и $NaOH$ - 1,8-2,0 %. Максимум стабилизирующего действия УЩР достигается при $pH=11-12$. В кислой среде молекулы УЩР свертываются в глобулы. УЩР снижает водоотдачу, вязкость, СНС. УЩР чувствителен к действию многовалентных катионов кальция и магния, которое сопровождается ростом водоотдачи и выпадением твердой фазы в осадок. Рабочая концентрация реагента составляет 10-20 %.

Сульфит – спиртовая барда (ССБ) является отходом целлюлозно-бумажного производства. Жидкая ССБ содержит не менее 50 % сухого вещества и не более 50 % воды, плотность ее равна 1,28-1,3 г/см³. Твердая ССБ содержит 75 % сухого вещества и 25 % воды.

Действующими агентами в щелочном реагенте из ССБ являются натриевые соли лигносульфоновых кислот.

Обычно реагенты из ССБ приготавливаются следующего состава: для слабоминерализованных вод – 300 г ССБ и 40г *NaOH* на 1 литр раствора, а для сильноминерализованных вод 300г ССБ и 60г *NaOH* (ССБ дается в пересчете на сухое вещество, каустическая сода - в твердом виде).

ССБ снижает водоотдачу, вязкость, СНС. Эффективность действия ССБ повышается в соленой воде. Основным недостатком ССБ является способность к пенообразованию. Рабочая концентрация ССБ 1-5 % в пересчете на сухое вещество.

Конденсированная сульфит - спиртовая барда (КССБ) - является продуктом конденсации сульфит - спиртовой барды (ССБ) с формальдегидом и фенолом в кислой среде, с последующей нейтрализацией *NaOH* до pH=6-7. КССБ выпускается в виде порошка или в виде 20-25 % водного раствора двух составов: с нормальным (КССБ) и с повышенным содержанием фенола (КССБ-1, КССБ-2, КССБ-4). Реагент КССБ-4 предназначен для использования в условиях большой минерализации (свыше 10 % солей) и при температурах выше 130 °С .

КССБ предназначен для уменьшения водоотдачи и снижения вязкости растворов различных типов (известковых, хлоркальциевых), а также минерализованных.

Рабочая концентрация КССБ 1-3 % в пересчете на сухое вещество.

Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) - является натриевой солью целлюлозогликолевой кислоты. Она представляет собой волокнистое вещество желтоватого цвета - КМЦ 300; КМЦ 350 или рассыпчатое твердое вещество кремового цвета КМЦ 400; КМЦ 500; (300, 350, 400, 500- число полимеризации). С увеличением числа полимеризации повышается солестойкость КМЦ. Добавка КМЦ в пресные растворы загущает их, а в соленые- разжижает. Эффективно снижает водоотдачу. Оптимальная pH для использования КМЦ – 6-9. При pH< 6 КМЦ выпадает в осадок. При pH> 9 макромолекулы КМЦ склонны к свертыванию под действием *NaOH*.

Волокнистую КМЦ применяют в виде водного раствора 5-10 % концентрации, приготавливаемого в глиномешалке, а рассыпчатую – в сухом виде.

Рабочие концентрации КМЦ для пресных сред 0,5-0,75 %, соленых сред- 1-2 %.

Модифицированный крахмал (МК-1) - является наиболее эффективным реагентом в условиях минерализации, в том числе и при хлоркальциевой агрессии. Этот реагент представляет собой порошок с влажностью 8-12 %, растворимый в холодной воде.

Приготовление МК-1 путем высушивания при температуре 130-160 °С суспензии обычного технического крахмала, содержащего алюмокалиевые квасцы - антисептическое (противозагнивающее) вещество. Реагент применяется в сухом виде.

Для обработки раствора иногда используют обычный технический крахмал с предварительной клейсторизацией – в виде щелочного водного раствора (крахмальный реагент КР). Количество щелочи составляет 1-1,5 % (на сухое вещество) для неминерализованных вод, 2-4 % для минерализованных вод. Недостаток КР – способность к загниванию.

Рабочая концентрация МК-1, 0,5-3 % по весу от объема в пересчете на сухое вещество. Добавки МК-1 и КР вызывают повышение вязкости раствора, поэтому его применяют совместно с ССБ.

Защитные коллоиды, полученные синтетическим путем.

Акриловые полимеры: гипан, полиакриламид, К-4, метас, сополимер М-14. Отличаются повышенной стойкостью к высоким температурам и минерализации. То обусловлено химическим строением молекул полимеров, наличием в главной цепи углеводородной связи и функциональных амидных и карбоксильных групп.

Гипан – гидролизированный полиакрилнитрил – предназначен для снижения водоотдачи неминерализованных, минерализованных поваренной солью или сульфатом натрия и известковых промывочных жидкостей. Различают две модификации гипана: гипан-1 и гипан-0,7.

Из двух марок большей стабилизирующей способностью обладает гипан-0,7.

Реагент представляет 10 % раствор жидкости, желтоватого цвета.

Гипан весьма чувствителен к солям кальция и других поливалентных металлов. Оптимальные значения рН, при которых гипан является наиболее эффективным, равны 10-12. При больших значения рН или при рН близким к 7, как указывает Э. Г. Кистер реагент может оказывать коагулирующее действие. Гипан сильно загущает пресные буровые растворы. При длительном хранении и при действии низких температур снижаются стабилизирующие действия гипана.

Рабочая концентрация реагента 0,5-2 %. С увеличением минерализации повышается концентрация реагента.

К-4 получают в результате неполного гидролиза полиакрилнитрила в присутствие щелочи. По стабилизирующим свойствам мало отличается от гипана 0,7.

Свежеприготовленный К-4 обладает устойчивым запахом аммиака (нашатырного спирта). По мере хранения запах ослабевает. Перед применением этих реагентов со слабым запахом необходимо произвести проверку на их эффективность в качестве понизителей водоотдачи промывочных жидкостей.

При добавке 0,5-0,3 % К-4 в неминерализованные глинистые растворы резко снижает водоотдачу и СНС. Ростом концентрации К-4 стабилизирующее действие усиливается. Более устойчив к действию $CaCl_2$, чем гипан. Несколько дешевле гипана. Затруднено применение в холодное время.

РС-2- гидролизированный полиакриламид- ГПАА получают путем гидролиза полиакриламида (ПАА) в присутствии щелочи или кальцинированной соды и триполифосфата натрия.

Для этого в глиномешалку объемом 4м³ загружают 600 кг 8 % водного раствора полиакриламида, 60 кг $NaOH$ и 60 кг триполитфосфата натрия ($Na_5P_3O_{10}$). Остальной объем мешалки заполняют водой. Готовый реагент имеет концентрацию полиакриламида 1,5-2 %. Реагент РС-2 наиболее целесообразно применять для снижения водоотдачи неминерализованных промывочных жидкостей с низким содержанием твердой фазы (глины 2-4 %) и естественных суспензии. Для снижения водоотдачи слабоминерализованных промывочных жидкостей целесообразно применять реагент РС-4, представляющий собой гидролизированный полиакриламид с добавками кальцинированной соды.

Гидролизированный полиакриламид весьма чувствителен к ионам кальция и других поливалентных металлов. Оптимальные добавки РС-2 и РС-4 колеблются от 0,2-0,5% (в пересчете на сухое вещество).

Метас - метакриловый сополимер – продукт сополимеризации метакриловой кислоты и метакриламида.

Метас представляет собой порошкообразный препарат белого цвета, трудно растворимый в воде, но хорошо растворимый в щелочной среде небольшой концентрации. Вязкость 2% водно-щелочного раствора метаса превышает 60 спз. Наиболее эффективно применение такого, метаса для стабилизации малоглинистых или безглинистых

промывочных жидкостей. Наиболее активен метас при $pH = 9,0-12,0$. При pH близких к 7,0 добавки метаса резко загущают промывочные жидкости.

М-14- сополимер метакриловой кислоты с метакриламидом. Представляет собой мелкогранулированный порошок белого цвета, растворимый в водных растворах щелочи. Рекомендовано готовить водно-щелочные растворы реагента 5-6 % концентрации при соотношении М-14 к щелочи от 1:0,3 до 1:0,5 (на воздушно-сухое вещество), в зависимости от щелочности обрабатываемой промывочной жидкости. Перед обработкой М-14 в промывочной жидкости определяется содержание ионов кальция и магния. При содержании последних 0,1 % и более для их удаления из системы необходимо применение кальцинированной соды. Расход реагента на химическую обработку неминерализованной промывочной жидкости для снижения водоотдачи до 4-5 см³ составляет 0,5-0,75 % при первичной обработке и 0,1-0,2 % (в пересчете на сухой реагент) при последующих обработках. При повышении минерализации (вплоть до полного насыщения поваренной солью) расход М-14 возрастает до 1,5 %. Гарантийный срок хранения сополимера М-14- один год со дня изготовления.

Электролиты

При обработке или насыщении промывочных жидкостей электролитами происходят обменные процессы между ионами частиц глины и ионами электролитов.

Эффект обработки электролитами зависит от типа и концентрации добавляемых в раствор электролитов (ионов) и их свойств (например, валентности). Стабилизация растворов (снижение водоотдачи) происходит, когда одновалентные катионы Na^+ , Li^+ замещают у поверхности частиц глины двухвалентные или многовалентные катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} . При замещении ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} другими ионами Na^+ , Li^+ происходит структурообразование и коагуляция промывочных жидкостей.

Анионы OH^- и CO_3^{2-} электролитов $NaOH$ и Na_2CO_3 способствуют стабилизации промывочных жидкостей, а анионы Cl^- электролитов $NaCl$ и $CaCl_2$ - структурообразованию и коагуляции.

Кальцинированная сода Na_2CO_3 является одним из наиболее употребляемых реагентов. Она дает возможность получать пригодные для бурения растворы из местных комовых глин, которые без химической обработки не могут быть использованы. Кальциевые глины при обработке кальцинированной содой переходят в хорошо набухаемые и легко диспергируемые натриевые глины, дающие качественные растворы.

Кальцинированная сода - белый мелкокристаллический порошок плотностью 2,5 г/см³. Является одним из основных средств для осаждения ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} - смягчения жесткой водопроводной и пластовой воды.

Она применяется для связывания ионов Ca^{2+} в минерализованных растворах, а также в растворах, содержащих гипс, ангидрид, цемент.

Кальцинированная сода применяется также для повторных обработок промывочных жидкостей, ранее обработанных УЩР. В этом случае оно выполняет роль понизителя вязкости и водоотдачи.

Каустическая сода (едкий натр) $NaOH$ поступает на буровые в твердом виде (в железных барабанах по 100-200 кг) или в виде водного раствора - тяжелой (густой) жидкости различной плотности.

Плотность твердой каустической соды 2,02 г/см³. При получении ее в жидком виде, определив плотность можно подсчитать концентрацию. Для этого также можно пользоваться соответствующими таблицами.

Каустическая сода действует на показатели промывочной жидкости подобно кальцинированной соде. Однако она не обладает способностью удалять из раствора ионы кальция и магния. Она значительно дороже кальцинированной соды и как самостоятельный реагент применяется мало.

Каустическая сода широко применяется для получения щелочных реагентов: УЩР, ТЩР, ССБ, РС-2, СГ и др.

Жидкое стекло (силикат натрия или калия). В бурении в основном применяют натриевое жидкое стекло ($Na_2O_nSiO_2$) с модулем $n = \frac{SiO_2}{Na_2O} = 2,6 - 2,8$.

Водный раствор силиката натрия представляет собой вязкую жидкость от светло-желтого до желто-коричневого и серых цветов.

Жидкое стекло применяют, как правило, при борьбе с поглощениями как для повышения вязкости и статического напряжения сдвига промывочных жидкостей, так и в качестве структурообразователя быстросхватывающихся тампонажных смесей.

При добавлении жидкого стекла к буровому раствору (до 3-5 % по массе от объема) значительно повышаются вязкость и статическое напряжение сдвига. Жидкое стекло способствует повышению рН промывочной жидкости до 12 и выше. С его применением готовят ингибированные промывочные жидкости – силикатные, силикатно-глинистые.

Поваренная соль ($NaCl$) - хлорид натрия используется для улучшения структурно-механических свойств глинистых и карбонатно-глинистых растворов, обработанных защитными коллоидами, в частности УЩР.

Насыщенные растворы поваренной соли используются при проходке пластов каменной соли, в которых вода или пресный буровой раствор, растворяя стенки скважины, образует каверны. применяют также при бурении в сильно набухающих глинах. $NaCl$ применяется как компонент различных солевых растворов.

Известь $Ca(OH)_2$ используется для обработки промывочных жидкостей. При введении 3-5 % $Ca(OH)_2$ к объему промывочной жидкости, значительно повышается вязкость последней. Хорошие результаты дает обработка известью буровых растворов, потерявших восприимчивость к химическим реагентам. При этом получают известковые растворы.

Известь применяется как составная часть для приготовления известковых кальциевых растворов совместно с каустической содой и защитными коллоидами. Известь поставляет ионы Ca^{2+} в буровой раствор и служит также для регулирования рН.

Комплексные фосфаты (полифосфаты) - это натриевые соли ортофосфорной кислоты: гексаметофосфат, пирофосфат, триполифосфат. Белые кристаллические порошки хорошо растворимые в воде. Добавка к глинистому раствору более 1-1,2 % их вызывает загустевание раствора. При меньших концентрациях они применяются как понизители вязкости. Полифосфаты способны эффективно пептизировать в водной среде глинистые агрегаты, и в то же время стабилизировать их, препятствуя обратному агрегированию и структурообразованию. В соответствии с этим полифосфаты, снижая предельное статическое напряжение сдвига, активно разжижают глинистые растворы. Обязательным при этом является соблюдение рН среды порядка 9.

Понизители вязкости

Понизители вязкости служат для регулирования реологических свойств промывочных жидкостей, что способствует их прокачиваемости, снижению гидравлического сопротивления в скважине, более полной очистки их от шлама.

Применение понизителей вязкости исключает необходимость разбавления глинистого раствора водой, которая обычно ухудшает фильтрационные и структурно-механические параметры глинистого раствора. К понизителям вязкости относятся конденсированные фенолы (ПФЛХ) и лигносульфонаты (игетан, окзил, ФХЛС, КССБ).

При введении в глинистый раствор реагенты адсорбируются на активных участках глинистых частиц; экранируют коагуляционно активные участки, предотвращая агрегирование глинистых частиц и ослабляют их структуру. В результате этого снижается вязкость и особенно интенсивно статическое напряжение сдвига.

Щелочь, входящая в состав реагентов, увеличивает емкость обмена, придавая мицеллам реагента развернутую конформацию, способствует стабилизации глинистых растворов.

ПФЛХ – полифенол лесохимический получают из фенольных экстрактов кислых вод методом конденсации. Готовый реагент представляет собой темно-коричневое твердое вещество.

ПФЛХ применяют в виде 5-10 % растворов в соотношении с щелочью от 1:0 до 1:0,5. Реагент проявляет себя как высокоэффективный понизитель вязкости пресных буровых растворов. Действие ПФЛХ оптимально при $\text{pH}=9-11$. Минимальные добавки, вызывающие разжижение глинистого раствора - 0,2-0,3 % (в пересчете на сухое вещество). При больших концентрациях ПФЛХ снижает водоотдачу до 0,5-3 см³.

Игетан – продукт омыления окисленного лигнина кальцинированной содой. Это твердое вещество темно-коричневого цвета хорошо растворимое в воде. Эффективное разжижение промывочных жидкостей различных плотностей и минерализации достигается вводом 0,2-0,5 % игетана.

В присутствии в промывочных жидкостях небольших количеств солей кальция и магния эффективность применения игетана значительно возрастает.

В пресных и слабоминерализованных промывочных жидкостях добавки до 2,0-2,5 % игетана, наряду с разжижением, обуславливают эффективное снижение водоотдачи.

Окзил. Представляет собой продукт, полученный при взаимодействии кальциевой СОБ с бихроматом калия или натрия в кислой среде, с последующей частичной нейтрализацией до $\text{pH}=3,5-4,5$. Реагент выпускается в жидком виде с содержанием сухого вещества 25-27 %. С помощью окзила можно регулировать вязкость и реологические свойства пресных, минерализованных, известковых, гипсовых, хлоркальциевых промывочных жидкостей. Реагент обладает достаточно высокой эмульгирующей способностью.

Добавление 0,5-1 % окзила (в расчете на сухое вещество) в неминерализованные промывочные жидкости понижает их водоотдачу. При химической обработке минерализованных промывочных жидкостей окзил применяют в различных комбинациях с другими реагентами (КМЦ, ССБ, гипаном и др.), что повышает эффективность их действия.

Оптимальные добавки окзила, обуславливающие эффективное разжижение глинистого раствора колеблются от десятых долей до 1 % (в расчете на сухое вещество) в зависимости от минерализации промывочной жидкости, содержания в ней твердой фазы и т. д.

Наибольшая эффективность окзила достигается при $\text{pH}=9-10$. ФХЛС (феррохромлигносульфонат) представляет собой полимер нерегулярного строения, в котором хром и железо находятся в трехвалентном состоянии и связаны в макромолекуле лигносульфоната в виде сложных комплексов.

ФХЛС представляет собой сыпучий порошок коричневого цвета, полностью растворимый в воде. Реагент выпускается Карабулакским химическим заводом (Средняя Азия).

Реагент вводится в циркулирующую промывочную жидкость в виде 30-40 %-го водного раствора или в виде порошка. Одновременно с ФХЛС в промывочную жидкость вводится каустическая сода в количествах, достаточных для поддержания pH в пределах 8,5-9,5. Обычно каустической соды требуется около 20 % от веса ФЛХС в расчете на сухое вещество. Порошкообразный ФХЛС является эффективным понизителем вязкости пресных и минерализованных промывочных жидкостей. Для пресных и среднеминерализованных (до 10-15 % NaCl) промывочных жидкостей ФХЛС является также понизителем водоотдачи. Промывочные жидкости, обработанные ФХЛС стабильны при попадании в них гипса, умеренных количеств соли, цемента.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ)

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) – это, понижающие поверхностное натяжение на границах раздела различных фаз: жидкость-газ, жидкость-жидкость, жидкость – твердое тело.

ПАВ, адсорбирующие на границе раздела фаз жидкость-газ, и, понижающие поверхностное натяжение в пограничном слое, относятся к группе пенообразователей. Они широко применяются для получения аэрированных промывочных жидкостей и борьбе с сальникообразованиями при бурении в обводненных породах с продувкой воздухом. ПАВ – пенообразователи: ПО-1, сульфонол, НП-1, сульфонол А и Б, азолят А и др.

ПАВ, понижающие поверхностное натяжение на границе раздела двух жидкостей, различных по своим физическим свойствам (например, вода-масло), составляют группу эмульгаторов-стабилизаторов эмульсий. В состав эмульсолов входят такие неионогенные ПАВ, как ОП-7, ОП-10. В качестве смазывающих добавок применяются коллоидные ПАВ: ОСГ, ВЖС, кожпастол, мылонафт, ОСЖК и др.

ПАВ, понижающие поверхностное натяжение на границе раздела жидкость-твердое тело и снижающее прочность твердого тела (горной породы), относятся к группе понизителей твердости горных пород: дисольван, превацелл, сульфонол и др.

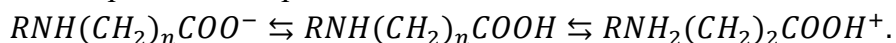
Проявление тех или иных свойств ПАВ, определяющих область их применения, их способность изменять свойства поверхности, на которой они адсорбируются, зависит от состава ПАВ, их молекулярного строения и физико-химических свойств среды.

ПАВ по своему составу делятся на четыре основных вида: 1) анионоактивные; 2) катионоактивные; 3) неионогенные; 4) амфотерные.

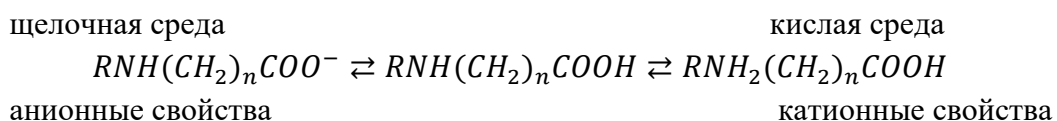
Анионоактивные ПАВ диссоциируют в водном растворе с образованием отрицательно заряженного органического иона и положительного иона металлического и металлоподобного характера, который обуславливает растворимость ПАВ. К числу анионоактивных ПАВ относятся сульфаты первичных и вторичных спиртов, алкилсульфонаты, сульфонаты и др. (например: ПО-1, ДС-РАС, сульфонол НП-1 и др.)
Схема диссоциации:



Катионоактивные вещества при диссоциации в воде образуют положительно заряженные поверхностно-активные ионы (катионы). К ним относятся катионы А, выравнитель А, карбозол О и др.



Амфотерные ПАВ содержат две функциональные группы, одна из которых имеет кислый, другая основной характер, например, карбоксильную и аминную группы. В зависимости от среды амфотерные соединения обладают анионоактивными либо катионоактивными свойствами:



Неионогенные ПАВ, растворяясь в воде, не образуют ионов. Растворимость их в воде определяется кислородосодержащими группами – эфирными и гидроксильными, которые образуют водородные связи с молекулами воды. Обычно это продукты

конденсации окиси этилена с полярными органическими веществами, содержащими подвижный атом водорода (ОП-4, ОП-7, ОП-10).

Анионоактивные ПАВ чувствительны к действию катионов поливалентных металлов, поэтому в минерализованных водах они выпадают в осадок.

Катионоактивные ПАВ обладают повышенной адсорбцией на глинистых частицах, вызывают резкую коагуляцию глинистых растворов. Поэтому их применение сопряжено с определенными трудностями.

Неионогенные ПАВ устойчивы к действию минерализованных вод и в большей степени способствуют смачиваемости породы водой, чем ионогенные ПАВ.

Контрольные вопросы

1. Принципы коллоидной, защиты,
2. Назовите реагенты-защитные коллоиды органического происхождения
3. Назовите реагенты-защитные коллоиды, полученные синтетическим путем.
4. Механизм действия реагентов-электролитов.
5. Назовите реагенты-электролиты и область их применения.
6. Механизм действия реагентов-понижителей вязкости.
7. Назовите реагенты-понижители вязкости и область их применения.
8. Что такое поверхностно-активное вещество (ПАВ)?
9. Классификация ПАВ по химическому составу.
10. Дайте общую характеристику каждой группе ПАВ.

Работа 1

Изучение контрольно- измерительной аппаратуры и определение структурно-механических параметров глинистых растворов

Цель работы: научить студентов самостоятельно измерять параметры глинистого раствора на контрольно-измерительной аппаратуре.

Оборудование и материалы для выполнения работы:

- 1) ареометр АГ-2;
- 2) вискозиметр СПВ-5;
- 3) вискозиметр ВСН-3;
- 4) прибор ВМ-6;
- 5) бланки с логарифмической шкалой;
- 6) фильтровальная бумага;
- 7) прибор СНС-2;
- 8) отстойник ОМ—2;
- 9) цилиндр ЦС-2;
- 10) секундомер;
- 11) кружки объемом 1-3 л.

Порядок выполнения

Изучить устройство приборов и методику измерения структурно-механических параметров.

Отобрав пробу глинистого раствора объемом 1 л, произвести измерение следующих параметров: 1) вязкости; 2) удельного веса; 3) водоотдачи; 4) содержания песка; 5) статического напряжения сдвига через 1 и 10 мин.

При этом условную и пластическую и эффективную вязкость следует определить 3 раза и рассчитать среднеарифметическую величину по уравнению:

$$\bar{T} = \frac{\sum T}{\eta} \quad (1)$$

где $\sum T$ - сумма результатов всех измерений; η - число измерений.

По уравнению:

$$\Delta = 3 \sqrt{\frac{\sum (T - T_i)^2}{\eta - 1}} \quad (2)$$

Сопоставляя полученное значение с каждым отклонением отдельного измерения от среднего арифметического, исключаем недоброкачественные измерения, для которых справедливо неравенство:

$$T_i - \bar{T} > \Delta \quad (3)$$

После исключения таких измерений вновь определяется среднее арифметическое по уравнению (1) и наибольшая ошибка отдельного наблюдения - по уравнению (2). Проверяется, все ли оставшиеся измерения являются доброкачественными, согласно неравенству (3) Определяем среднюю квадратичную ошибку средней арифметической величины:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T - T_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{\Delta}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

записываем полученный результат в виде

$$T = \bar{T} \pm \sigma_0$$

При этом вероятная ошибка среднего арифметического будет равна:

$$\tau_0 = 0,675 = \sigma_0$$

Водоотдачу промывочных жидкостей следует определить путем отсчета как промежуточных наблюдений через 1,2,3,4,5,10,15 и 20 минут, так и конечного результата за 30 минут. Следует обратить внимание на величину погрешности измерения, если

воспользоваться результатами наблюдений за первые пять минут и по ним с помощью бланков на логарифмической бумаге определить водоотдачу за 30 минут.

По уравнению:

$$p = \frac{\gamma_p - \gamma_t}{\gamma_r - \gamma_t} * \gamma_r \quad (5)$$

определить количество глины, содержащееся в глинистом растворе

Здесь p - количество глины в растворе, кг/л;

γ_p и γ_v - удельные веса соответственно раствора и воды, г/см³;

γ_r - удельный вес глины, г/см³.

Для определения γ_r следует взять образец глины небольших размеров; взвесить его и с помощью мензурки, заполненной машинным маслом или керосином, определить объем образца. Отношение веса образца к его объему даст величину удельного веса глины.

Результаты измерений всех пяти параметров глинистого раствора следует привести в конце отчета по лабораторной работе.

Работа № 2

Химическая обработка, глинистых растворов реагентами-понижителями водоотдачи

Цель работы: научить студентов производить химическую обработку глинистых растворов реагентами-стабилизаторами и давать оценку действия каждого реагента.

Оборудование и материалы для выполнения работы:

- 1) комплект приборов для измерения структурно-механических параметров;
- 2) лабораторные весы;
- 3) секундомер;
- 4) реагенты: УЩР, КМЦ, КССБ, гипан, К-4 и др. (не менее 3-х реагентов);
- 5) мерные цилиндры на 25 или 50 см;
- 6) бюретки на 10 мл;
- 7) кружки объемом 1-3 л.

Порядок выполнения работы.

Первоначально готовится углещелочной или торфощелочной реагенты. Для этого в один литр воды следует растворить 20, 40 или 60 г кальцинированной соды, а также добавить 150, 300 или 450 г порошка бурового угля или торфа (каждой бригаде студентов из 2-3 человек преподаватель уточняет рецептуру реагентов). Для ускорения реакции взаимодействия желательно воспользоваться теплой водой.

Перед обработкой глинистого раствора реагент размешивается примерно 30 минут.

Взяв пробу свежеприготовленного глинистого раствора 1,5 л, замерить его вязкость T , водоотдачу V , удельный вес γ , и статическое напряжение сдвига θ_1 и θ_{10} . Затем последовательно обрабатывать раствор углещелочным реагентом четыре раза в количестве 10 % объемных. После каждой обработки измерять водоотдачу раствора.

При определении объема ТЩР или УЩР, потребного для обработки раствора, учитывать изменение объема глинистого раствора, несмотря на то, что относительная концентрация вводимого реагента (10 %) не изменяется.

Результаты измерения водоотдачи при введении УЩР или ТЩР изобразить графически для следующих концентраций реагента 0; 10; 20; 30; 40 %. По оси абсцисс отложить концентрацию реагента, по оси ординат – водоотдачу.

При суммарной концентрации реагента в глинистом растворе 40 %, кроме водоотдачи произвести измерение удельного веса, вязкости и статического напряжения сдвига. Сопоставить начальные и конечные параметры глинистого раствора и обосновать их изменение. Для сравнения эффективности действия различных реагентов-понижителей водоотдачи следует воспользоваться более активными и универсальными реагентами КМЦ или ССБ и обработать свежеприготовленный глинистый раствор соответственно 0,5-1,0 % и 2-4 %. Сопоставить полученные результаты.

В виде выводов привести основные результаты работы.

Работа №3

Химическая обработка глинистых растворов реагентами–электролитами

Цель работы: научить студентов производить обработку глинистых растворов реагентами – электролитами и изучить действие каждого реагента на свойства глинистого раствора.

Оборудование и материалы на свойства глинистого раствора.

- 1) комплект приборов для измерения структурно-механических параметров глинистого раствора;
- 2) вискозиметр ВСН-3;
- 3) лабораторные весы;
- 4) секундомер;
- 5) реагенты: каустическая сода, кальцинированная сода, жидкое стекло, тринатрийфосфат;
- 6) бюретки на 10 мл;
- 7) мерные цилиндры на 25 мл;
- 8) кружки на 1-3л.

Порядок выполнения работы.

Производится измерение основных параметров свежеприготовленного глинистого раствора: вязкости условной, эффективной и пластической (T , $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{пл}}$), водоотдачи, удельного веса и статического напряжения сдвига.

Затем проба емкостью 1 литр последовательно обрабатывается каким-либо одним реагентом. Для кальцинированной соды Na_2CO_3 следует воспользоваться 1 % концентрацией. После введения 10 г соды 3 раза измерить вязкость (T , $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{пл}}$); затем после добавки еще одной порции 10 г повторно измеряется вязкость (T , $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{пл}}$). Так исследование проводится до введения 5 % Na_2CO_3 . В последнем случае измеряются и остальные параметры раствора.

Результаты измерений вязкости (T , $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{пл}}$) при различной концентрации реагентов изображаются графически. По оси абсцисс отложить концентрацию реагента, по оси ординат – вязкость (T , $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{пл}}$).

В случае обработки раствора каустической содой $NaOH$ диапазон концентрации реагента следует применять таким: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 %.

Химическая обработка глинистого раствора может проводиться путем совместного введения двух реагентов, например, каустической соды $NaOH$ и тринатрийфосфата Na_3PO_4 . При этом концентрация какого-либо одного из реагентов принимается постоянной (например, $NaOH$ 2-4 %).

По результатам выполнения лабораторной работы сделать выводы относительно оптимальной концентрации реагентов. Дать обоснование полученному результату.

Результаты наблюдений представляют графически в виде зависимости объема осадка частиц горных пород в нижней части V и количества выделившейся воды в верхней части цилиндра W от времени t .

Каждой бригаде рекомендуется преподавателем какой-либо реагент-стабилизатор для работы (КМЦ, ССБ, УЩР). Оценить седиментационную устойчивость водных суспензий при добавке КМЦ в количестве 2,3 % и 5 %, ССБ – 5, 8 и 10 %, УЩР -10, 15, 20 %.

На основании анализа графиков выбрать оптимальную концентрацию реагента, при которой будут минимальными значения W и V .

Приготовить водную суспензию с 10 % - концентрацией бурового шлама в объеме 700 см³. Ввести в суспензию оптимальную концентрацию реагента – стабилизатора и определить все параметры – T , γ , B , K .

Полученные результаты измерений сопоставляются с параметрами глинистых растворов. Отмечаются отклонения величин различных параметров и целесообразные границы применения естественных растворов в разведочном бурении скважин.

Работа №5

Приготовление и регулирование параметров аэрированных жидкостей

Аэрированные жидкости – это трехфазные системы, в которых жидкая фаза насыщена пузырьками воздуха. Для облегчения процесса аэрации и повышения стабильности аэрированных жидкостей в них вводят поверхностно-активные вещества – пенообразователи (ПАВ).

ПАВ, адсорбируясь на границе раздела жидкой и газовой фазы, повышают дисперсность пузырьков воздуха и устойчивость аэрированного раствора.

Выбор ПАВ для приготовления и регулирования свойств аэрированного раствора производится первоначально по устойчивости и кратности пены с учетом жесткости воды и химического состава растворенных солей.

Устойчивость пены характеризуется временем выделения 50% воды от исходного объема раствора до аэрации.

Кратность пены характеризует пенообразующие свойства ПАВ и представляет отношение объема аэрированного раствора к исходному объему раствора ПАВ.

Цель работы – научить студентов производить оценку пенообразующей способности ПАВ и регулировать параметры аэрированных жидкостей.

Для проведения опыта нужно иметь следующие приборы и материалы:

- 1) химические реагенты: ПО-1, сульфонол и ССБ;
- 2) мерные цилиндры на 100 см³;
- 3) пипетки на 5 и 10 мл;
- 4) пропеллерная мешалка с мерным стаканом емкостью 1 л;
- 5) секундомер;
- 6) комплект приборов для замера параметров промывочной жидкостей;
- 7) кружки на 1л.

Порядок проведения опыта следующий:

Приготовить растворы ПАВ в объеме 100 см³ с концентрациями реагентов:

- 1) ПО-1 или сульфонол – 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5%.
- 2) ССБ – 1,2,3,4,5%.

В мерный стакан мешалки залить раствор ПАВ заданной концентрации и перемешать в течение 30 секунд.

Затем выключить мешалку и определить объем аэрированного раствора. Разделив этот объем на 100, получают кратность пены.

Время, истекшее с момента выключения пропеллерной мешалки до момента, когда из раствора выделится 50 см³ жидкой фазы, является устойчивостью пены.

Результаты наблюдений представляются в виде таблицы:

Концентрация ПАВ, %	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Объем пены, см ³					
Устойчивость пены, сек.					

На основании табличных данных построить графики, откладывая по оси абсцисс – концентрацию ПАВ в %, по оси ординат – устойчивость пены и ее кратность. Согласно графическим зависимостям выбирается оптимальная концентрация ПАВ в растворе.

В соответствии с выбранной концентрацией приготовить в объеме 1 л аэрированный раствор (по заданию преподавателя аэрируется глинистый или естественный раствор).

Затем определяются параметры полученного раствора: T , γ , B , K , θ_1 , θ_{10} . При этом, если с помощью стандартного ареометра удельный вес замерить не удается, то это делается простым путем, взвешивая определенный объем раствора и деля полученный вес

на объем. Водоотдачу аэрированного раствора определяют вакуумным методом или с помощью модернизированного прибора ВМ-6М.

Полученные результаты исследований анализируют и дают оценку качества аэрированного раствора.

Работа №6

Приготовление и регулировании параметров утяжеленных промывочных жидкостей

Утяжеленные буровые растворы применяются для предотвращения водо-газо-нефтепроявлений и при бурении в соляных толщах для подавления пластического течения соли.

Чтобы предотвратить выбросы воды, нефти и газа из скважины, утяжеленный раствор должен обеспечивать такое гидростатическое давление, которое бы превышало давление в пласте на 10 %.

В качестве утяжелителей применяют инертные минеральные вещества с достаточно высоким удельным весом, от 2,5 до 7 г/см³: барит, железные руды (гематит и магнетит) и железные отходы (колошниковая пыль и пиритовые огарки), мел, доломит, известняк, концентраты свинцовых руд и т. д.

Утяжелители должны отвечать следующим требованиям: быть инертными веществами (не иметь химических примесей, ухудшающих свойства буровых растворов), обладать малой абразивностью, иметь достаточно высокую дисперсность частиц (число частиц в 1г - $350 \div 400 \times 10^8$ или средний эквивалентный диаметр частиц около 2,5 мк)

Такие утяжелители как мел, доломит и известняк позволяют утяжелить раствор до $\gamma = 1,7$ г/см³.

Железистые утяжелители обладают рядом недостатков: высокая абразивность, наличие агрессивных примесей: окислов железа, сульфидов и сульфатов, которые ухудшают свойства буровых растворов.

Наилучшими качествами и высокой утяжеляющей способностью обладают барит, который позволяет получать утяжеленные растворы с $\gamma = 2,2-2,4$ г/см³.

Цель работы – изучить студентам утяжелять глинистый раствор и производить регулирование его структурно-механических свойств.

Оборудование и материалы для выполнения работы:

- 1) комплект приборов для измерения параметров промывочных жидкостей;
- 2) секундомер;
- 3) лабораторные весы;
- 4) пикнометр;
- 5) реагенты: барит, гематит, мел;
- 6) кружки на 1л.

Выполнение работы

Для утяжеления необходимо приготовить качественный глинистый раствор с достаточно прочной структурой $\theta = 20 - 40$ мг/см² и $V = 10$ см³/30 мин.

Необходимо измерить все параметры исходного раствора.

Затем задается удельный вес, до которого нужно утяжелить глинистый раствор.

Расчетное количество утяжелителя в кг необходимое для утяжеления 1л раствора, определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{ут}} = \frac{\gamma_{\text{ут}}(\gamma_{\text{ут.р.}} - \gamma_{\text{р}})}{\gamma_{\text{ут}} - \gamma_{\text{ут.р.}}}$$

где $\gamma_{\text{р}}$, $\gamma_{\text{ут.р.}}$ - удельный вес глинистого раствора до и после утяжеления в г/см³;

$\gamma_{\text{ут}}$ - удельный вес утяжелителя.

Расчетное количество утяжелителя взвешивается на аналитических весах и добавляется в глинистый раствор. Глинистый раствор с утяжелителем перемешиваются в лабораторной мешалке в течении 3-5 мин. Потом замеряется удельный вес и остальные параметры: T , γ , B , K , θ_1 , θ_{10} .

Для разных бригад студентов можно дать разные виды утяжелителей: мел, барит, гематит. Дать задание утяжелить глинистый раствор до одного и того же удельного веса.

Затем необходимо сравнить показания замеров параметров и оценить качество утяжелителя по величине его расхода и изменению свойств промывочной жидкости.

Оформление отчета

По каждой проведенной лабораторной работе составляется отчет, в котором приводятся схемы применяемых измерительных приборов (лабораторная работа №1), результаты химической обработки промывочных жидкостей различными реагентами (в виде графиков). Дается подробное описание механизма действия каждого реагента и выбор оптимальной концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения промывочных жидкостей с заданными структурно-механическими параметрами для конкретных геолого-технических условий необходимо знать свойства и состав исходного сырья (глины, воды), применяемого для приготовления глинистого раствора.

В методических разработках приведен достаточно широкий ассортимент химических реагентов и дана полная их характеристика, которая позволит правильно производить выбор химических реагентов для повышения качества промывочных жидкостей с учетом свойств исходного сырья и геолого-технических условий бурения скважин.

Изложенная методика по оценке свойств различных видов промывочных жидкостей дает возможность научно обоснованно подходить к вопросам регулирования их структурно-механических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авидон В. П. Предварительные испытания глин в полевых условиях. М.: «Недра», 1968.
2. Зарипов С. З. Лабораторный контроль при бурении нефтяных и газовых скважин. М.: «Недра», 1977.
3. Кистер Э. Г. Химическая обработка буровых растворов. М., «Недра», 1972.
4. Овчаренко Ф. Д., Круглицкий Н. Н., Ничипоренко С. П. и др. Термосолеустойчивые промывочные жидкости на основе палыгорскита. М.: «Недра», 1970.
5. Городнов В. Д. Физико-химические методы предупреждения осложнения в бурении. М.: «Недра», 1977.



ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

Методические указания

по самостоятельной работе

по дисциплине

«Горизонтально-направленное бурение»

для студентов специальности

21.05.03 – Технология геологической разведки

Технология и техника разведки МПИ

Екатеринбург
2018

Технология бурения горизонтальных направленных скважин (ГНБ)

Общие положения метода бурения

По данным немецких источников метод заключается в управляемой системе гидробурения. Энергия, вырабатываемая с помощью силовой установки, передается сначала на гидравлическую систему (гидравлические двигатели, и насосы), а потом поступает на поршневые насосы для получения смеси воды с бентонитом (суспензии), которая используется для того, чтобы выбивать куски пород на пути бурения.

Экологически чистый бентонит придает струе шлама целый ряд необходимых для бурения (проходки) свойств. Одним из них является смазка штанг, режущего инструмента (буровые головки) и труб. Однако более важным является способность струи разрушать и поднимать вокруг себя частички грунта, держать их во взвешенном состоянии и выводить из скважины. Там его собирают и обезвреживают.

Буровой головкой можно управлять, контролируя направление струи из сопел, которые установлены под углом 15° к оси, буровой головки. Так как сила истечения суспензии из гидробурильной головки может быть направлена в одно из восьми направлений, то головкой можно управлять.

Благодаря поступательному движению штанг, скошенная бурильная головка прокладывает себе путь в грунте с помощью вымывания грунта струей промывки. Бурильная головка может продвигаться вперед и без регулировки, только благодаря вращению. Струя шлама удаляет с пути проходки частицы грунта во все стороны, образуя прямолинейный ствол скважины (см. рис. 1).

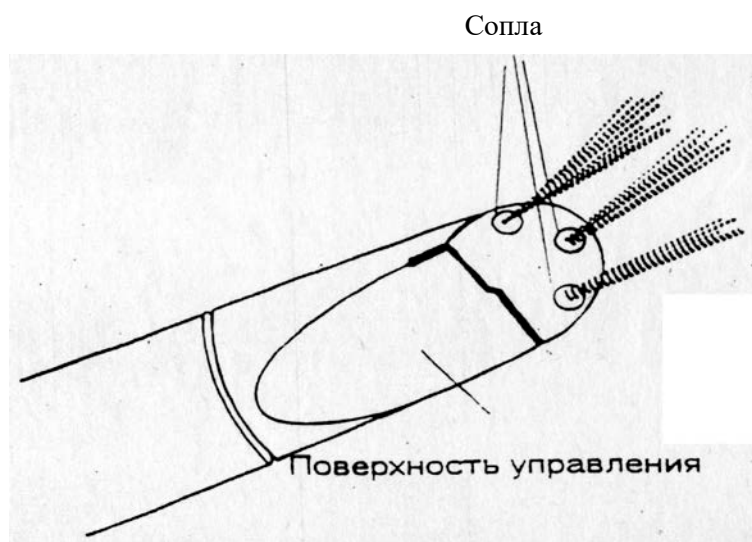


Рис. 1.

Технология бурения заключается в том, что для каждого типа грунта необходимо подобрать и выдерживать оптимальную комбинацию давления,

размера сопла, количества бентонита и вязкость суспензии, скорость прямого и обратного хода (перемещения бурильного вала).

Создаваемый при бурении, а затем расширении, диаметр скважины должен быть достаточно большим, чтобы пропускать через себя буровую головку, бурильную жидкость и части грунта, поднимаемые струей шлама.

Существуют 3 основных буровых параметра, которые должны быть выдержаны для бурения ГНБ:

- затраченное усилие;
- время соприкосновения с грунтом;
- расстояние проходки.

Эти переменные величины контролируются с помощью регулирования давления смеси, размеров сопла и скорости подачи и тяги (перемещения вала).

Рассмотрим каждую из этих величин и их влияние на технологию ГНБ.

Затраченное усилие

Усилие складывается из давления смеси в пределах от 0 до 100 бар и размера регулируемого сопла. Большой размер сопла создает более сильную струю, т.е. создаются условия для прохождения большего количества суспензии при низком давлении. Более сильная струя в состоянии создать и передать большее усилие. *Скорость потока в скважине должна составлять 0,5 м/сек.*

Время соприкосновения с грунтом

Время соприкосновения с грунтом пропорционально зависит от скорости подачи/тяги. Чем дольше струя будет воздействовать на определенную площадь, тем больше энергии поступает на нее.

Проходка

Проходка является результатом произведенного усилия и состава грунта. Сила давления струи естественно теряет свою энергию, удаляясь от сопла. Проходимые грунты могут быть мягкими, имеющими небольшое сопротивление, позволяющее проходить большие расстояния, а также такими, которые требуют большого давления, создаваемого в непосредственной близости от сопла. Поэтому, проходка определяется усилием и временем соприкосновения с грунтом.

Обратимся к вопросу использования параметров проходки и правильно-му формированию профиля скважины. Скважина должна быть достаточно широкой для прохождения буровой головки и отвода разрушенного грунта. Ошибки, возникающие при формировании недостаточного диаметра, вызывают «заглушки» или «подрезки». Под «подрезкой» понимается такое положение, при котором затрачивается на проходку большее усилие, чем необходимо.

Ни «подрезка», ни расширение скважины не дают нужного диаметра. Правильное использование всех параметров проходки зависит от знаний свойства грунта.

Первым шагом для формирования диаметра скважины является сбор информации о состоянии грунта на протяжении всей трассы скважины. Для этого следует использовать пробное бурение, разведочные скважины и пробы грунта при земляных работах. Скважина формируется только тогда правильно, когда вызванное давлением смеси усилие отбрасывает грунт на оптимальное расстояние от буровой головки. Скважина должна быть достаточно широкой для буровой головки и смеси бентонитовой суспензии с частицами грунта. Такая смесь называется «буровой массой». В идеальном случае это должно происходить при максимальной скорости подачи/тяги для поддержания высокой производительности.

Одновременно должен быть соответствующим и размер сопла, чтобы подавать нужное количество суспензии с целью удержания вымытого грунта во взвешенном состоянии и его вынос из скважины. Неправильное использование данных параметров происходит из-за неверного выбора давления суспензии, размера сопла и скорости подачи/тяги, что и вызывает сужение или расширение скважины и связанные с этим проблемы.

Сужение скважины является ошибкой, возникающей при невозможности выноса грунта вокруг буровой головки. Такое может случиться независимо от техники проходки, когда твердость грунта превышает возможность проходки. Сужение наступает также в случае, если затраченное усилие недостаточно для отвода грунта вокруг бурильной головки, чтобы и грунт и головка могли без препятствий двигаться.

Сужение сопровождается различными проблемами. Если, например, частицы грунта за буровой головкой не могут свободно протекать, то перед буровой головкой возникает препятствие – давление суспензии.

С увеличением удельного веса грунта увеличивается и давление суспензии, которое выдавливает смесь вверх. Давление, чуть более 1 бара на 1 кв.см. поднимает до 1 кг грунта. Давление же в 10 бар на площадь в 1 кв.м способно поднять 100 т.

Представьте себе, что буровой инструмент может создать давление в 10 бар. Уплотнительные свойства бентонита способствуют возникновению пузыря, который передает давление дальше. Проезжая часть дороги, места парковки и другие плотные поверхности могут быть приподняты. К ним относятся также и глинистые почвы. Даже плотно заросшие газоны, как это часто бывает на практике, можно приподнять.

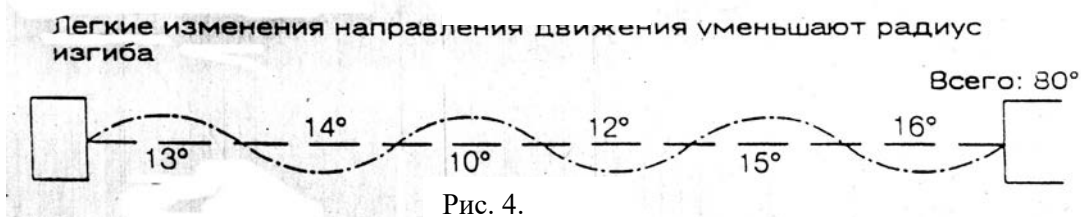
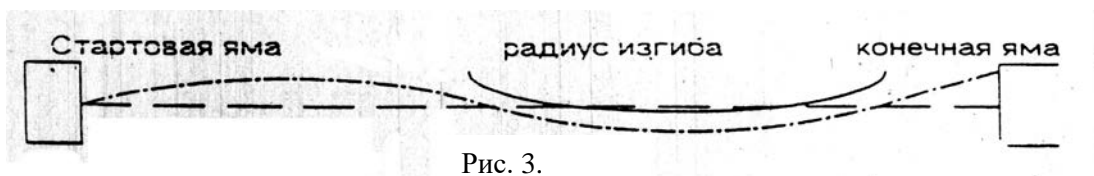
Если буровая масса может выходить на поверхность, то это вызывает проблемы с техникой безопасности и вызывает расходы на очистку территории. Такое явление называется «пузырение».

Другая важная проблема, которая возникает в связи с сужением скважины, вызвана неверными командами управления: «заглушка» легко возникает тогда, когда заданный режим бурения длится очень долго, так как буровой

инструмент проходит за время действия данной команды менее 1/3 сечения скважины. Струя суспензии в непосредственной близости от буровой головки наиболее мощная. Из-за сцепления между буровой головкой и поверхностью стенок скважины буровая смесь не имеет выхода, а увеличивающееся давление создает вздутие поверхности.

Так как поверхность управления буровой головки тесно соприкасается со стенками при максимальном угле, то это определяет прямую зависимость скорости подачи команды и производительности бурения.

Резкие смены команд управления вызывают сильные нагрузки на буровой инструмент и буровые штанги, так как нарушаются оптимальные радиусы их изгиба. Быстрая подача одних команд вызывает обычно команды обратного действия, чтобы скорректировать первые. Это приводит к «зигзагообразному» движению, которое усиливает сопротивление движения буровых штанг, разработку скважины, увеличивает продолжительность движения головки и снижает точность проходки (см. рис. 2, 3, 4, 5). Все это вызывает снижение производительности буровых работ.



Команды, отдаваемые на короткое время, вызывают обвал скважины и другие проблемы. Точная локация и полное восприятие перемещений бурового инструмента снижает необходимость больших корректировок. Между корректировками перемещения головки необходимо включать вращение, чтобы сократить возникновение зон обвалов.

Расширение скважины происходит тогда, когда затрачено очень большое усилие, вызванное неправильным выбором величины давления суспензии, размером сопла и скорости подачи/тяги при определенных характеристиках грунта.

При расширении скважины резко увеличивается «буровая масса». Так, скважина диаметром 65 мм имеет площадь сечения 34 кв.см, а диаметром 100 мм – свыше 78,5 кв.см, поэтому количество выводимой массы более чем удваивается.

Если расширение скважины сопровождается чрезмерным давлением и маленьким размером сопла, то это означает, что количество суспензии недостаточно для поддержания вымытого грунта во взвешенном состоянии и его вывода из скважины. Грунт, который не выводится из скважины, может вызывать затруднения в управлении головкой и ее отклонении от заданного направления. Слишком «тяжелый» поток выводимого грунта часто становится причиной «закупорки». Слишком большое расширение скважины приводит к тому, что буровая головка полностью перестает слушать команды, потому что управляемая поверхность буровой головки не соприкасается со стенками скважины.

Вес бурового инструмента и буровых штанг вызывает еще и силу, которая направлена вниз и увлекает туда и буровую головку.

Мы говорили о сужении и расширении скважины. Рассмотрим, как это влияет на процесс работ по расширению скважины пилотного бурения. Например, если мы хотим пробурить скважину диаметром 225 мм, а вместо этого получили расширение в 255 мм, то разбуриваемая площадь увеличивается с 397 кв.см до 510 кв.см и при расходе 75 литров в минуту невозможно вынести шлам. Сила тяги на протягиваемую трубу возрастает, а суспензии для достаточной смазки не хватает, поэтому снижается скорость подачи трубы.

Ситуацию усугубляет также **длительное время соприкосновения с грунтом** (время проходки относительно определенного расстояния), которое еще больше увеличивает площадь проходимого сечения, тем самым удваивая объем разбуриваемого грунта. Это может привести к превышению допустимых значений прочности протягиваемой трубы.

Особенно трудное расширение в длинной скважине является причиной обвалов, которые, в свою очередь, приводят к оседанию поверхности земли над ней. Это особенно опасно при работе под проезжей частью дорог.

Расширение при протягивании труб происходит потому, что скорость тяги не снижают настолько, чтобы усилие было направлено только на проходку скважины перед расширяющей головкой. Буровая установка имеет высокую мощность тяги по сравнению с относительно более низкой мощностью силы

бурения (силы продавливания). Так, для расширения скважины с 65 мм до 225 мм необходимо вывести из скважины грунта в 11 раз большего объема.

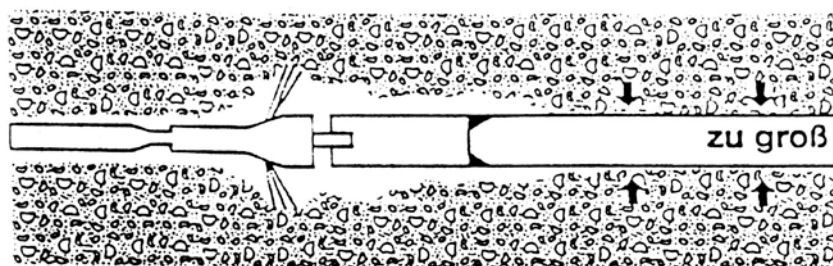


Рис. 6. Неправильное (зауженное) получение свободного пространства

Слишком малое расширение приводит к соприкосновению поверхности расширительной насадки со стенками скважины и сцеплению с ними. Поступательное движение головки вдавливает грунт, а не выводит его вокруг расширительной головки в уже пробуренную скважину. Расширительная головка работает как скребок, в результате чего повышается сила тяги трубы. Выбуренная масса грунта быстро распределяется, создавая при этом давление, направленное в их сторону. Если при этом предел прочности растяжения трубы еще не достигнут, то работу в таком режиме можно будет продолжить, откорректировав параметры проходки и снизив давление на стенки с помощью промывки.

Особенно мощное расширение происходит в том случае, когда рабочая поверхность расширительной головки в плотных грунтах полностью соприкасается со стенками скважины, что приводит к тому, что расширяющая головка уплотняет поверхность стенок скважины вместо того, чтобы выводить грунт. При этом уплотненный грунт обваливается и практически запирает канал. Давление «буровых масс» усиливается, и они начинают выходить на поверхность и вспучивать жесткие покрытия. Сопла расширительной головки вкачивают суспензию в грунт вместо того, чтобы уплотнять стенки; они обваливаются на протягиваемую трубу.

Хотя увеличивающаяся сила тяги имеет достаточно времени, чтобы замедлить движение расширяющей головки и скорректировать условия расширения скважины, спасти работу практически невозможно. Несмазанная, свалившаяся порода стопорит движение трубы. Дальнейшие попытки приводят лишь к превышению допустимых нагрузок.

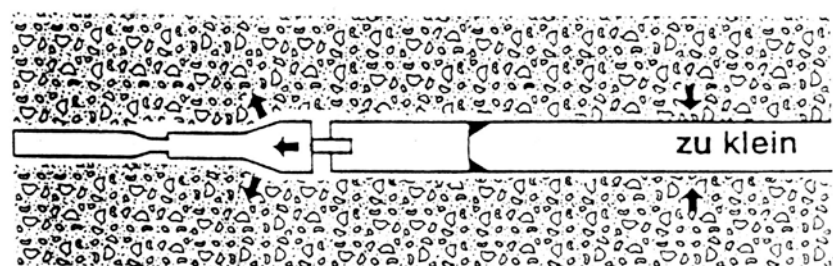


Рис. 7. Слишком малое свободное пространство при расширении

«Резьбовая» поверхность стенок скважины возникает при чрезмерной интенсивности работы в режиме расширения. Сопла вращающейся расширительной головки, оставляют на стенках скважины следы, которые возникают в результате или слишком малого времени соприкосновения головки со стенками, или же расстояние проходки для одного или нескольких сопел чрезмерно большое.

Эти следы на стенках скважины ослабляют прочность стенок, увеличивают зоны рыхлости и обвала. Радикальное смещение сопел на буровой и расширительной головках приводит иногда к изменению ситуации.

Теперь, когда мы получили представление о расширении и сужении канала бурения, а также сопутствующих проблем, следует поставить вопрос – каким образом можно все это предотвратить? Для этого необходимо соблюдать параметры проходки, размеры сопла, скорость подачи и тяги, а также учитывать свойство грунтов. **Следите за перепадами давления. Это единственная рекомендация для достижения успеха.**

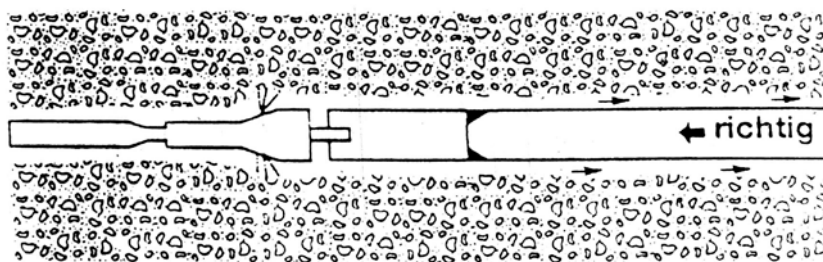


Рис. 8. Правильно полученное свободное пространство при расширении

Слишком малый поток выходящей из скважины породы к стартовой или конечной яме является признаком обвала в результате сужения или расширения канала.

Постоянный поток бентонита вперед или назад дает максимальную гарантию хорошего бурения.

Перепад давлений является самым точным и постоянным признаком процесса бурения. Для ввода в грунт буровых штанг и протягивания труб в хорошо смазанную и сформированную скважину требуется незначительное усилие. Следите при этом и за перепадом давления.

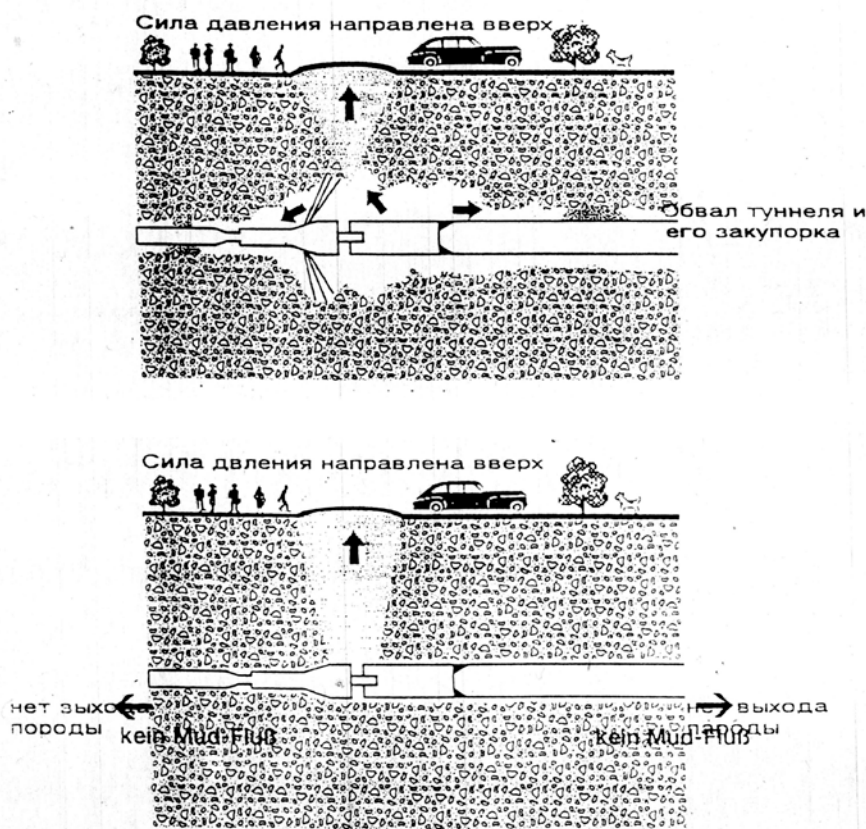


Рис. 9. Слишком маленькое свободное пространство при расширении канала туннеля

Что такое перепад давлений?

Под перепадом давления понимаются сравнительные показания манометра силы подачи и силы тяги. Разница в показаниях давления отражает рабочую мощность мотора или масляного насоса. Максимальная разница в 130 бар при втягивании трубы возможна, хотя действительная мощность подачи составляет всего 70 бар. Это значение соответствует действительной силе тяги в 65 кН при давлении 200 бар.

Если гидромоторы работают без нагрузки, то возникает незначительный перепад давлений. При рабочем усилии в 60-80 бар в режиме проталкивания и протяжки труб практически всегда формируется канал бурения.

Если продвижение прекращается из-за появившихся **камней** или **других препятствий** в грунте, то сила толкающего давления увеличивается, так как масляный насос работает на полную мощность.

Вращение головки вызывает лишь незначительные перепады давления, так как при вращении прорезается только сечение скважины.

Перепады давления, вызываемые **сменой команд** управления, не должны превышать разницу давлений при вращении, более **чем на 40 бар**. Перепад давления менее 40 бар является идеальной предпосылкой для прокладки скважины нужного диаметра.

Очень малый перепад давления или его полное отсутствие **однозначно указывает** на опасность резкого расширения. Если процесс расширения продолжается более нескольких метров, то этот отрезок туннеля может обвалиться.

Если отрезок туннеля, подверженного расширению или сужению, составляет более одной/двух буровых штанг, то на лицо аварийная ситуация. Корректировка параметров проходки в данном случае не даст существенных результатов.

Тенденция к сужению скважины в процессе расширения канала учитывается конструкцией рабочих инструментов. Усилие, требующееся для обратного хода, соотносится к буровому усилию как 2:1 и создает перегрузку для всех элементов, находящихся в скважине.

Такое соотношение усилий можно не учитывать, если пилотный канал будет расширен расширительной головкой, а сужение происходит от того, что обратное движение инструмента шло быстрее, чем вывод породы.

Только при учете различных факторов можно достигнуть правильного формирования скважины.

Таким образом, существуют многие признаки правильной и неправильной проходки, которые позволяют изменять параметры прокладки скважины для получения хороших результатов.

Рекомендуется следующий выбор буровых головок и сопел в зависимости от типа грунта.

Таблица 1

Тип буровой головки (сопла)	Тип грунта			
	мягкий	песок	средней плотности	плотный
Буровая головка Грундодрилл ДЖЕТ 100-210	–	–	X	X
Разрушающая буровая головка ДЖЕТ 00-215	–	X	X	–
Малые сопла от 1,0 ÷ 1,5 мм и от 1,5 ÷ 2,5 мм	–	–	X	X
Большие сопла от 2,3 до 3,0 мм	X	X	–	–

Расширительные насадки фирмы «Тракто-Техник» могут быть использованы для грунтов класса 1-5. Они должны иметь как минимум 40 мм свободного пространства.

Разработка ГНБ начиналась первоначально с простого метода технологии бестраншейного способа проходки скважин – метода «прокола», т.е. образования скважины за счет уплотнения массива грунта. Необходимое для прокола усилие (обычно 150-2000 кН) прямо пропорционально квадрату радиусов сечения скважины, т.е. этот метод относится к проходке скважин для труб малого диаметра. Важнейшее значение имеет свойство грунта (пористость и коэффициент трения стали о породу), а также длина скважины и масса труб.

Различают «механический» прокол, гидропрокол (имеется гидронасадка) и вибропрокол (используются вибромолоты, обеспечивающие продольно-направленные колебания).

Если при проколе грунт, вытесненный из скважины, попросту «вдавливается» в стенки скважины, то при продавливании он, подобно керну при колонковом бурении, поступает в снаряженную ножом трубу, что позволяет работать с трубами гораздо большего диаметра (до 2000, а отдельных случаях даже 3000 мм). Проталкивание, трубы, как и при проколе, осуществляется домкратами. Давление передается через наголовник сменными нажимными удлинительными патрубками, шомполами или зажимными хомутами. Труба (стальная или железобетонная) вдавливается циклически, путем попеременного переключения домкратов на прямой и обратный ход. Прилагаемое усилие до 3000 кН.

Возможно использование виброударных установок, гидроразмыва, комбинации гидромонитора, размывающего грунт, и шнека, его удаляющего.

Длина продавливания составляет обычно до 100 м. Скорость проходки при применении гидравлических домкратов - до 10-12 метров в смену. Работы могут вестись как с разрушением, так и без разрушения старой трубы.

Этот метод имеет ограничения по областям применения – наличие в разрезе скважины твердых горных пород или иных аналогичных препятствий.

Микротоннелирование можно считать своего рода симбиозом технологий горизонтального бурения и продавливания (конечно, очень далеко ушедшим от своих прародителей). Этот метод основан на строительстве тоннеля с помощью дистанционно управляемого проходческого щита, выдвигаемого из заранее подготовленной стартовой шахты. После завершения проходки (а она может вестись в прямолинейном или криволинейном направлении) его извлекают из приемной шахты.

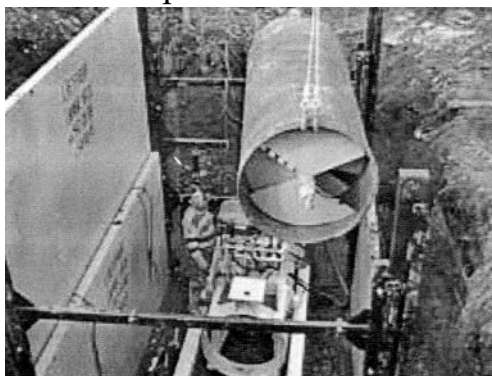


Рис. 10. Оборудование для микротоннелирования компании Herrenknecht AG.

Что означает приставка «микро»? Канадская фирма Lowat относит к этому классу технику для тоннелей диаметром до 1500 мм. В московском руководстве по применению микротоннелепроходческих комплексов и технологий микротоннелирования при строительстве подземных соору-

жений и прокладке коммуникаций закрытым способом сказано: «Микротоннелирование - процесс строительства подземного сооружения круглой формы поперечного сечения с диаметром от 200 до 2000 мм с использованием управляемых установок без присутствия людей в забое». Впрочем, иногда к микротоннелям относят тоннели диаметром 3000 мм.

От продавливания микротоннелирование отличается большей длиной проходки (до 500 м, а при необходимости до нескольких километров), скоростью и точностью (независимо от длины трассы она контролируется компьютерным комплексом с применением системы лазерного ведения). А кроме того, минимизацией затрат и материальных ресурсов. Импульс ускоренному развитию этой технологии в России дало не только появление эффективной техники (Lovat, Robbins, Herrenknecht AG), но и приход в нее квалифицированных специалистов из свернувших свою работу в середине 90-х годов метростроев.

С помощью микротоннелирования можно «пробиться» через грунты любой категории - от неустойчивых суглинков и водоносных песков до скальных пород, работать в смешанном забое, не бояться появления в грунтовом массиве по трассе крупнообломочных включений, валунов, гальки и щебня.

Для прокладки микротоннелированием используются самые разные трубы: полимербетонные, железобетонные, керамические, стеклопластиковые, асбестоцементные.

Разработана линейка (ряд) установок для данной технологии, например «ТТ-Ground bur st», установки шнекового бурения «60-1200 G2, «P40» и «P80» зарубежного производства и «ИП-4610», «СО-166» – отечественного. Наибольшего успеха достигла Германия, которая выпустила более 11 типов установок и Швейцария – 26 установок.

Основные требования организации и технологии работ

С начала 2001 г. в России распространение получила технология бестраншейной прокладки трубопроводов методом горизонтального направленного бурения (ГНБ), которая позволяет осуществлять прокладку коммуникаций – трубопроводов и кабелей на большой глубине и большой протяженности.

Установка ГНБ позволяет осуществлять:

- бестраншейную прокладку трубопроводов в условиях, где нет возможности применять землеройную технику;
- прокладку трубопроводов под автомобильными дорогами и железнодорожными путями без разрушения дорожного полотна и насыпи; под или над подземными коммуникациями; под зданиями и сооружениями ниже их фундаментов; под дном небольших водных преград.

Основными факторами, ограничивающими возможности применения технологии ГНБ являются: крупнообломочные грунты, грунты с включением

валунов и гальки, грунты песчаные, глинистые и гравелистые (с содержанием гравия более 30%); невозможна прокладка трубопроводов в плывунах (при коэффициенте текучести грунта >1) из-за невозможности создания стабильного бурового канала; затруднена прокладка трубопроводов в **рыхлых** песках (при коэффициенте пористости $> 0,7$) из-за сложности создания прочных стенок скважины.

Основными производителями установок ГНБ являются компании Vermeer, Ditch Witch, Robbins Tracto-Technik, Straightline, American Augers, Case и др.

Классификация установок ГНБ по тяговым усилиям и основным техническим характеристикам типовых представителей установок различных компаний-производителей приведены в табл.4.8.

Между тяговым усилием установок ГНБ, длиной скважины и диаметром прокладываемого в буровой канал трубопровода имеется жесткая взаимосвязь, изображенная на рис. 11. Пользуясь данными графика рис. 12 и табл. 2 можно быстро и точно определить тип (модель) требуемой установки ГНБ.

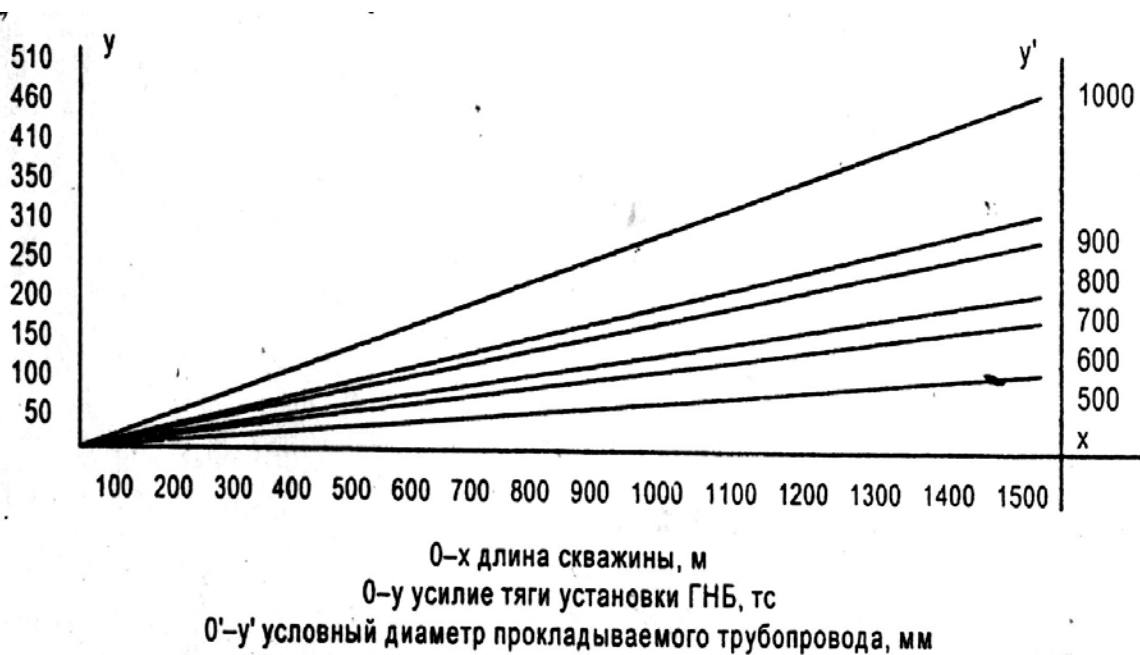


Рис. 11.

Технологический процесс бурения и прокладки инженерных коммуникаций по технологии ГНБ состоит из следующих этапов:

- планирование и расчет траектории бурения, организация места работ;
- пилотное бурение;
- расширение пилот-скважины и протягивание трубопровода.

Подготовительные работы

После перевозки установки ГНБ и сопутствующего технологического оборудования с базы механизации на объект производства работ, для выполнения буровых работ подготавливается площадка для размещения:

- буровой установки;
- генератора;
- контейнера для хранения строительных материалов;
- служебных помещений для персонала;
- приводного блока;
- подставки для хранения буровых штанг и т.д.

Производится отрывка котлована для бурового входа и котлована для временного хранения использованной буровой смеси.

Принципиальная схема размещения установки ГНБ на площадке приведена на рисунке.

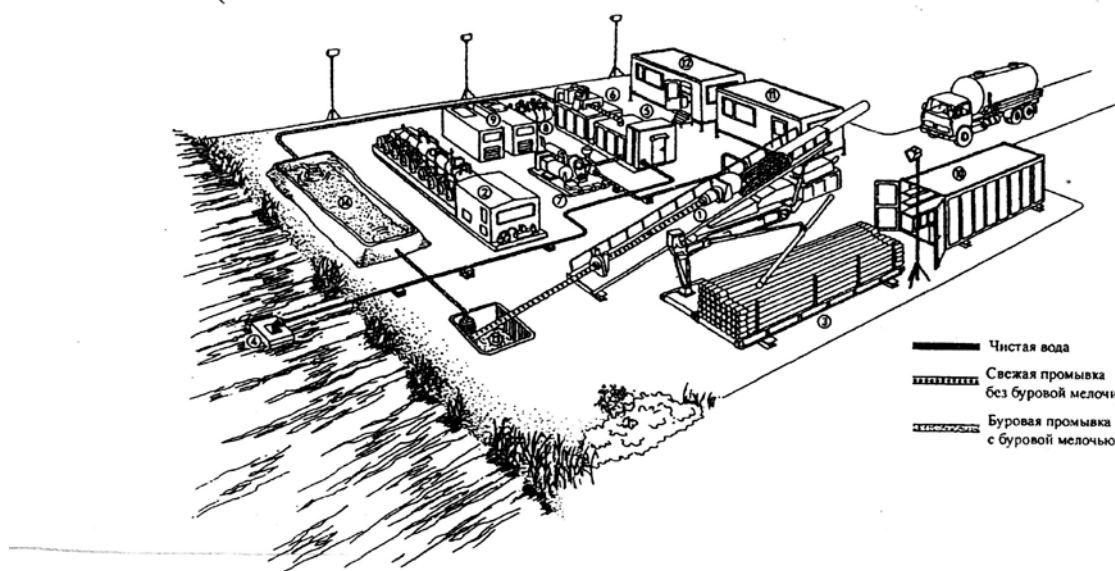


Схема размещения установки ГНБ на строительной площадке

- | | |
|--|--|
| 1. Буровая установка ГНБ | 8. Генераторы |
| 2. Пульт управления (приводной блок) | 10. Контейнеры для материала |
| 3. Склад буровых штанг | 11, 12. Служебные и бытовые помещения |
| 4. Водяной насос | 13. Буровой вход |
| 5. Промывочный блок | 14. Котлован для временного хранения использованной промывки |
| 6. Резервуар для приготовления буровой смеси | |
| 7. Промывочный блок | |

Рис. 12

Установка ГНБ устанавливается в точке бурения, закрепляется анкерными стойками и фиксируется упорными устройствами, рассчитанными на двойное тяговое усилие, которое может развить установка.

Место производства буровых работ следует огородить. Ширина ограждения должна составлять не менее 1,5 м.

Прокладка подземных коммуникаций по технологии ГНБ осуществляется в следующие этапы.

Подготовительный этап

Планирование и расчет траектории бурения скважины

Перед началом работ тщательно изучаются свойства грунта (это влияет на выбор инструмента и состав буровой жидкости); выясняется дислокация подземных коммуникаций (может быть выборочное зондирование грунтов, а, при необходимости, шурфление особо сложных пересечений трассы бурения с существующими коммуникациями); оформляются соответствующие разрешения и согласования; рассчитывается траектория бурения (углы входа и выхода бура по отношению к поверхности земли с учетом допустимых радиусов кривизны плети штанг).

Организация места работ

Непосредственно бурению предшествуют доставка, выгрузка, позиционирование на местности и фиксация установки ГНБ. Настраивается сигнализация предупреждения подземного столкновения с находящимися под напряжением электрическими сетями. Подготавливаются к работе двигателя установки и миксеры для приготовления раствора, приготавливается водно-бentonитовая суспензия.

Бурение пилот-скважины

Бурение пилотной скважины – особо ответственный этап работ в горизонтально направленном бурении, от которого зависит конечный результат. Оно осуществляется при помощи буровой головки со скосом в передней части и встроенным излучателем.

Контроль за местоположением буровой головки в процессе бурения осуществляется с помощью приемного устройства локатора, который принимает и обрабатывает сигналы встроенного в корпус буровой головки передатчика.

Схема бурения пилотной скважины приведена на рис. 13.

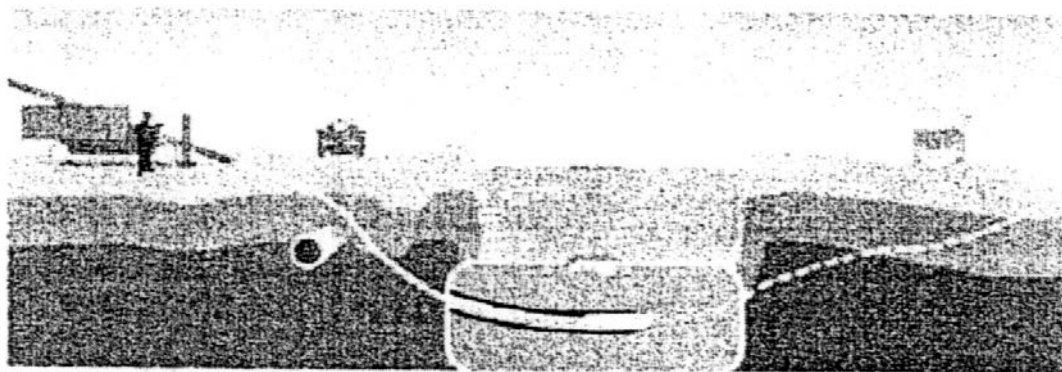


Рис. 13

Буровая головка соединена с гибкой приводной штангой, что позволяет управлять процессом бурения пилотной скважины и обходить выявленные препятствия в любом направлении в пределах естественного изгиба приводной штанги. Буровая головка имеет отверстия для подачи специального бурового раствора, который закачивается в скважину и образует суспензию с размельченной породой.

На мониторе локатора отображается визуальная информация о местоположении, угле, азимуте буровой головки. Эта же информация отображается на дисплее оператора буровой установки. Эти данные являются определяющими для контроля соответствия траектории строящегося трубопровода проектному направлению и минимизируют риск излома рабочей штанги. При отклонении буровой головки от проектной траектории оператор останавливает вращение буровых штанг и устанавливает скос буровой головки в нужном положении. Затем осуществляется задавливание буровых штанг в нужном положении с целью коррекции траектории бурения. Бурение пилотной скважины завершается выходом буровой головки в заданной проектной точке.

Расширение скважины

Расширение скважины осуществляется после завершения пилотного бурения. При этом буровая головка отсоединяется от буровых штанг и вместо нее присоединяется расширитель обратного действия.

Схема расширения буровой скважины приведена на рисунке 14.

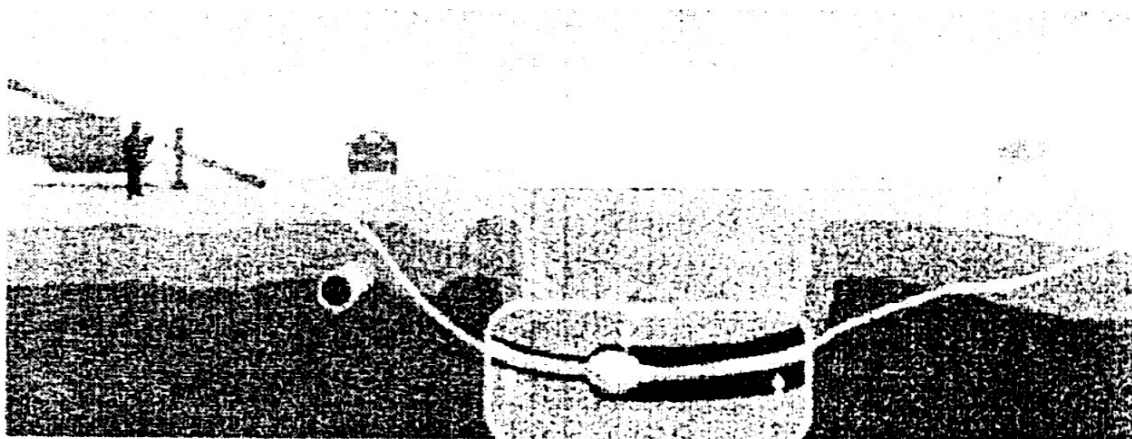


Рис. 14

Приложением тягового усилия с одновременным вращением расширитель протягивается через скважину в направлении буровой установки, расширяя пилотную скважину до необходимого для проталкивания трубопровода диаметра. Для обеспечения беспрепятственного протягивания трубопровода через расширенную скважину ее диаметр должен на 25-30% превышать диаметр трубопровода.

При благоприятных грунтовых условиях и относительно небольших расстояниях бурения расширение скважины возможно производить с одновременным затягиванием трубы по схеме приведенной на рисунке 15.

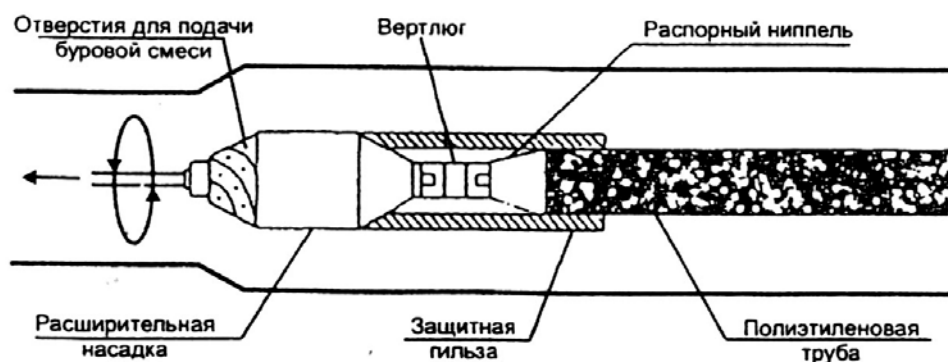


Рис. 15

Протягивание трубопровода

На противоположной от буровой установки стороне скважины располагается готовая плеть трубопровода. К переднему концу петли крепится оголовок с воспринимающим тяговое усилие вертлюгом.

Вертлюг вращается с буровой штангой и расширителем, и, в тоже время, не передает вращательное движение на трубопровод.

Таким образом, буровая установка затягивает в скважину плеть протягиваемого трубопровода.

Схема протаскивания трубопровода приведена на рисунке 16.



Рис. 16

Технология горизонтально направленного бурения уникальна тем, что позволяет изменять, при необходимости, направление прокладки, как в плане, так и в профиле, огибая на своем пути различные препятствия (действующие или брошенные подземные коммуникации или другие сооружения).

При протаскивании трубопровода с целью уменьшения силы трения рекомендуется использовать роликовые подставки. Схема протаскивания трубопровода в буровой канал без расширителя, приведена на рисунке.

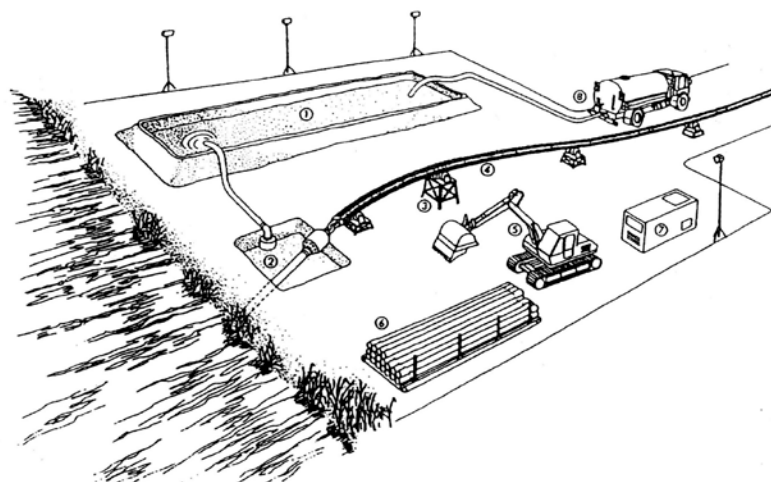


Схема протаскивания трубопровода в буровой канал без расширителя

1. Котлован для временного хранения использованной промывки	5. Экскаватор
2. Буровой вход	6. Склад буровых штанг
3. Роликовая подставка	7. Генератор
4. Трубопровод	8. Транспорт для подготовки

Рис. 17

Для оптимизации процесса бурения (управляемости буровой головки и условий протаскивания труб) определяются составы грунтов по трассе прокладываемого трубопровода, а затем назначаются необходимые режимы производства работ.

Рекомендуемые режимы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав грунта	Вязкость, сек	Размер сопла, мм	Давление буровой смеси, атм.	Скорость, м/мин.		Наружный диаметр трубы, мм
				бурение	протаскивание	
Песок	100-100	2,3-3,0 2,3-3,0	40-60 40-60	2,0 1,2	1,5 1,5	до 160 до 225
Песок с грунт водами	140	3,0	20-50	1,5	0,86	до 160
Песок	140	3,0	20-50	0,86	0,86	до 225
Шлам	120	2,3-3,0	20-50	4	2	до 160
Шлам	120	2,3-3,0	20-50	1,2	1,2	до 225
Глина, песок	80	1,5-2,3	60-80	2,4	2	до 160
Глина, песок	80	1,5	60-80	3	2	до 225
Глина, шлам	60	1,5	60-80	3	2	до 160
Глина, шлам	60	1,5	60-80	1,5	1,5	до 225
Глина	30	1,0	80-100	2,4	1,5	до 160
Глина	30	1,0	80-100	1,5	1,5	до 225

Концентрация бентонита в буровой смеси

Назначение буровой смеси:

- создание прочных конструкций стенок бурового канала;
- охлаждение и смазка режущего инструмента и штанг;
- удаление грунта из буровой скважины;
- формирование прочных стенок пилотной скважины (бурового канала), предотвращающая их обвал от давления окружающего грунта;
- создание избыточного давления внутри пилотной скважины (бурового канала), что предотвращает просачивание фунтовых вод в буровой раствор;
- снижение усилий протягивания трубопровода.

Приготовление смеси производится, как в навесных емкостях, крепящихся непосредственно на установке ГНБ, так и в отдельно стоящих резервуарах с использованием воды, бентонита и различных добавок.

Обязательным условием бурения является применение буровой смеси в течение всего процесса бурения. Состав и концентрация бентонита в буровой смеси в зависимости от состава грунта приведены в таблице 3.

Таблица 3

Грунт	Основа смеси	Концентрация для применения, кг/м ³
Глина	Бентонитовый загуститель	20-35
Плотный песок	Бентонит	30-45
Слабый песок	Бентонит	20-30

Приготовление буровой смеси осуществляется добавлением бентонита или бентонитового загустителя на струйную мешалку.

Размешивание продолжается до получения однородной смеси, при приготовлении которой необходимо контролировать показатели плотности и содержания хлорида. Показатель рН не должен превышать 10, а содержание хлорида должно быть не более, чем 1000 мг/л.

Количество добавок для улучшения качества буровой смеси и ее рабочих параметров в зависимости от состава грунтов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Грунты	Возможные сложности	Состав смеси	Замес, кг/1000 л
Песок с гравием, зернистый песок	Обвал канала, высокий момент вращения, отсутствие циркуляции	Бентонит Биополимер для увеличения плотности взвеси	40-60 1-3
Мелкий песок	Обвал канала, утечка смеси	Бентонит Биополимер для увеличения плотности взвеси	20-35 2-4
Смесь песка с глиной	Непрочность стенок канала	Бентонитовый загуститель Эмульсия для сгущения смеси	25-30 2-4

Сухая глина	Застревание штанг	Эмульсия для сгущения смеси Биополимер, регулирующий фильтрацию	3-4 2-5
Вязкая глина	Высокий момент вращения, засорение форсунок	Эмульсия для сгущения смеси Смачивающий состав	3-4 2-3

Скорость проходки в грунтах 1-2 группы

Данные фирмы VERMEER о скорости проходки в грунтах 1-2 группы горных пород для установки марки NAVIGATOR D 50×100 приведены в табл. 5.

Таблица 5

Диаметр расширителя, мм	Скорость проходки, м/ч
Пилотная скважина dnwl.=114	12,0-15,0
Расширитель d1 = 150	10,8-14,7
Расширитель d2 = 200	9,0-13,9
Расширитель d3 = 250	7,5-11,6
Расширитель d4 = 300	6,3-9,7
Расширитель d5= 350	5,25-8,1
Расширитель d6 = 400	4,4-6,8
Расширитель d7 = 450	3,7-5,7
Расширитель d8 = 500	3,0-4,8
Расширитель d9 = 550	2,5-4,0
Расширитель d10 = 600	2,0-3,3
Расширитель dn = 650	1,7-2,7
Расширитель d12 = 700	1,4-1,9
Расширитель d13 = 750	1,1-1,5
Расширитель d14 = 800	0,9-1,2
Расширитель d15 = 850	0,7-0,9
Расширитель d17 = 950	0,4-0,5
Расширитель d18 = 1000	0,3-0,4
Расширитель d16 = 900	0,5-0,7

Примечания:

1. При протаскивании трубопровода скорость последнего расширения принимается с коэффициентом 0,8;
2. Скорость бурения меняется в зависимости от категорий грунтов, материала и массы прокладываемого трубопровода;
3. Данные получены при бурении в грунтах 1-2 группы и прокладки полиэтиленовых трубопроводов длиной до 100 м.
4. При изменении условий рекомендуется применять следующие коэффициенты для:
 - стальных трубопроводов – 0,60;
 - водных преград – 0,80;
 - городских условий – 0,90;
 - особо стесненных условий – 0,85;
 - грунта 3 группы – 0,20
5. Очистка скважины может производиться неоднократно, в зависимости от параметров (доли примеси в грунтах) бурового раствора на выходе.

Контроль за бурением на поверхности

Траекторию направляющей скважины можно отслеживать с применением системы контроля на поверхности, которая позволяет определить место нахождения зонда в забое скважины посредством замеров ее фактического положения относительно сетки или пункта на поверхности (рис. 18).

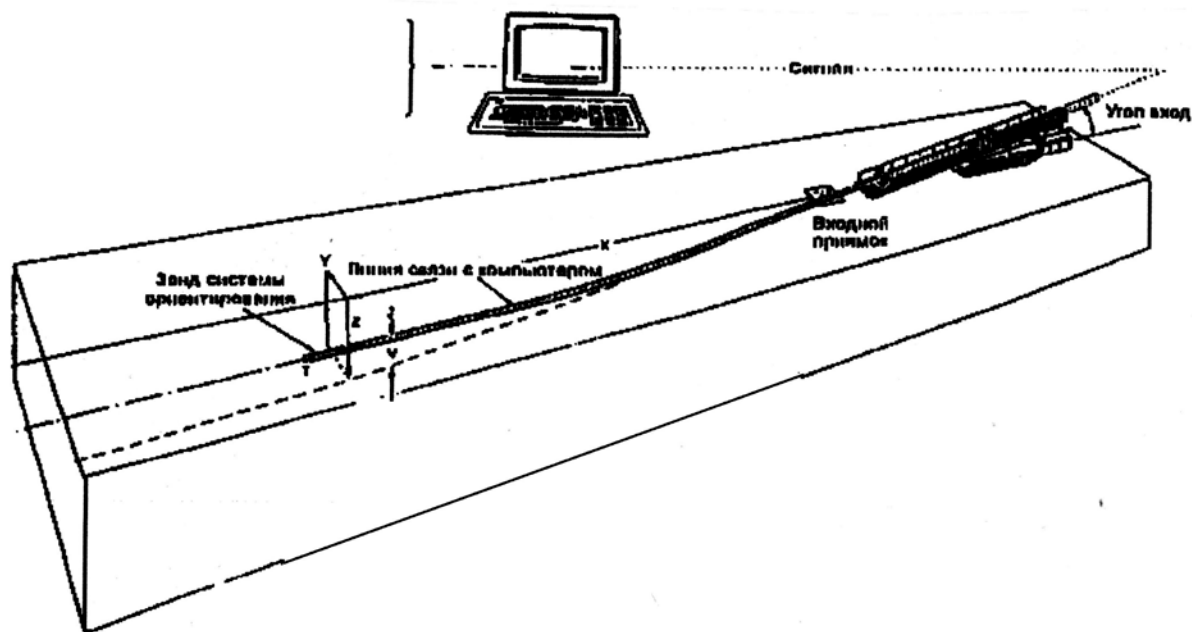


Рис. 18. Принципиальная схема системы ориентирования на поверхности:

- Пробуренная часть скважины – Т.
- Горизонтальная проекция – X.
- Вертикальная проекция – Y.
- Глубина скважины – Z.
- Вероятное отклонение – V

Данные измерений, выполненных с помощью измерительного зонда, проходящему внутри колонны бурильных труб. Эти показания в совокупности с данными замеров искривления интервалов, пробуренных после каждого предыдущего измерения, используются для расчета горизонтальных и вертикальных координат точек вдоль оси направляющей скважины относительно начальной (на устье скважины). Результаты измерения азимута, определяемого относительно силовых линий магнитного поля Земли, чувствительны к действию забойного инструмента, бурильной колонны и магнитных полей соседних металлических сооружений. По этой причине зонд устанавливается в немагнитной буровой штанге и размещается таким образом, чтобы была обеспечена его достаточная изоляция от забойного инструмента и бурильной колонны.

На экране компьютера выводятся следующие данные:

- пробуренная длина скважины; горизонтальная длина;

- горизонтальное отклонение буровой головки от проектного створа;
- глубина расположения буровой головки от уровня установки компьютера.

Слежение за траекторией пилотной скважины во время бурения ведется путем считывания показаний приборов, проводимых через 9-10-метровые интервалы бурения. Эти показания используются для расчета горизонтальной и вертикальной координат скважинного зонда по мере его продвижения вдоль пионерной скважины.

Исходные данные скважинного обследования и результаты расчетов должны включать, наряду с другими возможными компонентами, следующие данные:

- длина ствола скважины (расстояние между двумя точками исследования скважины, измеренное вдоль траектории бурения);
- измеренное расстояние – общее расстояние от любой точки исследования скважины до входа в скважину, измеренное вдоль траектории бурения;
- уклон – угол отклонения скважинного зонда от вертикальной оси в конкретной точке исследования скважины; при этом вертикальное направление, ориентированное вниз, соответствует нулю градусов;
- азимут – угол, под которым расположена проекция скважинного зонда на горизонтальную плоскость в конкретной точке исследования скважины; при этом направление, ориентированное на северный магнитный полюс, соответствует нулю градусов.
- визирный пункт – горизонтальное расположение измеренной при исследовании точки скважины относительно установленной горизонтальной системы отсчета;
- высота – вертикальное расположение измеренной при исследовании скважины точки относительно установленной вертикальной системы отсчета;
- отклонение – расстояние от точки исследования скважины до предусмотренной проектом опорной линии; положительные значения указывают, что точка проведения скважинного обследования расположена вправо от опорной линии, а отрицательные значения указывают, что точка проведения скважинного обследования расположена влево от опорной линии.

Ниже перечислены дополнительные данные, которые следует регистрировать:

– расстояние от головки бура до зонда – расстояние от ведущего края головки бура до скважинного зонда;

– курс – азимут линии магнитного поля, относительно которой отсчитывается траектория бурения.

– отступ буровой установки – расстояние от впервые установленной на бурильную установку головки бура, измеренное от отмеченной нивелиром входной точки.

– длина комплекта забойного инструмента – длина комплекта забойного инструмента. Данные слежения на поверхности – координаты, измеренные системой.

Расчет координат забоя «i».

Существуют три метода, применяемых при бурении ГНБ: метод среднего угла; метод минимальной кривизны и метод усредненной касательной.

Уравнения, применяемые в этих трех методах, используются для расчета вертикальных и горизонтальных расстояний от точки входа, а также расстояния от опорной линии. Обозначения, применяемые в уравнениях, указаны на рис.8 и определяются следующим образом (рис. 19).

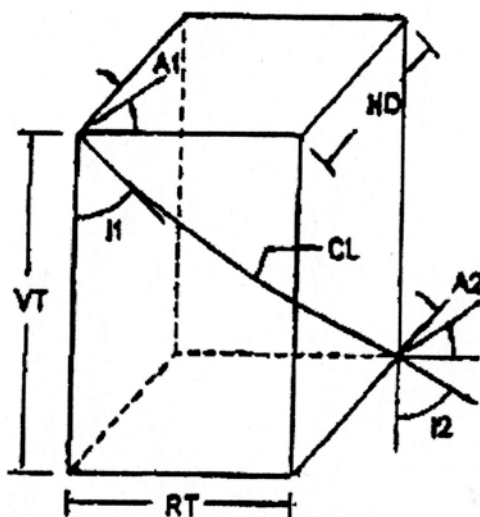


Рис. 19. Трехмерное изображение текущей и предыдущей точек замера:

CL – курсовая длина;

I1 – угол наклона в предыдущей точке замера;

I2 – угол наклона в текущей точке замера;

A1 – угол отклонения от курса в предыдущей точке замера;

A2 – угол отклонения от курса в текущей точке замера;

HD – расстояние по горизонтали между предыдущей и текущей точками замера;

RT – разность отклонений от опорной линии, замеренных в предыдущей и текущей точках замера;

VT – разность по вертикали между предыдущей и текущей точками замера.

Метод среднего угла – при этом используются средние значения предыдущего и текущего углов азимута и наклона, чтобы определить проекцию измеренного расстояния на траекторию, касательную к этому среднему углу.

Метод усредненной касательной – предполагается, что половина измеренного расстояния представляет собой касательную к проекциям углов наклона и азимута в текущей точке, а другая – касательную к проекциям углов наклона и азимута в предыдущей точке

Система контроля на поверхности TruTracker®. В ней применяется катушка, находящаяся в известной точке и служащая для наведения магнитного поля. Зонд определяет свое местоположение относительно наведенного магнитного поля и передает эту информацию на поверхность. Процесс схематично показан на рис. 20.

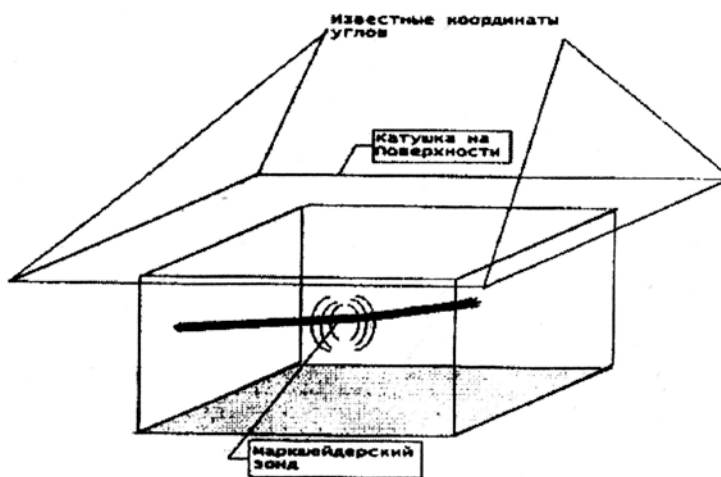


Рис. 20. Система поверхностного контроля TruTracker®

До начала бурения катушка укладывается на поверхность грунта, и ее угловые точки точно привязываются к геодезической сетке. При выборе компоновки катушки необходимо учитывать следующее:

- позволяет обнаруживать забойный зонд в пределах ширины ЗН на глубине И;
- может иметь до 32 углов;
- не требуется точное ориентирование относительно заданной оси;
- не должна быть обязательно прямоугольной;
- провода должны быть натянуты прямо, как по горизонтали, так и по вертикали, от угла до угла.

Данные системы TruTracker® обычно являются более точными, чем значения, рассчитываемые по результатам замера углов наклона и азимута. При контроле данных необходимо учитывать следующие принципы:

- радиальный угол должен находиться в пределах $270 \pm 90^\circ$;
- рассогласование радиального угла должно представлять собой дробь, близкую к нулю; рассогласование радиальной напряженности должно представлять собой дробь, близкую к нулю; рассогласование осевой напряженности не должно превышать 10%.

Если катушку нельзя установить непосредственно над преодолеваемым препятствием (например, при сооружении перехода через крупную реку), следует применять расчетные значения. Однако для корректировки результатов измерения магнитного азимута можно применять данные катушек, размещенных на обоих берегах. Это способствует получению более точных расчетных значений направлений и позволит Подрядчику повысить точность управления пространственной ориентации зонда.

Основные виды осложнений при бурении ГНБ

Осложнения являются причиной аварий и снижают технико-экономические показатели бурения. Необходимо стремиться к предупреждению осложнений, так как на их ликвидацию требуется значительно больше времени и средств. Часто не устраненное вовремя осложнение углубляется или является причиной новых осложнений; поэтому очень важно предупредить их и быстро ликвидировать.

Поглощение промывочной жидкости является широко распространенным видом осложнений, его интенсивность зависит от величины перепада давления на пласт от проницаемости горных пород и свойств промывочной жидкости. В большинстве случаев поглощение приурочено к проходке сильно трещиноватых и кавернозных карбонатных пород, галечниковых и песчаных отложений. Снижение уровня промывочной жидкости в скважине может привести к снижению противодействию на слабоустойчивые породы и к их обрушению.

Обвалы стенок скважины возникают как в рыхлых, так и в скальных породах. В рыхлых породах поддержание стенок скважины в устойчивом состоянии достигается противодействием столба промывочной жидкости на пласт. В глинистых породах возможно существенное снижение устойчивости за счет повышения влажности, вызванной контактом с раствором и проникновением фильтрата раствора. Об обвалах судят по возрастанию давления на буровых насосах, повышенному выносу обломков породы и шлама из скважины, возрастанию крутящего момента. Обвалы могут привести к прихвату инструмента. Процессы обвалообразования интенсифицируются во времени, поэтому важно вести бурение быстро, без задержек.

На буровой установке должен быть необходимый комплект специального ловильного инструмента. Ловильный инструмент предназначен для захвата и извлечения оставленных в скважине частей бурового снаряда, промывочных труб и других предметов.

Метчик - ловильный резьбонарезной инструмент с конической наружной нарезкой для соединения с внутренней поверхностью извлекаемых труб. На его рабочей поверхности профрезерованы продольные канавки, которые образуют режущую кромку, обращенную в сторону вращения метчика. Нарезка на верхней цилиндрической части метчика служит для соединения последнего с бурильными трубами.

Колокол – ловильный резьбонарезной инструмент с внутренней конической нарезкой для соединения с наружной поверхностью извлекаемых труб. Колокола рекомендуется применять при ловле утонченной части буровых труб; при соединении с трубой, имеющей клиновидный или спиральный излом, а также продольный разрыв; при устранении аварий, требующих расхаживания колонны и приложения больших крутящих моментов, т.е. когда снаряд прихвачен; при извлечении любых предметов цилиндрической формы (сплошных и пустотелых).

В зависимости от способа соединения с оставшейся частью, колокола подразделяются на резьбонарезные и гладкие; по конструктивному выполнению - с резьбой под направляющую воронку для облегчения ловильных работ в скважинах большого диаметра; с воронкой, изготовленной за одно целое с корпусом колокола; без направляющей воронки и резьбы под нее.

Колокола всех типов могут быть с правыми и левыми резьбами. Последние предназначены для развинчивания колонны и подъема ее по частям.

Труборезы – аварийные инструменты, служащие для отрезания труб в скважине с целью их извлечения. Они представляют собой сочетание режущего и захватывающего узлов, что позволяет за один раз произвести отрезание части трубы аварийной колонны, ее захват и извлечение на поверхность.

Мелкие предметы, попавшие в скважину, извлекаются с помощью паука, представляющего собой трубу, на нижнем конце, которой вырезают зубья высотой 150-200 мм. Мелкие стальные предметы удаляются из скважины магнитными ловушками, в корпусе которых помещены постоянные магниты.

Аварии, возникающие при бурении, могут быть обусловлены:

- геологическими причинами (обвалы стенок скважины в неустойчивых породах, закарстованность и трещиноватость пород, тектонические нарушения, встреча пльвунов с большим напором и т.п.);

- небрежным отношением к уходу за оборудованием и выполнению правил, предупреждающих аварии;

- использованием неисправного или чрезмерно изношенного оборудования буровых и промысловых труб, инструментов и принадлежностей;

- нарушением правил технологии бурения, работой на режимах, не соответствующих характеру буримых пород и создающих недопустимые нагрузки на буровой инструмент и оборудование.

Во избежание аварий с бурильными трубами необходимо:

- осуществлять систематический осмотр буровых труб и своевременно выбраковывать имеющие дефекты или чрезмерный износ;

- вести учет продолжительности работы труб, не включать в колонну трубы различного качества;

- следить за состоянием резьбовых соединений.

Основные виды осложнений при бурении и меры по их предупреждению и ликвидации представлены в табл. 6.

Таблица 6

Вид осложнений	Горные породы	Причины возникновения осложнений	Проявление осложнений	Основные меры предупреждения и ликвидации осложнений
Поглощение промывочной жидкости	Трещиноватые закарстованные рыхлые со значительной пористостью и низкими статическими уровнями подземных вод. Зоны тектонических нарушений	Превышение давления столба промывочной жидкости над пластовым. При спуско-подъемных операциях и бурении имеют место гидродинамические воздействия промывочной жидкости на пласт что интенсифицирует процесс поглощения и может привести к гидравлическому разрыву пласта	Нарушение циркуляции промывочной жидкости, затяжки и прихваты инструмента, а также обрушение пород	Исключение или сведение к минимуму динамических условий при спуско-подъемных операциях. Уменьшение противодействия промывочной жидкости на пласт путем снижения плотности раствора. Использование буровых растворов с высокими кольматирующими свойствами, тампонажных растворов (в том числе быстро схватывающихся) и инертных наполнителей
Обвалы стенок скважины	Пески, супеси, суглинки, глинистые сланцы, аргиллиты. Трещиноватые полускарпальные породы (известняки, доломиты, гипсы и т.д.)	В результате действия горного давления вышележащих пород. Недостаточное гидростатическое давление промывочной жидкости на стенки скважины. Снижение прочности пород за счет увлажнения	Кавернообразование и обильный вынос шлама, резкое повышение давления в нагнетательной линии насосов, прихват бурового инструмента. При спуске инструмента не доходит до забоя	Применение промывочных жидкостей с минимальной водоотдачей и плотностью, обеспечивающих устойчивость пород; применение технологий, обеспечивающих минимальные затраты времени на бурение. Скорость выноса шлама должна быть >0,8-1,0 м/с. Не допускать длительного пребывания бурового инструмента без движения
Сужение ствола	Глины, глиняные сланцы, аргиллиты, соляные породы	Выдавливание породы в ствол скважины под действием горного давления или при недостаточном противодействии столба промывочной жидкости	Ползучесть породы и сужение ствола скважины, затяжки и прихват бурового инструмента	Применение утяжеленных растворов. Организация работ и применение технологий, обеспечивающие минимальные затраты времени на бурение

Образование желобов	Твердые глины, глинистые сланцы, аргиллиты и др.	Увеличение сил прижатия буровых труб к стенкам скважины на участках искривления стволов скважин. Значительное время бурения и частые спуско-подъемные операции	Затяжки и прихваты бурового инструмента, необходимость проработки ствола скважины	Использование компоновок бурового инструмента и технологии бурения, обеспечивающих заданное искривление ствола скважины. Бурение с максимальной проходкой на долото и высокими коммерческими скоростями
Образование сальников	Глинистые породы	Недостаточная выносная способность промывочной жидкости, а также применение растворов с большой водоотдачей и образованием на стенках скважины толстой глинистой корки	Повышение давления в нагнетательной линии насоса; рост крутящего момента при бурении; затяжки и прихваты бурового инструмента	Увеличение интенсивности промывки, использование турбулизаторов на бурильной колонне. Периодическое прорабатывание ствола скважины при высоких частотах вращения колонны. Применение раствора с малой водоотдачей, обработка полимерами
Образование грифонов	Закарстованные трещиноватые рыхлые со значительной пористостью	Инфильтрация бурового раствора в окружающий грунт, недостаточное заглубление скважины	Непреднамеренные прорывы бурового раствора с выходом на дневную поверхность	Увеличение заглубления скважины, пригрузка грунтом места прорыва раствора, тампонаж затрубного пространства.
Растворение	Соляные породы	Растворение пород, слагающих стенки скважины под воздействием промывочной жидкости	Интенсивное кавернообразование, обвалы вышележащих пород, некачественное цементирование обсадной колонны	Применение безводных промывочных жидкостей, а также жидкостей, обеспечивающих минимальное растворение породы (соляные растворы, водогипановые и др.). Использование обычных глинистых растворов допустимо для маломощных пластов с обязательной их последующей изоляцией

Под **аварией** подразумеваются нарушения технологического процесса бурения, требующие проведения специальных работ по их устранению. Процесс бурения скважин требует осуществления постоянного контроля за применяемыми техническими средствами и технологией бурения, чтобы исключить возможность аварии или свести ее к минимуму.

Основные виды аварий и способы их устранения приведены в таблице 7.

Таблица 7

Вид аварии	Причины возникновения	Методы ликвидации
Прихват инструмента при бурении	Обвал и осыпи стенок скважины, сужение ствола, образование желоба или сальников. Прижег долота.	Проработка ствола скважины с вращением, расхаживание колонны. Интенсивная промывка скважины. При отсутствии циркуляции – закачка жидкости под максимальным давлением. Применение гидравлических и вибромеханизмов, левого бурового инструмента и разбуривание оставшегося инструмента фрезерным долотом
Обрыв буровых труб, УБТ и замков	Применение труб изношенных, низкого качества и с дефектами. Отсутствие службы контроля состояния труб и замков. Высокие осевые нагрузки и частоты вращения. Навинчивание замков на трубы с малым моментом.	Соединение с оставшейся в скважине инструментом с помощью колокола, метчика или труболочки и извлечение инструмента из скважины
Отвинчивание или обрыв долота	Недостаточная затяжка долота, плохое качество резьб и недостаточный контроль их состояния.	Соединение с долотом через переводник, колокол или метчик. Возможно применение паука.
Поломка узлов и деталей долота	Использование долота с низким качеством изготовления или изношенного. Несоответствие типа долота проходным породам. Удар долота о забой, заклинивание долота. Неправильный выбор режимных параметров бурения.	Извлечение узлов и деталей долота пауком или магнитным фрезером. Если это невозможно, то необходимо цементирование забоя и разбуривание фрезерным долотом.
Прихват труб	Сужение ствола скважины, обвал пород. Длительная остановка при бурении	Интенсивная промывка скважины. Проработка ствола скважины с расхаживанием колонны. Извлечение при максимальных усилиях. Применение гидравлических и вибромеханизмов. Взрыв торпеды и детонирующего шнура в месте прихвата. Извлечение труб по частям или с применением труборезки
Обрыв труб	Недостаточная затяжка резьб. Низкое качество труб и элементов их соединений, недостаточный контроль за их состоянием.	Извлечение труб с помощью муфты или ниппеля, применение метчика или труболочки.
Отвинчивание труб	Плохое качество резьбы, не используются специальные смазки для резьб.	Замена изношенных промывочных труб. Повторное свинчивание резьбового соединения.

Оборудование и буровой инструмент

Ассортимент установок ГНБ Astec Underground покрывает весь спектр потребностей современного строительства. Установка DD-1100 превосходит миниатюрную DD-65 по массе в 35 раз (43 т против 1200 кг). Еще более разительна разница в крутящем моменте (678 и 136000 Нм) и тяговом усилии (2,72 и 500 т).

Пульт управления установкой горизонтально-направленного бурения Astec DD-3238 приведен на рисунке 21.



Рис. 21

Фирма Charles Machine Works, Inc. The Charles Machine Works, Inc. является одним из мировых лидеров по производству оборудования для бестраншейных технологий, самостоятельно разрабатывающего практически все компоненты систем выпускаемого бурового оборудования, включая буровой инструмент, штанги и электронные системы слежения. В ассортименте фирмы 9 моделей установок ГНБ – от самой маленькой JT-520 (масса – 1352 кг, длина прохода – до 50 м, диаметр – до 102 мм, усилие проталкивания/тяги – 2000/2200 кг).

Установки для горизонтально-направленного бурения: Robbins 2420 (диаметр коммуникации до 450 мм/длина бестраншейного участка до 300 м); Robbins 4510 (800 мм/457 м); Robbins 6015 (600 мм/610 м); Robbins 9015/Robbins 9030 (900 мм/914 м); Robbins 18030 (1350 мм/1372 м); Robbins 25030 (1500 мм/1524 м); Robbins 36030 (1350 мм/1830 м); Robbins 50030 (1800 мм/1830 м); Robbins 100030 (2000 мм/2000 м).

В ассортименте фирмы Vermeer Manufacturing Company 16 установок: от самой маленькой Navigator PL8000 весом менее полутонны и, тем не менее, обеспечивающей бурение скважин с протяженностью до 95 м, диаметром до 300 мм и силой протяжки 3990 кг до таких гигантов, как Navigator D150X300 и Navigator D200X300 массой 34473 кг с протяженностью бурения почти в полтора километра, расширением до 1200 мм, силой протяжки – 68039 и 90719 кг.

Известная швейцарская фирма TERRA AG уже более 30 лет производит оборудование для прокладки подземных инженерных коммуникаций без вскрытия грунта. Самая маленькая в модельном ряде TERRA MINI-JET MJ 1400 – компактная установка горизонтально-направленного бурения с приме-

нением раствора для буровых скважин длиной до 50 м и диаметром до 260 мм (используются штанги длиной 0,5 м, с минимальным радиусом изгиба R=15 м). Самая большая – TERRA-JET 6015 D предназначена для прокладки буровых каналов длиной до 400 м и диаметром до 650 мм.

В последнее время большое распространение получили системы вакуумной экскавации грунта. Применительно к горизонтально-направленному бурению (ГНБ) они используются для быстрого выполнения шурфов для обнажения подземных инженерных коммуникации, отсоса бурового раствора из котлованов и уборки места работы. Система вакуумной экскавации грунта Vermeer E900 EVACUATOR приведена на рисунке 22.

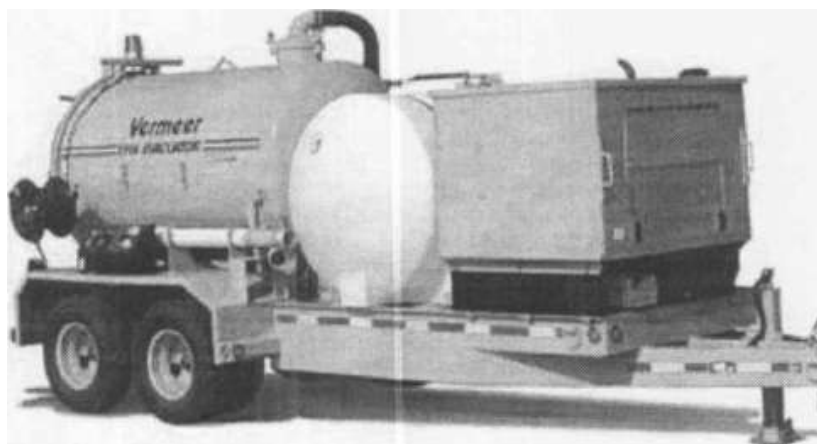


Рис. 22

Серия установок компании Tracto-Technik. ГНБ GRUNDODRILL X включает модели массой: 7Xplus TD (для прокладки труб диаметром до 300 мм на длину до 200 м), 10X TD (для прокладки труб диаметром до 355 мм на длину до 250 м), 13X TD (для прокладки труб диаметром до 3400 мм на длину до 300 м); 15X (для прокладки труб диаметром до 3400 мм на длину до 350 м).

Серия GRUNDODRILL S Family – это две модели: 10S TD (6600 кг) и 20S TD (14000 кг) приведена на рисунке 23.

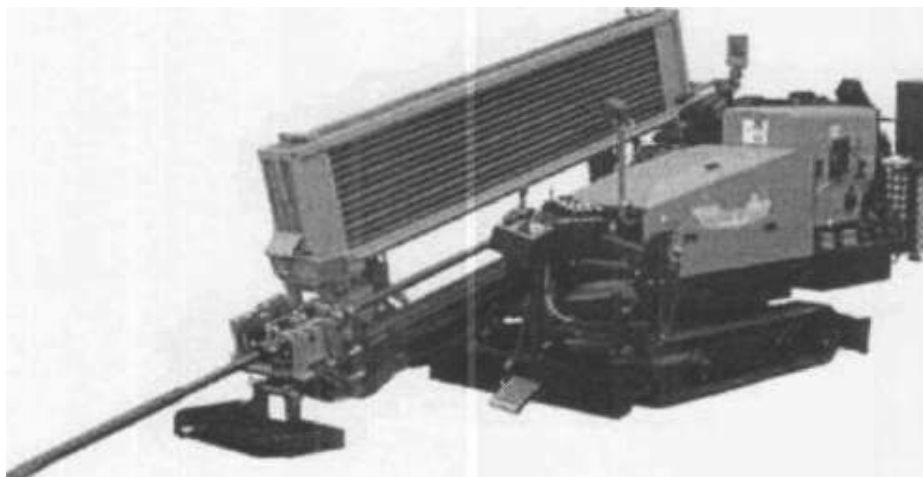


Рис. 23

Классификация установок ГНБ

Таблица 8

Класс установок ГНБ	Тяговое усилие, тс/кн	Диаметр прокладываемой коммуникации, мм	Типовые представители моделей установок ГНБ	Основные параметры модели установки ГНБ		
				Тяговое усилие, тс	Диаметр прокладываемой коммуникации, мм	Длина прокладываемой коммуникации, м
Мини	до 12/117,72	от 32 до 315	VERMEER D7×11	3,2	250	95
			VERMEER D 10×15	7,2	350	130
			VERMEER D 24×40	10,8	600	320
			TRACTO-TECHNIK 6.5	6,5	300	200
			TRACTO-TECHNIK 10S	10,0	450	300
			TRACTO-TECHNIK 12G	12,0	600	350
Миди-1	12-25/ 117,72- 245,25	от 32 до 500	VERMEER D 36 × 50	16,3	600	400
			ROBBINS HDD 4515 TMS C	21,3	800	457
			VERMEER D 50×100	22,5	700	600
Миди-2	25-45/ 245,25- 441,45	от 32 до 800	ROBBINS HDD 6015 TMS C	28,4	1000	610
			ROBBINS HDD 9015 TMS C	42,6	1200	914
			WIRTH PB 30	34,7	1200	900
Макси-1	45-150/ 441,45- 1471,5	от 32 до 1400	WIRTH PB 50	57,1	1500	1200
			WIRTH PB 70	71,4	1500	1300
			ROBBINS HDD 9030 TMS C	81,7	1300	1372
			ROBBINS HDD 18030 TMS C	114,0	1300	1524
Макси-2	более 150/1471,5	от 1400 до 2000	ROBBINS HDD 25030 TMS C	163,0	1600	1830
			ROBBINS HDD 36030 TMS C	230,0	1600	1830
			ROBBINS HDD 50030 TMS C	342,5	1600	1830
			WIRTH PB 150	157,1	1600	1800
			WIRTH PB 250	260,2	1600	1800

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ

ПИОНЕР



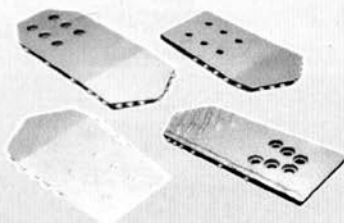
Передовой бур (пионер) со сменными насадками создан для проведения универсальных работ.

Буровая лопатка расположена по центру для максимальной эффективности, это расположение создает оптимальный угол резания грунта, снижает крутящий момент и улучшает работу вашей буровой установки.

Пионер является разборным. Буровая лопатка и носовая часть легко заменяются, что снижает затраты и время на замену изношенного инструмента.

Диаметр пионера, мм	Стоимость, у.е.
82	1150
92	1370
105	1660

БУРОВЫЕ ЛОПАТКИ



Буровая лопатка расположена по центру для максимальной эффективности, это расположение создает оптимальный угол нарезания грунта, сокращает требования по крутящему моменту и улучшает работу вашей буровой установки. Ширина буровой лопатки может подбираться под условия грунта.

Буровая лопатка с изгибом ошпикованная и обваренная твердосплавом

Ширина буровой лопатки, мм	Стоимость, у.е.
115	110
135	115
160	125

Буровая лопатка прямая ошпикованная и обваренная твердосплавом

Ширина буровой лопатки, мм	Стоимость, у.е.
115	100
135	110
160	115

Буровая лопатка прямая обваренная твердосплавом

Ширина буровой лопатки, мм	Стоимость, у.е.
115	80
135	85
160	90

Буровая лопатка с изгибом обваренная твердосплавом

Ширина буровой лопатки, мм	Стоимость, у.е.
115	85
135	90
160	100

ПЕРЕХОДНИКИ И ПЕРЕВОДНИКИ



Диаметр пионера, мм	Стоимость, у.е.
82	90
92	95
105	100

РАСШИРИТЕЛИ СКВАЖИН (римеры)

Режущие римеры имеют различный дизайн, что предоставляет возможности для выполнения работ в песке, глине, легких сланцах и т.д.

Универсальная крыловидная форма способствует быстрому прониканию и более мягкой нарезке даже при малом крутящем моменте.

Радиально-поточный ример

Используется в уплотняемых почвах, содержащих слой песка и гравия. Размеры: от 101,6 мм до 508 мм.



Диаметр римера, мм	Стоимость, у.е.
160	500
200	600
250	805
350	1050
400	1165
500	1345
600	1615
780	1840

Ример режущий зубчатый



Зубчатый расширитель скважин просто необходим для работы в сложных составных почвах. Может успешно работать в сложных грунтовых условиях, включая сочетание глины и булыжного камня. Долговечные твердосплавные лезвия, расположенные точно по спиральной линии, придают расширителю необычайно сильный режущий и смесительный эффект.

Диаметр римера, мм	Стоимость, у.е.
350	1200
400	1295
500	1495
600	1795
800	2100

Трехфункциональный ример

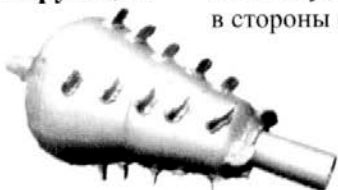


Ример Tri Action имеет форму длинной свечи имеющей три больших желобка, которые позволяют легко отбрасывать нарезанный грунт, обеспечивая прохождение буровой жидкости, и предотвращают застревание.

Режущая кромка защищена высокопрочным материалом. Ример создан для работы в затрудненных условиях и уплотненных грунтах.

Диаметр римера, мм	Стоимость, у.е.
250	1200
350	1350

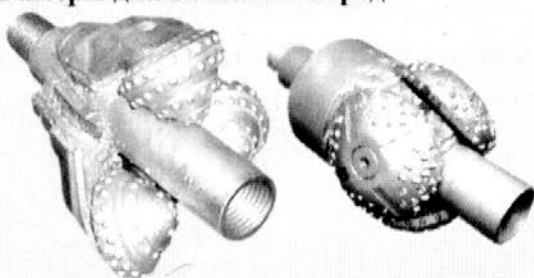
Ример калибрующий



Используется для увеличения диаметра скважины путем сжатия почвы в стороны от ее оси.

Диаметр римера, мм	Стоимость, у.е.
230	850
320	1300
400	1600
530	2500
620	3100
730	4000

Римеры для скальных пород



Диаметр римера, мм	Стоимость, у.е.
212	3000
250	2100
350	2800

ВЕРТЛЮГ

Усилие протяжки до 16 тонн

Усилие протяжки до 40 тонн



Усилие протяжки, т	Стоимость, у.е.
16	1100
25	1485
40	2800

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ



1. Комплект для измерения вязкости бурового раствора.
2. Комплект фильтров.
3. Заглушка буровой штанги.
4. Комплект инструментов для раскручивания штанг в стесненных условиях 500 у.е.
5. Ключ одношарнирный трубный 85 у.е.
6. Плашки для механизма раскручивания буровых штанг.

Расходные материалы:

Полимер (18 кг бочка)	232 у.е.
Бентонит HYG 200 (бумажный мешок 22,7 кг)	820 у.е./тонн
Смазка для штанг (ведро 4,5 кг)	180 у.е.
Твердосплав (резцы)	8 у.е.

Оборудование для приготовления бурового раствора

Полиэтиленовая емкость объемом 2000 литров, насос Robbin мощностью 7,5 л.с., 3-х дюймовые резиновые шланги и шаровые краны, фильтр, приемный резервуар.

Цена за комплект 6 800 у.е.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный
университет»

Г. А. Усов

Промысловые жидкости

Методические указания
к практическим занятиям
по дисциплине

«Бурение скважин в осложненных условиях»
для студентов специальности
21.05.03 Технологии геологической разведки

очного и заочного обучения

Екатеринбург
2020

ВВЕДЕНИЕ

Практические занятия - важнейший элемент подготовки молодого специалиста - предусматривают выполнение студентами под руководством преподавателя самостоятельных заданий, включающих экспериментальные исследования по результатам непосредственного наблюдения изучаемых объектов и процессов.

Главной целью методических указаний является знакомство с теоретическими положениями изучаемой дисциплины, приобретение навыков экспериментальной деятельности, обеспечение глубокого понимания студентами изучаемых явлений, закономерностей и форм их проявления, формирование у будущих специалистов практических умений и навыков в области общинженерной деятельности и овладения специальностью.

В соответствии с требованиями УМС практические работы должны содержать следующие основные элементы:

- теоретическую часть работы, помогающую понять изучаемые процессы или явления, цели и задачи, стоящие перед студентами при выполнении работы;

- методическую часть, целью которой является изучение применяемых и исследуемых образцов и материалов, методик экспериментов, оборудования, приборов, используемых в практической работе;

- экспериментальную часть, в которой осуществляются процессы подготовки образцов (проб), технологические процессы их обработки, снятие характеристик процесса, определение параметров после завершения процесса;

- обсуждение результатов и составление выводов по работе, что позволяет установить, достигнута ли цель, в краткой форме сформулировать основные сведения об изучаемом материале, процессе, явлении.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед проведением практических работ студенты должны изучить правила безопасного ведения работ и противопожарной безопасности и после инструктирования их преподавателем расписаться в журнале инструктажа.

Практическая работа выполняется по теме, по которой начитан теоретический материал. Для успешного проведения работы студенты должны обладать минимальным запасом теоретических знаний. Контроль этих знаний проводится преподавателем в виде опроса (в устной или письменной форме), на основе новых информационных технологий (тестов).

Студенты, не получившие допуск, отстраняются от выполнения практической работы, а её выполнение проводится студентом после проверки его знаний индивидуально.

Допуск студентов на последующие практические работы производится после контроля знаний по этой работе, сдачи отчёта и защиты по предыдущей работе.

Подгруппа может разбиваться на бригады по 2-3 человека.

Отчёт должен оформляться по каждой практической работе титульным листом и содержать следующие основные разделы:

- цель и основные задачи;
- теоретическая часть;
- описание установок, приборов, инструмента, материалов, реагентов;
- методика выполнения работы;
- результаты наблюдений;
- анализ результатов исследований и выводы;
- список литературы.

Отчёт должен иллюстрироваться таблицами, графиками, рисунками.

Защита практической работы осуществляется каждым студентом отдельно на очередном занятии после представления отчёта.

Практическая работа 1.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГЛИНЫ И ВОДЫ.

Цель работы: Изучить методики определения качества глины, как структурообразователя бурового раствора.

Теоретическая часть

Структурированные промывочные жидкости представляют собой дисперсные системы, состоящие из дисперсионной среды и дисперсной фазы.

В качестве дисперсной среды чаще всего используют воду, а в качестве дисперсной фазы структурообразователи: глинистые минералы, полимеры, конденсированную твёрдую фазу. Наиболее доступным и дешёвым структурообразователем являются глинистые минералы: монтмориллонит, иллит, каолинит. Эти листовые силикаты, легко диспергируют вследствие их листовой структуры и гидрофильности в воде на тонкие частицы размером в микрон и менее.

Благодаря наличию нескомпенсированного поля межмолекулярных сил и функциональных (полярных) групп с отрицательный зарядом на поверхности частиц происходит адсорбция молекул воды (гидратация частиц) с образованием общей гидратной структуры промывочной жидкости. Прочности структуры (прочность адсорбированного слоя) глинистого раствор, а значит и качество глины определяется суммарно поверхностью частиц (дисперсностью глины) количеством и активностью (гидрофильностью) функциональных групп $\equiv \text{SiO}$
 $\equiv \text{SiOH}$.

Благодаря огромной суммарной поверхности глинистых частиц таких минералов, как монтмориллонит, почти вся вода бурового раствора становится адсорбированной (гидратированной). Дисперсная система превращается в гель.

Наиболее легко диспергирует в воде натриевый монтмориллонит, представляющий собой совокупность глинистых частиц, состоящих из пакетов двухлистных кремнекислородных тетраэдров, связанных гидроаргилитовым слоем $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. Пакеты

между собой слабо связаны обменными ионами Na которые в воде легко диссоциируют, глинистые частицы расщепляются на более мелкие частицы.

Кальциевые монтмориллониты в связи с более прочными связями пакетов диспергируют значительно труднее, поэтому считаются менее качественными.

Ещё хуже диспергируют в воде (вследствие более прочных связей между пакетами) иллиты и каолиниты.

Существенное влияние на диспергирование глинистых частиц оказывают минеральные компоненты воды, в первую очередь ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} . При значительном содержании в воде они способствуют дегидратации (нейтрализации заряда, снижению гидрофильности) частиц и их сшиванию. Поэтому для приготовления глинистых растворов используют воду с общей жёсткостью не более 12-15° (1° жёсткости соответствует 10 мг СаО в 1 л воды). Жёсткость воды определяют титрованием воды с добавкой 2,5 мл аммиачного раствора раствором олеата калия.

$$H^\circ = 20 \Pi \cdot \delta, \quad (1.1)$$

где Π - количество раствора олеата калия, израсходованного на титрование, мл, δ - титр олеата калия (количество г в 1 мл).

Таким образом, наиболее качественными глинистыми структурообразователями являются монтмориллонитовые (бентонитовые) глины.

Оценку качества глины для приготовления раствора производят визуальным методом, методом смачивания (по Н. А. Максимовичу) и по выходу раствора (количеству м³ раствора, вязкостью 25 с).

$$Q_p \gg 630 / (\delta_p - 1000), \quad (1.2)$$

где δ_p - плотность глинистого раствора при условной вязкости 25 с.

Визуальный метод используют для оценки качества комовой глины. Глина считается пригодной, если при естественной влажности и воздушно сухом состоянии:

а) характеризуется большим сопротивлением излому; б) при изломе образует острые края; в) не поддаётся раздавливанию пальцами даже в мелких кусочках; г) даёт тёмную полированную поверхность при резании ножом; д) в эластичном (смоченном

водой) состоянии раскатывается в длинные шнуры, диаметром 1 мм и менее.

Метод смачивания используют для определения качества порошкообразной глины. С помощью этого метода примерно можно определить и минеральный состав глины.

За показатель качества глины принимают условную величину

$$K = t d, \quad (1.3)$$

где L - время впитывания 1 мл весьма гидрофильного (с высокоэлектроотрицательными атомами) раствора, например, 4 % раствора пиррофосфорнокислого натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), d – диаметр смоченной раствором глины, мм.

Благодаря высокой гидрофильности раствор интенсивно всасывается глинопорошком. Чем выше дисперсность и гидрофильность частиц глины, тем быстрее и на более значительное расстояние (большой объём) распространяется раствор. При $K > 300$ глина считается монтморилонитовой, при $K = 300 - 100$ - иллитно-каолинитовой, при $K = 100 - 50$ - каолинитоиллитовой, при $K < 50$ - каолинитовой.

Методическая часть

Для определения качества комовой глины необходимо иметь: исследуемую глину в воздушно сухом состоянии, линейку, перочинный нож.

Для определения качества порошкообразной глины: сито с отверстиями 0,5 мм, фарфоровую чашку с пестиком, 4% раствор пиррофосфорнокислого натрия, пипетку, секундомер.

Для определения качества воды: аммиачный раствор, раствор олеата калия, мензурку 250мл.

Экспериментальная часть

Подгруппа разбивается на четыре бригады. Одна бригада исследует качество комовой глины. Для этого глину подвергают излому, раздавливанию, режут ножом, в пластичном состоянии раскатывают в шнуры. Затем после размельчения глины в фарфоровой чашке определяют показатель K подобно рассмотренному ниже

$$K = t d ,$$

Результаты испытаний заносят в табл.1.

Вторая бригада исследует качество глинопорошка. Для этого порошок просеивают через сито; 40-50 г просеянного глинопорошка высыпают в фарфоровую чашку, уплотняют пестиком и выравнивают его поверхность.

С помощью пипетки в центр чашки вводят по каплям (по мере впитывания) 1 мл 4 % раствора пирофосфата натрия и засекают время впитывания по секундомеру.

Расстояние нижнего конца пипетки от поверхности глинопорошка должно быть не более 2 см, каждая капля должна направлена в одну точку.

После впитывания последней капли раствора секундомер выключают и линейкой определяют диаметр смоченной поверхности. При неравномерном распространении раствора определяют диаметр в различных направлениях и рассчитывают среднее значение d .

По полученным результатам вычисляют показатель K :

$$K = t d .$$

Одновременно с этим оценивают характер смоченной поверхности: набухание, усадку, толщину увлажнённого слоя.

По показателю K определяют минеральный состав глины. Глины с показателем $K = 100$, а также при явно выраженной усадке смоченной поверхности для приготовления бурового раствора не пригодны.

Полученные результаты необходимо занести в табл.1.

Таблица 1

Визуальный метод				Метод смачивания			
Сопротив. излому	Сопротив. раздавлив.	Характер поверх. разреза	Диаметр и длина шнура	t , мин	d , мм	$K =$	Характер смоченной поверхности

Третья бригада определяет качество воды (её жёсткость).

Для этого: в мензурку ёмкостью 250 мл заливают 50 мл исследуемой воды; добавляют 2,5 мл аммиачного раствора; проводят медленное титрование раствором олеата калия (титр которого известен) до образования стойкой (мелкопузырчатой) пены, сохраняющейся 4-5 мин.

При титровании после очередного прибавления раствора обязательно нужно встряхивать содержимое мензурки.

После образования стойкой пены вычисляют жёсткость воды

$$H^{\circ} = 20 \text{ П } \delta$$

Результаты испытаний занести в табл.2.

Таблица 2

Проба воды	П, мл	δ , град	H° , град	Примечание

Четвёртая бригада определяет качество глины по выходу раствора. Для этого необходимо приготовить 0,5 л глинистого раствора с условной вязкостью 25 с, измерить его плотность и по формуле (2) определить выход раствора

$$Q_p = 630 / (\delta_p - 1000).$$

Анализ результатов исследований. Выводы

На основании заполненных таблиц необходимо определить минеральный состав, сделать выводы о качестве глины и её пригодности для приготовления глинистых растворов, то же Сделать и по отношению к воде.

Практическая работа 2.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОФИЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БУРОВЫХ (ГЛИНИСТЫХ) РАСТВОРОВ

Цель лабораторной работы - экспериментально раскрыть теоретические положения о природе структурирования глинистых растворов, получить навыки экспериментальной деятельности, обеспечить глубокое понимание явлений структурирования глинистых растворов.

Структурированные промывочные жидкости при бурении скважин применяют с целью колюматации пор и трещин горных пород, закрепления стенок скважин, представленных рыхлыми и неустойчивыми горными породами, создания противодействия на стенки скважин неустойчивых пород. Структурированные жидкости обладают малой водоотдачей, что предотвращает набухание глинистых пород и их обвалы; обладают высокой несущей способностью, что позволяет выносить с забоя тяжёлый шлам.

Теоретическая часть

"Структура - это совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающая его целостность, т.е. сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях".

В коллоидной химии понятию структура придаётся более широкий смысл. По классификации П. А. Ребиндера для дисперсных систем выделяют два типа структур: кристаллизационный (конденсационный) и коагуляционный (тиксотропный). Если первый тип структур соответствует вышеописанному определению, т. е. представляет собой совокупность устойчивых связей твёрдых частиц с образованием жёсткого каркаса, то второй тип структур представляет собой совокупность неустойчивых связей твёрдых частиц, обеспечивающих устойчивые связи только в состоянии покоя. При течении эти временные структуры (пространственные каркасы) разрушаются.

Таким образом, под структурой дисперсных систем понимают совокупность межмолекулярных связей частиц твёрдой фазы.

Коагуляция частиц (межмолекулярное взаимодействие) возможна лишь на незначительных расстояниях между частицами, измеряемых чаще всего десятками нанометров (т. е. в весьма концентрированных твёрдых дисперсных системах или растворах с гидрофобной твёрдой фазой).

В промывочных жидкостях расстояния между частицами значительно превышают названную величину. В этих системах с гидрофильной твёрдой фазой прочность структуры осуществляется за счёт гидратных слоёв. В зависимости от гидрофильности твёрдой фазы и характера структуры (за счёт коагуляции частиц или за счёт гидратных, адсорбционных слоёв) структуры буровых растворов можно разделить на гидрофобные и гидрофильные. Задачей лабораторной работы является изучение гидрофильной структуры. В качестве структурированных промывочных жидкостей в практике бурения чаще всего применяют глинистые растворы.

Прочность структуры глинистых растворов зависит от количества глинистых частиц в единице объёма (концентрации и дисперсности глины) и их активности (гидрофильности).

Глина - это совокупность глинистых частиц различных фракций и различных минералов (силикатов), чаще всего листовых. Поверхность частиц силикатов представлена кремнекислородными группами (силанольными анионами) $\equiv\text{SiO}^-$. Кислород, как известно, обладает весьма высокой электроотрицательностью, поэтому поверхность частиц оказывается полярной с отрицательным зарядом и способна взаимодействовать с различными катионами, наиболее активно (по исследованиям академика Гедройца) с ионами водорода, который способен вытеснить даже трёхвалентные катионы. В результате нейтрализации полярной группы водородом $\equiv\text{SiOH}^+$ заряд частиц, а следовательно, её активность понижаются.

Под воздействием заряда частиц вокруг *них* образуется плотный гидратный слой четко соориентированных и прочно связанных молекул-диполей воды. Гидратный слой обладает высокой прочностью, в результате чего и промывочная жидкость становится более вязкой с прочной структурой. Прочность

гидратного слоя (прочность межмолекулярных связей воды) зависит от его толщины

$$f = \frac{c}{r^7} \quad (2.1)$$

где r - толщина слоя.

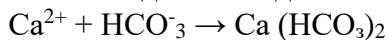
Чем больше глинистых частиц и меньше расстояния между ними (тоньше гидратный слой), тем прочнее структура промывочной жидкости.

Качество глины определяется как её способностью диспергировать в воде, так и количеством функциональных групп ($\equiv\text{SiO}^-$; $\equiv\text{SiOH}^-$) и их активностью. Наиболее интенсивно диспергируют в воде натриевые монтмориллониты, пакеты которых связаны слабыми одновалентными катионами Na^+ , легко диссоциирующими в воде. Труднее диспергируют кальциевые монтмориллониты.

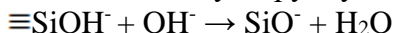
С целью удаления или замены натрием обменных катионов Ca^{2+} , сшивающих пакеты глинистых частиц в глинистый раствор добавляют щелочные электролиты, способные взаимодействовать с катионами Ca^{2+} и образовывать нерастворимые соли. Наряду с удалением ионов Ca^{2+} щёлочи способны удалять водородный экран и переводить малоактивные функциональные группы $\equiv\text{SiOH}^-$ более активные $\equiv\text{SiO}^- \text{Na}^+$.

Пример: В воде кальцинированная сода диссоциирует на ионы

$\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{OH}^- + \text{Na}^+ \text{HCO}_3^-$ взаимодействует с обменными катионами и выпадает в осадок



Оксигруппа OH^- взаимодействует с водородом функциональной группы и образует воду, а функциональная группа OH переходит в более активную группу $\equiv\text{SiO}^-$



Вследствие этого при обработке глинистого раствора щёлочью стабильность (агрегативная и седиментационная устойчивость) раствора повышается.

Однако с увеличением щёлочи увеличивается не только концентрация оксигруппы OH^- , но и концентрация катионов (в

частности Na^+), которые при избытке щёлочи способствуют нейтрализации (снижению) гидрофильности глинистых частиц. Поэтому щёлочность глинистого раствора должна контролироваться специальными приборами.

Кроме качества глины, на прочность структуры оказывает влияние её концентрация. Суммарная энергия взаимодействия молекул воды с поверхностью глинистой частицы определяется суммой энергий ориентационного и электростатического взаимодействий.

$$U = \frac{m e \mu}{2} + \frac{2 n \mu^4}{3 r^6 R T}, \quad (2.2)$$

где e – заряд иона частицы, μ – дипольный момент частиц, m – число взаимодействующих ионов.

Для разбавленных растворов (при расстояниях, превышающих действие межмолекулярных сил) между частицами и молекулами воды действуют только электростатические силы

$$f = \frac{m e \mu}{r^3} = \frac{m e \mu C}{V_{\text{ср}}}, \quad (2.3)$$

где

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{n}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\phi} V}{V_{\text{ср}}}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{ср}}}{C}}$$

Здесь V – объём раствора, n – число глинистых частиц, $V_{\text{ср}}$ – объём одной усреднённой частицы, V_{ϕ} – объём всех частиц, C – концентрация глины в растворе.

Из формулы (2.3) следует, что для разбавленных растворов прочность структуры прямо пропорциональна концентрации глины и обратно пропорциональна объёму частиц.

В концентрированных растворах (при расстояниях действия межмолекулярного взаимодействия r)

$$f = \frac{2 n \mu^4}{r^7} = 2 n \mu^4 \left(\frac{C}{V_{\text{ср}}}\right)^{7/3}, \quad (2.4)$$

Методическая часть

Основными показателями гидрофильной структуры глинистых растворов являются величина статистического напряжения сдвига (прочность структуры), водоотдача и стабильность.

Статистическое напряжение сдвига определяют по прибору СНС-2, представляющему из себя два соосных цилиндра (стакана, устанавливаемого на вращающемся столике и боба с рифлённой боковой поверхностью, подвешенного внутри стакана на упругой нити к кронштейну). Стакан через редуктор с частотой вращения 0,2 об/мин приводится в движение от электродвигателя.

Водоотдачу бурового раствора определяют по прибору ВМ-6, имеющему фильтрационный и напорный узлы. Фильтрационный узел состоит из фильтрационного стакана и основания, между которыми устанавливают фильтр. В основании просверлен канал, перекрываемый пробкой.

Напорный узел состоит из напорного цилиндра с тарелкой и клапаном для слива масла и плунжера - груза со шкалой.

Стабильность раствора определяют по суточному отстою в мензурке (в % осветлённой части раствора) и разности плотностей раствора в нижней и верхней частях цилиндра ЦС-I после отстоя его в течение суток

$$C = \rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}$$

Порядок измерения статистического напряжения сдвига: 1) с помощью регулировочных винтов добиваются соосности подвешенного на кронштейне цилиндра и стакана; 2) подвесную головку нити приподнимают и поворачивают до полного совмещения нуля риски с риской указателя (закреплённого на кронштейне); 3) заполняют стакан раствором (при этом не следует смачивать верхний торец цилиндра); 4) путём поворота цилиндра в стакане перемешивают раствор и оставляют его в покое на 1 мин; 5) через минуту включают двигатель и после полной остановки поворота лимба берут отсчёт угла поворота; 6) таким образом, (после перемешивания раствора и минутной выдержки) берут три замера и определяют среднее значение угла поворота $\varphi_{\text{ср}}$; 7) вычисляют СНС по формуле $\theta = K\varphi_1$; 8) аналогичным способом измеряют СНС через 10 мин покоя $10 = K\varphi_{10}$. Коэффициент упругости нити $K = 1,26$.

Порядок измерения водоотдачи: 1) насухо протереть все детали прибора; 2) смочить два листа фильтровальной бумаги и отжать влагу между листами; 3) уложить фильтром (а сверху них резиновую прокладку) в гнездо основания; 4) закрепить стекай в

основании; 5) установить пробку; 6) заполнить стакан раствором; 7) закрепить напорный цилиндр на стакане; 8) закрыть клапан напорного цилиндра; 9) заполнить цилиндр маслом; 10) вставить плунжер; 11) с помощью клапана спустить масло в тарелку до совпадения нуля шкалы с риской на верхней части цилиндра, после чего клапан закрыть; 12) извлечь пробку в основании прибора; 13) включить секундомер, через 30 мин взять отсчёт по шкале прибора; 14) с помощью клапана слить масло в тарелку; 15) снять плунжер; 16) отсоединить напорный цилиндр от стакана и слить масло из тарелки в ведро; 17) вылить масло и раствор из стакана, ополоснуть стакан; 18) нельзя ополаскивать детали напорного узла.

Щелочность бурового раствора определяют по лакмусовой бумаге или с помощью специального прибора рН-метра, основанного на способности одного из его электродов в зависимости от концентрации водородных ионов изменять потенциал. Потенциал другого электрода (электрода сравнения) остаётся постоянным.

В результате изменения потенциала измерительного электрода создаётся меняющаяся с изменением рН разность потенциалов, которая с помощью электронного усилителя усиливается и фиксируется прибором со шкалой, протарированной в единицах рН.

В качестве измерительного электрода используют стеклянную трубочку с толщиной стенки 0,01 мм, заполненную 0,1N раствором HCl, в которую помещён вспомогательный хлорсеребряный электрод. Стеклянный электрод имеет отрицательный заряд. С увеличением концентрации катионов водорода заряд постепенно нейтрализуется, потенциал электрода понижается.

В качестве электрода сравнения используют каломельный электрод, состоящий из металлической ртути, покрытой каломелью Hg_2Cl_2 , и погруженный в насыщенный раствор KCl.

Экспериментальная часть

Для проведения лабораторной работы заранее приготавливают пасту из бентонитового глинопорошка на пресной воде при соотношении бентонита и воды 1:1 по массе.

Из приготовленной пасты студенты на миксере готовят 15 % глинистый раствор на водопроводной воде.

Подгруппа разбивается на 3-6 бригад. Каждой бригаде выдаётся задание:

1-й бригаде - измерить статическое напряжение СНС «водоотдачу В и рН необработанного раствора;

2-й бригаде – 15 % раствор обработать кальцинированной содой из расчёта 2 % соды от содержания глины, раствор перемешать (в течение 5 мин) и после этого измерить СНС, В и рН;

3-й бригаде - разбавить 15 % глинистый, обработанный щёлочью раствор до 10 % и после перемешивания измерить СНС, В и рН;

4-й бригаде - разбавить 15 % глинистый, обработанный щёлочью раствор, до 5 % и после перемешивания измерить СНС, В и рН;

5-й бригаде разбавить 15% глинистый обработанный раствор до 2% и после перемешивания измерить СНС, В и рН.

Полученные бригадами замеры занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№	Необраб. 15 % глинистый раствор	15 % обраб. щелочью глинистый раствор	10 % обраб. щелочью глинистый раствор	5 % обраб. щелочью глинистый раствор	2 % обраб. щелочью глинистый раствор	Примечание
ПаН						

По экспериментальным данным необходимо построить графики зависимости статического напряжения сдвигу (прочности структуры) от концентрации глины $\theta = \varphi(C)$, $V = \varphi(C)$, $pH = \varphi(C)$.

Обсуждение результатов. Выводы

На основании таблицы и графиков необходимо сделать выводы о целесообразности обработки глины кальцинированной содой, о влиянии концентрации глины в растворе на статическое напряжение сдвига, водоотдачу, а также выводы о соответствии экспериментальных результатов теоретическим.

Практическая работа 3.

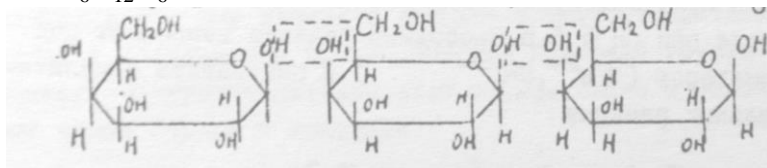
ИЗУЧЕНИЙ ГИДРОФИЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БУРОВЫХ (ПОЛИМЕРНЫХ) РАСТВОРОВ.

Цель работы: экспериментально доказать теоретические положения о природе структурирования полимерных растворов, получить навыки экспериментальной деятельности, обосновать глубокое понимание явление структурирования полимерных растворов.

Теоретическая часть

Полимерами называют соединения, молекулы которых состоят из большого числа атомных групп (звеньев), соединённых химическими связями в длинные цепи и сетки. Полимеры обладают гибкостью цепи, т.е. способностью звеньев под воздействием силового электрического поля какого-либо тела или соседних цепей вращаться относительно друг друга. Все полимеры, в зависимости от состава, подразделяют на органические и неорганические, органические - на природные и синтетические. К неорганическим полимерам можно отнести листовые силикаты. Наиболее широкое применение для приготовления промывочных жидкостей из органических природных полимеров получили производные целлюлозы, а из синтетических производные полиакриловой кислоты.

Целлюлоза (клетчатка) $C_6H_7O_2(OH)_3$ - природный полисахарид, образованный в результате поликонденсации Д - глюкозы $C_6H_{12}O_6$



Это главная составная часть клеточных стенок растений, обуславливающая их прочность. Получают целлюлозу путём растворения древесины и выделения из неё лигнина при сульфидной, сульфатной или щелочной варке. В промышленности целлюлоза используется для получения химических волокон (вискозного, ацетатного), пластмасс, целлофана, бумаги, пороха, лаков и др.

В чистом виде целлюлоза в воде не растворяется вследствие наличия в макромолекуле большого количества оксигрупп, способных с атомами водорода соседних макромолекул образовывать прочные водородные связи. Для возможности растворения целлюлозы в воде часть оксигрупп замещают гидрофобными группами (что позволяет снизить прочность их молекулярных водородных связей) или более гидрофильными (полярными) функциональными группами.

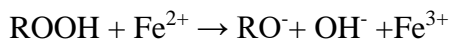
*поликонденсация - процесс образования макромолекул с выделением воды.

По первому варианту путём замещения части оксигрупп OH^- гидрофобной метиловой группой $^-\text{OCH}_3$ получают метилцеллюлозу (ММЦ) $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_3)_x$ оксиэтильной группой – оксиэтилцеллюлозу и т. д.

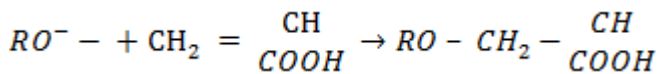
По второму варианту путём замещения части оксигрупп OH^- гидрофильной карбоксиметильной группой $^-\text{OCH}_2\text{COONa}$ получают карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OCH}_2\text{COONa})_x]_n$, сернокислой группой $^-\text{OSO}_3\text{Na}$ -сернокислый эфир целлюлозы (СЭЦ) $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x}(\text{OSO}_3\text{Na})_x]_n$ и т. д.

Путём комбинаций первого и второго вариантов получают метилкар-боксиметилцеллюлозу (МКМЦ) $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_{3-x-y}(\text{OCH}_3)_x(\text{OCH}_2\text{COONa})_y]_n$ и т.д. Группа $^-\text{COONa}$ КМЦ так же, как и соли Na_2CO_3 активно взаимодействует с двухвалентными металлами Ca^{2+} , Mg^{2+} с образованием нерастворимой КМЦ (соли), поэтому в агрессивных средах при наличии катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} КМЦ не применяется. Более устойчивы в этих средах ММЦ, СЭЦ, ОЭЦ, МКМЦ.

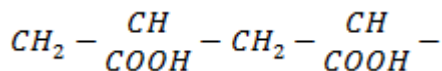
Полиакриловая кислота $[\text{CH}_2\text{CHCOOH}]_n$. - синтетический карбоцепной полимер, который получают путём радикальной полимеризацией акриловой кислоты в воде при $\text{pH} \leq 6,5$. Свободный радикал возникает под воздействием инициаторов (Fe^{2+} , CR^{2+}) в результате окислительно-восстановительных реакций



Этот радикал реагирует с двойной связью молекулы мономера и образует более сложный радикал

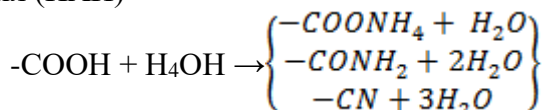


способный взаимодействовать со следующей молекулой мономера и т.д.



Как и все кислоты, полиакриловая кислота ухудшает качество промывочных жидкостей (в первую очередь структурно-механические свойства), повышает водоотдачу, поэтому для обработки буровых растворов полиакриловая кислота не применяется.

В качестве структурообразователей используют соли полиакриловой кислоты, которые получают путём этерификации (нейтрализации) полиакриловой кислоты спиртом. Так, при этерификации полиакриловой кислоты нашатырным спиртом получают полиакриламмонит, полиакриламид (ПАА), полиакрилонитрил (ПАН)



Хорошими структурообразователями являются и сополимеры: метас, М-14, лакрис 20. Метас - термостойкий сополимер метакриловой кислоты и метакриламида, М-14 - термостойкий сополимер метакриловой кислоты и метилметакрилата, лакрис - модификация сополимера М-14.

Качество полимера, как структурообразователя, определяется длиной макромолекулы (степенью полимеризации - количеством звеньев мономеров в цепи), количеством функциональных групп и их гидрофильностью (полярностью).

Полярность функциональной группы обусловлена величиной электроотрицательности её атомов. Под воздействием электроотрицательности электронное облако атомов группы с меньшей электроотрицательностью смещается в сторону атомов с большей электроотрицательностью, что и приводит к поляризации группы. Энергия полярной группы определяется разностью электроотрицательностей отрицательно и положительно заряженных ионов группы в квадрате

$$E = \frac{(n\Theta_1 - \Theta_2)^2}{2},$$

где Θ_1 - электроотрицательность отрицательно заряженного, а Θ_2 - положительно заряженного атома, n - число отрицательно заряженных атомов в группе.

Функциональные группы с малой разностью электроотрицательностей атомов являются гидрофобными.

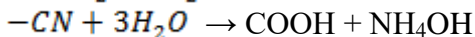
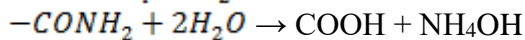
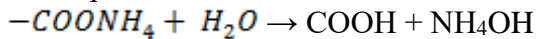
Наиболее высокой электроотрицательностью обладают анионы фтора ($\Theta_1 = 4$), кислорода ($\Theta_1 = 3,5$), азота ($\Theta_1 = 3,07$), хлора ($\Theta_1 = 3$). Наиболее низкой электроотрицательностью - одновалентные катионы калия ($\Theta_2 = 0,91$) и натрия ($\Theta_2 = 0,93$). Следовательно, полимеры, имеющие в функциональных группах кислород и азот, весьма гидрофильны.

Причём, чем больше их атомов в группе, тем более гидрофилен полимер. Поэтому для приготовления промывочных жидкостей чаще всего применяет полимеры с кислородо- и азотосодержащими функциональными группами.

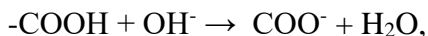
Повысить гидрофильность функциональной группы можно путём устранения экрана катионов или их замены на менее электроотрицательные катионы.

С этой целью прибегают к гидролизу (разложению воды) полимера с образованием кислоты и спирта - процессу этерификации.

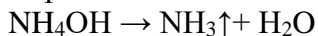
Так, при гидролизе производных полиакриловой кислоты (в щелочной среде) получают полиакриловую кислоту, которая в щелочной среде теряет водород и превращается в весьма гидрофильный полимер



В щелочной среде карбоксильная группа переходит в более активную группу



а гидроксид аммония разлагается на аммиак и воду



Так, в результате гидролиза ПАА получают более активный полимер ГПАА и его разновидности РС-1, РС-2, РС-4. В результате гидролиза полиакрилонитрила - ГиПАН и его разновидности: К-4, К-9, "нитрон"



Методическая часть

Основными показателями прочности структуры полимерных растворов, так же, как и для глинистых растворов, являются статическое напряжение сдвигу, водоотдача и рН. Приборы для определения этих показателей рассмотрены в предыдущей работе.

Экспериментальная часть

Подгруппа разбивается на 3-5 бригад. Каждой бригаде выдаётся индивидуальное задание.

1-й бригаде - приготовить миксером 0,5; 1,0; 1,5% растворы КМЦ, определить СНС, водоотдачу и рН растворов.

Результаты занести в табл.1.

Таблица 3.1

	1-я бригада			2-я бригада			3-я бригада			4-я бригада			5-я бригада		
	КМЦ %			ПАА %			ОЭЦ %			Метас %			Гипан %		
	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2	0,5	1,0	2
θ , Па V, см ³ /30мин рН															

2-й бригаде - приготовить 0,5; 1,0;2% растворы ПАА, определить показатели СНС, водоотдачу и рН, результаты занести в табл.1.

3-й бригаде - приготовить 1,0;2,0;3% растворы метаса, определить СНС, водоотдачу и рН, результаты занести в табл. 3.1.

4-й бригаде - приготовить 0,5;1,0;2% растворы метаса, определить СНС, водоотдачу и рН, результаты занести в табл. 3.1.

5-й бригаде - приготовить 0,5;1,0;2% растворы гипана, определить СНС, водоотдачу и рН растворов, результаты занести в табл. 3.1.

По экспериментальным данным необходимо построить графики зависимости СНС, водоотдачи и рН от концентрации полимера

Обсуждение результатов. Выводы

На основании таблицы и графиков необходимо сделать выводы о влиянии концентрации полимеров на показатели θ , В, рН, о соответствии зависимостей с теоретическими положениями, о возможности использования полимерных растворов в качестве промывочных жидкостей при следующих условиях СНС = 0,5 \pm I Па, В = 5-10 см³/30 мин.

Практическая работа 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Цель работы: экспериментально определить зависимость вязкости буровых растворов от концентрации твёрдой фазы, скорости течения плотности и сечения потока.

Теоретическая часть

Вязкость (внутреннее трение) - свойство жидкостей оказывать сопротивление при её течении.

Вязкость - один из важнейших показателей промывочных жидкостей - существенно влияет на эффективность бурения горных пород. Вязкие структурированные растворы способствуют кольматации пор и трещин в горной породе, закреплению стенок скважин в рыхлых и неустойчивых горных породах; вязкие растворы имеют малую водоотдачу, а, следовательно, предотвращают насыщение пористой глинистой породы водой, её набухание и обвалы стенок скважин. Вязкие растворы обладают высокой несущей способностью и применяются при бурении горных породообразующих шлам высокой плотности.

Природа вязкости промывочных жидкостей та же, что и прочность структуры - межмолекулярное взаимодействие молекул воды и частиц твердой фазы. Поэтому зависимости

вязкости от концентрации твёрдой фазы, температуры и размеров сосудов (диаметра труб, зазора между трубами и стенками скважин, в котором находится или протекает жидкость) те же, что зависимости прочности структуры от этих величин. Однако вязкость не всегда соответствует статическому напряжению сдвига. Так, например, в малоглинистых, активированных растворах, растворах с гидрофильной структурой вязкость значительно ниже, чем СНС, так как при движении жидкости вследствие дезориентации молекул взаимодействие между ними снижается, а в растворах с гидрофобной структурой вязкость значительно выше, чем СНС, так как при течении воды вследствие дезориентации молекул толщина гидратных оболочек уменьшается, а сила межмолекулярного взаимодействия частиц возрастает.

При обработке малоглинистых растворов гибкими полимерами (например, метасом) при повышении концентрации полимера в небольших объёмах СНС понижается (за счёт повышения толщины гидратного слоя), а вязкость повышается. Дело в том, что полярные (функциональные) группы полимера (по закону полярностей Ребиндера) поворачиваются в сторону фазы с большей полярностью. При течении раствора молекулы воды дезориентируются (движутся более хаотично) полярность воды понижается и полярные группы поворачиваются в сторону более полярной поверхности глинистых частиц, а гидрофобной в сторону воды. В результате частицы становятся более гидрофобными и, как следствие, вязкость раствора сначала возрастает (до некоторого предела концентрации полимера, а затем при образовании второго слоя полимера понижается.

За единицу вязкости принимают касательные усилия при течении жидкости, приходящиеся на единицу площади (касательные напряжения, Па) при разности скоростей между слоями равно $dv = \text{м/с}$ и расстояние между ними $dr = 1 \text{ м}$.

Для ньютоновских жидкостей

$$\tau = \eta \frac{dv}{dr} = |\eta|, \quad (4.1)$$

где η - коэффициент вязкости.

Для бингамовских (вязкопластичных) жидкостей (глинистых растворов)

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr} \quad (4.2)$$

где τ_0 - динамическое напряжение сдвига, η - коэффициент пластической вязкости.

Коэффициент пластической вязкости при использовании вискозиметра ВСН-3 определяют из соотношения

$$\eta = (\varphi_{600} - \varphi_{300}), \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (4.3)$$

а динамическое напряжение сдвига

$$\tau_0 = 0,3(2\varphi_{300} - \varphi_{600}), \text{ Па} \quad (4.4)$$

где φ - угол поворота лимба, град, вискозиметра ВСН-3.

Вязкость структурированных жидкостей можно определить и по формуле

$$\tau = \eta_{\text{эф}} \frac{dv}{dr}, \text{ Па}, \quad (4.5)$$

где

$$\eta_{\text{эф}} = \eta + \tau_0 / \frac{dv}{dr}, \quad (4.6)$$

Вязкость (касательные напряжения сдвига) псевдопластичных жидкостей (активированных малоглинистых, полимерных, полимерглинистых растворов) при $\eta = 600$ об/мин определяют по степенному закону

$$\tau_{600} = \eta_c \frac{v^n}{r}, \quad (4.7)$$

С другой стороны касательные напряжения можно выразить через коэффициент трения и радиальное давление жидкости

$$\tau_{600} = fP \quad (4.8)$$

В соответствии с законом Бернулли у стенок внутреннего цилиндра (боба) вискозиметра ВСН-3, где $V = 0$

$$P_0 = \text{const} - \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \quad (4.9)$$

у стенок вращающегося внешнего цилиндра $v = v_{\text{ц}}$

$$P_{\text{ц}} = \text{const} - \frac{\rho v_{\text{ц}}^2}{2} \quad (4.10)$$

тогда радиальное давление

$$P = P_0 - P_{II} = \frac{\rho v_{II}^2}{2} \quad (4.11)$$

При $V_0 = V_{II}$ $P = 0$

Из уравнений (4.7), (4.8) и (4.11)

$$f = \frac{\eta_c \left(\frac{v}{r}\right)^n}{\rho \Delta v^2} = \frac{\eta_c}{\rho \Delta v^{2-n} r^n} = \frac{\eta_0 C^{7/8}}{\rho \Delta v^{2-n} r^n}, \quad (4.12)$$

где η_0 - показатель вязкости.

Таким образом касательные напряжения сдвига определяются двумя показателями коэффициентом трения f , (межмолекулярного взаимодействия молекул воды и частиц твёрдой фазы), зависящим от концентрации твёрдой фазы, скорости течения и размеров труб с одной стороны и радиального давления $P = \rho v^2 / 2$ с другой стороны.

При повышении скорости течения коэффициент трения понижается и тем интенсивнее, чем меньше показатель степени (чем ниже гидрофильность глинистых частиц, выше глиноёмкость раствора). При некотором значительной концентрации, когда молекулярные связи между частицами окажутся выше, чем с поверхностью частиц, скорость течения по всему сечению потока окажется одинаковой $V = V_{II}$ радиальное давление снизится до нуля, следовательно, взаимодействие молекул воды со стенками трубы возрастает, и раствор будет перемещаться в трубе как твердое тело. Энергия затрачивается только на трение раствора о трубу $\tau = f r P_0$, и касательные напряжения не будут зависеть от скорости течения ($n=0$, $\tau = \tau_0 = const$).

Методическая часть

Таким образом, основными показателями вязкости бурового раствора являются: для бингамовских (глинистых) растворов - динамическое напряжение сдвигу τ_0 и пластическая вязкость, для псевдопластичных (полимерных) растворов - эффективная вязкость.

Все эти показатели определяют по прибору - вискозиметру ВСН-3.

В полевых условиях пользуются условной величиной вязкости, определяемой по времени истечения 500 см^3 раствора из воронки через трубку с внутренним диаметром 5 мм.

Вискозиметр ВСН-3 состоит из станины, внутри которой в нижней части установлен двигатель для привода (через редуктор) гильзы для измерения вязкости раствора, а в верхней части - двигатель для вращения этой же гильзы при определении СНС (с частотой 0,2 об/мин). Внутри гильзы на стержне, установленном в станине на подшипниках, подвешивается подпружинный цилиндр с рифлёной поверхностью (боб). В процессе измерения гильза вводится в стакан с исследуемым буровым раствором при подъёме телескопического столика. На стержне боба закреплён лимб с делениями (в градусах). Редуктор нижнего двигателя с помощью переключателя позволяет менять частоту вращения гильзы (200,300,400,600 об/мин).

П о р я д о к и з м е р е н и я в я з к о с т и .

1. Заполнить стакан исследуемым раствором до риски, установить его на подъёмном столике, поднять столик до упора и зафиксировать его поворотом по часовой стрелке.
2. Установить переключатель в положение 600 об/мин и включить двигатель.
3. Выждать 2-3 мин (до полной остановки лимба), взять отсчёт по лимбу f_{600} и отключить двигатель.
4. Переключатель установить в положение $n=300$ об/мин и включить двигатель.
5. После полной остановки лимба взять отсчёт f_{300} .

По полученным значениям в соответствии с формулами (4.3-4.6) определяем пластическую вязкость, динамическое напряжение сдвига, эффективную вязкость и вязкость раствора при 600 об/мин. Вязкость раствора при других числах оборотов гильзы можно определить по формуле

$$T = K \cdot \varphi_n \quad (4.13)$$

коэффициент K приводится в паспорте вискозиметра.

Статическое напряжение сдвига определяют при 0,2 об/мин после перемешивания раствора при $n = 600$ об/мин и выдержки после перемешивания в течение 1 мин и 10 мин.

Показания шкалы снимают в момент максимальных знамений перед разрушением структуры

$$\theta = K \cdot \varphi_n \quad (4.14)$$

Экспериментальная часть:

Из приготовленной заранее пасты черногорского глинопорошка миксером приготавливают 2 л 20 % глинистого раствора, обработанного (2 % от веса с чистой глины) кальцинированной содой.

Группа студентов разбивается на 3-6 бригад. Каждой бригаде выдаётся индивидуальное задание.

1-й бригаде: определить зависимость вязкости глинистого раствора от концентрации глины. Для этого отлить из общей ёмкости 0,3 л. раствора и разлить его в пять частей: 120, 90, 60, 30 мл, разбавить водой четыре последних до 120 мл, получив таким образом по 120 мл: 20, 15, 10, 5 и 2%-х глинистых растворов.*

Для каждого раствора определить по формуле (4.6) значение τ_{600} и формуле (4.14) значения θ .

Полученные значения занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Показатели τ_{600} и θ глинистого раствора при концентрации глины								
20%		15%		10%		5%		2%
	600		600		600		600	

По полученным данным построить график зависимости $\tau_{600} = \varphi(C)$, $\theta = \varphi(C)$.

2-й бригаде: определить зависимость вязкости глинистого раствора от скорости вращения цилиндра вискозиметра. Для этого из общей ёмкости отлить 150 мл 20 %-го глинистого раствора, определить по формулам (4.13) и (4.14) значения τ и θ при различной скорости вращения цилиндра: 0,2; 200; 300; 400; 600 об/мин. Затем в 2 раза разбавить раствор водой (до 10 %) и вновь замерить эти показатели.

*Для сокращения времени приготовления растворов получить требуемые растворы можно путём последовательного разбавления одного и того же 20 %-го раствора после определения τ_{600} до 15, затем 10,5 и 2 %.

Полученные результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Концентрация раствора %	θ , Па	Вязкость, Па			
		τ_{200}	τ_{300}	τ_{400}	τ_{600}
20					
10					

По экспериментальным данным построить графики зависимости $\tau = \varphi(n)$ для 20 и 10%-х растворов.

3-й бригаде: определить зависимость вязкости и СНС глинистого раствора от зазора между вращающимся цилиндром и бобом.

Для этого из общей ёмкости отлить 150 мл 20 %-го глинистого раствора, определить по формулам (4.7) и (4.16) и τ_{600} при установке различных цилиндров, позволяющих получать зазор..... мм. Разбавить в 2 раза раствор и вновь определить значения θ и τ

Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Концентрация глины, %	Значения θ и τ_{600} при					
	$\delta =$		$\delta =$		$\delta =$	
	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}
20						
10						

По экспериментальным данным построить график зависимости $\tau_{600} = \varphi(\delta)$ и $\theta = \varphi(\delta)$.

4-й бригаде: определить зависимость вязкости и СНС глинистого раствора от его плотности.

Для этого отлить из общей ёмкости 150 мл 20 %-го глинистого раствора, в который добавить 10 % барита и определить на вискозиметре значения θ и τ_{600} и ареометре значения ρ . Затем добавлять по 5 % барита и также определять значения ρ , θ , τ_{600} при 15 и 20 % барита.

Результаты занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Показатели θ и τ_{600} при					
10 % барита		15 % барита		20 % барита	
θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}

По полученным результатам построить график зависимости $\tau_{600} = \omega(\delta)$, $\theta = \omega(\delta)$.

5-й бригаде: определить зависимость вязкости глинистого раствора от температуры. Для этого отлить 150 мл 20%-го глинистого раствора, замерить его температуру и определить показатели θ и τ_{600} на вискозиметре ВСН-3. Подогреть раствор до 40 °С и определить показатели θ и τ_{600} . Затем подогреть до температуры 60 и 80 °С и замерить значения θ и τ_{600} .

Результаты занести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Показатели θ и τ_{600} при							
20 °С		40 °С		60 °С		80 °С	
θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}	θ	τ_{600}

По полученным данным построить графики зависимости $\tau_{600} = \varphi(T^{\circ}\text{C})$, $\theta = \varphi(T^{\circ}\text{C})$.

Обсуждение результатов. Выводы

Полученные различными бригадами исследования обобщить, составить отчёт, сделать выводы.

Практическая работа 5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ПРОЧНОСТЬ СТРУКТУРЫ И ВЯЗКОСТЬ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ (ГИДРОФОБНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ)

Цель работы: экспериментально раскрыть теоретические положения о гидрофобных структурах промывочной жидкости, обеспечить более глубокое понимание происходящих в растворах физико-химических процессов при обработке их электролитами.

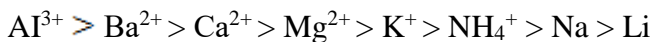
Теоретическая часть

Гидрофобная структура промывочной жидкости обусловлена межмолекулярным взаимодействием частиц твёрдой фазы, которые возможны только на незначительном удалении частиц друг от друга. Сближение частиц возможно в двух случаях: при повышении количества частиц твёрдой фазы (повышении концентрации или их диспергировании) и при гидрофобизации частиц (снижении их потенциала электролитами или гидрофобизация гидрофобными полимерами).

Все структурообразователи промывочных жидкостей обладают отрицательным зарядом, поэтому нейтрализацию заряда производят катионоактивными электролитами. В процессе насыщения бурового раствора электролитами вокруг частиц твёрдой фазы образуется двойной электрический слой (ДЭС), состоящий из заряженной поверхности самих частиц и слоя катионов, нейтрализующих этот заряд.

Интенсивность снижения потенциала частиц зависит от заряда катионов, с увеличением заряда она растёт. С помощью одновалентных катионов заряд частиц нейтрализуется частично, с помощью двухвалентных катионов потенциал может быть понижен до нуля, а трёхвалентными катионами можно даже изменить заряд на противоположный.

По адсорбционной способности (способности катионов вытеснять с поверхности частиц силанольного типа $\equiv \text{SiO}^-$) катионы располагаются в следующем порядке



Ионы водорода с радикалами $\equiv \text{SiO}^-$ образуют прочные водородные связи и поэтому способны вытеснять все вышеприведённые катионы.

При нейтрализации потенциалы частиц твёрдой фазы сила взаимодействия с ними молекул воды понижается, понижается толщина гидратного слоя, частицы получают возможность сблизиться на расстояние их межмолекулярного взаимодействия, что резко повышает прочность структуры (связей частиц). При повышении концентрации катионов может произойти полная нейтрализация заряда, агрегатирование (слипание) частиц и их седиментация.

При снижении толщины гидратного слоя увеличивается и кулоновское взаимодействие катионов с частицами твёрдой фазы. Особенно интенсивно оно проявляется при наличии поливалентных катионов, способных “сшивать” частицы уже при малых концентрациях.

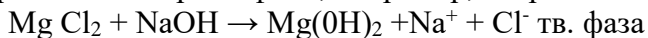
Гидрофобизация частиц сопровождается повышением водоотдачи. Гидрофобное структурирование раствора можно определить по повышению прочности структуры и водоотдачи. При агрегатировании твёрдой фазы водоотдача также растёт, но прочность структуры понижается. При флокуляции частиц (образовании хлопьев) прочность структуры растёт, водоотдача остаётся постоянной.

Для повышения прочности структуры промывочных жидкостей электролиты используют редко. Чаще электролиты добавляют в раствор с целью ингибирования (ограничения, предотвращения), набухания глинистых пород. В этом случае катионы из раствора за счёт кулоновских сил по порам проникают в глинистую породу, нейтрализуют заряд глинистых частиц, в результате чего предотвращается всасывание воды и набухание породы. Глинистые частицы без гидратного слоя повышают свою прочность за счёт межмолекулярного взаимодействия.

Наиболее эффективными ингибиторами являются поливалентные катионы. Однако поливалентные катионы при высокой их концентрации повышают положительный заряд бурового раствора, что приводит к диспергированию глинистой породы (засасыванию раствором отрицательно заряженных глинистых частиц породы, слагающих стенки скважин), кавернообразованию, авариям и ухудшению качества бурового раствора. Поэтому ингибирующие растворы готовят с использованием солей одновалентных металлов (NaCl, KCl) или слаборастворимых в воде соединений поливалентных металлов, вследствие чего обеспечивающих раствор незначительным количеством поливалентных катионов: известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$, гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Легко растворимые соли поливалентных металлов CaCl_2 , AlCl_3 могут использоваться только для приготовления ингибирующих растворов при бурении недиспергирующихся глинистых пород: микротрещиноватых аргиллитов, глинистых сланцев с целью "сшивания" кусков горной породы.

Электролитами насыщают буровые растворы при бурении соленосных отложений с целью предотвращения их растворения при бурении. Обычно насыщают буровой раствор теми же солями, которые присутствуют в геологическом разрезе: при бурении галита - поваренной солью, а бишофита и корналита - раствором бишофита.

Наконец, электролиты применяют для получения конденсированной твёрдой фазы, например, гидрогеля магнезия



В глинистых растворах электролиты вызывают коагуляцию, агрегатирование и седиментацию глинистых частиц, ухудшают качество бурового раствора. Для предотвращения агрегатирования и седиментации глинистых частиц, а также роста кристаллов конденсированной твёрдой фазы раствор стабилизируют солестойкими полимерами (например, КМЦ КССБ и др.).

Методическая часть

Основными показателями гидрофобной структуры буровых растворов являются прочность структуры (статическое напряжение сдвига), вязкость, водоотдача и стабильность.

Статическое напряжение сдвига и вязкость бурового раствора предусматривается определять на вискозиметре ВСН-3, водоотдачу на приборе ВМ-6, стабильность по суточному отстою в мензурке (%) и в цилиндре ЦС-2 по разности плотности раствора в верхней и нижней половине цилиндра $s = \rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}$. Для приготовления бурового раствора предусматривается использовать миксер, для нагревания раствора - кипятильник.

Экспериментальная часть

Подгруппа разбивается на пять бригад. Каждой бригаде выдается задание.

1-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи глинистого раствора от концентрации поваренной соли. Для этого из заранее приготовленной пасты черногорского глинопорошка (в соотношении глина - вода 1:1) приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработанного кальцинированной содой (2 % от веса глины). Из общей ёмкости отлить в четыре ёмкости по 250 мл 15 %-го глинистого раствора, добавить в три из них 5,15,25 % поваренной соли, тщательно перемешать и определить показатели, для каждого раствора. Результаты занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	В см ³ /30 мин
0			
5			
15			
25			

По экспериментальным данным построить графики зависимости $\theta = \varphi(C)$, $\tau_{600} = \varphi(C)$, $V = \varphi(C)$.

2-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи от концентрации хлористого кальция. Для этого приготовить 1л 15 %-го глинистого раствора, обработанного

кальцинированное содой (2 % от веса глины), разлить раствор в четыре ёмкости по 250 мл, добавить в три из них хлористого кальция: 0,5; 1,5; 2,5 %, тщательно перемешать и определить для каждого раствора показатели θ , τ_{600} , В. Результаты занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	В см ³ /30 мин
0			
0,5			
1,5			
2,5			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), В = \varphi(C).$$

3-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи глинистого раствора, стабилизированного КМЦ-600 от концентрации хлористого калия. Для этого приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от веса глины) и 1,5 %-го КМД. Раствор разлить в четыре ёмкости по 250 мл. В три из них добавить хлористого калия 5, 15, 25 %. Для каждого раствора определить θ , τ_{600} и В. Результаты занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	В см ³ /30 мин
0			
5			
15			
25			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), В = \varphi(C).$$

4-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкости и водоотдачи, стабилизированного КМЦ-600 глинистого раствора от концентрации хлористого кальция. Для этого приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработать его кальцинированной содой (1 % от веса глины) и 1,5 %-го КМЦ-600. Раствор разделить и разлить в 4 ёмкости по 250 мл. В три из них добавить 0,5; 1,5; 2,5 % CaCl₂.

Растворы тщательно перемешать и определить для каждого из них показатели θ , τ_{600} и V . Результаты занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	V см ³ /30 мин
0			
0,5			
1,5			
2,5			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), V = \varphi(C).$$

5-й бригаде: определить зависимость прочности структуры, вязкость и водоотдачи от концентрации поваренной соли. Для этого приготовить 1 л 15 %-го глинистого раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от веса глины) и КМЦ-600. Разлить раствор в 4 ёмкости по 250 мл. В три из них добавить поваренной соли 5, 15, 25 %. Для каждого раствора определить θ , τ_{600} и V . Результаты занести в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Концентрация (С) соли %	θ , Па	τ_{600} , Па	V см ³ /30 мин
0			
5			
15			
25			

По экспериментальным данным построить графики зависимости

$$\theta = \varphi(C), \tau_{600} = \varphi(C), V = \varphi(C).$$

Обсуждение результатов. Выводы

Полученные результаты обобщить всей подгруппой, оделить выводы о влиянии электролитов на свойства глинистых растворов и целесообразности обработки ими буровых растворов.

Практическая работа 6.

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ РАЗЖИЖЕНИЯ (ДЕСТРУКТИРОВАНИЯ) БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Цель работы: экспериментально раскрыть теоретические положения о влиянии различных способов деструктурирования и снижения вязкости промывочных жидкостей.

Теоретическая часть

В процессе бурения соленосных отложений или при наличии агрессивных подземных вод в результате гидрофобизации катионами электролитов частиц твёрдой фазы прочность структуры и вязкость буровых растворов резко возрастают. Прочность структуры и вязкость буровых растворов возрастают также и вследствие насыщения промывочных жидкостей тонким шламом. Резкое повышение вязкости раствора вызывает ряд нежелательных явлений осложняющих процесс бурения. В первую очередь вязкие растворы существенно снижают механическую скорость бурения.

$$V_{\text{мех}} \approx V_0 (1 - \kappa \tau)$$

где V_0 - механическая скорость бурения при промывке водой, τ - вязкость раствора.

Высокая вязкость раствора вызывает необходимость дополнительного расхода энергии на вращение снаряда, затрудняет очистку раствора от шлама, повышает содержание в растворе абразивного шлама, что ведёт к интенсивному износу снаряда, осложняет спуско-подъёмные операции, создаёт антисанитарные условия.

При повышении концентрации твёрдой фазы в растворе повышается его плотность ρ , что также резко снижает механическую скорость бурения

$$V_{\text{мех}} = \frac{V_0}{\rho^n}$$

Снижение прочности структуры и вязкости раствора на практике осуществляют путём уменьшения частиц тонкодисперсной твёрдой фазы в растворе (разбавления водой,

удаления части твёрдой фазы флокулянтами, агрегации и седиментации частиц). Удаление грубой твёрдой фазы (шлама) осуществляет в очистной системе с помощью вибросит, гидроциклонов, желобов, отстойников. Эти методы используют в тех случаях, когда требуется одновременно со снижением СНС и вязкости понизить и плотность раствора.

В тех случаях, когда нужно понизить прочность структуры, но сохранить плотность раствора на прежнем уровне растворы разжижают (путём удаления из раствора катионов в первую очередь, поливалентных металлов Ca^{2+} , Mg^{2+}) с солями с поливалентными анионами, способными образовывать с Ca и Mg нерастворимые соединения Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , путём активации твёрдой фазы: щелочными реагентами (УЩР, ТЩР, фосфатами, щелочными электролитами Na_2CO_3 , NaOH , KOH и др.), полимерами - стабилизаторами (в первую очередь олигомерами).

В результате активации твёрдой фазы между частицами твёрдой фазы образуются толстые гидратные оболочки, межмолекулярное взаимодействие между частицами снижается, прочность структуры, вязкость и водоотдача понижаются.

Для разжижения растворов и снижения водоотдачи чаще всего используют активированный щёлочью гидролизный лигнин и его производные, активированные щёлочью бурый уголь и торф.

Лигнин является отходом гидролизного производства спирта, дрожжей, целлюлозно-бумажного производства. Это составная часть древесины, связывающая фибриллы целлюлозы в единое целое. Активированный лигнин и его производные - ароматические соединения, обладают высокой адсорбционной способностью, способны образовывать на поверхности частиц твёрдой фазы достаточно плотную и гидрофильную полимерную плёнку. Ароматические полимеры - разжижители обладают высокой солестойкостью, при большой концентрации (выше 2-3 %) могут повышать прочность структур.

В практике бурения для разжижения глинистых растворов применяют почти все отходы гидролизного производства: гидролизный лигнин, шлам - лигнин, активные илы,

лигносульфонаты (сульфитспиртовая барда - ССБ, сульфит-дрожжевая бражка - СДБ, нитратный сульфатный щёлок НСЩ). К производным лигнина относятся нитролигнин - продукт окисления и нитрования гидролизного лигнина в 10 % азотной и 4 % серной кислоте, и г е т а н - продукт дальнейшей активации нитролигнина в каустической соде и кислороде; с у н и л - продукт активации нитролигнина гидросульфитом натрия. Производными ССБ являются о к з и л - продукт обработки кальциевой ССБ хромпиком в щелочной среде, феррохромлигносульфонат - продукт взаимодействия ССБ (СДБ) с серноокислым железом и бихроматом натрия, конденсированная сульфитспиртовая барда (КССБ, КССБ-1, КССБ-2, КССБ-4) – продукт обработки ССБ формальгидом и фенолом в кислой среде с последующей нейтрализацией щелочью. Цифра указывает на содержание фенола КССБ-4 кроме того содержит хромпик и по свойствам (термостойкости) близок окзилу.

Помимо целлюлозы и лигнина древесина содержит значительное количество гемицеллюлоз (примерно равное содержанию лигнина), среди которых выделяют древесную смолу. Экстракционная (нерастворимая в воде, но растворимая в этилацетате) смола наполовину состоит из фенолов. При конденсации фенолов с помощью формальдегидов и формаль сульфитов получают реагент - полифеноллесохимический - ПФЛХ.

Помимо перечисленных реагентов из растений, за рубежом применяют экстракты из различных деревьев и других растений — таннины, представляющие собой конденсированные фенолы. Одним из представителей таннинов является сулькор, получаемый из щелочной вытяжки отходов дубильного экстракта.

Широкое распространение в качестве разжижителей получили УЩР,

ТЩР - продукты активации бурого угля и торфа щелочами и их производные: НГР - (нитрогуматный реагент) - бурый уголь, окисленные 8 %-й азотной кислотой при температуре 50-60 °С, СНГР - сульфированный нитрогуматный реагент, который получают сульфированием бурого угля бисульфатом натрия, ХГР - хромгуматный реагент - бурый уголь, окисленный хромпиком.

В практике бурения для выбора способа структурирования или разжижения на графике определяет оптимальную зону (рис.1) в системе координат θ, T .

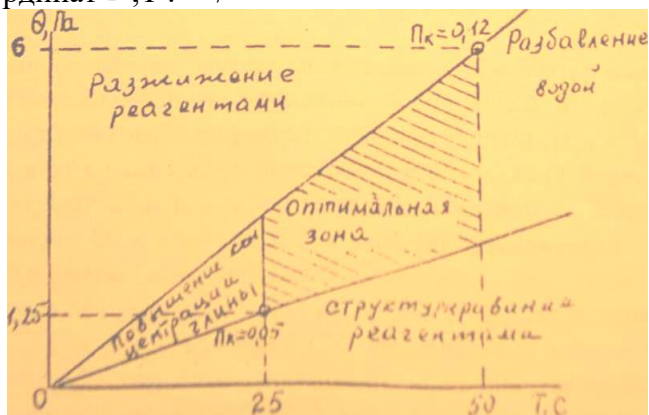


Рис. 6.1. Схема регулирования вязкости раствора

Для этого определяют минимальный и максимальный показатель консистенции - отношение СНС к условной вязкости

$$П_k = \frac{\theta}{T}$$

отмечают точки на графике и через эти точки проводят прямые.

В практике нефтяного бурения за оптимальные показатели принимают $\theta = 1,25 \div 6$ Па, $T = 25-50$ с, максимальный показатель консистенции $П_k = \frac{6}{50} = 0,12$ Па/с, минимальный $П_k = \frac{1,25}{25} = 0,05$ Па/с. Тогда оптимальной областью консистенции будет область, расположенная между прямыми, проведёнными через максимальный и минимальный $П_k$, в пределах - от 1,25 до 6 Па и T от 25 до 50 с.

Если вязкость T будет меньше 25 с раствор структурируют введением дополнительного количества твёрдой фазы, больше 50 с - буровой раствор разбавляют водой. При $П_k < 0,05$, раствор структурируют реагентами, при $П_k > 0,12$, раствор обрабатывают разжижителями (табл. 6.1).

В оптимальной области регулируют только показатель фильтрации.

Таблица 6.1

P _к раствора Па/с	Обработка	Тип реагента			
	Растворами реагентами	Пресный раствор	Слабоминер аз. NaCl раствор	Минерали з. NaCl раствор	Минерал из. CaCl ₂ раствор
P _к =0,05- 0,12	Понизителям и фильтрации	УЩР, ТЩР	УЩР, ТЩР	КССБ, КМЦ, гипан, К- 4, метас	КССБ, КМЦ
P _к <0,05	Структурооб разователям и	NaCl, Na ₂ SiO ₃ , кальц. глина	Ca(OH) ₂ CaSO ₄ натр.глина	Асбест солест. глина	CaCl ₂ , Ca(OH) ₂ CaSO ₄ кальц. глина
P _к >0,12	разжижителя ми	УЩР, ТЩР, нитролигнин , игетан, окзил, бур.уголь	ССБ, нитролигни н, окзил, ПФЛХ, бур.уголь	ССБ, окзил	ССБ, окзил

Методическая часть

Основными показателями качества разжижения являются вязкость, статическое напряжение сдвига и водоотдача. Статическое напряжение сдвига, как известно, определяют на приборе СНС-2, вязкость можно определять как по вискозиметру СПВ-5, так и вискозиметру ВСН-3.

Экспериментальная часть

Из заранее приготовленной пасты черногорского глинопорошка приготавливают 25 %-й глинистый раствор. Подгруппа разбивается на пять бригад.

1-й бригаде необходимо отлить из общей ёмкости 0,5 л 25 %-го раствора, определить показатель P_к и при необходимости наметить пути дальнейшей обработки раствора. При необходимости разжижения раствора определить методы разжижения и дать оценку эффективности выбранного метода.

2-й бригаде отлить 0,5 л 25 %-го раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от веса глины), определить по показателю P_к необходимость дальнейшей обработки раствора.

Если требуется разжижение раствора, выбрать метод разжижения и после его реализации определить эффективность метода.

3-й бригаде отлить 0,5 л 25/6-го раствора, обработать его кальцинированной содой (2% от массы глины) и полимерами (КМЦ-600, 1,5 % от массы раствора) и определить по показателю θ необходимость дальнейшей обработки. При необходимости разжижения определить метод разжижения и после его реализации определить эффективность метода.

4-й бригаде отлить 0,5л 25 %-го глинистого, раствора, обработать его кальцинированной содой (2 % от массы глины) и полимерами (КМЦ-600 1,5 % от массы раствора), а затем поваренной солью (5 % от массы раствора). Определить необходимость дальнейшей обработки раствора по показателю P_k . При необходимости разжижения раствора выбрать его метод и после реализации определить эффективность метода.

5- й бригаде отлить 0,5 л 25 %-го глинистого раствора, разбавить его в 2 раза водой, обработать кальцинированной содой (2% от массы глины) метасом (0,5 % от массы раствора) и хлористым кальцием (1 % от массы раствора). По показателе P_k определить необходимость дальнейшей обработки. При необходимости разжижения выбрать метод, а после его реализации определить эффективность метода.

Результаты экспериментов бригады заносят в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Состав раствора				Показатели			Разжижитель и показатель после разжижения			
Глина %	Na ₂ CO ₃	КМЦ метас	NaCl, CaCl ₂	θ_{10} , Па	T, с	P_k	Разж.	θ_{10} , Па	T, с	P_k

Анализ результатов исследований и выводы

На основании экспериментальных данных необходимо проанализировать влияние различных компонентов промывочной жидкости на показатели θ , T, P_k и сделать вывод об эффективности разжижения различными методами.

Практическая работа 7.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

Цель работы: ознакомить студентов с методами регулирования плотности бурового раствора.

Теоретическая часть

При бурении скважин неперенным условием предупреждения водопроявлений обвалов стенок скважин и связанных с ними осложнений является регулирование гидростатического давления столба бурового раствора в зависимости от давления водоносных пластов и норового давления глинистых пород. В зонах аномально высоких пластовых давлений, зонах неустойчивых горных пород, чтобы не допустить водопроявлений и обвалов .необходимо поддерживать плотность раствора, при которой давление на стенки скважин было бы несколько больше пластового давления флюида.

С другой стороны повышенное давление столба жидкости способно вызвать гидравлический разрыв пластов, что может повлечь потери промывочной жидкости и другие последствия. Повышенная плотность бурового раствора резко понижает механическую скорость бурения

$$V_{\text{мех}} = \frac{V_0}{\rho^n}$$

где V_0 - механическая скорость бурения при промывке водой, ρ - плотность раствора, n - показатель степени, равный 2-3.

Следовательно, при бурении скважин необходимо постоянно регулировать плотность бурового раствора.

Для повышения плотности раствора повышают концентрацию глины, вводят специальные утяжелители.

Буровые растворы, приготовленные на основе бентонитовых глин, имеют невысокую плотность 1059-1080 кг/м³. Каолиновые и иллитовые глины в зависимости от их качества позволяют получать растворы плотностью 1180—1300 кг/м³, а за счёт повышения концентрации и обработки химреагентами - разжижителями - 1400 -

1450 кг/м³. Однако опыт показывает, что выгоднее использовать утяжелители с высокой плотностью, т. к. они позволяют уменьшить концентрацию твёрдой фазы в растворе, а значит, повысить механическую скорость бурения и расход утяжелителя.

Основной показатель качества утяжелителя - утяжеляющая способность, которая определяется плотностью раствора после введения 300% утяжелителя (по массе к исходному раствору) для создания раствора с условной вязкостью 60 с, водоотдачей 5-6 см³ за 30 мин.

Утяжеляющая способность материала зависит от его плотности, дисперсности, гидрофильности и химического состава. Высокая степень дисперсности утяжелителя способствует повышению вязкости, а вязкость не позволяет повышать концентрацию утяжелителя и плотность раствора. Низкая степень дисперсности утяжелителя снижает седиментационную устойчивость.

В зависимости от минерального состава утяжелители делят на четыре группы: карбонатные (мергель, $\rho = 2650$ кг/м³, известняк и мел $\rho = 2700$ кг/м³, доломит, $\rho = 2900$ кг/м³, сидерит $\rho = 3900$ кг/м³), баритовые (баритовые концентраты производства обогатительных фабрик цветной металлургии КБ-1, КБ-2, КБ-3, КБ-4, КБ-5, плотностью 4050-4250 кг/м³), железистые (гематит $\rho = 5300$ кг/м³, магнетит $\rho = 4900-5200$ кг/м³, ильменит $\rho = 4790$ кг/м³) и свинцовые (галанит $\rho = 7400-7500$ кг/м³). Железистые утяжелители вследствие их абразивности применяют редко.

При добавках галенита получают буровые растворы плотностью более 3000 кг/м³.

Для промывки скважин в устойчивых горных породах и особенно в трещиноватых зонах с целью повышения механической скорости бурения и снижения поглощения плотность промывочной жидкости понижают (чаще всего за счет аэрации). Аэрация позволяет уменьшить плотность любых промывочных жидкостей в широких пределах. При этом возрастает вязкость раствора; при концентрации воздуха $C = 0 \div 54$ % она равна

$$\mu_a = \mu_n (1 + 3,6 C)$$

где μ_n - исходная вязкость.

При концентрации воздуха $C = 54 \div 96 \%$

$$\mu_a = \frac{\mu_{из}}{I} - C^{0,49}$$

Плотность азрированной жидкости определяется по формуле

$$\rho_0 = \frac{(I - a)\rho}{I - a + a\rho_0/\rho}$$

где ρ_0, ρ - плотность азрированной и исходной жидкостей, a - количество воздуха в единице объёма азрированной жидкости, ρ_0, ρ - атмосферное и заданное давление.

Гидростатическое давление азрированной жидкости ρ на глубине h для статических условий определяют из соотношения

$$P + \frac{a}{I-a} \lg \rho - \rho_0 = \rho h$$

Для придания промывочной жидкости закупоривающей способности в неё вводят наполнители. Для надёжного закупоривания трещин размеры частиц наполнителя должны быть в 2 раза меньше величины раскрытия трещин.

Для азрации промывочных жидкостей применяют специальные азраторы, а для стабилизации азрированных растворов - пенообразователи.

Методическая часть

Плотность бурового раствора чаще всего определяют с помощью ареометра АГ-ЗПП или АБР-1, состоящего из поплавка с двумя рабочими и одной поправочной шкалами, мерного стакана с балластом и съёмного груза.

Перед измерением плотности раствора проверяют правильность его показаний. Для этого в стакан заливают пресную воду, подсоединяют его к поплавку и опускают вместе с поплавком в ведёрко с водой. Если по рабочей шкале 0,8-1,7 уровень воды ведёрка окажется выше или ниже 1, 0, нужно определить причину (наличие засохшей глины в стакане, его деформация, попадание воды в поплавок) и устранить ее. При невозможности этого сделать по поправочной шкале определить поправку.

После определения поправки стакан заполняют исследуемым раствором и опустив его вместе с поплавком в ведёрко с водой, по

шкале 1,6-2,6 определяют плотность раствора; к этому показанию добавляют ее личину поправки. Если поплавков не погружается в воду, к стакану подсоединяют груз и отсчёт ведут по шкале 0,8-1,7.

Для измерения плотности могут быть использованы также рычажные весы - плотномер ВРП-1. Плотномер состоит из стойки и рычага со стаканом. На рычаге имеются две призмы, с помощью которых рычаг устанавливается на стойке, и две шкалы, соответствующие этим призмам. Для определения плотности стакан заполняют раствором до отверстия и закрывают крышкой «рычаг устанавливают на правую призму, с помощью подвижного груза стакан с раствором уравнивают и снимают показания по верхней шкале. Если плотность окажется больше предела измерения, рычаг устанавливают на левую призму и показания снимают по нижней шкале.

Для более точного измерения плотности раствора используют пикнометр, представляющий собой стеклянный сосуд с притёртой пробкой и меткой на шейке.

Для определения плотности раствора вначале взвешивают пустой пикнометр P_1 . Заполняют его до метки исследуемым раствором, закрывают пробкой и вновь взвешивают P_2 .

Плотность бурового раствора рассчитывают по формуле

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

где V - объём пикнометра.

Экспериментальная часть

Для приготовления утяжелённых глинистых растворов заранее готовят пасту из черногорского глинопорошка в соотношении 1:1 по массе.

Подгруппа разбивается на четыре бригады. Каждое бригаде выдаётся задание:

1-й бригаде: а) определить зависимость плотности глинистого раствора от концентрации глины; б) определить концентрацию глинистого раствора максимальной плотности.

Для этого приготовить из глинистой пасты 1 л глинистого раствора с концентрацией 30 %. Разлить его в три ёмкости: 460, 310 и 230 мл.

Во вторую ёмкость добавить 150 мл , в третью 230 мл воды. Определить концентрацию и плотность каждого раствора. По результатам замеров построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$.

Повышая концентрацию глины раствора и регулируя реагентами - разжижителями, добиться максимальной плотности при $T_c = 60$ с и $V = 6$ см/30 мин.

2-й бригаде: а) определить зависимость плотности раствора от концентрации барита; б) определить уплотняющую способность барита. Для этого приготовить 0,6 л 7 %-го(по массе) глинистого раствора, разлить в три ёмкости по 200 мл, добавить в первую 200 г, во вторую 400 г, в третью 600 г барита, после перемешивания измерить плотность каждого раствора, построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$. Для раствора 600г/200 мл определить показатель условной вязкости T_c и водоотдачу. При $T_c > 60$ с и $V > 6$ см/30 мин обработать раствор реагентами до нужных параметров $T_c > 60$ с, $V \approx 6$ см/30 мин и вновь измерить плотность раствора. По результатам замеров построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$.

3-й бригаде: определить зависимость плотности бурового раствора от концентрации мела и определить уплотняющую способность мела.

Для этого приготовить I кг мелового раствора следующего состава по массе: 250 г воды, 750 г мела и 20 г КМЦ. Разлить тщательно перемешанный раствор в три ёмкости: 460 г, 310 г, 230 г. Разбавить водой раствор во второй ёмкости в 1,5 раза, а в третьей ёмкости- в 2 раза. После дополнительного перемешивания раствора определить концентрацию мела и плотность каждого раствора.

Построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$. Определить вязкость T_c к водоотдачу V . При необходимости добавить глины до получения вязкости $T_c = 60$ с и водоотдачи $V = 6$ см/30 мин. Замерить плотность раствора.

4-й бригаде: определить зависимость плотности цементного раствора от концентрации цемента (или $V/ц$) и определить его уплотняющую способность. Для этого приготовить I кг цементного раствора следующего состава: 250 г воды, 750 г цемента ($V/ц = 0,33$). После тщательного перемешивания раствор разлить в три ёмкости: 450 г, 310 г и 230 г. Раствор второй ёмкости

разбавить в 1,5 раза, а в третьей ёмкости в 2 раза. Определить концентрацию цемента (или В/ц) и плотность каждого раствора, построить график зависимости $\rho = \varphi (C)$. Определить вязкость и водоотдачу раствора первого сосуда, добавить глины и полимеры до величины $T_c < 60c$ и $V < 6 \text{ см}/30 \text{ мин}$. Замерить плотность раствора.

Обсуждение результатов. Выводы

На основании полученных результатов сделать выводы о целесообразности использования различных утяжелителей.

Практическая работа 8.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Цель лабораторной работы: экспериментально доказать теоретические положения осложнений при бурении глинистых пород, получить навыки экспериментальной деятельности, обеспечить более глубокое понимание явлений набухания, размягчения и диспергирования глинистых пород.

Теоретическая часть

Глинистые горные породы представляют собой совокупность минеральных обломков различного состава и различных фракций, связанных между собой плёнками воды (в глинах) или кремнекислоты (в аргиллитах). Поэтому глинистые породы называют связными. Со связными частицами «определяющими основные свойства глинистых пород, являются глинистые (размером в микрон и менее) и пылеватые (размером 2-5 мкм) частицы - продукты механического и химического выветривания магматических пород.

По минеральному составу глинистые частицы могут быть представлены различными минералами. Но преобладающими из них являются листовые силикаты: монтмориллонит, гидрослюда (чаще всего иллит и каолинит. Реже встречаются палыгорскит, хлорит, вермикулит и другие листовые силикаты.

Плотные метоморфизованные породы (например, глинистые сланцы, роговики) с непосредственным межмолекулярным взаимодействием глинистых частиц весьма устойчивы. Трещиноватые при насыщении их водой распадаются на кусочки (по трещиноватости). Глины с неустойчивыми и слабоуплотнёнными частицами легко насыщаются водой, набухают, теряют свою прочность и разрушаются.

Степень набухания (отношение объема набухшей породы к объёму сухой породы) обусловлена структурой кристаллов горной породы, дисперсностью и гидрофильностью глинистых частиц. С увеличением дисперсности частиц (увеличением их суммарной поверхности) и гидрофильности (заряда частиц, обусловленного количеством гидрофильных функциональных $\equiv\text{SiO}^-$; $\equiv\text{SiOH}^-$ на их поверхности). Степень набухания возрастает.

Кристаллическая решётка монтмориллонита представляет собой пакетиз двух слоёв кремнекислородных тетраэдров $\text{SiO}_2\text{O}_5^{2-}$, связанных гидраргиллитовым слоем $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. Пакеты между собой связаны обменными катионами: K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} . С увеличением заряда катиона прочность связи повышается, поэтому кальциевые монтмориллониты значительно труднее набухают и диспергируют в воде, по сравнению с натриевыми.

Кристаллическая решётка иллита сходна с кристаллической решёткой монтмориллонита, отличается лишь тем, что в поверхностном слое пакета часть атомов кремния замещена атомами алюминия, в результате чего некомпенсированный заряд поверхности пакетов активнее взаимодействует с катионами (в частности с катионами калия К) и связь между пакетами оказывается значительно выше, чем в пакетах монтмориллонита. Иллиты значительно слабее набухают и труднее диспергируют в воде.

Кристаллическая решётка каолинита имеет только два слоя: слой кремнекислородных тетраэдров и гидраргиллитовый слой. Пакеты каолинита за счёт большого количества гидроксильных групп OH^- сказываются прочно связанными между собой. Глина весьма слабо набухает и диспергирует в воде.

Молекулы воды состоят из атомов кислорода и двух атомов водорода. Атомы кислорода и водорода обладают разной

электроотрицательностью, поэтому орбитали кислорода подвергаются гибридизации (вытягиваются). Молекула воды принимает форму тетраэдра и поляризуется (образует диполь). В двух вершинах тетраэдра (в вершинах орбиталей кислорода с неподелёнными электронными парами) возникает отрицательный заряд, а в двух других вершинах (с атомом водорода) - положительный заряд.

В результате такой поляризации молекул воды осуществляется межмолекулярная связь. Помимо межмолекулярных сил между молекулами воды и поверхностью твёрдого тела возможна и водородная связь, обусловленная способностью атома водорода воды взаимодействовать с высокоотрицательными атомами твёрдого тела: *O, N, Cl, F*. Водородная связь прочнее межмолекулярной в 5-6 раз, но в 15-20 раз слабее химической.

В результате взаимодействия отрицательного заряда глинистых частиц (обусловленного наличием на их поверхности огромного количества высокоотрицательного кислорода) и положительных полюсов молекул (диполей) вода (за счёт межмолекулярных и водородных связей) вокруг частиц образуется плотный адсорбированный гидратный слой, прочно связывающий глинистые частицы друг с другом.

Прочность глинистой породы зависит от толщины плёнки воды между глинистыми частицами.

У самой поверхности глинистых частиц силы взаимодействия молекул воды с частицами достигают тысяч и десятков тысяч кг/см². С удалением от поверхности межмолекулярные силы быстро убывают обратно пропорционально седьмой степени расстояния (от молекул до частиц). Таким образом, чем тоньше плёнка воды, тем выше прочность породы.

Суммарную поверхностную энергию всех частиц горной породы называют объёмной электрической энергией. Плотность объёмное электрической энергии определяется главным образом дисперсностью и гидрофильностью (зарядом) частиц. С увеличением толщины плёнок воды между частицами эта плотность понижается.

Под воздействием объёмной электрической энергии горной породы последняя насыщается водой и набухает. Глина насыщается водой до тех пор, пока толщина гидратного слоя не достигнет некоторого критического значения при котором сила взаимодействия молекул воды с частицами будет меньше силы давления извне или когда межмолекулярные силы снизятся до нуля.

В лабораторных условиях пользуются тремя характеристиками набухания: степенью набухания $K_1 = V_n / V_0$, показателем набухания $K_2 = V_{ж} / \rho$ и скоростью набухания $\omega = K_2 / t$, где $V_{ж}$ - объём воды в горной породе, V_0 - объём сухой породы, V_n - объём насыщенной водой породы, P - вес сухой породы, t - время набухания.

В результате насыщения глины водой толщина плёнок воды между частицами возрастает, вследствие чего прочность глины падает (глина размягчается).

В атмосферных условиях прочность глины понижается обратно пропорционально её влажности в третьей степени

$$f_i = \frac{f_0 K_0^3}{K_i^3} \quad (8.1)$$

где f_0 и f_i пластическая прочность глины исходного образца и образца, насыщенного водой, K_0 , K_i - влажность глины. Характеристикой снижения прочности глинистой породы является коэффициент размягчения $K_p = f_i / f_0$ который зависит от дисперсности глины и гидрофильности ее частиц.

Прочность глины, находящаяся под давлением σ_i обратно пропорциональна её влажности W_i

$$\sigma_i = \frac{W_0 \sigma_0}{W_i}, \quad (8.2)$$

где σ_0 и W_0 - прочность и влажность «сухого» образца глины.

В контакте глины с водой за счёт поверхностной энергии частиц происходит не только "всасывание" молекул воды глиной, но и "всасывание" водой глинистых частиц, т. о. диспергирование глины.

Эффективность диспергирования зависит как от дисперсности и гидрофильности глины, так и от наличия количества и заряда в воде катионов.

За критерий диспергирования глины можно принять скорость диспергирования породы.

Скорость диспергирования - это объём (ΔV) или вес (ΔP) глины, перешедшей с единицы площади образца S в промывочную жидкость за единицу времени

$$D = \frac{\Delta P}{St} . \quad (8.3)$$

Методическая часть

1. Для изучения процессов набухания, размягчения и диспергирования глины предусматривается использовать образцы из кальциевых бентонитов, которые студенты получают из заранее приготовленного глинопорозка на водопроводной воде в соотношении 1:1 по массе.

В настоящее время существует целый ряд методик определения набухания глины.

Наиболее простой является методика визуального наблюдения М. Х. Фишера, заключающаяся в следующем.

Исследуемый образец помещается в градуированный сосуд, фиксируется его начальный объём. Затем в сосуд заливается вода и через некоторое время измеряется объём набухшего образца. Отношением объёма набухшего образца к его первоначальному объёму и характеризуется величина набухания.

Для проведения исследований по этой методике необходимо иметь: 2 мензурки, корзинку для опускания образца, весы и часы.

Для изучения процесса размягчения глины (определения пластической прочности) используют различные методы.

Наиболее часто замер пластической прочности осуществляют по методу П. А. Ребиндера на приборе ВИКа, у совершенство ванному М. С. Винарским. Вместо иглы прибор снабжается комплектом конусов из стали или алюминия с углами при вершине $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

Пластическая прочность определяется по формуле

$$P_m = K\alpha(P/h^2), \text{ Па}, \quad (8.4)$$

при $K\alpha$ – коэффициент зависящий от угла конуса

$$K\alpha = \frac{I}{\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (8.5)$$

при $\alpha = 60^\circ$, $K\alpha = 0,413$; P - вес погружаемой системы, H ; h - глубина погружения конуса, м.

Коэффициент размягчения определяют по отношению пластическое прочности набухшего образца к пластической прочности исходного образца

$$K_p = \frac{P_m}{P_{исх}}$$

Скорость диспергирования глины в воде невелика, и определить её вследствие сложности происходящих в растворе процессов можно лишь с большой погрешностью, поэтому на практике её не измеряют. Тем не менее этот показатель (особенно при использовании в качестве промывочной жидкости растворов электролитов) имеет важное значение при выборе буровых растворов. Исследования предполагается проводить с использованием 5-10 %-го раствора $Al_2(O_4)_3$.

Скорость диспергирования можно определить приближённо по разности весов образцов глины, выдержанных в воде, и испытуемом буровом растворе, делённой на площадь поверхности образца и время выдержки

$$V_g = \frac{P_{н.в.} - P_{н.р.}}{S t}$$

Экспериментальная часть

Исследования набухания и размягчения глины. 1. Из заранее приготовленного замеса глины на воде (в соотношении 1:1 по весу) готовят образцы в виде шариков или цилиндров, диаметром 4-5 см. 2. Определяют вес образцов P_0 . 3. Определяют пластическую прочность (среднюю из трёх измерений).

4. В мензурку заливают 150 мл воды. 5. С помощью корзинки в мензурку опускают образцы глины и измеряют их объём (по изменению уровня воды в мензурке) V_0 . 6. Через каждые 0,5 часа выдержки в воде образцы извлекают из мензурки и измеряют объём набухшей глины V_n . 7. Замеряют вес набухшего образца P_n . 8. Замеряют пластическую прочность глины P_m . 9. Определяют степень набухания $K_1 = \frac{V_n}{V_0}$. 10. Определяют объём жидкости в глине

По полученным данным строят графики зависимости от времени.

Обсуждение результатов. Выводы.

Общие выводы о характеристиках горной породы, о зависимостях показателей и скорости набухания, размягчения и диспергирования от времени. Прогноз поведения горной породы при её перебурировании. Требования к промывочной жидкости при бурении глины.

Литература

1. Ивачёв Л. М. Промывочные жидкости и тампонажные смеси. М.: Недра, 1987.
2. Зварыгин В. И. Регулирование технологических свойств суровых растворов. Красноярск: КИЦМ, 1994.
3. Лекции.



**ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**



**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
Кафедра технологии и техники разведки МПИ**

В. И. Еркалов, Г. А. Усов, Ф.П. Сердюков

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
В БУРЕНИИ**

*Методические указания для самостоятельной работы
студентов по дисциплине*

«Оптимизация в геологоразведочном производстве»

*Для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки*

Очное, заочное

**Екатеринбург
2020**

Оглавление

Предисловие	5
Введение	7
1. Основные понятия и определения.....	14
1.1. Научный эксперимент.....	14
1.2. Планирование эксперимента.....	15
1.3. Система «черный ящик»	16
1.4. Факторы.....	18
1.5. Параметр оптимизации.....	19
1.6. Объект исследования.....	21
1.7. Модель.....	22
Контрольные вопросы.....	24
2. Классификация экспериментов и их характеристика.....	24
2.1. Подразделение экспериментов по структуре.....	24
2.2. Виды экспериментов по стадии научных исследований.....	25
2.3. Эксперименты с точки зрения их организации	25
2.4. Эксперименты по способу их проведения.....	26
2.5. Типы экспериментов по планированию.....	28
Контрольные вопросы.....	28
3. Методологические концепции экспериментирования.....	29
3.1. Рандомизация.....	29
3.2. Получение устойчивых результатов.....	30
3.3. Математическое моделирование.....	31
3.4. Последовательность экспериментирования... ..	31
3.5. Оптимальное использование факторного пространства	32
Контрольные вопросы.....	32
4. Методы обработки результатов наблюдений.....	33
4.1. Исключение грубых погрешностей.....	34
4.2. Результат измерения и оценка его среднего квадратического отклонения.....	36
4.3. Коэффициент вариации и точность измерений.....	40
4.4. Проверка гипотезы о принадлежности результатов наблюдений к нормальному распределению.....	42

4.5. Вычисление доверительных границ случайной погрешности результата измерения.....	48
4.6. Определение необходимого количества наблюдений.....	51
4.7. Проверка однородности наблюдений.....	53
Контрольные вопросы.....	60
5. Полный факторный эксперимент.....	60
5.1. Выбор области определения, основного уровня и интервалов варьирования факторов.....	62
5.2. Матрица планирования и ее свойства.....	68
5.3. Дробные реплики от полного факторного эксперимента	74
5.4. Реализация плана эксперимента.....	82
5.5. Алгоритм расчета полного факторного эксперимента типа 2^k при равномерном дублировании опытов...	88
5.6. Интерпретация результатов.....	99
5.7. Принятие решений после построения модели.....	101
5.8. Пример применения полного факторного эксперимента с равномерным дублированием опытов ...	104
Контрольные вопросы.....	113
Заключение.....	113
Библиографический список.....	115

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность научно-технических исследований определяется прежде всего их организацией и квалификацией кадров. Поэтому в настоящее время все большее внимание уделяется вопросам организации исследований и разработок.

За последние годы коренным образом изменился подход к экспериментально-статистическому исследованию. В различных областях научно-технических исследований успешно стали применяться методы математического планирования эксперимента. Они нашли применение в ряде отраслей народного хозяйства в повседневной экспериментальной работе при проектировании и испытаниях новых технических средств, при разработке и совершенствовании технологических процессов и т. д.

Статистические методы планирования эксперимента позволяют значительно интенсифицировать труд исследователя, сократить сроки и затраты на эксперимент, повысить достоверность выводов по результатам исследования, глубже проникнуть в сущность исследуемых систем и процессов. Важным достоинством методов планирования эксперимента является их универсальность, пригодность в большинстве областей исследования для решения так называемых экстремальных задач.

Математическая обработка и анализ результатов эксперимента все больше входят в круг вопросов, необходимых инженерно-техническим работникам геологоразведочных организаций. В связи с этим в последние годы для студентов специальности «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых» был введен курс «Оптимизация буровых и геологоразведочных работ и планирование эксперимента».

В нашей стране и за рубежом издано очень много литературы по планированию эксперимента в химии, металлургии, биологии, машиностроении, электронике и др. При этом необходимо отметить, что, несмотря на наличие большого числа теоретических и прикладных работ по планированию экс-

перимента, учебников и учебных пособий, посвященных данному вопросу, явно недостаточно. К сожалению, до настоящего времени не издана учебно-методическая литература по планированию эксперимента для специалистов по бурению скважин. Недостаточное знание ими методов планирования эксперимента приводит к применению упрощенных и недостаточно обоснованных приемов.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, которые должны овладеть одним из направлений в планировании эксперимента, связанного с оптимизацией процессов, – планированием экстремального эксперимента – и уметь применять его на практике. Полезные сведения в нем найдут работники производственных организаций, занимающиеся вопросами бурения скважин.

Для успешного усвоения материала студенту достаточно знаний основ высшей математики в объеме обычной программы вузовского курса, включая элементы теории вероятностей и математической статистики.

В основу учебного пособия положен курс лекций, читаемый авторами студентам специальности 130203 – «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых».

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее повышение экономической эффективности геологоразведочных работ в значительной мере связано с научно-техническим прогрессом в области разведочного бурения, в частности, одним из важнейших его направлений — оптимизацией процесса бурения.

Определенные трудности возникают при оптимизации процесса бурения разведочных скважин на твердые полезные ископаемые вследствие изменчивости условий ведения буровых работ, отсутствия полноты информации о геологическом разрезе, частой перемежаемости горных пород и большого разнообразия их по физико-механическим свойствам, наличия трещиноватости, раздробленности горных пород и т. д.

Исследование и оптимизация процесса бурения могут быть проведены как на основе всестороннего теоретического изучения его механизма, так и эмпирическим путем поиска оптимальных условий и построения математической модели по данным эксперимента. Решение этой задачи на современном уровне возможно только при использовании экспериментально-статистического подхода к процессу бурения как к некоторой системе, имеющей определенные входы и выходы. Это, в свою очередь, приводит к пересмотру взглядов на эксперимент, его организацию и научную трактовку.

Процесс бурения относится к классу сложных систем, характеризующихся значительным числом взаимосвязанных параметров. Задача исследования таких систем заключается в установлении зависимости между входными параметрами (факторами) и выходными (показателями качества функционирования системы) и определении уровней факторов, оптимизирующих выходные параметры системы.

В последние десятилетия появились новые методы математической статистики, где используются идеи кибернетического подхода к изучению технологических процессов, к планированию и постановке экспериментов. Получило развитие новое направление экспериментально-

статистических исследований - математическое планирование эксперимента.

Планирование эксперимента - это новый подход к исследованию, в котором математическим методам отводится активная роль. Основываясь на априорных сведениях об изучаемом процессе, исследователь выбирает некоторую оптимальную стратегию для управления экспериментом. Процесс исследования обычно разбивается на отдельные этапы. После каждого этапа исследователь получает новую информацию, позволяющую ему изменить стратегию исследования.

Применение планирования эксперимента делает поведение исследователя целенаправленным и организованным, существенно способствуя повышению производительности его труда и надежности полученных результатов. Планирование эксперимента — мощный инструмент экспериментально-статистического исследования и оптимизации сложных систем. Исключая слепой поиск, оно значительно сокращает число опытов, следовательно, затраты и сроки проведения эксперимента, дает возможность получить количественные оценки влияния факторов, математические модели.

Планирование эксперимента вносит ряд положительных моментов в традиционные экспериментальные методики, среди которых необходимо отметить следующие:

1. Рандомизация условий эксперимента, позволяющая посредством специальных приемов перевести неуправляемые факторы в случайные величины и, следовательно, учитывать их статистически.

2. Планирование эксперимента дает исследователю четкую Логическую схему и способ решения задач на разных этапах исследования (рис. В1).

3. Результаты экспериментов можно представить в виде математических зависимостей между воздействующими факторами и изучаемыми параметрами процесса, для чего можно использовать ПК.

4. При использовании планирования эксперимента с увеличением количества исследуемых факторов точность эксперимента повышается.

5. При планировании эксперимента резко сокращается количество необходимых опытов по сравнению с традиционными экспериментами.

6. Планирование эксперимента позволяет рассмотреть связь между большим числом факторов, оценить долю влияния каждого, отсеять второстепенные факторы, что невозможно сделать при традиционном однофакторном эксперименте.

7. Результаты эксперимента можно представить графически в двух- и трехмерном факторных пространствах.

8. Планирование эксперимента весьма эффективно применяется при решении экстремальных задач. В данном случае при минимальном количестве опытов, варьируя значение независимых переменных (факторов), можно найти область оптимума и получить ее математическую модель.

Из изложенного следует, что математическая теория планирования эксперимента дает в руки исследователя научно обоснованные методы, позволяющие при минимальных затратах времени и средств планировать эксперимент таким образом, чтобы получать максимум информации об изучаемом объекте.

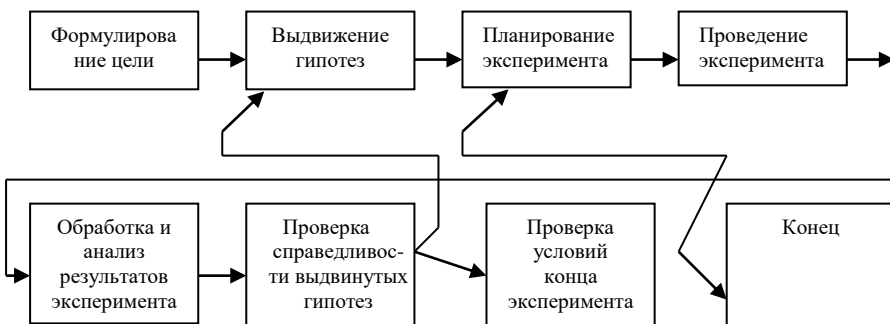


Рис. В1. Логическая схема экспериментального исследования

Методы планирования эксперимента впервые начали использовать в сельскохозяйственных и биологических науках в 20 – 30-х годах XX нашего века. Инициатором применения статистических методов в планировании экспериментов является английский математик Р. Фишер. В начале 50-х годов появляется новое направление в планировании эксперимента, связанное с оптимизацией процессов, - планирование экстремального эксперимента. Первая работа в этой области опубликована в 1951 г. Д. Боксом и К. Уилсоном. Развитие планирования эксперимента связано также с именами Д. Финни, Г. Шеффе, Д. Хантера и др. В нашей стране эти методы получили развитие после появления в 1960 г. работы В. В. Налимова, а в дальнейшем Ю. П. Адлера, Е. В. Марковой, Г. К. Круга, В. В. Федорова, В. Г. Горского, Н. А. Черновой и др.

В настоящее время методы планирования эксперимента, как и другие математические методы (табл. В1), находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства для исследования физических объектов.

В последние годы при технологических исследованиях в бурении стали все больше обращаться к математическим методам, так, была принята схема последовательности технологических работ в процессе бурения скважин на твердые полезные ископаемые, в которой определенное место отведено планированию эксперимента и методу группового учета аргументов (рис. В2).

Планирование экстремального эксперимента находит широкое применение для решения практических задач по оптимизации технологических процессов, и наша цель — в доступной и понятной форме изложить его применительно к задачам бурения скважин.

Математические методы исследования производства

Класс методов	Способ исследования	Объекты	Используемый математический аппарат
Прямое математическое описание	Аналитическое исследование	Производство с непрерывным стационарным технологическим процессом	Системы алгебраических и трансцендентных уравнений (численные методы)
		Производство с нестационарным непрерывным технологическим процессом	Дифференциальные уравнения и уравнения математической физики (численные методы)
		Производство с дискретным технологическим процессом	Комбинаторика, теория графов
Статистическое моделирование	Статистическое исследование	Производство со стохастическими характеристиками	Метод Монте-Карло
Экспериментальные методы	Пассивный эксперимент	Реальный промышленный объект с высокой производительностью и дорогим продуктом	Математическая статистика (корреляционный, регрессионный, дисперсионный анализы)
	Активный эксперимент	Лабораторная или полупромышленная установка, реальный промышленный объект в пусковой период	Планирование эксперимента

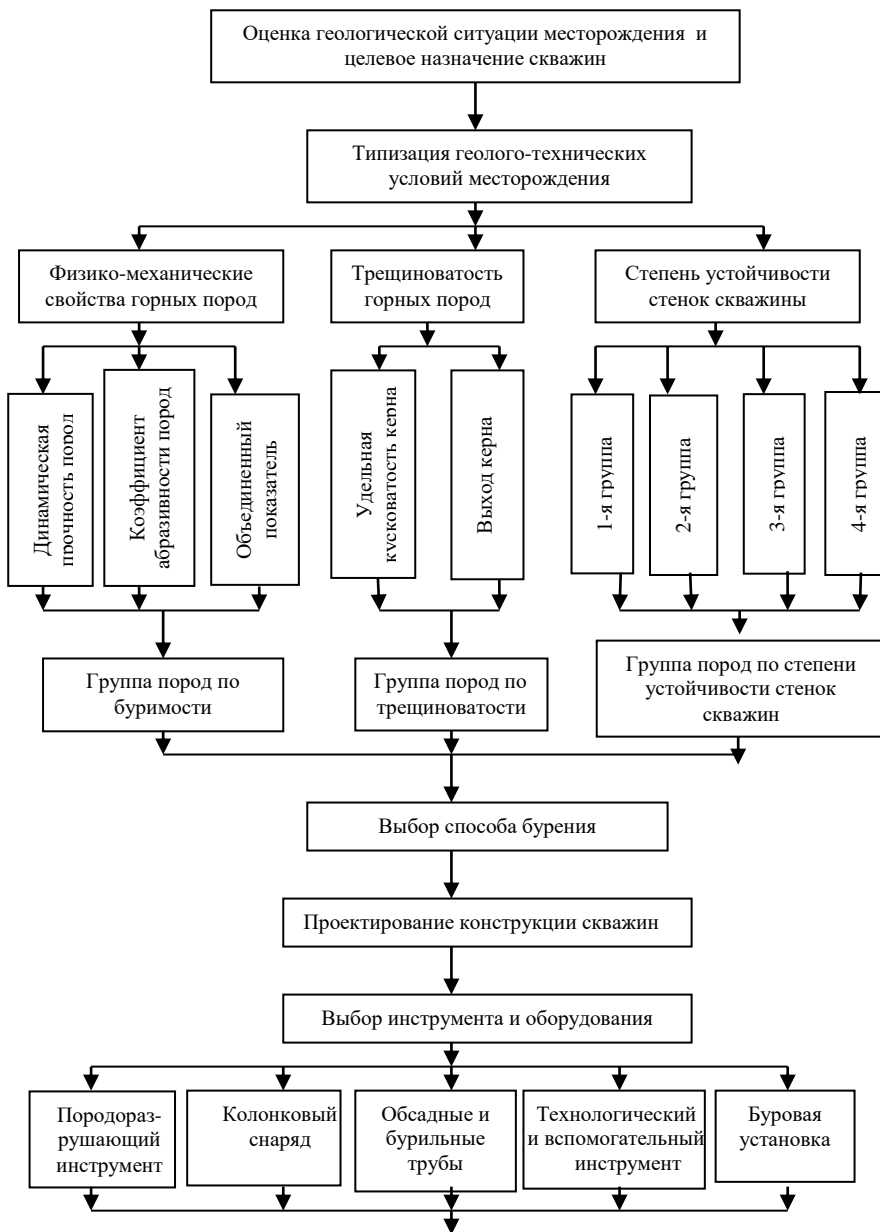


Рис. В2

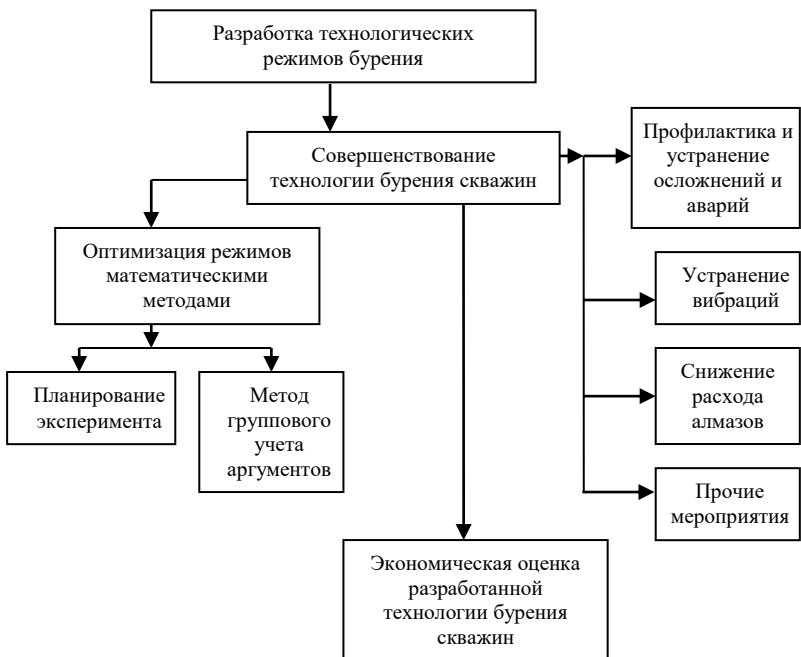


Рис. В2. Последовательность технологических работ в процессе бурения скважин на твердые полезные ископаемые (окончание)

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Научный эксперимент

Эксперимент (от латинского *experimentum* — проба, опыт) относится к эмпирическому уровню научного познания.

Под экспериментом понимают изучение природных явлений путем научного поиска при точно учитываемых условиях, которые дают возможность следить за ходом исследуемого процесса и повторять его каждый раз при воспроизведении тех же условий.

Эксперимент отличается от простого наблюдения своим активным характером, вмешательством в естественный ход событий. Это делает эксперимент формой практики. Эксперимент предполагает проведение всей совокупности действий и операций с помощью специальных экспериментальных средств, которые обеспечивают создание явлений и условий, совпадающих (или не совпадающих) с выводами и предсказаниями, полученными из проверяемой теории или гипотезы.

Исходя из этого можно дать следующее определение эксперимента: *эксперимент есть вид деятельности, предпринимаемой в целях научного познания, открытия объективных закономерностей и состоящей в воздействии на изучаемый объект (процесс) посредством специальных инструментов и приборов, благодаря чему удается: 1) изолировать исследуемый объект от влияния побочных, несущественных и затемняющих его сущность явлений и изучать его в «чистом» виде; 2) многократно воспроизводить ход процесса в строго фиксированных, поддающихся контролю и учету условиях; 3) планомерно изменять, варьировать, комбинировать различные условия в целях получения искомого результата.*

Из данного определения можно сделать вывод: эксперимент представляет собой органическое единство практического действия и теоретической работы мысли.

Постановка и проведение эксперимента не являются самоцелью. Эксперимент – всегда средство получения некоторой искомой информации, установления фактов, проверки гипотезы, словом, средство для решения определенной познавательной задачи или проблемы.

Эксперимент как вид практики характеризуется взаимосвязью трех его основных составляющих элементов: 1) экспериментатор и его деятельность; 2) средства (инструменты, приборы, экспериментальные установки), с помощью которых проводится эксперимент; 3) объект экспериментального исследования.

1.2. Планирование эксперимента

Рост объемов экспериментальных исследований сделал актуальной постановку вопроса об эффективности эксперимента. Возникли математическая теория эксперимента и планирование эксперимента как ее часть.

Проф. Налимов В. В. дает следующее определение планированию эксперимента: *«...планирование эксперимента — это оптимальное управление экспериментом при неполном знании механизма явлений. Эксперименты обычно ставятся небольшими сериями по заранее составленному алгоритму, оптимальному в некотором строго сформулированном смысле. После каждой небольшой серии опытов производится обработка результатов наблюдений и принимается строго обоснованное решение о том, что делать дальше. Планирование эксперимента можно рассматривать как одно из направлений кибернетики. Возможность управления сложными системами при неполном знании механизма явлений — это одно из основных положений кибернетики».*

Планирование эксперимента рассматривается еще и как процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. При этом существенно следующее: 1) стрем-

ление к минимизации общего числа опытов; 2) одновременное варьирование всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам — алгоритмам; 3) использование математического аппарата, формализующего многие действия экспериментатора; 4) выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

Внешне планирование эксперимента выглядит как математическая дисциплина. Однако его логическая структура отличается от построений чистой математики. В планировании эксперимента роль аксиом играют критерии оптимального эксперимента. Их правомерность основывается на нашем интуитивном представлении о том, что есть хороший эксперимент. Критерии оптимальности, сформулированные на математическом языке, становятся теми исходными высказываниями, на которых строится вся дальнейшая теория. И когда мы говорим о математической теории эксперимента, то это не означает, что здесь строится новая математическая дисциплина. Речь идет о создании формально-логического подхода к изучению проблемы эксперимента, формулируемого на языке математики.

Планирование эксперимента - это раздел знаний, относящийся не только и не столько к математической статистике, сколько к логике. Применение планирования эксперимента требует высокой степени формализации. Это заставляет исследователя стремиться к четкому логическому осмысливанию всей процедуры исследования.

1.3. Система «черный ящик»

В связи с тем, что математические методы планирования эксперимента основаны на кибернетическом представлении об объекте исследования, наиболее подходящей моделью последнего является кибернетическая система, схематически изображенная на рис. 1.1 и называемая «черным, ящиком».

При рассмотрении такой кибернетической системы различают входы и выходы. Охарактеризуем их.

x_1, x_2, \dots, x_k , - управляемые факторы, которые можно фиксировать на определенном уровне или варьировать в процессе эксперимента (например, осевая нагрузка, частота вращения, расход промывочной жидкости);

z_1, z_2, \dots, z_m - контролируемые факторы, значение которых можно контролировать или поддерживать на определенных уровнях (например, тип породоразрушающего инструмента, промывочной жидкости и др.);

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ - неконтролируемые факторы. Они часто недоступны для измерения, а в некоторых случаях неизвестны исследователю (например, физико-механические свойства горных пород, трещиноватость пород и др.);

y_1, y_2, \dots, y_i - выходные параметры процесса. Они называются функциями отклика, целями или параметрами оптимизации. При исследовании процесса бурения чаще всего это механическая скорость, стоимость одного метра скважины, износ породоразрушающего инструмента и др.

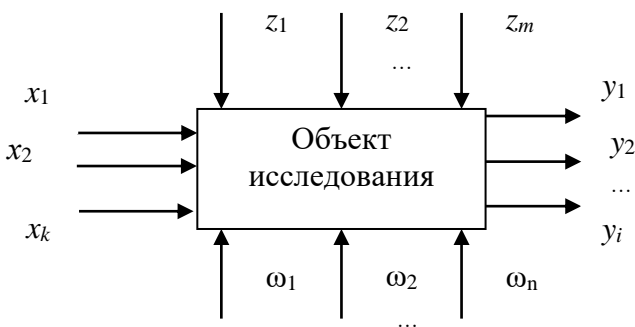


Рис. 1.1. Схема кибернетической системы

Такой кибернетический подход позволяет на основании экспериментальных данных не только построить математическую модель процесса, связывающую функцию отклика (параметр оптимизации) с варьируемыми факторами, но и управлять им при недостаточном знании самого происходящего явления.

1.4. Факторы

Фактором называется входная независимая переменная, принимающая в некоторый момент времени определенное значение и соответствующим способом воздействующая на объект.

Каждый фактор может принимать в опыте одно или несколько значений, называемых уровнями. Фиксированный набор уровней факторов определяет одно из возможных состояний кибернетической системы. Одновременно этот набор представляет условия проведения одного из возможных опытов.

Опыт - осуществление определенного воздействия на объект и регистрация получаемого результата.

Каждому фиксированному набору уровней факторов соответствует определенная точка в многомерном пространстве факторов, называемом факторным пространством. Опыты могут быть реализованы лишь в точках, принадлежащих допустимой области факторного пространства.

Факторы могут быть количественными и качественными. Количественными факторами являются переменные величины, которые можно оценивать количественно: измерять, взвешивать и т. д., качественными — переменные, характеризующиеся качественными свойствами (разные аппараты, исполнители и т. п.). Качественным факторам в отличие от количественных не соответствует числовая шкала. Однако и для них можно построить условную порядковую шкалу, которая производит кодирование, устанавливая соответствие между уровнями качественного фактора и числами натурального ряда.

При исследовании процесса необходимо учитывать все существенные факторы. Если по каким-либо причинам влияние некоторых факторов невозможно учесть в эксперименте, то эти факторы должны быть стабилизированы на определенных уровнях в течение всего эксперимента. Если число факторов велико, то необходимо отсеять те факторы, которые оказывают незначительное влияние на параметр оптимизации. Отсеивание

несущественных факторов производят на основе априорного ранжирования или с помощью постановки отсеивающих экспериментов (дисперсионный анализ, метод случайного баланса и др.).

Основные требования, предъявляемые к факторам:

1) управляемость, т. е. возможность установки и поддержания выбранного нужного уровня фактора постоянным в течение всего опыта или его изменение по заданной программе;

2) непосредственное воздействие на объект исследования, так как трудно управлять фактором, являющимся функцией других факторов;

3) операциональность - указание последовательности операций, с помощью которых устанавливаются конкретные уровни, размерность и точность фиксирования фактора;

4) совместимость - все запланированные комбинации уровней факторов должны быть осуществимы и безопасны;

5) независимость - возможность установления факторов на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов.

Каждый фактор имеет область определения - совокупность всех значений, которые он может принимать. Эта область имеет ограничения; принципиальные, технические, технологические, экономические.

1.5. Параметр оптимизации

Реакция (отклик) системы на воздействие факторов может быть весьма многогранна. Среди множества выходных параметров исследователь должен уметь выделить параметр, который нужно оптимизировать. Цель исследования должна быть сформулирована очень четко и допускать количественную оценку. Характеристику цели, заданную количественно, называют параметром оптимизации (критерием оптимизации, целевой функцией).

Параметры оптимизации бывают экономическими (прибыль, себестоимость и др.), технико-экономическими (производительность, надежность, долговечность и др.), технико-технологическими (выход продукта, физические характеристики продукта и др.), статистическими и т. д.

Из многих параметров, характеризующих объект исследования, только один может служить параметром оптимизации. Остальные рассматриваются как ограничения. Если параметров оптимизации несколько, то эксперимент проводится по каждому из них, а затем решается компромиссная задача.

К параметру оптимизации предъявляется ряд требований: эффективность с точки зрения достижения цели, универсальность, количественное выражение одним числом, статистическая эффективность, физический смысл, простота и доступность вычисления, существование для всех различных состояний.

Главным, определяющим корректность постановки задачи является требование эффективности с точки зрения достижения конечной цели. Параметр оптимизации должен оценивать функционирование системы в целом, а не отдельных ее подсистем. Под универсальностью параметра оптимизации понимают его способность всесторонней характеристики объекта исследования. Параметр оптимизации должен быть количественным, задаваться числом. Множество значений, которые может принимать параметр оптимизации, назовем областью его определения. Эти области могут быть непрерывными и дискретными, ограниченными и неограниченными. Исследователь должен уметь измерять параметр оптимизации при любой возможной комбинации выбранных уровней факторов. С количественной природой параметра оптимизации связаны требования его выражения одним числом, а также однозначность в статистическом смысле (заданному набору значений факторов должно соответствовать одно с точностью погрешности эксперимента значение параметра оптимизации).

Требование статистической эффективности сводится фактически к выбору параметра оптимизации, определяемого с наибольшей возможной точностью.

Требование физического смысла, связанное с последующей интерпретацией результатов эксперимента, а также требования простоты и легкости вычисления часто также оказываются весьма существенными.

1.6. Объект исследования

Для определения параметра оптимизации и выбора схемы планирования эксперимента предварительно изучают объект исследования на основе априорной информации, которую получают, изучая литературные источники и анализируя результаты ранее проведенных работ. При планировании эксперимента к объекту исследования предъявляют следующие требования.

1. Объект исследования должен удовлетворять требованию воспроизводимости. При многократном повторении опыта его результат имеет разброс значений, который характеризует воспроизводимость результата. Считается, что объект исследования удовлетворяет требованию воспроизводимости, если многократно повторенные опыты дают результаты с разбросом значений, не превышающим некоторой заданной величины.

2. Объект должен быть управляемым, но практически нет абсолютно управляемых объектов. На реальный объект обычно действуют как управляемые, так и неуправляемые факторы. Последние влияют на воспроизводимость результатов эксперимента и являются причиной ее нарушения.

Если требование воспроизводимости удовлетворяется, выявляют возможность проведения активного эксперимента. Объект, на котором возможен активный эксперимент, называется управляемым.

Если требование воспроизводимости не выполняется, приходится обращаться к активно-пассивному эксперименту.

Возможно, что плохая воспроизводимость объясняется действием фактора, систематически изменяющегося (дрейфующего) во времени. Тогда необходимо обращаться к специальным методам планирования.

Наконец, возможно, что все факторы неуправляемы. В этом случае возникает задача установления связи между параметром оптимизации и факторами по результатам наблюдений за поведением объекта, или, как говорят, по результатам пассивного эксперимента.

В учебном пособии рассматриваются только такие объекты, для которых требование воспроизводимости выполняется.

1.7. Модель

Результаты эксперимента используют для получения математической модели исследуемого процесса. Математическая модель - система математических соотношений, описывающих изучаемый процесс или объект. При планировании эксперимента под математической моделью часто понимают уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами. Такое уравнение называется также функцией отклика, а геометрический образ, соответствующий функции отклика, - поверхностью отклика.

Для выбора конкретной модели необходимо сформулировать конкретные требования. К ним относятся адекватность, содержательность, простота и др. Под адекватностью понимается способность модели предсказывать результаты эксперимента в некоторой области с требуемой точностью. Содержательность модели должна хорошо объяснять множество уже известных фактов, выявлять новые, незамеченные явления, в какой-то степени предсказывать их дальнейшее развитие и выдвигать перед исследователем новые проблемы. Одним из главных достоинств модели должна быть ее простота.

В зависимости от постановки задачи могут применяться различные модели. Так, для планирования экстремального эксперимента нашли применение полиномиальные модели - модели в виде алгебраических полиномов.

В общем виде функция отклика, являющаяся и параметром оптимизации, может быть представлена выражением

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (1.1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_k – независимые переменные факторы.

При решении экстремальных задач при неполном знании механизма процессов функцию отклика представляют в виде полиномиального уравнения

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1.2)$$

где $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ – коэффициенты, характеризующие свободный член уравнения, линейные, квадратичные эффекты и эффекты взаимодействия.

Пользуясь данными эксперимента, исследователь находит лишь оценки коэффициентов уравнения регрессии $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$. После этого уравнение принимает вид:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (1.3)$$

где \hat{y} — оценка выходного параметра оптимизации.

Такая математическая модель является наиболее простой и удобной при решении задач оптимизации. Она удобна и в том смысле, что в случае неадекватности (т. е. несоответствия с экспериментом) порядок ее можно увеличить, продолжив исследования с использованием результатов уже ранее проведенного эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение научному эксперименту.
2. Что понимается под термином «планирование эксперимента»?
3. Охарактеризуйте систему «черный ящик»,
4. Какие требования предъявляются к факторам?
5. Понятие «параметр оптимизации». Какие требования предъявляются к нему?
6. Что такое «воспроизводимость» и «управляемость» объекта исследования?
7. Какие математические модели применяются при планировании экстремального эксперимента?

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Рассмотрим один из возможных вариантов схемы разветвленной классификации экспериментов, в которой приняты за основу следующие обобщенные признаки: структура, стадия научных исследований, организация, способ проведения и планирование.

2.1. Подразделение экспериментов по структуре

По структуре эксперименты подразделяются на натурные, модельные и модельно-кибернетические (машинные).

В натурном эксперименте средства экспериментального исследования взаимодействуют непосредственно с объектом исследования.

В модельном эксперименте экспериментируют не с самим объектом, а с его заменителем — моделью. Модель здесь играет двоякую роль: она является непосредственно объектом экспериментального исследования и по отношению к изучаемому объекту выступает в качестве средства экспериментального исследования.

Модельно-кибернетический эксперимент является разновидностью модельного эксперимента, при котором соответствующие характеристики изучаемого объекта вычисляются с помощью моделирующего алгоритма на ПК. Данный вид эксперимента отличается универсальностью и имеет широкую область применения.

2.2. Виды экспериментов по стадии научных исследований

По стадии научных исследований эксперименты делятся на лабораторные, стендовые и промышленные.

К лабораторным относятся эксперименты по изучению общих закономерностей различных явлений и процессов, по проверке научных гипотез и теорий.

Стендовые испытания (исследования) проводят тогда, когда необходимо изучить вполне конкретный процесс, протекающий в исследуемом объекте, с определенными свойствами. По результатам стендовых испытаний судят о различных недоработках при расчетах или конструировании объекта (изделия, технологического процесса и др.), а также вырабатывают рекомендации относительно серийного выпуска изделий и условий его эксплуатации.

Промышленный эксперимент проводят при создании нового изделия или процесса по данным лабораторных или стендовых испытаний, при оптимизации действующего процесса, при проведении контрольно-выборочных испытаний качества выпускаемой продукции.

2.3. Эксперименты с точки зрения их организации

С точки зрения организации можно выделить обычные (рутинные), специальные (технические), уникальные и смешанные эксперименты.

Обычные эксперименты проводятся в лабораторных условиях, как правило, по несложным методикам с использова-

нием сравнительно простого экспериментального оборудования и сопряжены с однообразными измерениями и вычислениями, многократно повторяющимися в течение длительного промежутка времени.

Специальные эксперименты связаны с созданием и исследованием разных приборов и аппаратов (средства автоматизации, элементы и узлы ПК).

Уникальные эксперименты проводятся на сложном экспериментальном оборудовании (типа ядерного реактора, радиоэлектронного комплекса и др.). Такие эксперименты отличаются большими объемами экспериментальных данных, высокой скоростью протекания исследуемых процессов, широким диапазоном измерения характеристик объектов исследования. Основные области применения уникальных экспериментов — исследование космоса, новых судов, самолетов и др.

Смешанные эксперименты содержат совокупность разнотипных экспериментов, объединенных единой программой исследования и связанных друг с другом результатами исследований.

2.4. Эксперименты по способу их проведения

По способу проведения различают пассивные, активные, активные с программным управлением, активные с обратной связью и активно-пассивные эксперименты.

Пассивный эксперимент основан на регистрации входных и выходных параметров, характеризующих объект исследования (без вмешательства в эксперимент в процессе его проведения, с применением математико-статистических методов только после окончания эксперимента для обработки собранных экспериментальных данных. Исследование влияния совокупности факторов на объект производится при условии, что изменяется только один из факторов и фиксируются значения всех остальных. В сложных системах, в которых большое число воздействий не может контролироваться или управляться, это условие не выполняется.

В отличие от пассивного неуправляемого активный эксперимент предполагает возможность активного воздействия на исследуемый объект. При использовании методов активного эксперимента математическое описание строится в виде совокупности статических и динамических выходных характеристик объекта, которые регистрируются при подаче на его входы специальных возмущающих воздействий. При активном эксперименте можно оценить дисперсию погрешности, строго проверить адекватность модели и принять необходимые меры для выполнения условий, необходимых для применения метода множественного регрессионного анализа, используемого для обработки результатов эксперимента.

Активный эксперимент с программным управлением проводится по заранее составленному плану. В соответствии с этим планом экспериментатор воздействует на входные параметры исследуемого процесса, а выходные параметры, отражая реакцию исследуемого объекта на управляющие воздействия, позволяют выяснить природу происходящих процессов в объекте исследования.

В случае активного эксперимента с обратной связью, интерпретируя результаты на каждом этапе эксперимента, можно выбрать оптимальную стратегию управления экспериментом – такие эксперименты можно проводить автоматически (без участия экспериментатора).

Активно-пассивный эксперимент характеризуется тем, что при его проведении одна часть данных просто регистрируется, а другая, кроме того, обрабатывается в процессе эксперимента' и участвует в выработке управляющих воздействий. В таком эксперименте одна часть информации, получаемой от объекта, соответствует характеристикам, изменяющимся в соответствии с приложенными управляющими воздействиями, а другая отражает характеристики, не подверженные управляющим воздействиям.

2.5. Типы экспериментов по планированию

В связи с планированием принято выделять следующие типы экспериментов.

Экстремальный эксперимент, задача которого состоит в определении экстремальных значений функции регрессии (или комбинации факторов, при которых функция отклика принимает экстремальные значения). Методы его планирования тесно связаны с методами планирования регрессионного и факторного экспериментов, с одной стороны, и методами стохастического программирования – с другой.

Эксперимент по проверке конкретной статистической гипотезы (дискриминирующий эксперимент). Это сравнительно изученный раздел, который также связан с планированием в регрессионных и факторных моделях.

Отсеивающий эксперимент, задача которого состоит в выделении значимых факторов. Теория его планирования активно развивается в последнее время.

Имитационный эксперимент, который, как правило, связан с имитацией изучаемого явления на ЭВМ или другом устройстве, позволяющем воспроизводить это явление с приемлемой точностью. Ряд результатов по его планированию получен в связи с использованием метода Монте-Карло, а также исследованием сложных систем (типа моделей ядерного реактора).

Контрольные вопросы

1. Какие обобщенные признаки положены в основу классификации экспериментов?
2. Как можно подразделить эксперименты по структуре?
3. На какие виды по стадии научных исследований делятся эксперименты?
4. Дайте характеристику экспериментам с точки зрения их организаций.

5. Охарактеризуйте классификацию экспериментов по способу их проведения.
6. Назовите типы экспериментов по планированию.

3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТИРОВАНИЯ

Планирование эксперимента существенным образом изменило отношение исследователя к стратегии эксперимента. Это изменение связано с появлением ряда методологических концепций современного подхода к эксперименту. Рассмотрим их.

3.1. Рандомизация

Термин «рандомизация» происходит от английского слова *random* — случайный.

При проведении эксперимента исследователь сталкивается, как правило, с действием так называемых мешающих факторов, которые трудно поддаются учету и контролю. Но если при этом план многофакторного эксперимента составить таким образом, чтобы рандомизировать, т. е. сделать случайными в пространстве и во времени эти систематически действующие мешающие факторы, то их можно рассматривать как случайные величины и, следовательно, учитывать статистически. Иными словами, в противоположность традиционному подходу к эксперименту со стремлением стабилизировать или не обращать внимание на мешающие факторы, рандомизация внесла концепцию случая в эксперимент и оформилась в виде процедуры планирования эксперимента.

Случайный порядок проведения опытов в большой мере исключает влияние мешающих факторов, тем самым уменьшая систематическую погрешность.

Для рандомизации можно воспользоваться таблицей случайных чисел или применить метод «попугая и морской свинки», который заключается в следующем. Номера опытов записываются на карточках, которые тщательно перемешиваются и затем извлекаются.

Однако далеко не во всех случаях рандомизацию удается осуществить так просто. Часто на рандомизацию приходится налагать ограничения, обусловленные особенностями той или иной экспериментальной ситуации. Как, например, рандомизировать во времени эксперимент, если исследователю нужно последовательно выполнить несколько циклов, состоящих из четырех опытов, а в день он может поставить только три опыта? Появилась потребность в создании экспериментальных планов с ограничениями, наложенными на рандомизацию. Так появились неполноблочные сбалансированные планы, латинские и греко-латинские квадраты, латинские кубы и параллелепипеды.

3.2. Получение устойчивых результатов

Одним из важнейших условий экспериментирования является устойчивость получаемых результатов в том смысле, что многократное повторение опыта или измерения дает совершенно строгую картину распределения результатов. Другими словами, желательно, чтобы результаты подчинялись известным статистическим закономерностям.

Обычно предполагают, что среднее значение результатов параллельных опытов стремится к математическому ожиданию, погрешности опытов распределены нормально и т. п. Это позволяет экспериментатору: 1) использовать определенные приемы обработки результатов; 2) делать статистические выводы и принимать решения.

Устойчивости поведения случайной величины обычно добиваются путем сохранения постоянства условий при проведении эксперимента и применением рандомизации.

3.3. Математическое моделирование

Кибернетика внесла свои понятия и методы в процессы изучения и управления исследуемых объектов. Важнейшим из них является понятие математической модели, наиболее широко используемое как средство описания исследуемого объекта в виде математических зависимостей и уравнений.

Математические модели, полученные при исследовании технологических объектов, позволяют решать ряд задач, среди которых особое место занимает задача поиска оптимальных условий исследуемого объекта. Говорят, что в таком случае рассматривается экстремальный эксперимент, где все действия направлены на поиск оптимума (экстремума) технологического объекта. Математическая модель, описывающая исследуемый объект, позволяет эффективно определить его оптимальный режим.

3.4. Последовательность экспериментирования

Каждый экспериментатор в своей практике широко использует идею последовательного экспериментирования, согласно которой эксперимент осуществляется не сразу, а последовательно, этапами. После каждого этапа производится анализ полученных результатов, и на основании этого анализа принимается решение о дальнейшей деятельности.

Эта концепция наиболее ярко проявилась в задачах планирования экстремальных экспериментов, когда исследователь, варьируя многие переменные, пытается найти оптимальные условия протекания некоторого технологического процесса. Поиск экстремума производится последовательно с помощью различных методов: линейного приближения, движения по градиенту, описания полиномами второго порядка и т. д.

3.5. Оптимальное использование факторного пространства

Одной из самых распространенных идей теории эксперимента является концепция многофакторного эксперимента. Суть ее заключается в том, что состояние исследуемого объекта (процесса) в каждом опыте определяется по результату одновременного варьирования факторов, изменяющих состояние этого объекта (процесса). Такое экспериментирование проводится в противовес поочередному изменению факторов, когда состояние объекта (процесса) определяется по результатам изменения вначале одного фактора, затем другого и т. д. Новая идея обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционным экспериментированием: резко сокращается количество необходимых опытов, повышается точность расчета коэффициентов математической модели, оценивается доля влияния каждого фактора и влияние их взаимодействий.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные методологические концепции экспериментирования.
2. В чем сущность концепции рандомизации?
3. Охарактеризуйте концепцию математического моделирования.
4. В каких задачах находит применение концепция последовательного эксперимента?
5. В чем суть концепции оптимального использования факторного пространства?

4. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Для небольшого количества экспериментальных данных, полученных на предварительном этапе исследования объекта (процесса), могут быть рассчитаны его основные числовые характеристики выходных переменных как случайных величин. Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем с наибольшей эффективностью, а главное, корректно использовать информацию, полученную на данном этапе, для планирования эксперимента и его проведения на последующих этапах исследования.

При статистической обработке группы результатов наблюдений необходимо выполнить следующие операции:

- исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений;
- вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;
- вычислить оценку среднего квадратического отклонения результата наблюдения;
- вычислить оценку среднего квадратического отклонения результата измерения;
- проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению;
- вычислить доверительные границы случайной погрешности результата измерения;
- вычислить границы неисключенной систематической погрешности результата измерения;
- вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Информацию о случайной погрешности получают, повторяя наблюдения; информацию о систематической погрешности из самих наблюдений получить нельзя. Для ее оценки необходимо знать свойства используемых средств измерений, метод и условия измерения.

Если систематическая погрешность результата каждого наблюдения известна, то, введя поправки, можно получить группу исправленных результатов наблюдений.

4.1. Исключение грубых погрешностей

Результаты наблюдений, содержащие грубые погрешности, часто бывают заметны, так как они сильно отличаются от других результатов наблюдений. В этих условиях наиболее целесообразный способ выявления и устранения грубых погрешностей — непосредственный анализ наблюдений, тщательная проверка неизменности условий проведения эксперимента, запись результатов «в две руки» и т. д. Необходимо всегда помнить, что статистические методы выявления грубых погрешностей следует применять лишь в сомнительных случаях, когда дополнительная информация о качестве наблюдений является либо неполной, либо ненадежной.

В литературе можно встретить большое количество различных рекомендаций по обнаружению и исключению грубых погрешностей наблюдений. Предложим для практического применения один из критериев оценки аномальности, используемый при обработке результатов наблюдений случайной величины, заведомо подчиняющейся нормальному закону распределения.

Аномальным называется результат наблюдения, резко отклоняющийся от группы результатов наблюдений, которые являются нормальными.

Критерий оценки аномальности результатов наблюдений при неизвестном генеральном среднем квадратическом отклонении σ и неизвестном генеральном среднем m_x заключается в том, что для упорядоченной выборки результатов наблюдений случайной величины (вариационного ряда значений) $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ подсчитывают выборочное среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

и выборочное среднее квадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} . \quad (4.2)$$

Чтобы оценить принадлежность x_n или x_1 данной нормальной совокупности и принять решение об исключении или оставлении x_n (x_1) в составе выборки, находят отношение

$$U_n = \frac{x_n - \bar{x}}{S} \quad \text{или} \quad U_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{S} . \quad (4.3)$$

Результат сравнивают с величиной h , взятой из табл. 4.1 для данного объема выборки n и принятой вероятности α .

Таблица 4.1

Предельные значения H для случая неизвестного генерального среднего квадратического отклонения σ

Объем выборки n	Предельное значение H при вероятности α				Объем выборки n	Предельное значение h при вероятности α			
	0,100	0,075	0,050	0,025		0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15	12	2,13	2,20	2,29	2,41
4	1,42	1,44	1,46	1,48	13	2,17	2,24	2,33	2,47
5	1,60	1,64	1,67	1,72	14	2,21	2,28	2,37	2,50
6	1,73	1,77	1,82	1,89	15	2,25	2,32	2,41	2,55
7	1,83	1,88	1,94	2,02	16	2,28	2,35	2,44	2,58
8	1,91	1,96	2,03	2,13	17	2,31	2,38	2,48	2,62
9	1,98	2,04	2,11	2,21	18	2,34	2,41	2,50	2,66
10	2,03	2,10	2,18	2,29	19	2,36	2,44	2,53	2,68
11	2,09	2,14	2,23	2,36	20	2,38	2,46	2,56	2,71

Если $U_n \geq h$ ($U_1 \geq h$), то подозреваемый в аномальности результат наблюдения может быть исключен, в противном случае его не исключают.

Пример 4.1

При гидроударно-эжекторном бурении коронками СА5 диаметром 76 мм в определенных геолого-технических условиях были получены следующие значения углубки за рейс, м: 0,7; 1,1; 1,2; 1,2; 1,2; 1,8.

Требуется оценить результат 1,8 м при заданном $\alpha = 0,050$. Для критерия $U_n = \frac{x_n - \bar{x}}{S}$ вычисляем:

$$\bar{x} = \frac{0,7 + 1,1 + 1,2 + 1,2 + 1,2 + 1,8}{6} = 1,2 \text{ м;}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{6-1} [(0,7-1,2)^2 + (1,1-1,2)^2 + (1,2-1,2)^2 + (1,2-1,2)^2 + (1,2-1,2)^2 + (1,8-1,2)^2]} = 0,35 \text{ м,}$$

откуда $U_n = \frac{1,8 - 1,2}{0,35} = 1,71$.

В табл. 4.1 для $n = 6$ и $\alpha = 0,050$ находим $h = 1,82$.

В этом случае $U_n (1,71) < h (1,82)$, и, следовательно, для исключения результата 1,8 м нет оснований.

4.2. Результат измерения и оценка его среднего квадратического отклонения

За результат измерения принимают среднее арифметическое результатов наблюдений, в которые предварительно введены поправки для исключения систематических погрешностей. Стандарт допускает исключение систематической погрешности после вычисления среднего арифметического неисправленных результатов наблюдений, если в них содержится постоянная систематическая погрешность.

Среднее арифметическое результатов наблюдений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.4)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – случайная выборка объема n .

Когда значения x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) большие, целесообразно избрать «круглое» число a (начало отсчета), близкое к \bar{x} , и вместо формулы (4.4) пользоваться формулой

$$\bar{x} = a + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a). \quad (4.5)$$

Оценкой для генерального среднего квадратического отклонения σ нормального распределения является выборочное среднее квадратическое отклонение S результата наблюдения, определяемое по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.6)$$

Для большинства практических случаев целесообразно привести формулу (4.6) к следующему виду:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]}. \quad (4.7)$$

Если определяют несмещенную оценку \hat{S} для генерального среднего квадратического отклонения σ нормального распределения, применяют формулу

$$\hat{S} = M(v)S, \quad (4.8)$$

где S — выборочное среднее квадратическое отклонение результата наблюдения.

Значение коэффициента $M(v)$ дано в табл. 4.2 в зависимости от $v = n - 1$ при неизвестной генеральной средней.

Таблица 4.2

Значения коэффициентов $M(v)$

v	$M(v)$	v	$M(v)$	v	$M(v)$
1	1,253	8	1,032	15	1,017
2	1,128	9	1,028	16	1,016
3	1,085	10	1,025	17	1,015
4	1,064	11	1,023	18	1,014
5	1,051	12	1,021	19	1,013
6	1,042	13	1,019	20	1,013
7	1,036	14	1,018	25	1,010

Среднее квадратическое отклонение $\sigma(\tilde{A})$ результата измерения оценивают по формуле

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.9)$$

где x_i — i -й результат наблюдений; \tilde{A} — результат измерения (среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений); n — число результатов наблюдений; $S(\tilde{A})$ — оценка среднего квадратического отклонения результата измерения.

Пример 4.2

При твердосплавном бурении с обратной призабойной циркуляцией промывочной жидкости в определенном интервале скважины в процессе наблюдений по девяти рейсам был получен ряд значений механической скорости, м/ч: 4,30; 5,37; 6,76; 8,23; 4,03; 5,35; 4,97; 5,60; 6,21.

Требуется вычислить значения выборочных среднего \bar{x} , среднего квадратического отклонения S результата наблюдений, определить несмещенную оценку \hat{S} и оценку среднего

квадратического отклонения результата измерения S (\tilde{A}). По формуле (4.4) находим выборочное среднее значение механической скорости бурения:

$$\bar{x} = \frac{1}{9}(4,30 + 5,37 + 6,76 + 8,23 + 4,03 + 5,35 + 4,97 + 5,60 + 6,21) = 5,65 \text{ м/ч.}$$

Среднее квадратическое отклонение результата наблюдения определяется согласно формуле (4.6), а вспомогательные расчеты рекомендуется оформить, как показано в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Расчет оценки среднего квадратического отклонения

№ п. п.	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	- 1,35	1,8225
2	-0,28	0,0784
3	1,11	1,2321
4	2,58	6,6564
5	-1,62	2,6244
6	0,30	0,0900
7	-0,68	0,4624
8	-0,05	0,0025
9	0,56	0,3136
		$\Sigma = 13,2823$

$$S = \sqrt{\frac{1}{9-1} \sum_1^9 (x_i - 5,65)^2} = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot 13,2823} = 1,29 \text{ м/ч.}$$

Для определения несмещенной оценки воспользуемся формулой (4.8) и табл. 4.2, в которой для $\nu = 9 - 1 = 8$ значение коэффициента $M(\nu)$ принимаем равным 1,032:

$$\hat{S} = 1,032 \cdot 1,29 = 1,33 \text{ м/ч.}$$

Среднее квадратическое отклонение результата измерения вычисляется по формуле (4.9), где в числителе подкоренного выражения поставим уже вычисленное значение суммы и приведенное в табл. 4.3.

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (x_i - 5,65)^2}{9(9-1)}} = \sqrt{\frac{13,2823}{72}} = 0,43 \text{ м/ч.}$$

Таблица 4.4

К выбору класса точности

Класс точности	I	II	III	IV	V
Коэффициент вариации, %	<8	8-15	15-25	25-33	>33

4.3. Коэффициент вариации и точность измерений

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение - величины абсолютные, именованные и выражаются в тех же единицах, что и характеризуемый ими признак. Поэтому, когда возникает необходимость сравнивать изменчивость признаков, выраженных разными единицами, приходится пользоваться относительными показателями вариации. Одним из таких показателей является коэффициент вариации, который представляет процентное отношение среднего квадратического отклонения к средней арифметической, т. е.

$$V = \frac{S}{\bar{x}} 100 \% \quad (4.10)$$

При небольшом количестве наблюдений в формуле (4.10) используется несмещенная оценка \hat{S} для генерального

среднего квадратического отклонения σ , определяемая по формуле (4.8).

В зависимости от величины коэффициента вариации можно принять к руководству следующие пять классов точности технологических показателей и расчетов в бурении (табл. 4.4).

Измерения по первому классу точности могут быть получены только при работе с точными измерительными приборами в лабораторных условиях. Ко второму классу относится большинство величин, получаемых при измерениях приборами в стволе скважины, а также при расчетах по формулам, которые принято считать точными. Точность этих расчетов всегда соответствует той, с которой были получены параметры, входящие в расчетные формулы. Третьему классу соответствуют данные, получаемые при расчете по большинству формул технологических процессов в стволе скважины. Четвертый класс точности соответствует грубым ориентировочным расчетам. Производственные данные, относящиеся к пятому классу точности, пригодны лишь для подтверждения той или иной качественной зависимости.

Пример 4.3

По данным примера 4.2 вычислить коэффициент вариации и определить класс точности.

В формулу (4.10) подставим вычисленные в примере 4.2 значения несмещенной оценки среднего квадратического отклонения $S = 1,33$ м/ч и среднего арифметического $\bar{x} = 5,65$ м/ч.

Тогда

$$V = \frac{1,33}{5,65} \cdot 100 \% = 23,5 \%$$

По табл. 4.4 определяем класс точности - третий.

4.4. Проверка гипотезы о принадлежности результатов наблюдений к нормальному распределению

1. Наиболее простым, но весьма приближенным методом оценки согласия результатов наблюдений с тем или иным законом распределения является графический метод. Опытные данные наносят на вероятностную бумагу и сравнивают с графиком принятой функции распределения, которая на вероятностной сетке изображается прямой линией. Если экспериментальные точки ложатся вблизи прямой со случайными отклонениями влево и вправо, то опытные данные соответствуют рассматриваемому закону распределения. Систематическое и значительное отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой свидетельствует об ошибочности принятой модели для обоснования закона распределения исследуемой случайной величины.

2. Для приближенной проверки гипотезы о нормальности распределения могут быть использованы выборочные показатели асимметрии и эксцесса, которые определяются по формулам:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{nS^3}; \quad (4.11)$$

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{nS^4} - 3, \quad (4.12)$$

где n — количество наблюдений; S — среднее квадратическое отклонение результата наблюдения.

При небольшом числе наблюдений n несмещенные оценки для показателей асимметрии A_s и эксцесса E_x определяют по формулам

$$\tilde{A}_s = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} A_s; \quad (4.13)$$

$$\hat{E}_x = \frac{n-1}{(n-2)(n-3)} [(n+1)E_x + 6]. \quad (4.14)$$

При нормальном распределении обе эти вычисленные по формулам (4.13) и (4.14) оценки показателей асимметрии и эксцесса должны быть малы и, кроме того, сравнимы с их средними квадратическими отклонениями:

$$S_{\hat{A}_s} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}; \quad (4.15)$$

$$S_{\hat{E}_x} = \sqrt{\frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}}. \quad (4.16)$$

Если выполняются условия

$$|\hat{A}_s| \leq 3S_{\hat{A}_s} \text{ и } |\hat{E}_x| \leq 5S_{\hat{E}_x}, \quad (4.17)$$

то гипотеза нормальности исследуемого распределения может быть принята.

Пример 4.4

Проверить гипотезу о нормальности распределения механической скорости бурения с помощью показателей асимметрии и эксцесса на основании данных, приведенных в примере 4.2.

По формулам (4.11) и (4.12) определяем выборочные показатели асимметрии и эксцесса:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^9 (x_i - 5,65)^3}{9 \cdot 1,29^3} = \frac{11,695}{9 \cdot 2,147} = 0,61;$$

$$E_x = \frac{\sum_1^9 (x_i - 5,65)^4}{9 \cdot 1,29^4} - 3 = \frac{55,361}{9 \cdot 2,769} - 3 = -0,78.$$

Вычисляем несмещенные оценки для показателей асимметрии и эксцесса по формулам (4.13) и (4.14):

$$\hat{A}_s = \frac{\sqrt{9(9-1)}}{9-2} 0,61 = \frac{\sqrt{9 \cdot 8}}{7} 0,61 = 0,74;$$

$$\hat{E}_x = \frac{9-1}{(9-2)(9-3)} [(9+1)0,78 + 6] = \frac{8}{7 \cdot 6} [10 \cdot 0,78 + 6] = 2,63.$$

По формулам (4.15) и (4.16) вычисляем средние квадратические отклонения показателей асимметрии и эксцесса:

$$S_{\hat{A}_s} = \sqrt{\frac{6 \cdot 9(9-1)}{(9-2)(9+1)(9+3)}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 9 \cdot 8}{7 \cdot 10 \cdot 12}} = 0,72;$$

$$S_{\hat{E}_x} = \sqrt{\frac{24 \cdot 9(9-1)^2}{(9-3)(9-2)(9+3)(9+5)}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 9 \cdot 8^2}{6 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 14}} = 1,4.$$

Проверяем условия (4.17). В данном примере $0,74 < 2,16$ и $|-2,63| < 7,0$, что свидетельствует о выполнении указанных условий, и гипотеза нормальности распределения может быть принята.

3. Рассмотрим методику проверки согласия опытного распределения с нормальным или логарифмически нормальным распределением по критерию W для числа наблюдений $3 \leq n \leq 50$.

Результаты наблюдений случайной величины располагают в порядке их возрастания, т. е. получают упорядоченную выборку $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$.

Для вычисления статистики критерия

$$W = \frac{b^2}{\varphi^2} \quad (4.18)$$

определяют величины

$$b^2 = \left[\sum_{j=1}^l a_{n-j+1} (x_{n-j+1} - x_j) \right]^2 \quad (4.19)$$

и

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n}, \quad (4.20)$$

для чего дополнительно составляется таблица по следующей форме (табл. 4.5). В графу 1 записывают значения порядкового индекса i для $i = 1, 2, \dots, n$. В графу 2 табл. 4.5 заносят соответствующие значения упорядоченной выборки x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, а в графу 3 – значения их квадратов x_i^2 . В графу 4 записывают значение порядкового индекса j для $j = 1, 2, \dots, e$ в обратном порядке, чем индекс i . При этом $e = n / 2$, если n четное и $e = (n - 1) / 2$, если n нечетное. Далее, в графу 5 записывают к индексу j соответствующие величины коэффициентов a_{n-j+1} . Эти коэффициенты для данного n и e находят по табл. 4.6. В графу 6 табл. 4.5 записывают вычисленные разности чисел $x_{n-j+1} - x_j$ для $j = 1, 2, \dots, e$, а в графу 7 – значения произведений $a_{n-j+1}(x_{n-j+1} - x_j)$ для $j = 1, 2, \dots, e$.

Гипотезу проверяют на основании неравенства

$$W \geq W^*, \quad (4.21)$$

где W^* — критическое значение критерия для данного уровня значимости α и числа наблюдений n (табл. 4.7).

Если выполняется неравенство (4.21), то гипотеза принимается.

Таблица 4.5

**Данные для построения проверки согласия
распределения с теоретическим
по критерию W**

i	x_i	x_i^2	j	a_{n-j+1}	$x_{n-j+1}-x_j$	(5)·(6)
1	2	3	4	5	6	7
1	x_1	x_1^2	-	-	-	-
2	x_2	x_2^2	-	-	-	-
...
$n - e + 1$	x_{n-e+1}	x_{n-e+1}^2	e	a_{n-e+1}	$x_{n-e+1} - x_e$	$a_{n-e+1} (x_{n-e+1} - x_e)$
...
$n - 1$	x_{n-1}	x_{n-1}^2	2	a_{n-1}	$x_{n-1} - x_2$	$a_{n-1} (x_{n-1} - x_2)$
n	x_n	x_n^1	1	a_n	$x_n - x_1$	$a_n (x_n - x_1)$
-	$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n x_{ii}^2$	-	-	-	$\sum_{j=1}^l a_{n-j+1} (x_{n-j+1} - x_j)$

Пример 4.5

По результатам наблюдений, приведенных в примере 4.2, проверить с помощью критерия W гипотезу о нормальном распределении значений механической скорости бурения. Принять $\alpha = 0,05$.

Результаты наблюдений за механической скоростью бурения приводим в форме упорядоченной выборки в графе 2 табл. 4.8, а в третьей графе — их вторые степени. Так как $n = 9$, то $e = 4$, и, следовательно, в графу 4 запишем индекс j , который находится между 1 и 4. В табл. 4.6 находим коэффициенты a_{n-j+1} для $n = 9$ и четырех значений j (1, 2, 3, 4) и записываем их в графу 5. Далее вычисляем разности $x_{n-j+1} - x_j$ для $j=1, 2, 3, 4$ (графа 6) и значения $a_{n-j+1} (x_{n-j+1} - x_j)$, которые записываем в графу 7.

Определяем величины

$$b^2 = 3,54^2 = 12,53;$$

и

$$\varphi^2 = 50,82 - \frac{300,24}{9} = 17,46.$$

Таблица 4.6

Значения коэффициентов a_{n-j+1}

Коэффициент a_{n-j+1} для вычисления критерия W при n										
i	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6052	0,5888	0,5739	0,5601	0,5475
2	—	0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3291	0,3315	0,3325
3	—	—	—	0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141	0,2260	0,2347
4	—	—	—	—	—	0,0561	0,0947	0,1 224	0,1429	0,1586
5	—	—	—	—	—	—	—	0,0399	0,0695	0,0922
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0303
Коэффициент a_{n-j+1} для вычисления критерия W при n										
i	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0,5359	0,5251	0,5150	0,5056	0,4968	0,4886	0,4808	0,4734	0,4643	0,4590
2	0,3325	0,3318	0,3306	0,3290	0,3273	0,3253	0,3232	0,3211	0,3185	0,3156
3	0,2412	0,2460	0,2495	0,2521	0,2540	0,2553	0,2661	0,2565	0,2578	0,2571
4	0,1707	0,1802	0,1878	0,1939	0,1988	0,2027	0,2059	0,2085	0,2119	0,2131
5	0,1099	0,1240	0,1353	0,1447	0,1524	0,1587	0,1641	0,1686	0,1736	0,1764
6	0,0539	0,0727	0,0880	0,1005	0,1109	0,1197	0,1271	0,1334	0,1399	0,1443
7	—	0,0240	0,0433	0,0593	0,0725	0,0837	0,0932	0,1013	0,1092	0,1150
8	—	—	—	0,0196	0,0359	0,0496	0,0612	0,0711	0,0804	0,0878
9	—	—	—	—	—	0,0163	0,0303	0,0422	0,0530	0,0618
10	—	—	—	—	—	—	—	0,0140	0,0263	0,0368
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0122

На основании (4.18) вычисляем статистику критерия:

$$W = \frac{12,53}{17,46} = 0,718$$

и сопоставляем с критическим значением, взятым из табл. 4.7 для $n = 9$ и $\alpha=0,05$, $W^* = 0,829$. Условие (4,21) не выполняется, т. е. эмпирическое распределение не соответствует нормальному распределению.

4.5. Вычисление доверительных границ случайной погрешности результата измерения

Получив оценку результата измерения и проверив рассмотренными критериями гипотезу о принадлежности результатов наблюдений нормальному распределению, необходимо выяснить, насколько эта оценка может изменяться при повторных измерениях, выполняемых в тех же условиях.

Таблица 4.7

Значение критерия W^*

n	Квантиль распределения критерия W при α			n	Квантиль распределения критерия W при α		
	0,01	0,05	0,10		0,01	0,05	0,10
3	0,753	0,767	0,789	17	0,851	0,892	0,910
4	0,687	0,748	0,792	18	0,858	0,897	0,914
5	0,686	0,762	0,806	19	0,863	0,901	0,917
6	0,713	0,788	0,826	20	0,868	0,905	0,920
7	0,730	0,803	0,838	21	0,873	0,908	0,923
8	0,749	0,818	0,851	22	0,878	0,911	0,926
9	0,764	0,829	0,859	23	0,881	0,914	0,928
10	0,781	0,842	0,869	24	0,884	0,916	0,930
11	0,792	0,850	0,876	25	0,888	0,918	0,931
12	0,805	0,859	0,883	26	0,891	0,920	0,933
13	0,814	0,866	0,889	27	0,894	0,923	0,935
14	0,825	0,874	0,895	28	0,896	0,924	0,936
15	0,835	0,881	0,901	29	0,898	0,926	0,937
16	0,844	0,887	0,906	30	0,900	0,927	0,939

Этот вопрос выясняется с помощью построения доверительного интервала. Так называется вычисленный по выборочным значениям интервал, который с заданной вероятностью, называемой доверительной, покрывает истинное, но не известное нам значение измеряемой величины.

Построение доверительного интервала основано на t -распределении Стьюдента с числом степеней свободы $\nu = n-1$, при этом доверительная вероятность принимается равной 0,95 или 0,99 и лишь иногда 0,90.

При большом числе степеней свободы ($\nu > 30$) t – распределение сходится к нормальному. Чем меньше число степеней свободы, тем сильнее расхождение между t – распределением и нормальным.

Таблица 4.8

Данные для вычисления критерия

i	x_i	x_i^2	j	a_{9-j+1}	$x_{9-j+1} - x_j$	(5)·(6)
1	2	3	4	5	6	7
1	4,03	16,24	—	—	—	—
2	4,30	18,49	—	—	—	—
3	4,97	24,70	—	—	—	—
4	5,35	28,62	—	—	—	—
5	5,37	28,84	—	—	—	—
6	5,60	31,36	4	0,0947	5,60-5,35=0,25	0,023675
7	6,21	38,56	3	0,1976	6,21-4,97=1,24	0,245024
8	6,76	45,70	2	0,3244	6,76-4,30=2,46	0,798024
9	8,23	67,73	1	0,5888	8,23-4,03=4,20	2,472960
Σ	50,82	300,24				3,539683≈3,54

Доверительные интервалы для генерального среднего m_x при неизвестном значении σ^2 находят из выражения

$$\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} t \leq m_x \leq \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} t, \quad (4.22)$$

где \bar{x} и S – выборочные характеристики; t – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n находят по табл. 4.9.

Таблица 4.9

Значение коэффициента t для случайной величины, имеющей распределение Стьюдента с $\nu = n-1$ степенями свободы

$n-1$	P=0,95	P=0,99	$n-1$	P=0,95	P=0,99	$n-1$	P=0,95	P=0,99
3	3,182	5,841	13	2,160	3,012	23	2,069	2,807
4	2,776	4,604	14	2,145	2,977	24	2,064	2,797
5	2,571	4,032	15	2,131	2,947	25	2,060	2,787
6	2,447	3,707	16	2,120	2,921	26	2,056	2,779
7	2,365	3,499	17	2,110	2,898	27	2,052	2,771
8	2,306	3,355	18	2,101	2,878	28	2,048	2,763
9	2,262	3,250	19	2,093	2,861	29	2,045	2,756
10	2,228	3,169	20	2,086	2,845	30	2,043	2,750
11	2,201	3,106	21	2,080	2,831	40	2,021	2,704
12	2,179	3,055	22	2,074	2,819	60	2,000	2,660

Имея в виду, что $\frac{S}{\sqrt{n}} = S(\tilde{A})$, доверительный интервал

для генерального среднего m_x можно выразить так:

$$\bar{x} - tS(\tilde{A}) \leq m_x \leq \bar{x} + tS(\tilde{A}), \quad (4.23)$$

где $S(\tilde{A})$ – оценка среднего квадратического отклонения результата измерения, полученная по формуле (4.9). В компактной форме границы доверительного интервала можно записать следующим образом:

$$\bar{x} \pm tS(\tilde{A}). \quad (4.24)$$

Величина $e = tS(\tilde{A})$ выражения (4.24) определяет доверительные границы случайной погрешности результата измерения.

Пример 4.6

По данным из примера 4.2 ($\bar{x} = 5,65$ м/ч и $S(\tilde{A}) = 0,43$ м/ч) вычислить доверительные границы случайной погрешности результата измерения механической скорости бурения при доверительной вероятности $P = 0,95$.

По табл. 4.9 для $\nu = 9 - 1 = 8$ и $P = 0,95$ находим $t = 2,306$.

На основании формулы (4.23) имеем:

$$5,65 - 2,306 \cdot 0,43 \leq m_x \leq 5,65 + 2,306 \cdot 0,43;$$

$$4,66 \text{ м/ч} \leq m_x \leq 6,64 \text{ м/ч}$$

или в компактной форме (4.24): $5,65 \text{ м/ч} \pm 0,99 \text{ м/ч}$.

4.6. Определение необходимого количества наблюдений

Со значительными затратами времени и средств связано получение большого количества экспериментальных данных в бурении. Поэтому важно уметь определять необходимое количество наблюдений с целью получения среднего значения интересующего нас признака с требуемой точностью при заданной надежности (доверительной вероятности).

Минимально необходимое число наблюдений рассчитывается из выражения (4.22), в котором

$$e = \frac{S}{\sqrt{n}} t, \text{ и тогда } n = \frac{S^2 t^2}{e^2}. \quad (4.25)$$

Если представить величину доверительного интервала ε в долях от среднего квадратического отклонения S , т. е. $q = \varepsilon/S$, то формула (4.25) по определению необходимого числа наблюдений будет иметь вид

$$n = \frac{t^2}{q^2}. \quad (4.26)$$

Для удобства решения этой задачи можно воспользоваться, например, табл. 4.10. В ней приведены величины количества наблюдений, которое необходимо иметь, чтобы при заданных значениях вероятности P доверительный интервал ε исследуемого признака был не более доли q среднего квадратического отклонения S .

Таблица 4.10

Минимальное необходимое количество наблюдений

q	Доверительная вероятность P							
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,99	0,999
1,0	2	2	3	4	5	7	11	17
0,5	3	4	6	9	13	18	31	50
0,4	4	6	8	12	19	27	46	74
0,3	6	9	13	20	32	46	78	127
0,2	13	19	29	43	70	99	171	277
0,1	47	72	109	166	273	387	668	1089

Из табл. 4.10 видно, как быстро растет количество наблюдений с уменьшением q и с увеличением P . Поэтому для достижения требуемой точности значений исследуемого признака необходимо больше уделять внимания точности отдельных наблюдений, отражающихся на величине среднего квадратического отклонения S , а не их числу; задаваться чрезмерным значением P нецелесообразно. Величина надежности (доверительной вероятности) в зависимости от характера поставленной задачи может быть принята равной 0,99; 0,95; 0,90 и т. д. При технологических исследованиях в бурении обычно принимают $P = 0,95$; при испытаниях бурового оборудования и инструмента – 0,95 - 0,8.

Так как при $q > 1$ величины \bar{x} и S не могут устойчиво характеризовать генеральную совокупность, то при решении рассматриваемой задачи не следует брать q больше 1. При $q=1$ минимальное необходимое количество наблюдений должно быть: а) для ориентировочных расчетов ($P = 0,90$) не менее 5; б) для инженерно-технических расчетов ($P = 0,95$) не менее 7; в) для научно-экспериментальных расчетов ($P = 0,99$) не менее 11. Из табл. 4.10 видно, что чем сильнее рассеивание (колебание) значений исследуемого признака и чем большая требуется точность, тем больше необходимо иметь наблюдений.

4.7. Проверка однородности наблюдений

Измерения с большими случайными погрешностями требуют настороженного внимания. Необходимо удостовериться в том, что получаемые результаты статистически подконтрольны, устойчивы, т. е. что результаты наблюдений группируются вокруг одного и того же центра и имеют одну и ту же дисперсию. Если метод измерения и объект исследования изучены мало, то наблюдения при таком измерении нужно повторять до тех пор, пока не появится уверенность в устойчивом характере этих результатов. Тем самым определяются продолжительность исследования и необходимое число наблюдений.

Устойчивость измерений часто оценивается интуитивно на основе длительных наблюдений. Однако известны математические методы, полезные для решения рассматриваемой задачи, так называемые методы проверки, однородности. Применительно к измерениям рассматривается однородность групп наблюдений. Необходимые признаки однородности групп наблюдений состоят в том, что оценки средних арифметических и дисперсий не должны иметь значимых смещений относительно друг друга.

Выбор групп для контроля однородности остается задачей специалиста-экспериментатора, так же как и ограничение одной группы от другой. Обычно наблюдения, выполненные через интервалы времени, большие, чем время для получения какой-то совокупности результатов наблюдений, относят к разным группам. Целесообразно иметь в группе порядка 5-10 наблюдений и лучше — несколько таких групп, чем одну группу с большим числом наблюдений.

Приведем некоторые из числа наиболее часто применяемых методов проверки допустимости различия между оценками дисперсий и различия между средними арифметическими групп наблюдений. Предполагается при этом,

что распределения наблюдений предварительно проверены на нормальность.

1. Проверка допустимости различия между оценками дисперсий выполняется с помощью критерия Фишера в случае двух групп наблюдений и критерия Бартлетта, если групп больше. Приведем критерий Фишера.

Пусть несмещенные оценки дисперсий этих групп S_1^2 и S_2^2 , причем $S_1^2 > S_2^2$. Число наблюдений в группах n_1 и n_2 , так что степени свободы равны соответственно $\nu_1 = n_1 - 1$ и $\nu_2 = n_2 - 1$.

Составляем отношение двух дисперсий S_1^2 и S_2^2 и получаем статистику:

$$F_p = \frac{S_1^2}{S_2^2}. \quad (4.27)$$

Затем из табл. 4.11 при заданном уровне значимости и для степеней свободы ν_1 и ν_2 выбираем значение F_T .

Гипотеза принимается, т. е. оценки дисперсий можно считать отвечающими одной и той же дисперсии, если выполняется неравенство $F_p < F_T$. Уровень значимости при этом удваивается.

Табл. 4.11 содержит верхние границы значимости F -распределения для дисперсионного анализа при одностороннем критерии. Как правило, нас интересуют отклонения в обе стороны, и мы применяем двусторонний критерий. Если, например, мы проверяем гипотезу при уровне значимости 0,1 (10 %-ные границы), то необходимо использовать таблицу при уровне значимости 0,05 (5 %-ные границы).

Пример 4.7

В процессе наблюдений были получены два ряда значений средней механической скорости бурения в двух соседних интервалах скважины (по девяти и десяти рейсам соответственно):

1. 6,90; 8,96; 6,80; 5,20; 3,80; 4,20; 8,00; 6,80; 9,80 м/ч.

2. 8,57; 9,42; 8,96; 7,17; 9,09; 8,78; 4,44; 5,00; 9,57; 7,44 м/ч.

Проверить гипотезу об однородности (равенстве) дисперсий при уровне значимости 0,1.

Определяем статистические характеристики:

$n_1 = 9$; $\bar{x}_1 = 6,72$ м/ч; $S_1^2 = 4,17$ м/ч.

$n_2 = 10$; $\bar{x}_2 = 7,84$ м/ч; $S_2^2 = 3,33$ м/ч.

Составляем отношение $F_p = 4,17/3,33 = 1,25$.

По табл. 4.11 для уровня значимости 0,05 при $\nu = 9 - 1$ и $\nu_2 = 10 - 1 = 9$ степеней свободы находим $F_T = 3,23$.

Так как $F_p = 1,25 < F_T = 3,23$, то гипотеза об однородности дисперсий принимается.

2. Проверка допустимости различий между средними арифметическими для двух групп наблюдений производится с помощью критерия Стьюдента. При большом числе групп допустимость различия между средними арифметическими проверяется с помощью критериев Фишера и Аббе.

Рассмотрим сравнение средних арифметических для двух групп наблюдений (табл. 4.12).

Таблица 4.11

Верхние доверительные границы F -распределения при уровнях значимости 0,05 (верхняя строка) и 0,01 (нижняя строка)

$\nu_2 = n_2 - 1$	$\nu_1 = n_1 - 1$ (для большей дисперсии)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,9	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0
	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5928	5982	6022	6056	6106	6157	6209
2	18,51	19,00	9,16	9,25	9,30	19,33	9,35	9,37	9,38	9,40	9,41	9,43	9,45
	98,50	99,00	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,37	99,39	99,40	99,42	99,43	99,45
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66
	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,91	27,67	27,49	27,35	27,23	27,05	26,87	26,69
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80
	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,47	14,40	14,32
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,74	4,68	4,56
	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	10,16	10,05	9,89	9,72	9,55
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87
	13,75	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,72	7,56	7,40
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44
	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,47	6,31	6,16
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15
	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,67	5,52	5,36
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94
	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,11	4,96	4,81
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,84	2,77
	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,71	4,56	4,41

Продолжение таблицы 4.11

$\nu_2 = n_2 - 1$	$\nu_1 = n_1 - 1$ (для большей дисперсии)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65
	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,63	4,54	4,40	4,25	4,10
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54
	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,16	4,01	3,86
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,44
	9,07	6,70	5,74	5,21	4,86	4,62	4,44	4,30	4,19	4,10	3,96	3,82	3,66
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39
	8,86	6,51	5,56	5,04	4,69	4,46	4,28	4,14	4,03	3,94	3,80	3,66	3,51
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33
	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,67	3,52	3,37
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28
	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,55	3,41	3,26
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23
	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,46	3,31	3,16
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19
	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,37	3,23	3,08
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16
	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,42	3,30	3,1E	3,00
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,7	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12
	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,23	3,09	2,94

Таблица 4.12

Сравнение двух средних значений из приближенно нормально распределенных генеральных совокупностей

Объемы выборки	Дисперсии	
	равны: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	неравны: $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$
Равны $n_1 = n_2 = n$	$t_p = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n}}}$ $v = 2n - 2$ <p align="right">(1)</p>	$t_p = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n}}}$ $v = n - 1 + \frac{2n - 2}{\frac{S_1^2}{S_2^2} + \frac{S_2^2}{S_1^2}}$ <p align="right">(2)</p>
Неравны $n_1 \neq n_2$	$t_p = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\left[ \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \right] \left[\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}}$ $v = n_1 + n_2 - 2$ <p align="right">(3)</p>	$t_p = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$ $v = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 + 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 + 1}} - 2$ <p align="right">(4)</p>

Если вычисленное по приведенным формулам в табл. 4.12 значение t -критерия окажется меньше табличного ($t_p < t_T$) при выбранной доверительной вероятности и числе степеней свободы v (определяется по формулам в табл. 4.12), то различие между средними арифметическими считается допустимым.

Значения t -критерия при различных доверительных вероятностях для двустороннего критерия приведены в табл. 4.13.

Пример 4.8

По данным, приведенным в примере 4.7, сравните два средних значения при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 4.13

Распределение Стьюдента

Число степеней свободы ν	Доверительная вероятность			Число степеней свободы ν	Доверительная вероятность		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
1	6,314	12,706	63,657	16	1,746	2,120	2,921
2	2,920	4,303	9,925	17	1,740	2,110	2,898
3	2,353	3,182	5,841	18	1,734	2,101	2,878
4	2,132	2,776	4,604	19	1,729	2,093	2,861
5	2,015	2,571	4,032	20	1,725	2,086	2,845
6	1,943	2,447	3,707	21	1,721	2,080	2,831
7	1,895	2,365	3,499	22	1,717	2,074	2,819
8	1,860	2,306	3,355	23	1,714	2,069	2,807
9	1,833	2,262	3,250	24	1,711	2,064	2,797
10	1,812	2,228	3,169	25	1,708	2,060	2,787
11	1,796	2,201	3,106	26	1,706	2,056	2,779
12	1,782	2,179	3,055	27	1,703	2,052	2,771
13	1,771	2,160	3,012	28	1,701	2,048	2,763
14	1,761	2,145	2,977	29	1,699	2,045	2,756
15	1,753	2,131	2,947	30	1,697	2,042	2,750

Так как гипотеза об однородности дисперсий принята (дисперсии равны), объемы выборок неравны, то вычисление t -критерия и ν проводятся по формулам (3) табл. 4.12.

$$t_p = \frac{|6,72 - 7,84|}{\sqrt{\left[\frac{9+10}{9 \cdot 10} \right] \left[\frac{(9-1) \cdot 4,17 + (10-1) \cdot 3,33}{9+10-2} \right]}} = 1,263;$$

$$\nu = 9 + 10 - 2 = 17.$$

По табл. 4.13 находим значение t_T при заданной доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы

$v=17$, $t_T=2,110$ и сравниваем с $t_p=1,263$.

Поскольку $t_p < t_T$ ($1,263 < 2,110$), то различие между средними значениями механической скорости бурения в двух интервалах скважины считается допустимым (незначимым).

Контрольные вопросы

1. Какие операции необходимо выполнить при статистической обработке группы результатов наблюдений?
2. Как можно исключить грубую погрешность?
3. Что принимается за результат измерения и как оценивается его среднее квадратическое отклонение?
4. Дайте характеристику классов точности в зависимости от величины коэффициента вариации.
5. Какие методы используются для проверки гипотезы о принадлежности результатов наблюдений к нормальному распределению?
6. Как вычисляются доверительные границы случайной погрешности результата измерения?

5. ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Одной из основных задач эксперимента является задача идентификации, т. е. построение с помощью полученных экспериментальных данных математической модели.

Эта задача играет большую роль при автоматизации технологических процессов (объектов), так как отсутствие работоспособной математической модели не позволяет осуществлять их оптимальное управление и оптимизацию.

Построение математического описания (идентификация) сложного объекта предполагает, с одной стороны, глубокое теоретическое изучение механизма протекающих в нем явлений, с другой — четко спланированный эксперимент для проверки гипотез относительно структуры модели и оценки ее коэффициентов.

При проведении экстремальных экспериментов необходимо найти область оптимума и описать ее математической моделью при наименьшем количестве опытов. Чтобы избежать полиномов высокого порядка, используется шаговый метод изучения поверхности отклика. При этом методе исследователь вначале ставит небольшую серию опытов для локального описания малого участка поверхности отклика полиномом первой степени. На этом этапе используется полный факторный эксперимент (ПФЭ) или планы дробных реплик.

Под полным факторным экспериментом понимается такой эксперимент, в котором реализуются все возможные, неповторяющиеся комбинации уровней факторов.

Если число факторов равно k , а число уровней каждого из них равно p , то число комбинаций N при полном факторном эксперименте соответствует количеству независимых опытов и равно p^k , т. е. $N = p^k$. Чаше встречаются планы эксперимента типа 2^k , реже 3^k и очень редко при $p > 3$, в связи с резким увеличением числа опытов N .

Сущность полного факторного эксперимента первого порядка состоит в одновременном варьировании всех факторов при его проведении по определенному плану, представлении математической модели (функции отклика) в виде линейного полинома и его исследовании методами математической статистики.

Полный факторный эксперимент типа 2^k позволяет описать исследуемый процесс (объект) математической моделью вида

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j . \quad (5.1)$$

Планирование и реализация полного факторного эксперимента состоит из следующих основных этапов: выбора параметра оптимизации, факторов и уровней их варьирования; кодирования факторов; составления матрицы эксперимента; рандомизации опытов; реализации плана эксперимента и

статистической проверки результатов эксперимента. Рассмотрим эти этапы подробнее.

5.1. Выбор области определения, основного уровня и интервалов варьирования факторов

С учетом требований, предъявляемых к параметру оптимизации и факторам (см. 1.4 и 1.5), производят их выбор, после чего приступают к определению локальной области факторного пространства.

Вначале оцениваются границы областей определения факторов, задаваемые либо принципиальными ограничениями, которые не могут быть нарушены ни при каких обстоятельствах, либо технико-экономическими соображениями (стоимость, время ведения процесса и др.), либо конкретными условиями проведения процесса (существующая аппаратура, технология и др.). Установление области определения факторов связано с тщательным анализом априорной информации, т. е. информации, полученной до начала эксперимента.

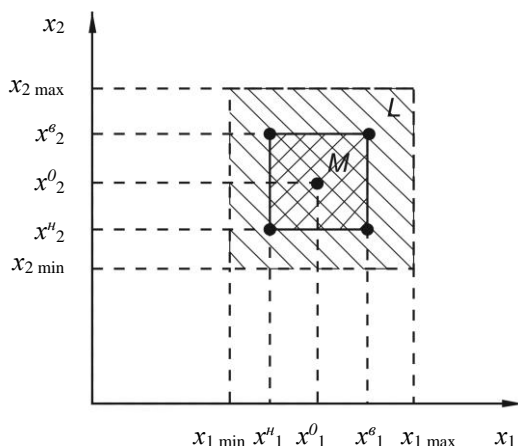


Рис. 5.1. Геометрическая интерпретация области определения факторов и подобласти для планирования эксперимента

Априорную информацию получают из литературных источников, с оценкой результатов исследования аналогичных объектов, на основании опроса специалистов, работающих в области исследуемых процессов. Каких-либо специальных требований к сбору априорной информации не существует, хотя у каждого экспериментатора есть своя система и методика. Основную часть информации об объекте исследования получают из опытов, которые проводятся при наладке лабораторной установки (стенда) и при постановке в последующем небольшого числа опытов по определенным планам с применением отсеивающих экспериментов.

После выбора области определения факторов необходимо найти локальную подобласть, в которой будет проведена первая серия опытов. На рис. 5.1 представлена геометрическая интерпретация области определения факторов L и подобласти M для случая планирования эксперимента с двумя факторами – x_1 и x_2 . Процедура выбора этой подобласти M включает выбор основных (нулевых) уровней x_i^0 и интервалов варьирования факторов. Заметим при этом, что правильный выбор основных (нулевых) уровней (центра эксперимента) и интервалов варьирования факторов имеет решающее значение для действенности математической модели.

Основным, или нулевым уровнем фактора, называют его значение, принятое за исходное в плане эксперимента. В качестве исходной точки обычно выбирают точку, соответствующую наилучшим значениям параметра оптимизации, определенным из анализа априорной информации. Если эта точка лежит на границе (или близко к границе) области определения факторов, то приходится выбирать основной уровень с определенным сдвигом от наилучших условий.

Дальнейшее построение плана эксперимента состоит в выборе экспериментальных точек, симметричных относительно исходной точки, или, что одно и то же, центра плана. Это достигается с помощью интервалов варьирования факторов.

Интервалом варьирования фактора называют число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному (нулевому) уровню дает верхний уровень фактора, а вычитание – нижний. Обозначим его $\Delta \tilde{x}_i$. При решении задач оптимизации интервал варьирования факторов должен составлять часть области определения факторов, чтобы была возможность осуществить движение к оптимуму в пределах этой области. В задачах же аппроксимации (или интерполяции) интервал варьирования охватывает всю описываемую область, т. е. для двухфакторной задачи верхними уровнями факторов x_1 и x_2 являются $\tilde{x}_{1\max}$ и $\tilde{x}_{2\max}$, а нижними уровнями – $\tilde{x}_{1\min}$ и $\tilde{x}_{2\min}$.

Тогда область L можно назвать интерполяционной, а область M — областью постановки экстремального эксперимента.

На выбор интервалов варьирования факторов накладываются естественные ограничения сверху и снизу. Например, интервал варьирования не может быть меньше погрешности фиксирования фактора, иначе верхний и нижний уровни окажутся неразличимыми. С другой стороны, интервал варьирования не может быть настолько большим, чтобы верхний или нижний уровни оказались за пределами области определения факторов.

Выбор интервалов варьирования отдельных факторов при решении оптимизационной задачи в большей степени субъективен, но в то же время это очень важный и ответственный момент в планировании эксперимента. Здесь нужно использовать априорную информацию о точности фиксирования факторов (определяется точностью приборов и стабильностью уровня в ходе опыта), о кривизне поверхности отклика (определяется по графикам однофакторных зависимостей, табличным данным, а также исходя из теоретических предположений) и диапазоне изменения параметра оптимизации, который считается узким, если незначительно превышает интервал рассеивания значений параметра в повторных (параллельных) опытах. В зависимости

от этой информации интервалы варьирования факторов бывают узкими, средними и широкими. Например, при высокой точности фиксирования уровней факторов и сильно выраженной кривизне поверхности отклика нужно выбрать узкий интервал варьирования. При высокой точности фиксирования уровней, нелинейной поверхности отклика и широком диапазоне изменения параметра оптимизации требуются узкие интервалы варьирования факторов и, наоборот, при низкой точности фиксирования уровней, поверхности с малой кривизной и узким диапазоном изменения параметра интервал варьирования факторов выбирается широким.

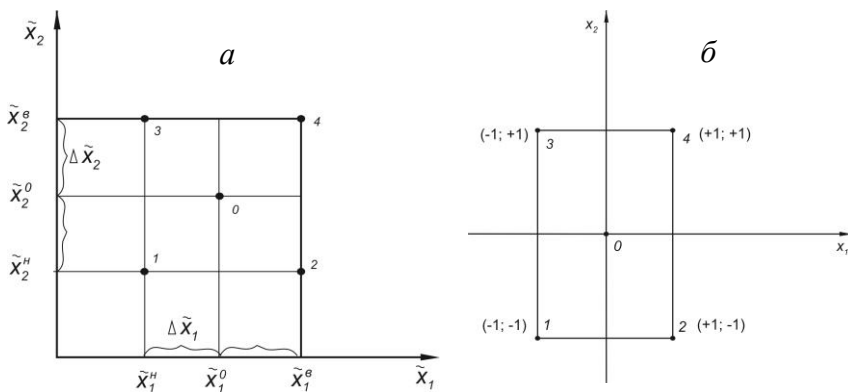


Рис. 5.2. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента для двух факторов:
 а – в натуральных единицах; б – в кодированной форме

Размер интервала варьирования составляет некоторую долю от области определения фактора. Ориентировочно можно считать, что узкие интервалы варьирования факторов должны составлять не более 10 % от области определения соответствующих факторов, средние интервалы варьирования – не более 30 %, широкие интервалы — в остальных случаях.

Выбрав основной уровень и интервалы варьирования факторов, приступают к построению плана проведения эксперимента.

Первый этап планирования эксперимента для получения линейной модели основан на варьировании факторов на двух уровнях — \tilde{x}_i^B и \tilde{x}_i^H , симметрично расположенных относительно основного (нулевого) уровня \tilde{x}_i^0 (рис. 5.2, а). Так как каждый фактор принимает лишь два значения: $\tilde{x}_i^B = \tilde{x}_i^0 + \Delta\tilde{x}_i$ и $\tilde{x}_i^H = \tilde{x}_i^0 - \Delta\tilde{x}_i$, для стандартизации, упрощения записи условий эксперимента удобно закодировать их символами «+1» и «-1». С этой целью масштабы по осям выбираются так, чтобы верхний уровень соответствовал «+1», нижний — «-1», а основной (нулевой) — «0» (рис. 5.2, б).

Кодирование — это перевод натуральных значений уровней факторов в кодированные безразмерные величины с целью построения стандартной матрицы эксперимента. Для факторов с непрерывной областью определения это всегда можно сделать с помощью преобразования:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\Delta\tilde{x}_i}, \quad (5.2)$$

где x_i — кодированное значение i -го фактора; \tilde{x}_i — натуральное текущее значение i -го фактора; \tilde{x}_i^0 — натуральное значение основного (нулевого) уровня i -го фактора;

$\Delta\tilde{x}_i = \frac{\tilde{x}_i^B - \tilde{x}_i^H}{2}$ — интервал (шаг) варьирования i -го фактора.

Кодирование факторов означает переход от системы координат в натуральных единицах (см. рис. 5.2, а) к системе координат в кодированной форме (см. рис. 5.2, б).

Расположение точек для двух исследуемых факторов в кодированной форме приведено на рис. 5.2, б. Здесь каждая точка факторного пространства $(-1, -1)$, $(+1, -1)$, $(-1, +1)$, $(+1, +1)$ — это опыт в эксперименте.

По аналогии можно дать геометрическую интерпретацию и для трех факторов. Геометрической интерпретацией полного факторного эксперимента 2^3 служит куб, координаты вершин которого задают условия опытов.

В общем случае план эксперимента типа 2^k (при $k>3$) геометрически представляет собой совокупность точек, расположенных в вершинах гиперкуба, размещенного в многомерном пространстве. Пространство, заключенное внутри гиперкуба, или гиперсферы, описывающей гиперкуб, и является областью планирования.

Пример 5.1

При оптимизации процесса алмазного бурения в качестве управляемых факторов выбрали осевую нагрузку x_1 и частоту вращения x_2 .

На основе априорной информации принята следующая область определения факторов: $\tilde{x}_1=10\div 30$ кН и $\tilde{x}_2 = 500\div 1000$ об/мин. Априорно считается, что наилучшим сочетанием уровней факторов будет $\tilde{x}_1 = 15$ кН и $\tilde{x}_2 = 700$ об/мин. Также априорно известно, что поверхность отклика нелинейная, а диапазон изменения параметра оптимизации широкий. Точность фиксирования уровней факторов высокая.

Определить интервалы варьирования уровней каждого фактора, вычислить значение их уровней и закодировать.

Исходя из данной априорной информации, следует принять узкий интервал варьирования факторов, поэтому принимаем его шириной, равной 10 % от интервала изменения соответствующих факторов. По условию границы интервалов изменения факторов в натуральных единицах будут $\tilde{x}_{1\min}=10$ кН, $\tilde{x}_{2\min}=500$ об/мин, $\tilde{x}_{1\max}=30$ кН, $\tilde{x}_{2\max}=1000$ об/мин, а их основные (нулевые) уровни $\tilde{x}_1^0=15$ кН и $\tilde{x}_2^0=700$ об/мин.

Тогда интервалы варьирования уровней факторов будут следующие:

$$\Delta\tilde{x}_1 = \frac{\tilde{x}_{1\max} - \tilde{x}_{1\min}}{100} \cdot 10 = \frac{30 - 10}{10} = 2 \text{ кН};$$

$$\Delta\tilde{x}_2 = \frac{\tilde{x}_{2\max} - \tilde{x}_{2\min}}{100} \cdot 10 = \frac{1000 - 500}{10} = 50 \text{ об/мин},$$

а нижние и верхние уровни факторов будут соответственно:

$$\tilde{x}_1^H = \tilde{x}_1^0 - \Delta\tilde{x}_1 = 15 - 2 = 13 \text{ кН}; \quad \tilde{x}_1^B = \tilde{x}_1^0 + \Delta\tilde{x}_1 = 15 + 2 = 17 \text{ кН};$$

$$\tilde{x}_2^H = \tilde{x}_2^0 - \Delta\tilde{x}_2 = 700 - 50 = 650 \text{ об/мин};$$

$$\tilde{x}_2^B = \tilde{x}_2^0 + \Delta\tilde{x}_2 = 700 + 50 = 750 \text{ об/мин}.$$

Кодированные значения факторов для рассмотренного примера (верхние и нижние уровни) согласно выражению (5.2):

$$x_1^B = \frac{17-15}{2} = +1; \quad x_1^H = \frac{13-15}{2} = -1;$$

$$x_2^B = \frac{750-700}{50} = +1; \quad x_2^H = \frac{650-700}{50} = -1.$$

5.2. Матрица планирования и ее свойства

Факторный эксперимент осуществляется с помощью матрицы планирования, в которой используют кодированные значения факторов.

Матрицей планирования называется план, содержащий запись всех комбинаций факторов или их части в кодированной форме. Этот план представляется в виде таблицы, в которой строки соответствуют различным независимым опытам, а столбцы — значениям (уровням) факторов.

Каждый столбец матрицы планирования называется вектор-столбцом, а строка — вектор-строкой. Каждому фактору соответствует только один вектор-столбец.

Рассмотрим прежде всего простейший случай, когда варьируются только два фактора — x_1 и x_2 , причем каждый на двух уровнях $+1$ и -1 . Все возможные комбинации уровней факторов будут исчерпаны в следующих четырех опытах, указанных в табл. 5.1. Такая таблица будет матрицей планирования эксперимента.

В матрице планирования указываются все возможные сочетания нижних и верхних уровней по каждому из факторов модели, в последнем столбце записываются значения параметра оптимизации, соответствующие определенным сочетаниям факторов.

Для удобства при расчетах коэффициентов математической модели в матрицу планирования вводится так называемая фиктивная независимая переменная x_0 , которая во всех опытах принимает только одно значение +1. В этом случае матрица планирования принимает вид (табл. 5.2) и называется расширенной информационной матрицей.

Таблица 5.1

Матрица планирования

Номер опыта	x_1	x_2	y
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Таблица 5.2

Расширенная информационная матрица

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	y
1	+1	-1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	y_4

Таблица 5.3

Матрица ПФЭ типа 2^2 с эффектом взаимодействия

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y
1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4

Из полного факторного эксперимента для двухуровневых факторов можно оценить все линейные эффекты и эффекты взаимодействия факторов (двойные, тройные, четверные и т. д.) независимо друг от друга. Общее число всех эффектов, включая b_0 , равно числу опытов полного факторного эксперимента, т. е. 2^k .

Линейным называется эффект, характеризующий линейную зависимость параметра оптимизации от соответствующего фактора. Эффект взаимодействия характеризует совместное влияние нескольких факторов на параметр оптимизации.

С учетом эффекта взаимодействия двух факторов или, как говорят, эффекта парного взаимодействия приведем матрицу планирования эксперимента (табл. 5.3).

Здесь элементы столбца x_1 x_2 получают путем построчного перемножения соответствующих элементов столбцов x_1 и x_2 . Эффект взаимодействия в данном случае показывает силу влияния одного из факторов на параметр оптимизации в зависимости от уровня, на котором находится другой.

Мы рассмотрели самый простой случай, когда построение матриц полного факторного эксперимента для двух факторов на двух уровнях не вызывает затруднений, так как все возможные комбинации уровней факторов легко найти простым перебором.

Обратимся теперь к полному факторному эксперименту типа 2^3 . Матрица планирования для трех факторов с учетом всех возможных взаимодействий приведена в табл. 5.4.

В табл. 5.4 столбец эффекта взаимодействия x_1 x_2 x_3 получается перемножением всех трех столбцов x_1 , x_2 и x_3 и называется эффектом взаимодействия второго порядка, в то время как эффекты взаимодействия двух факторов x_1x_2 , x_1x_3 , и x_2x_3 называются эффектом взаимодействия первого порядка. Довольно часто для них применяют синонимы: парные эффекты взаимодействия (x_1 , x_2 , ...), тройные (x_1 x_2 x_3 , ...) и т. д.

Матрица ПФЭ типа 2^3 с эффектами взаимодействия

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Из табл. 5.4 видно, что с увеличением числа факторов число возможных взаимодействий быстро растет и матрица планирования усложняется. Поэтому возникает необходимость в некоторых приемах построения матриц.

Существует несколько приемов построения матриц полного факторного эксперимента. Среди них рассмотрим два наиболее простых приема.

Первый прием основан на правиле чередования знаков, согласно которому в первом столбце x_1 знаки меняются через один, во втором – x_2 – они чередуются через два, в третьем – x_3 – через четыре, а в четвертом – x_4 – через восемь и т. д.

Второй прием основан на последовательном достраивании матрицы (табл. 5.5). Для этого при добавлении нового фактора необходимо повторить комбинации уровней исходного плана сначала при значении нового фактора на верхнем уровне, а затем на нижнем. Для простоты записи в табл. 5.5 единицы опущены, оставлены только знаки. Первые отчеркнутые четыре опыта представляют собой матрицу 2^2 . Далее они еще раз повторены, и в столбце x_3 для первой матрицы 2^2 проставлены четыре знака «+», для второй — четыре знака «-». Таким образом, отчеркнутые восемь опытов представляют собой уже матрицу планирования 2^3 . Затем эта процедура повторяется до построения матрицы типа 2^5 .

Одним из преимуществ полного факторного эксперимента является то, что по построенной матрице можно найти свойства, определяющие качество математической модели. Эксперимент и планируется для того, чтобы получить модель с некоторыми оптимальными свойствами. Это значит, что оценки коэффициентов модели должны быть наилучшими и что точность предсказания параметра оптимизации не должна зависеть от направления в факторном пространстве, ибо заранее неизвестно, в каком направлении предстоит двигаться в поисках оптимума.

Два свойства следуют непосредственно из построения матрицы: симметричность и условие нормировки.

Симметричность относительно центра экспериментального плана – алгебраическая сумма элементов вектор – столбца каждого фактора, кроме x_0 , равна нулю, т. е.

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0, \quad (5.3)$$

где x_{iu} – и – e кодированное значение i -го фактора; N — число опытов; $i=1, 2, \dots, k$.

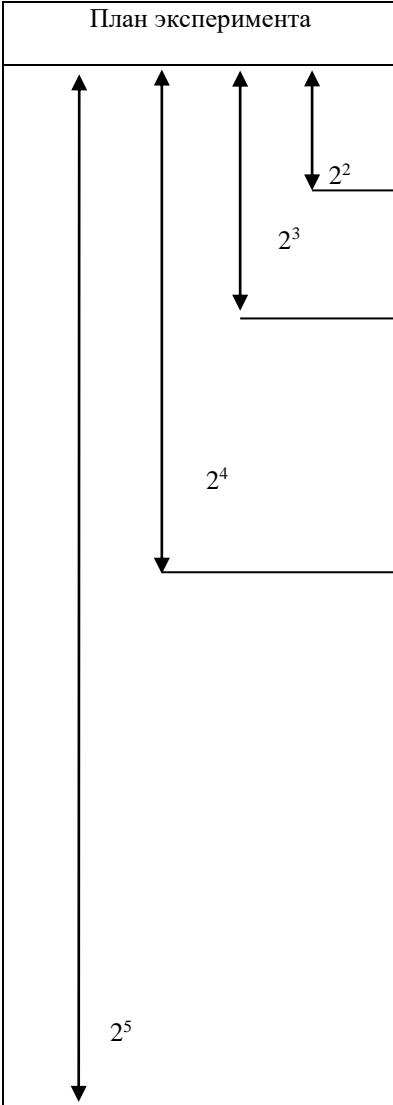
Условие нормировки — сумма квадратов элементов каждого столбца матрицы равна числу опытов или

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = N. \quad (5.4)$$

Это следствие того, что значения факторов в матрице задаются $+ 1$ и $- 1$. Следующие два свойства относятся к совокупности вектор-столбцов матрицы планирования.

Таблица 5.5

Построение матриц планирования ПФЭ при увеличении числа факторов от 2 до 5

План эксперимента	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
	1	+	+	+	+	+	+
	2	+	-	+	+	+	+
	3	+	+	-	+	+	+
	4	+	-	-	+	+	+
	5	+	+	+	-	+	+
	6	+	-	+	-	+	+
	7	+	+	-	-	+	+
	8	+	-	-	-	+	+
	9	+	+	+	+	-	+
	10	+	-	+	+	-	+
	11	+	+	-	+	-	+
	12	+	-	-	+	-	+
	13	+	+	+	-	-	+
	14	+	-	+	-	-	+
	15	+	+	-	-	-	+
	16	+	-	-	-	-	+
	17	+	+	+	+	+	-
	18	+	-	+	+	+	-
	19	+	+	-	+	+	-
	20	+	-	-	+	+	-
	21	+	+	+	-	+	-
	22	+	-	+	-	+	-
	23	+	+	-	-	+	-
	24	+	-	-	-	+	-
	25	+	+	+	+	-	-
	26	+	-	+	+	-	-
	27	+	+	-	+	-	-
	28	+	-	-	+	-	-
	29	+	+	+	-	-	-
	30	+	-	+	-	-	-
	31	+	+	-	-	-	-
	32	+	-	-	-	-	-

Ортогональность — сумма почленных произведений любых вектор-столбцов матрицы равна нулю:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0 \quad (j \neq i). \quad (5.5)$$

Ротатабельность — точки в матрице планирования подбираются так, что точность предсказания значений параметра оптимизации одинакова на равных расстояниях от центра эксперимента и не зависит от направления.

5.3. Дробные реплики от полного факторного эксперимента

Полный факторный эксперимент позволяет получить весьма обширную информацию, однако при большом числе факторов ($k > 3$) число опытов в нем резко возрастает. Так, при четырех факторах требуется поставить $2^4 = 16$ опытов, при шести факторах — $2^6 = 64$, а уже при восьми факторах — $2^8 = 256$ опытов. Конечно, увеличение числа опытов повышает точность математической модели, однако при этом значительно возрастают затраты времени и средств.

В то же время на первых этапах планирования, когда используется линейная модель в виде полинома $\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$ применение полного факторного эксперимента становится нецелесообразным вследствие избыточности опытов, т. е. разности между числом всех опытов и числом оцениваемых коэффициентов модели. В этом случае есть смысл сократить число опытов за счет той информации, которую несут эффекты взаимодействия факторов и которая для построения линейной модели не существенна. Сделать это можно с помощью плана, представляющего собой некоторую часть ($1/2$, $1/4$, $1/8$ и т. д.) от полного факторного эксперимента и называемого дробным факторным экспериментом или дробной репликой.

Рассмотрим принцип построения такого плана. Для этого обратимся к полному факторному эксперименту 2^2 и составим уже известную нам матрицу (табл. 5.6)

Пользуясь таким планированием, можно построить модель

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2.$$

Таблица 5.6

Полуреплика 2^{3-1}

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1x_2 \equiv x_3$	y
1	+	+	+	+	y_1
2	+	-	+	-	y_2
3	+	+	-	-	y_3
4	+	-	-	+	y_4

Однако, если есть основания считать, что в выбранных интервалах варьирования процесс может быть описан линейной моделью, то достаточно определить коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , а коэффициент b_{12} можно принять равным нулю, т. е. взаимодействие факторов x_1x_2 отсутствует. Это позволяет включить в схему эксперимента еще один новый фактор x_3 и приписать ему знаки столбца x_1x_2 (см. табл. 5.6). Эта процедура записывается так: $x_3 \equiv x_1x_2$. Теперь получилась матрица планирования уже для трех факторов, и линейная модель будет выражаться уравнением $\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$. Для определения коэффициентов этого уравнения (см. табл. 5.6) достаточно провести четыре опыта вместо восьми в полном факторном эксперименте типа 2^3 . Итак, поставив четыре опыта для оценки влияния трех факторов, мы воспользовались половиной полного факторного эксперимента 2^3 или дробной репликой.

Аналогично можно построить дробную реплику с четырьмя факторами, используя план типа 2^3 (см. табл. 5.4). В этом случае целесообразно произвести замену столбца $x_1x_2x_3$ четвертым фактором x_4 . Тогда получим план эксперимента с 8

опытами для четырех факторов. Такой план также содержит половину опытов полного факторного эксперимента.

План эксперимента, предусматривающий реализацию половины опытов полного факторного эксперимента, называется полуреplikой. При увеличении числа факторов ($k > 3$) возможно применение реплик большей дробности. Составляют дробные реплики заменой некоторых эффектов взаимодействия, которыми можно пренебречь, новыми факторами. Эти реплики условно обозначают 2^{k-p} , где p — число линейных эффектов, приравненных к эффектам взаимодействия. При $p=1$ получают полуреplikу, при $p=2$ получают $1/4$ реплики, при $p=3$ получают $1/8$ реплики и т. д. Дробный факторный эксперимент, указанный в табл. 5.6, представляет полуреplikу 2^{3-1} .

Наиболее распространены так называемые регулярные реплики, в которых число опытов получается делением числа опытов полного факторного эксперимента на число, кратное двум.

В табл. 5.7 приведены основные показатели дробных реплик.

Для сравнения в последнем столбце приведено число опытов для полного факторного эксперимента. Преимущество дробных реплик по числу опытов очевидно, и эффект от их использования становится тем больше, чем больше число факторов.

Отметим наиболее важное отличие дробных реплик от полного факторного эксперимента. В связи с тем, что в дробных репликах часть взаимодействий заменена новыми факторами, найденные коэффициенты уравнения регрессии будут являться совместными оценками линейных эффектов и эффектов взаимодействия. Величина коэффициента b_3 в точности совпадает с величиной коэффициента b_{12} (знаки столбцов x_3 и x_1x_2 одинаковы) (см. табл. 5.6). Если в дополнение к указанным столбцам (см. табл. 5.6) построить столбцы x_1x_3 и x_2x_3 , они в точности совпадут соответственно со столбцами x_2 и x_1 , и, следовательно, коэффициенты b_{13} и b_{23} совпадут соответственно с коэффициентами b_2 и b_1 . Таким

образом, здесь уже нельзя получить отдельных, независимых оценок коэффициентов, как это делало при полном факторном эксперименте. В данном случае говорят, что линейные эффекты смешаны с эффектами парных взаимодействий.

Таблица 5.7

Основные показатели дробных реплик

Число факторов k	Дробные реплики	Условное обозначение 2^{k-p}	Число опытов	
			дробной реплики	полного факторного эксперимента
3	1/2 реплики от 2^3	2^{3-1}	4	8
4	1/2 реплики от 2^4	2^{4-1}	8	16
5	1/2 реплики от 2^5	2^{5-1}	16	32
5	1/4 реплики от 2^5	2^{5-2}	8	32
6	1/2 реплики от 2^6	2^{6-1}	32	64
6	1/4 реплики от 2^6	2^{6-2}	16	64
6	1/8 реплики от 2^6	2^{6-3}	8	64
7	1/4 реплики от 2^7	2^{7-2}	32	128
7	1/8 реплики от 2^7	2^{7-3}	16	128
7	1/16 реплики от 2^7	2^{7-4}	8	128
8	1/8 реплики от 2^8	2^{8-3}	32	256
8	1/16 реплики от 2^8	2^{8-4}	16	256
9	1/32 реплики от 2^9	2^{9-5}	16	512
10	1/64 реплики от 2^{10}	2^{10-6}	16	1024

Следовательно, коэффициенты b_1, b_2, b_3 будут оценками совместных эффектов, а именно:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12},$$

где b_i – вычисленные выборные оценки коэффициентов; β_i – неизвестные истинные значения коэффициентов.

Приведенную запись можно прочесть так: коэффициент b_1 , например, является совместной оценкой влияния фактора x_1 и парного взаимодействия x_2x_3 на функцию отклика (параметр

оптимизации). Влияние фактора x_1 в этом случае характеризуется величиной β_1 , а влияние взаимодействия x_2x_3 – величиной β_{23} . Итак, в рассматриваемой дробной реплике нельзя отделить линейное влияние факторов от их парных взаимодействий, что свидетельствует о значительной потере информации по сравнению с полным факторным экспериментом.

Таблица 5.8

Две полуреплики 2^{3-1}

Номер опыта	$x_3 \equiv x_1x_2$			Номер опыта	$x_3 \equiv -x_1x_2$		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
1	-	+	-	1	-	+	+
2	+	+	+	2	+	+	-
3	-	-	+	3	-	-	-
4	+	-	-	4	+	-	+

Оценки, в которых невозможно разделить линейный эффект и эффект взаимодействия, называются смешанными. Линейные эффекты рекомендуется смешивать прежде всего с теми взаимодействиями, которые, согласно априорной информации, незначимы.

В реальных условиях часто приходится решать задачи, в которых заранее можно полагать, что эффекты взаимодействия, хотя и малы по сравнению с линейными эффектами, все же не равны нулю. В таких случаях необходимо заранее определить, когда и какие эффекты определяются совместно, т. е. рассмотреть вопрос о разрешающей способности дробных реплик.

Прямая оценка разрешающей способности дробной реплики затруднена. Поэтому дробные реплики обычно задают с помощью генерирующих соотношений. Генерирующим называется такое соотношение, которое показывает, какое из взаимодействий принято незначимым и заменено новым фактором.

План типа 2^{3-1} может быть представлен двумя полурепликами (см. табл. 5.8), которые задаются одним из следующих генерирующих соотношений:

$$x_3 \equiv x_1 x_2; \quad x_3 \equiv -x_1 x_2. \quad (5.6)$$

Генерирующие соотношения умножим на новый фактор:

$$x_3^2 \equiv x_1 x_2 x_3; \quad x_3^2 \equiv -x_1 x_2 x_3. \quad (5.7)$$

Поскольку всегда $x_i^2 = 1$, получим следующие выражения:

$$1 \equiv x_1 x_2 x_3; \quad 1 \equiv -x_1 x_2 x_3. \quad (5.8)$$

В результате умножения генерирующего соотношения на новый фактор получают, так называемый, определяющий контраст.

Для указанных полуреplik (см. табл. 5.8) определяющими контрастами будут выражения (5.8). Зная определяющий контраст, можно найти соотношения, задающие совместные оценки. Для этого необходимо перемножить факторы x_1 , x_2 и x_3 на определяющий контраст. Умножая по очереди определяющие контрасты (5.8) на x_1 , x_2 и x_3 , получим соотношения:

$$\begin{aligned} x_1 \cdot 1 &\equiv x_1^2 x_2 x_3; \quad x_1 \cdot 1 \equiv -x_1^2 x_2 x_3; \\ x_2 \cdot 1 &\equiv x_1 x_2^2 x_3; \quad x_2 \cdot 1 \equiv -x_1 x_2^2 x_3; \\ x_3 \cdot 1 &\equiv x_1 x_2 x_3^2; \quad x_3 \cdot 1 \equiv -x_1 x_2 x_3^2, \end{aligned}$$

но так как $x_i^2 = 1$, то

$$\begin{aligned} x_1 &\equiv x_2 x_3; \quad x_1 \equiv -x_2 x_3; \\ x_2 &\equiv x_1 x_3; \quad x_2 \equiv -x_1 x_3; \\ x_3 &\equiv x_1 x_2; \quad x_3 \equiv -x_1 x_2. \end{aligned}$$

Это значит, что коэффициенты линейного уровня регрессии будут оценками

$$\begin{aligned} b_1 &\rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{23}; \\ b_2 &\rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{13}; \\ b_3 &\rightarrow \beta_3 + \beta_{12}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{12}, \end{aligned}$$

т. е. получено то же, что и ранее.

Рассмотрим различия в оценках влияния эффектов факторов, даваемых дробными репликами с различными определяющими контрастами. Предположим, в задаче четыре фактора. Решено поставить дробный факторный эксперимент типа 2^{4-1} , включающий 8 опытов. В этом случае можно составить несколько матриц планирования, т. е. несколько полуреплик. Две из них приведены в табл. 5.9 и 5.10. Восемь опытов представляют собой полный факторный эксперимент 2^3 . Поэтому для первых трех факторов x_1, x_2 и x_3 (см. табл. 5.9 и 5.10) записана матрица 2^3 . Фактор x_4 в одном случае (см. табл. 5.9) приравнен тройному взаимодействию x_1, x_2 и x_3 , в другом (см. табл. 5.10) - двойному x_1, x_2 .

Полуреплика 2^{4-1} в табл. 5.9 задана генерирующим соотношением $x_4 \equiv x_1x_2x_3$, а в табл. 5.10 - $x_4 \equiv x_1x_2$. Соответственно, определяющие контрасты будут выражены соотношениями $1 \equiv x_1x_2x_3x_4$ и $1 \equiv x_1x_2x_4$.

Совместные оценки будут определяться следующим образом: 1) для первой полуреплики (см. табл. 5.9); 2) для второй полуреплики (см. табл. 5.10):

$x_1 \equiv x_2x_3x_4$	$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{234}$	$x_1 \equiv x_2x_4$	$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{24}$
$x_2 \equiv x_1x_3x_4$	$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{134}$	$x_2 \equiv x_1x_4$	$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{14}$
$x_3 \equiv x_1x_2x_4$	$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{124}$	$x_3 \equiv x_1x_2x_3x_4$	$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{1234}$
$x_4 \equiv x_1x_2x_3$	$b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{123}$	$x_4 \equiv x_1x_2$	$b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{12}$
$x_1x_2 \equiv x_3x_4$	$b_{12} \rightarrow \beta_{12} + \beta_{34}$	$x_1x_3 \equiv x_2x_3x_4$	$b_{13} \rightarrow \beta_{13} + \beta_{234}$
$x_1x_3 \equiv x_2x_4$	$b_{13} \rightarrow \beta_{13} + \beta_{24}$	$x_2x_3 \equiv x_1x_3x_4$	$b_{23} \rightarrow \beta_{23} + \beta_{134}$
$x_1x_4 \equiv x_2x_3$	$b_{14} \rightarrow \beta_{14} + \beta_{23}$	$x_3x_4 \equiv x_1x_2x_3$	$b_{34} \rightarrow \beta_{34} + \beta_{123}$

В практических задачах тройные и более высокого порядка взаимодействия значительно чаще, чем двойные, бывают равны нулю, и ими можно пренебречь. Полуреплика 2^{4-1} , заданная генерирующим соотношением $x_4 \equiv x_1x_2x_3$, позволяет получить отдельные оценки четырех линейных эффектов и три совместные оценки парных взаимодействий. В этом случае отдельными оценками будут b_1, b_2, b_3 и b_4 , так как тройными

взаимодействиями β_{234} , β_{134} , β_{124} , β_{123} вследствие их незначимости можно пренебречь. В другой полуреплике, заданной генерирующим соотношением $x_4 \equiv x_1 x_2$, три линейных эффекта, а именно b_1 , b_2 , b_4 , оказались смешанными с парными взаимодействиями. Разрешающая способность полуреплики, заданной генерирующим соотношением $x_4 \equiv x_1 x_2 x_3$ (см. табл. 5.9), получилась значительно выше, чем у полуреплики, заданной генерирующим соотношением $x_4 \equiv x_1 x_2$ (см. табл. 5.10). Следовательно, разрешающая способность полуреплики зависит от генерирующего соотношения, которым она задана.

Таблица 5.9

Полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $I \equiv x_1 x_2 x_3 x_4$

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_4 \equiv x_1 x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	-
3	+	+	-	+	-
4	+	-	-	+	+
5	+	+	+	-	+
6	+	-	+	-	-
7	+	+	-	-	-
8	+	-	-	-	+

Таблица 5.10

Полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $I \equiv x_1 x_2 x_4$

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_4 \equiv x_1 x_2$
1	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	-
3	+	+	-	+	-
4	+	-	-	+	+
5	+	+	+	-	+
6	+	-	+	-	-
7	+	+	-	-	-
8	+	-	-	-	+

Используя аналогичные способы замены эффектов взаимодействия факторов на эффекты других факторов, можно построить планы эксперимента большей дробности и оценить разрешающую способность дробной реплики.

Выбор степени дробности плана эксперимента должен осуществляться всякий раз в зависимости от поставленной задачи и имеющихся сведений о процессе. Целесообразность практического применения дробных реплик возрастает с увеличением числа факторов, а эффективность зависит от удачного выбора системы смешивания линейных эффектов с эффектами взаимодействия, а также от интуиции исследователя в случае значимости некоторых взаимодействий. Независимость оценок нелинейных взаимодействий можно достигнуть, создавая план дробной реплики на основе специально подобранного генерирующего соотношения.

При использовании регулярных дробных реплик необходимо учитывать их свойства: симметричность, условие нормировки, ортогональность и ротатабельность, аналогичные свойствам полного факторного эксперимента.

5.4. Реализация плана эксперимента

После выбора основных (нулевых) уровней и интервалов варьирования факторов их натуральные значения заносятся в таблицу (табл. 5.11). Это делается для того, чтобы облегчить работу экспериментатора и исключить ошибки при выборе условий опыта.

Проведение любого эксперимента связано с погрешностями, знание которых необходимо для оценки его результатов. В связи с этим план эксперимента должен быть выбран таким, чтобы имелась возможность исключить влияние возможных систематических погрешностей и оценить случайную погрешность эксперимента.

Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	...	\tilde{x}_k	Размерность
Основной уровень \tilde{x}_i^0	\tilde{x}_1^0	\tilde{x}_2^0	...	\tilde{x}_k^0	
Интервал варьирования $\Delta\tilde{x}_i$	$\Delta\tilde{x}_1$	$\Delta\tilde{x}_2$	...	$\Delta\tilde{x}_k$	
Верхний уровень (+1)	\tilde{x}_1^B	\tilde{x}_2^B	...	\tilde{x}_k^B	
Нижний уровень (-1)	\tilde{x}_1^H	\tilde{x}_2^H	...	\tilde{x}_k^H	

Чтобы исключить влияние систематических погрешностей, вызванных различными внешними условиями (мешающими факторами), необходимо опыты, заданные планом эксперимента, проводить рандомизированно во времени, т. е. в случайной последовательности. Порядок проведения опытов следует выбирать по таблице равномерно распределенных случайных чисел (см. табл. 5.12).

Если, например, необходимо провести восемь опытов (эксперимент типа 2^3), то в случайном месте таблицы последовательно выписывают числа от 1 до 8, отбрасывая числа больше 8 и уже выписанные. Эти числа, взятые из табл. 5.12, будут, например, 5, 4, 8, 2, 7, 6, 1, 3. Это значит, что первым следует провести опыт № 5, вторым – № 4, третьим – № 8 и т. д.

Другой подход состоит в разбивке матрицы на блоки. Если экспериментатор знает заранее об изменении каких-то внешних условий, он может составить план эксперимента так, чтобы эффект влияния этих условий был связан с определенным взаимодействием факторов, которым можно пренебречь. Например, матрицу 2^3 можно разбить на два блока таким образом, чтобы эффект влияния условий сказался на величине тройного эффекта взаимодействия. В первый блок следует сгруппировать все опыты, в которых это взаимодействие $x_1x_2x_3$ равно +1, а во второй – где оно равно – 1 (табл. 5.13).

**Фрагмент из таблицы равномерно распределенных
случайных чисел**

10 09 73 25 33	76 52 01 35 86	34 67 35 48 76	80 95 90 91 17	39 29 27 49 45
37 54 20 48 05	64 89 47 42 96	24 80 52 40 37	20 63 61 04 02	00 82 29 16 65
08 42 26 89 53	19 64 50 93 03	23 20 90 25 60	15 95 33 47 64	35 08 03 36 06
99 01 90 25 29	09 37 67 07 15	38 31 13 11 65	88 67 67 43 97	04 43 62 76 59
12 80 79 99 70	80 15 73 61 47	64 03 23 66 53	98 95 11 68 77	12 17 17 68 33
66 06 57 47 17	34 07 27 68 50	36 69 73 61 70	65 81 33 98 85	11 19 92 91 70
31 06 01 08 05	45 57 18 24 06	35 30 34 26 14	86 79 90 74 39	23 40 30 97 32
85 26 97 76 02	02 05 16 56 92	68 66 57 48 18	73 05 38 52 47	18 62 38 85 79
63 57 33 21 35	05 32 54 70 48	90 55 35 75 48	28 46 82 87 09	83 49 12 56 24
73 79 64 57 53	03 52 96 47 78	35 80 83 42 82	60 93 52 03 44	35 27 38 84 35
98 52 01 77 67	14 90 56 86 07	22 10 94 05 58	60 97 09 34 33	50 50 07 39 98
11 80 50 54 31	39 80 82 77 32	50 72 56 82 48	29 40 52 42 01	52 77 56 78 51
83 45 29 96 34	06 28 89 80 83	13 74 67 00 78	18 47 54 06 10	68 71 17 78 17
88 68 54 02 00	86 50 75 84 01	36 76 66 79 51	90 36 47 64 93	29 60 91 10 62
99 59 46 73 48	87 51 76 49 69	91 82 60 89 28	93 78 56 13 68	23 47 83 41 13
65 48 11 76 74	17 46 85 09 50	58 04 77 69 74	73 03 95 71 86	40 21 81 65 44
80 12 43 56 35	17 72 70 80 15	45 31 82 23 74	21 11 57 82 53	14 38 55 37 63
74 35 09 98 17	77 40 27 72 14	43 23 60 02 10	45 52 16 42 37	96 28 60 26 55
69 91 62 68 03	66 25 22 91 48	36 93 68 72 03	76 62 11 39 90	94 40 05 64 18
09 89 32 05 05	14 22 56 85 14	46 42 75 67 88	96 29 77 88 22	54 38 21 45 98
91 49 91 45 23	68 47 92 76 86	46 16 28 35 54	94 75 08 99 23	37 08 92 00 48
80 33 69 45 98	26 94 03 68 58	70 29 73 41 35	53 14 03 33 40	42 05 08 23 41
44 10 48 19 49	85 15 74 79 54	32 97 92 65 75	57 60 04 08 81	22 22 20 64 13
12 55 07 37 42	11 10 00 20 40	12 86 07 46 97	96 64 48 94 39	28 70 72 58 15
63 60 64 93 29	16 50 53 44 84	40 21 95 25 63	43 65 17 70 82	07 20 73 17 90

Разбивка матрицы 2^3 на два блока

Блок	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_1
	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_4
2	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_5
	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_8

Для разбивки любого эксперимента типа 2^k на два блока следует выбирать взаимодействие, которым можно пожертвовать (обычно это взаимодействие самого высокого порядка).

Дать оценку случайной погрешности эксперимента можно только при повторении (дублирования) каждого опыта строки матрицы m раз. Такие опыты называются параллельными. Обычно число m параллельных опытов принимается равным 2 – 3, иногда – 4 – 5. Первоначальное число m выбирается по результатам специально поставленных опытов, оценивающих их воспроизводимость. План эксперимента, в который вносятся результаты параллельных опытов, записывается в виде табл. 5.14.

Постановка параллельных опытов не дает полностью совпадающих результатов, хотя и опыты воспроизводятся по возможности в одинаковых условиях. Это происходит за счет погрешности измерения значений факторов и самого параметра оптимизации, влияния неучтенных факторов и т. п. Получение среднего арифметического значения параметра оптимизации \bar{y}_i по каждой строке матрицы планирования связано с применением методов статистической обработки результатов наблюдений (гл. 4).

При проведении исследований экспериментатор может иметь дело с тремя вариантами дублирования опытов в каждой

точке факторного пространства: 1) эксперимент проведен при равномерном дублировании опытов; 2) эксперимент выполнен при неравномерном дублировании опытов; 3) эксперимент поставлен с дублированием опытов в центре плана.

При равномерном дублировании все строки матрицы планирования имеют одинаковое число параллельных опытов (см. табл. 5.14).

Таблица 5.14

План эксперимента типа 2^k с параллельными опытами

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	...	x_k	Параллельные опыты				\bar{y}_u
						y_{u1}	y_{u2}	...	y_{um}	
1	+1	+1	+1	...	+1	\bar{y}_{11}	\bar{y}_{12}	...	\bar{y}_{1m}	\bar{y}_1
2	+1	-1	+1	...	+1	y_{21}	y_{22}	...	y_{2m}	\bar{y}_2
3	+1	+1	-1	...	+1	y_{31}	y_{32}	...	y_{3m}	\bar{y}_3
...
N	+1	-1	-1	...	-1	y_{N1}	y_{N2}	...	y_{Nm}	\bar{y}_N

В случае неравномерного дублирования число параллельных опытов по строкам матрицы неодинаково. Это происходит на практике из-за случайных грубых нарушений условий эксперимента, когда опыт признается неудачным, а повторить его по каким-либо причинам нельзя. Пример такого плана приведен в табл. 5.15.

Таблица 5.15

План эксперимента типа 2^2 с неравномерным дублированием параллельных опытов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Параллельные опыты			\bar{y}_u
					y_{u1}		y_{u3}	
1	+1	+1	+1	+1	\bar{y}_{11}	\bar{y}_1	y_{13}	\bar{y}_1
2	+1	-1	+1	-1	y_{21}	\bar{y}_2	-	\bar{y}_2
3	+1	+1	-1	-1	y_{31}	\bar{y}_3	y_{32}	\bar{y}_3
4	+1	-1	-1	+1	-	y_{42}	y_{43}	\bar{y}_4

В третьем варианте все опыты, заданные планом, выполняются по одному разу, и лишь один из них, находящийся в центре плана, дублируется 3 – 4 раза. Это становится возможным, если экспериментатору известна заранее хорошая воспроизводимость опытов на объекте исследования. В этом случае резко сокращается число опытов и план эксперимента принимает следующий вид (см. табл. 5.16).

Из рассмотренных вариантов дублирования наиболее предпочтителен вариант с равномерным дублированием опытов.

Таблица 5.16

**Матрица планирования эксперимента типа 2^2
с дублированием опытов в центре плана**

Номер опыта	x_1	x_2	Параметр оптимизации y_u
1	+ 1	+ 1	y_1
2	- 1	+1	y_2
3	+ 1	- 1	y_3
4	- 1	- 1	y_4
Опыты в центре плана			
1	0	0	y_{1o}
2	0	0	y_{2o}
3	0	0	y_{3o}
4	0	0	y_{4o}

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{4} \sum_1^4 y_{i_0}$$

При этом варианте эксперимент отличается повышенной точностью, а математическая обработка экспериментальных данных — простотой. Характер дублирования опытов влияет на содержание математической обработки результатов наблюдений. Исходя из этого, рассмотрим алгоритм расчета полного факторного эксперимента при равномерном дублировании опытов.

5.5. Алгоритм расчета полного факторного эксперимента типа 2^k при равномерном дублировании опытов

Выбор модели и построение матрицы планирования

Выбор модели состоит в выборе вида функции

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (5.9)$$

где y — параметр оптимизации; x_1, x_2, \dots, x_k — факторы, влияющие на параметр оптимизации. Обычно функцию (5.9) выбирают в виде линейного алгебраического полинома вида

$$\hat{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k. \quad (5.10)$$

Планируя эксперимент на первом этапе, всегда стремятся получить линейную модель. Однако нет никакой гарантии, что в выбранных интервалах варьирования факторов процесс описывается линейной моделью типа (5.10). На практике приходится прибегать к более сложным зависимостям, т. е. когда модель нелинейна (5.1). Это связано с тем, что эффект одного фактора зависит от уровней, на которых находятся другие факторы. В этом случае имеют место эффекты взаимодействия, количественную оценку которых позволяет получить полный факторный эксперимент. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбцы произведений всех факторов. При добавлении столбцов эффектов взаимодействий все рассмотренные свойства матрицы планирования сохраняются.

Теперь модель, например, для двух факторов будет иметь вид

$$\hat{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (5.11)$$

а для эксперимента типа 2^3 выглядит следующим образом:

$$\hat{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (5.12)$$

В столбцах x_1, x_2, x_3 (см. табл. 5.4) задают планирование, по ним непосредственно определяются условия опытов, а остальные столбцы $x_0, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3$ и $x_1x_2x_3$ служат только для расчета.

Для полного факторного эксперимента типа 2^2 матрица планирования для модели вида (5.11) представлена в табл. 5.17.

При решении задач оптимизации всегда рассчитываются коэффициенты b_{ij} уравнения (5.1), которые в дальнейшем используются для проверки адекватности полученной по результатам эксперимента модели.

Таблица 5.17

Матрица планирования эксперимента типа 2^2

Номер опыта	x_0	План		x_1x_2	Параметр оптимизации						Дисперсия $(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$
		x_1	x_2		y_{u1}	y_{u2}	...	y_{um}	\bar{y}_u	\hat{y}_u	
1	+1	-1	-1	+1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1m}	\bar{y}_1	\hat{y}_1	$(\bar{y}_1 - \hat{y}_1)^2$
2	+1	+1	-1	-1	y_{21}	y_{22}	...	y_{2m}	\bar{y}_2	\hat{y}_2	$(\bar{y}_2 - \hat{y}_2)^2$
3	+1	-1	+1	-1	y_{31}	y_{32}	...	y_{3m}	\bar{y}_3	\hat{y}_3	$(\bar{y}_3 - \hat{y}_3)^2$
4	+1	+1	+1	+1	y_{41}	y_{42}	...	y_{4m}	\bar{y}_4	\hat{y}_4	$(\bar{y}_4 - \hat{y}_4)^2$

Расчет построчных дисперсий и дисперсии воспроизводимости

Для каждой строки матрицы планирования по результатам m параллельных опытов находится среднее арифметическое значение параметра оптимизации:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m y_{ur}, \quad (5.13)$$

где $r=1, 2, \dots, m$ – число параллельных опытов, одинаковое по всей матрице; $u=1, 2, \dots, N$ – число строк матрицы планирования; y_{ur} – значение параметра оптимизации по параллельным опытам u -й строки матрицы планирования.

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляется дисперсия опыта по данным m параллельных опытов:

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{r=1}^m (y_{ur} - \bar{y}_u)^2 \quad (5.14)$$

и проверяется с помощью G -критерия Кохрена их однородность:

$$G_p = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (5.15)$$

где $S_{u \max}^2$ – максимальная из рассчитанных построчных дисперсий; $\sum_{u=1}^N S_u^2$ – сумма всех дисперсий по N строкам матрицы планирования. Если выполняется условие

$$G_p < G_t, \quad (5.16)$$

то гипотеза об однородности дисперсий принимается.

Табличное значение G -критерия находят по табл. 5.18 для чисел степеней свободы $\nu_1 = m-1$ и $\nu_2 = N$ и выбранного уровня значимости.

Если $G_p > G_t$, то дисперсии неоднородны, и одним из решений является увеличение числа параллельных опытов, т. е. еще раз или несколько раз необходимо реализовать план эксперимента. Если это не дает результата, то необходимо изменить метод контроля параметра оптимизации, увеличив его точность. В то же время неоднородность дисперсий требует провести более тщательную проверку гипотезы о нормальности распределения исследуемой величины и сделать соответствующие выводы.

Таблица 5.18

Значения G-критерия при уровнях значимости 0,05 (верхняя строка) и 0,01 (нижняя строка)

$\nu_2=N$	$\nu_1=m-1$						
	1	2	3	4	5	6	7
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365
	0,9676	0,8643	0,7814	0,7212	0,6761	0,6410	0,6129
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980
	0,8828	0,7218	0,6258	0,5635	0,5195	0,4866	0,4608
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185
	0,7945	0,6152	0,5209	0,4627	0,4226	0,3932	0,3704
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666
	0,7175	0,5358	0,4469	0,3934	0,3572	0,3308	0,3106
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299
	0,6528	0,4751	0,3919	0,3428	0,3099	0,2861	0,2680
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911
	0,5747	0,4069	0,3337	0,2882	0,2593	0,2386	0,2228
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501
	0,4799	0,3297	0,2654	0,2288	0,2048	0,1877	0,1748
24	0,3434	0,2354	0,1907	0,1656	0,1493	0,1374	0,1286
	0,4247	0,2871	0,2295	0,1970	0,1759	0,1608	0,1495
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377	0,1237	0,1137	0,1061
	0,3632	0,2412	0,1913	0,1635	0,1454	0,1327	0,1232
40	0,2370	0,1576	0,1259	0,1082	0,0968	0,0887	0,0827
	0,2940	0,1915	0,1508	0,1281	0,1135	0,1033	0,0957

При выполнении условия (5.16) построчные дисперсии усредняют по формуле

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2, \quad (5.17)$$

получая, таким образом, дисперсию воспроизводимости S_y^2 . Отсюда, случайная погрешность эксперимента может быть определена как корень квадратный из дисперсии воспроизводимости:

$$S_y = + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2} . \quad (5.18)$$

Расчет коэффициентов уравнения регрессии

По результатам проведенного эксперимента в выбранной области факторного пространства производится оценка численных коэффициентов уравнения регрессии.

Для расчета оценок коэффициентов математической модели вида (5.1) применяется метод наименьших квадратов. При этом ортогональность матрицы планирования позволяет получить независимые друг от друга оценки коэффициентов. Это означает, что величина любого коэффициента не зависит от того, какие величины имеют другие коэффициенты,

В общем случае для ортогональных планов коэффициенты рассчитываются по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_0 \bar{y}_u ; \quad (5.19)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_i \bar{y}_u ; \quad (5.20)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_i x_j \bar{y}_u , \quad (5.21)$$

где \bar{y}_u - среднее значение параметра оптимизации, определяемое по формуле (5.13); $x_0, x_i, x_i x_j$ - кодированное значение факторов и их взаимодействий.

Воспользуемся формулами (5.19), (5.20) и (5.21) и матрицей планирования (см. табл. 5.15) для оценки коэффициентов b_0, b_1, b_2 и b_{12} модели (5.11):

$$b_0 = \frac{(+1)\bar{y}_1 + (+1)\bar{y}_2 + (+1)\bar{y}_3 + (+1)\bar{y}_4}{4} = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4}{4} ;$$

$$b_1 = \frac{(-1)\bar{y}_1 + (+1)\bar{y}_2 + (-1)\bar{y}_3 + (+1)\bar{y}_4}{4} = \frac{-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4}{4} ;$$

$$b_2 = \frac{(-1)\bar{y}_1 + (-1)\bar{y}_2 + (+1)\bar{y}_3 + (+1)\bar{y}_4}{4} = \frac{-\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4}{4};$$

$$b_{12} = \frac{(+1)\bar{y}_1 + (-1)\bar{y}_2 + (-1)\bar{y}_3 + (+1)\bar{y}_4}{4} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4}{4}$$

Из изложенного видно, что, благодаря кодированию факторов, расчет коэффициентов уравнения регрессии превратился в простую арифметическую процедуру. Для подсчета коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 и b_{12} используются соответственно вектор-столбцы: x_0 , x_1 , x_2 и x_1x_2 и средние значения параметра оптимизации \bar{y}_u каждой вектор-строки матрицы планирования.

Для оценки влияния факторов на параметр оптимизации производится проверка значимости каждого коэффициента двумя равноценными способами: 1) с помощью t -критерия Стьюдента; 2) сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом. В обоих случаях вначале находится дисперсия коэффициентов регрессии, которая при m параллельных опытов рассчитывается по формуле

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\frac{N}{m} \sum_{u=1}^m x_{iu}^2}, \quad (5.22)$$

а при выполнении условия нормировки (5.4)

$$S_{b_i}^2 = \frac{1}{mN} S_y^2. \quad (5.23)$$

Из формул (5.22) и (5.23) видно, что дисперсии коэффициентов равны друг другу, а поэтому их среднеквадратические отклонения могут быть определены как

$$S_{b_0} = S_{b_i} = S_{b_{ij}} = \frac{1}{\sqrt{mN}} S_y. \quad (5.24)$$

По первому способу оценка значимости коэффициентов осуществляется по формуле

$$t_{i_p} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}} . \quad (5.25)$$

Коэффициент считается статистически значимым, если t_{i_p} больше или равен t_T , т. е.

$$t_{i_p} \geq t_T , \quad (5.26)$$

где $|b_i|$ — абсолютное значение i -го коэффициента уравнения регрессии; t_T — табличное значение критерия Стьюдента, которое находится из таблицы (табл. 4.13) по числу степеней свободы $\nu = N(m - 1)$ и заданном уровне значимости (доверительной вероятности); S_{b_i} — среднеквадратическое отклонение в определении коэффициента регрессии, вычисляемое по формуле (5.24).

По второму способу для проверки значимости коэффициентов используется доверительный интервал Δb_i , который является одинаковым для всех коэффициентов регрессии и находится по формуле

$$\Delta b_i = \pm t_T S_{b_i} . \quad (5.27)$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала или равна ему, т. е.

$$|b_i| \geq \Delta b_i . \quad (5.28)$$

Статистическая незначимость коэффициента интерпретируется как отсутствие влияния соответствующего эффекта.

Если какой-то из коэффициентов окажется статистически незначимым, то он может быть исключен из уравнения регрессии без пересчета остальных. После этого математическая модель исследуемого процесса вида (5.1) может быть

представлена уравнением регрессии с факторами и их взаимодействиями, имеющими только значимые коэффициенты. Здесь же необходимо заметить, что статистическая незначимость одного или нескольких коэффициентов могла быть вызвана следующими причинами: неудачно выбранным интервалом варьирования, неправильным выбором уровней факторов в экспериментальной области факторного пространства, значительными погрешностями эксперимента. Отсюда ясно, что более правильным является решение повторить эксперимент, например, при расширенном интервале варьирования для исследуемого фактора. Конечно, при этом число опытов, а значит, и время эксперимента возрастают. В этом случае половину опытов можно сохранить тем, что расширение интервала варьирования проводится только в одну сторону – один (верхний или нижний) уровень оставить. Если фактор все же остается незначимым после повторения эксперимента и всех необходимых расчетов, то его отбрасывают и переходят к следующему этапу обработки экспериментальных данных – проверке адекватности модели, т. е. выяснению пригодности уравнения регрессии для поиска области оптимума.

Проверка адекватности модели

Адекватность модели проверяют с помощью F -критерия Фишера. Для этого сравниваются две дисперсии – дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2$ и дисперсия воспроизводимости S_y^2 . Первая показывает рассеяние средних опытных данных параметра оптимизации \bar{y}_u относительно тех значений параметра оптимизации \hat{y}_u , которые предсказаны полученным линейным уравнением регрессии. Эта дисперсия рассчитывается по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (5.29)$$

где m — число параллельных опытов; N — число строк матрицы планирования; l — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии (включая свободный член).

Вторая дисперсия — это дисперсия воспроизводимости S_y^2 — определяется из выражения (5.17).

Расчетное значение критерия Фишера вычисляется по формуле

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (5.30)$$

при этом предполагается, что $S_{ад}^2 > S_y^2$.

Гипотеза адекватности уравнения регрессии принимается в том случае, если расчетное значение F -критерия не превышает табличного для соответствующих степеней свободы $\nu_1 = N - l$, $\nu_2 = N(m-1)$ и принятого уровня значимости (см. табл. 4.11), т. е, когда

$$F_p \leq F_T. \quad (5.31)$$

На практике бывает, что $S_{ад}^2 \leq S_y^2$, и тогда вывод об адекватности модели может быть сделан без проверки условия (5.31).

При невыполнении условия (5.31), т. е. при неадекватной линейной модели, наиболее часто принимается решение об уменьшении интервалов варьирования факторов и повторении эксперимента. Такое решение хотя и уменьшает кривизну поверхности отклика параметра оптимизации, может привести к появлению незначимых коэффициентов. Эффективным в этом случае считается включение в план эксперимента нового фактора из числа тех, которые были близки по своему эффекту к другим факторам, но были предварительно отсеяны.

Если условие (5.31) выполняется, то адекватный линейный полином используется для поиска области оптимума объекта (процесса) исследования.

При проверке адекватности необходимо, чтобы соблюдалось неравенство $\nu_1 > 0$, т. е. число опытов N должно превышать число членов l уравнения регрессии.

Однако в практике проведения технологических исследований возможны различные ситуации при статистической оценке полученного уравнения регрессии. Например, возможна ситуация, когда в полученном уравнении регрессии все коэффициенты значимы. Тогда для проверки адекватности уравнения не остается степеней свободы ($N=l$ и $\nu_1 = 0$). В этом случае адекватность уравнения регрессии можно проверить способом, основанным на оценке разности значений коэффициента b_0 и параметра оптимизации \bar{y}_0 , полученного в опыте на нулевых уровнях факторов. Полученная разность $|b_0 - \bar{y}_0|$ является оценкой суммы эффектов взаимодействия факторов. Если разность велика, уравнением регрессии пользоваться нельзя, а если эта разность мала, т. е. соизмерима с погрешностью эксперимента, то использование данного уравнения возможно. Здесь следует иметь в виду, что коэффициенты при эффектах взаимодействий могут быть с разными знаками, а потому их сумма — небольшой величиной.

Значимость различия между b_0 и \bar{y}_0 оценивается по t^* - критерию

$$t_p^* = \frac{|b_0 - \bar{y}_0| \sqrt{N}}{S_y}, \quad (5.32)$$

где S_y — погрешность эксперимента, вычисленная по формуле (5.18).

Гипотеза адекватности уравнения регрессии принимается, если

$$t_p^* \leq t_T. \quad (5.33)$$

Табличное значение критерия Стьюдента при заданном уровне значимости и числе степеней свободы $\nu = N (m-1)$ берется из таблицы (табл. 4.13).

Если условие (5.33) не соблюдается, т. е. $t_p^* > t_T$, то это свидетельствует о значимости коэффициентов при эффектах взаимодействия факторов и позволяет сделать вывод о неадекватности полученной модели.

Таким образом, изложенная последовательность обработки результатов эксперимента при равномерном дублировании опытов может быть представлена следующей схемой:

1) для каждой строки матрицы планирования по формуле (5.13) вычисляется среднее арифметическое значение \bar{y}_u параметра оптимизации;

2) по формуле (5.14) определяются построчные дисперсии S^2_u для каждого опыта матрицы планирования;

3) проверяется гипотеза однородности дисперсий S^2_u всех опытов по G -критерию Кохрена (5.15), (5.16);

4) по формуле (5.17) вычисляется дисперсия воспроизводимости S_y^2 (при условии однородности дисперсий S^2_u);

5) вычисляется погрешность эксперимента S_y из выражения (5.18);

6) по формулам (5.19), (5.20), (5.21) определяются коэффициенты уравнения регрессии;

7) по выражению (5.23) находятся дисперсии $S_{b_i}^2$ коэффициентов регрессии;

8) определяются среднеквадратические отклонения S_{b_i} коэффициентов уравнения регрессии по формуле (5.24);

9) по формуле (5.27) устанавливается величина доверительного интервала Δb_i ;

10) проверяется статистическая значимость коэффициентов уравнения регрессии (5.28);

11) по выражению (5.29) определяется дисперсия адекватности $S^2_{ад}$;

12) проверяется гипотеза адекватности модели с помощью F -критерия Фишера (5.30), (5.31).

В заключение необходимо отметить, что использование критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера предполагает нормальное распределение полученных результатов эксперимента.

5.6. Интерпретация результатов

В качестве адекватной модели принимается полином, коэффициенты которого являются частными производными функции отклика по соответствующим переменным. Их геометрический смысл — тангенсы углов наклона гиперплоскости к соответствующим осям. Большой по абсолютной величине коэффициент соответствует большому углу наклона и, следовательно, более существенному изменению параметра оптимизации при изменении данного фактора.

Полученную математическую модель для предварительного анализа переводят на язык экспериментатора. Это называется интерпретацией модели.

Задача интерпретации является весьма сложной и решается в несколько этапов. На первом этапе устанавливается, в какой мере каждый из факторов влияет на параметр оптимизации. Величина коэффициента уравнения регрессии — количественная мера этого влияния. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. О характере влияния факторов говорят знаки коэффициентов. Здесь необходимо запомнить следующее правило: если коэффициент регрессии отрицателен, то для увеличения параметра оптимизации необходимо уменьшать значения фактора, а если коэффициент регрессии положителен, — увеличивать. Это, в конечном итоге, зависит от того, ищем ли мы максимум или минимум функции отклика. Если ищем максимум функции, то увеличение положительных коэффициентов благоприятно, если необходимо найти минимум функции, то благоприятно уже увеличение отрицательных коэффициентов. Далее факторы располагаются в ряд по силе их влияния на параметр оптимизации. Факторы, коэффициенты которых незначимы, конечно, не интерпретируются. Про эти факторы можно сказать только то, что при данных интервалах варьирования и погрешности эксперимента они не оказывают существенного влияния на параметр оптимизации.

Изменение интервалов варьирования факторов приводит к изменению коэффициентов уравнения регрессии. Абсолютные значения коэффициентов возрастают с увеличения интервалов варьирования. Инвариантными к изменению интервалов варьирования факторов остаются знаки линейных коэффициентов уравнения регрессии. Однако и они изменяются на обратные, если «проскочили» экстремум функции.

На следующем этапе проверяется правильность априорных сведений, которые дают перед экспериментом некоторые представления о характере действия факторов на параметр оптимизации. Источниками таких сведений могут служить теория изучаемого процесса, опыт работы с аналогичными процессами, предварительные опыты и т. д.

Если, например, ожидается, что с ростом одного из факторов должно происходить увеличение параметра оптимизации, а его коэффициент регрессии имеет знак «минус», то возникает противоречие. В этом случае возможны следующие две причины возникновения такой ситуации: либо в эксперименте допущена ошибка, и он должен быть подвергнут ревизии, либо неверны априорные представления о механизме процесса. Здесь нужно иметь в виду, что эксперимент проводится в локальной области факторного пространства и коэффициент отражает влияние фактора только в этой области. Заранее не известно, в какой мере можно распространить результат эксперимента на другие области. Теоретические же представления имеют обычно более общий характер. Кроме того, априорная информация часто основывается на однофакторных зависимостях. При переходе к многофакторному пространству ситуация может измениться. Поэтому мы должны быть уверены, что эксперимент проведен корректно. Тогда для преодоления противоречия можно выдвигать различные гипотезы и проверять их экспериментально.

Далее анализируются эффекты взаимодействия факторов.

Пусть, например, взаимодействие двух факторов значимо и имеет положительный знак. Это свидетельствует о том, что для увеличения параметра оптимизации требуется одновременное увеличение или уменьшение значений факторов, а для уменьшения параметра оптимизации значения факторов должны одновременно изменяться в разных направлениях. Если же эффект взаимодействия имеет отрицательный знак, то для увеличения параметра оптимизации значения факторов должны одновременно изменяться в разных направлениях, а для уменьшения параметра оптимизации требуется одновременное увеличение или уменьшение значений факторов.

Отсюда видно, что интерпретация эффектов взаимодействия факторов не так однозначна, как линейных эффектов. В каждом случае имеется два варианта. Какому из вариантов отдать предпочтение? Прежде всего необходимо учесть знаки линейных эффектов соответствующих факторов. Если эффект взаимодействия имеет знак «плюс» и соответствующие линейные эффекты отрицательны, то выбор однозначен; требуется одновременное уменьшение факторов, т. е. сочетание $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$. Однако возможен такой случай, когда знаки линейных эффектов различны, тогда приходится учитывать численные значения коэффициентов и жертвовать самым малым эффектом.

Интерпретация уравнения регрессии является важной не только для понимания процесса, но также и для принятия решений при оптимизации.

5.7. Принятие решений после построения модели

После интерпретации полученных результатов переходят к принятию решений о дальнейших действиях: исправлять эксперимент или переходить к следующему этапу — поиску области оптимума. Этап принятия решений включает в себя эвристические моменты, зависящие от опыта и интуиции экспериментатора. При этом количество возможных ситуаций даже невозможно перечислить. Поэтому рассмотрим только наиболее часто встречающиеся случаи и выделим так

называемые типичные решения, в основу которых положена многоаспектная классификация ситуаций: по адекватности и неадекватности модели, значимости и незначимости коэффициентов уравнения регрессии, информация о положении оптимума.

Линейная модель адекватна. Здесь возможны три варианта ситуации: 1) все коэффициенты регрессии значимы; 2) часть коэффициентов регрессии значима, часть — незначима; 3) все коэффициенты регрессии незначимы.

В каждом варианте оптимум может быть близко, далеко или в неопределенной ситуации, т. е. о его положении нет информации.

Рассмотрим первый вариант, когда все коэффициенты регрессии значимы. Если область оптимума близка, то возможны три решения: окончание исследования, движение по градиенту и переход к планам второго порядка. Движение по градиенту используется при малой погрешности опыта и дает возможность найти оптимальную область. Переход к планированию второго порядка позволяет получить математическое описание области оптимума и найти экстремум. При удаленной области оптимума или когда неопределенная ситуация, принимается одно и то же решение — движение по градиенту.

Второй вариант — часть коэффициентов регрессии значима, часть незначима. Если часть коэффициентов линейной модели незначима и оптимум не близок или информация о нем отсутствует, необходимо выявить причины незначимости. Ими могут быть неправильный выбор интервалов варьирования, слабое влияние соответствующих факторов на параметр оптимизации, большая погрешность опыта. По устранению выявленной причины незначимости принимается решение: расширить интервалы варьирования незначимых факторов при проведении опытов; исключить факторы, не оказывающие влияние; увеличить число параллельных опытов для уменьшения погрешности. Изменение интервалов варьирования факторов иногда сочетают с переносом центра плана в точку, соответствующую условиям наилучшего опыта. Целью каждого

из этих решений является получение значимых коэффициентов. Это необходимо делать, так как движение по градиенту наиболее эффективно при значимых коэффициентах. Если область оптимума близка, то можно принимать такие же решения, как и при значимости всех коэффициентов, т. е. по первому варианту.

По третьему варианту – все коэффициенты регрессии незначимы (кроме b_0). Чаще всего это происходит вследствие большой погрешности эксперимента или узких интервалов варьирования факторов. Поэтому возможные решения направлены прежде всего на увеличение точности эксперимента и расширение интервалов варьирования. Увеличение точности может достигаться двумя путями: улучшением методики проведения опытов или постановкой дополнительных параллельных опытов.

Линейная модель неадекватна. Для неадекватной модели не делается различия между случаями значимых и незначимых линейных коэффициентов уравнения регрессии, потому что решения для них обычно совпадают. При неадекватной линейной модели центр плана (нулевая точка) переносится в экспериментальную точку с наилучшим значением параметра оптимизации, а интервал варьирования уменьшается пропорционально абсолютной величине коэффициента регрессии. Этим самым уменьшается кривизна поверхности отклика в точке эксперимента, что должно привести к адекватной линейной модели.

Если и при этом модель неадекватна, то очевидно, что нулевая точка эксперимента попала в область оптимума, которая описывается полиномом второго порядка. Однако такая ситуация встречается редко, поэтому в этом случае необходимо оценить вклад эффектов взаимодействия и квадратичных членов в суммарную дисперсию и, если в статистическом смысле он невелик, двигаться в область оптимума и при неадекватной модели.

Движение в область оптимума осуществляется с помощью методов оптимизации, среди которых в планировании

эксперимента широко используется метод крутого восхождения.

Рассмотрение данного метода для поиска области оптимума, как и применение планов второго порядка для ее исследования, выходят за рамки настоящего пособия.

5.8. Пример применения полного факторного эксперимента с равномерным дублированием опытов

Применение полного факторного эксперимента типа 2^k проиллюстрируем следующим примером.

В определенных геолого-технических условиях изучали зависимость механической скорости от технологических параметров режима бурения: осевой нагрузки P , расхода промывочной жидкости Q и частоты вращения n .

Локальную область определения факторов установили на основе априорных сведений. Основной (нулевой) уровень и интервал варьирования для каждого фактора были выбраны произвольно. Интервалы варьирования факторов и их натуральные значения на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в табл. 5.19.

Выбор модели и построение матрицы планирования. На первом этапе исследования для оценки влияния указанных факторов на параметр оптимизации (механическую скорость) и математического описания процесса бурения была использована модель вида

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (5.34)$$

Матрица планирования эксперимента с расчетными столбцами взаимодействия факторов и результатами бурения представлена в табл. 5.20. В соответствии с выбранным планом было выполнено рандомизированно во времени 8 опытов. Порядок реализации указан в табл. 5.20. Каждый опыт был повторен три раза.

Таблица 5.19

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Интервалы варьирования $\Delta\tilde{x}_i$	Уровни факторов		
		основной 0	верхний +1	нижний -1
Осевая нагрузка x_1 , кН	4	12	16	8
Расход промывочной жидкости x_2 , л/мин	35	55	70	40
Частота вращения x_3 , об/мин	120	460	576	340

Таблица 5.20

Матрица планирования эксперимента типа 2^3

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,80	0,78	0,69
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	2,00	1,80	2,48
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	1,28	1,20	1,34
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	2,00	2,06	2,18
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	4,00	3,60	3,12
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	5,54	4,80	4,50
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	4,24	5,54	3,80
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	5,54	5,14	6,00

Расчет дисперсии воспроизводимости

По формуле (5.13) определяем средние значения параметра оптимизации (механической скорости бурения) \bar{y}_i для каждой строки матрицы планирования по параллельным опытам:

$$\begin{aligned}\bar{y}_1 &= \frac{0,80+0,78+0,69}{3} = 0,76; \quad \bar{y}_5 = \frac{4,00+3,60+3,12}{3} = 3,57; \\ \bar{y}_2 &= \frac{2,00+1,80+2,48}{3} = 2,09; \quad \bar{y}_6 = \frac{5,54+4,80+4,50}{3} = 4,95; \\ \bar{y}_3 &= \frac{1,28+1,20+1,24}{3} = 1,27; \quad \bar{y}_7 = \frac{4,24+5,54+3,80}{3} = 4,53; \\ \bar{y}_4 &= \frac{2,00+2,06+2,18}{3} = 2,08; \quad \bar{y}_8 = \frac{5,54+5,14+6,00}{3} = 5,56.\end{aligned}$$

Для удобства вычислений составим таблицу (табл. 5.21) и для каждого опыта по формуле (5.14) рассчитаем построчные дисперсии $S^2_{u_i}$:

$$\begin{aligned}S_1^2 &= \frac{0,0016+0,0004+0,0049}{3-1} = 0,0035; \\ S_2^2 &= \frac{0,0081+0,0841+0,1521}{3-1} = 0,1222; \\ S_3^2 &= \frac{0,0001+0,0049+0,0049}{3-1} = 0,0050; \\ S_4^2 &= \frac{0,0064+0,0004+0,0100}{3-1} = 0,0084; \\ S_5^2 &= \frac{0,1949+0,0009+0,2025}{3-1} = 0,1942; \\ S_6^2 &= \frac{0,3481+0,0225+0,2025}{3-1} = 0,2866; \\ S_7^2 &= \frac{0,0841+1,0201+0,5329}{3-1} = 0,8186; \\ S_8^2 &= \frac{0,0004+0,1764+0,1936}{3-1} = 0,1852.\end{aligned}$$

Таблица 5.21

Расчет дисперсии опыта

Номер опыта	Механическая скорость бурения, м/ч				$y_{u1} - \bar{y}_u$	$y_{u2} - \bar{y}_u$	$y_{u3} - \bar{y}_u$	$(y_{u1} - \bar{y}_u)^2$	$(y_{u2} - \bar{y}_u)^2$	$(y_{u3} - \bar{y}_u)^2$	S_u^2
	y_{u1}	y_{u1}	y_{u2}	\bar{y}_u							
1	0,80	0,78	0,69	0,76	+0,04	+0,02	-0,07	0,0016	0,0004	0,0049	0,0035
2	2,00	1,80	2,48	2,09	-0,09	-0,29	+0,39	0,0081	0,0841	0,1521	0,1222
3	1,28	1,20	1,34	1,27	+ 0,01	-0,07	+0,07	0,0001	0,0049	0,0049	0,0050
4	2,00	2,06	2,18	2,08	-0,08	-0,02	+0,10	0,0064	0,0004	0,0100	0,0084
5	4,00	3,60	3,12	3,57	+0,43	+0,03	-0,45	0,1849	0,0009	0,2025	0,1942
6	5,54	4,80	4,50	4,95	+0,59	-0,15	-0,45	0,3481	0,0225	0,2025	0,2866
7	4,24	5,54	3,80	4,53	-0,29	+ 1,01	-0,73	0,0841	1,0201	0,5329	0,8186
8	5,54	5,14	6,00	5,56	-0,02	-0,42	+0,44	0,0004	0,1764	0,1936	0,1852
Σ				24,8							1,6237
				1							

Проверяем однородность ряда построчных дисперсий S_u^2 , для чего по формуле (5.15) рассчитаем величину критерия Кохрена. В данном случае

$$\sum_{u=1}^N S_u^2 = 1,6237 \text{ и } S_{u\max}^2 = 0,8186$$

(см. табл.5.21), поэтому

$$G_p = \frac{0,8186}{1,6237} = 0,5042 .$$

Расчетное значение критерия сравниваем с табличным (см. табл. 5.18) для степеней свободы $\nu_1 = 3 - 1 = 2$, $\nu_2 = 8$ и при заданном уровне значимости 0,05

$$G_T = 0,5157 > G_p = 0,5042.$$

Поскольку выполняется условие (5.16), ряд дисперсий S_u^2 можно считать однородным, и поэтому по формуле (5.17) рассчитываем дисперсию воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{1,6237}{8} = 0,2030.$$

Погрешность эксперимента, согласно (5.18):

$$S_y = \sqrt{0,2030} \approx 0,45 .$$

Расчет коэффициентов регрессии

Для расчета коэффициентов воспользуемся расширенной матрицей планирования (см. табл. 5.20) и полученным средним значением параметра оптимизации y_u по каждой строке (см. табл. 5.21). Коэффициенты подсчитываем по формулам (5.19), (5.20) и (5.21). Их значения оказались следующими:

$$\begin{aligned}
b_0 &= \frac{0,76+2,09+1,27+2,08+3,57+4,95+4,53+5,56}{8} = 3,10; \\
b_1 &= \frac{-0,76+2,09-1,27+2,08-3,57+4,95-4,53+5,56}{8} = 0,57; \\
b_2 &= \frac{-0,76-2,09+1,27+2,08-3,57-4,95+4,53+5,56}{8} = 0,26; \\
b_3 &= \frac{-0,76-2,09-1,27-2,08+3,57+4,95+4,53+5,56}{8} = 1,55; \\
b_{12} &= \frac{0,76-2,09-1,27+2,08+3,57-4,95-4,53+5,56}{8} = -0,11; \\
b_{13} &= \frac{0,76-2,09+1,27-2,08-3,57+4,95-4,53+5,56}{8} = 0,03; \\
b_{23} &= \frac{0,76+2,09-1,27-2,08-3,57-4,95+4,53+5,56}{8} = 0,13; \\
b_{123} &= \frac{-0,76+2,09+1,27-2,08+3,57-4,95-4,53+5,56}{8} = 0,02
\end{aligned}$$

После расчета всех коэффициентов уравнение (5.34) принимает вид

$$\begin{aligned}
\hat{y} &= 3,10 + 0,57x_1 + 0,26x_2 + 1,55x_3 - 0,11x_1x_2 + \\
&+ 0,03x_1x_3 + 0,13x_2x_3 + 0,02x_1x_2x_3.
\end{aligned} \tag{5.35}$$

Проверка статистической значимости коэффициентов

Проверку статистической значимости коэффициентов проводим двумя равноценными способами. Для этого вначале по формуле (5.24) вычисляем среднеквадратическое отклонение S_{b_i} , которое для всех коэффициентов одинаковое и численно равно

$$S_{b_i} = \frac{0,45}{\sqrt{3 \cdot 8}} = 0,09.$$

По первому способу, согласно формуле (5.25), получаем следующие расчетные значения критерия Стьюдента:

$$t_0 = \frac{3,10}{0,09} = 34,44 ; t_1 = \frac{0,57}{0,09} = 6,33 ; t_2 = \frac{0,26}{0,09} = 2,89 ; t_3 = \frac{1,55}{0,09} = 17,22 ;$$

$$t_{12} = \frac{0,11}{0,09} = 1,22 ; t_{13} = \frac{0,03}{0,09} = 0,33 ; t_{23} = \frac{0,13}{0,09} = 1,44 ; t_{123} = \frac{0,02}{0,09} = 0,22$$

и сравниваем их с табличным (см. табл. 4.13) для степеней свободы $\nu = 8(3 - 1) = 16$ и заданной доверительной вероятности 0,95 ($t_T = 2,12$). Коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} оказались статистически незначимыми, так как условие (5.26) не выполняется, а именно $t_{12} = 1,22 < t_T = 2,12$; $t_{13} = 0,33 < t_T = 2,12$ и т. д.

По второму способу определяем величину доверительного интервала Δb_i по формуле (5.27) и получаем для всех коэффициентов его численное значение

$$\Delta b_i = 2,12 \cdot 0,09 = 0,19.$$

Согласно условию (5.28), статистически значимыми признаются коэффициенты, величина которых равна доверительному интервалу или больше его. В данном случае это коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 . Статистически незначимые коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} из модели (5.35) исключаются, так как $b_{12} = |0,11| < \Delta b_i = 0,19$; $b_{23} = 0,03 < \Delta b_i = 0,19$ и т. д.

После исключения статистически незначимых коэффициентов b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} получено следующее уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 3,10 + 0,57x_1 + 0,26x_2 + 1,55x_3. \quad (5.36)$$

Проверка адекватности модели

Прежде всего определим с помощью уравнения (5.36) расчетные значения механической скорости бурения. Напомним, что все x_i в данное уравнение входят в кодированной форме, а поэтому расчетное значение механической скорости получаем с учетом условий опытов, приведенных в табл. 5.20:

$$\hat{y}_1 = 3,10 - 0,57 - 0,26 - 1,55 = 0,72;$$

$$\hat{y}_2 = 3,10 + 0,57 - 0,26 - 1,55 = 1,86;$$

$$\hat{y}_3 = 3,10 - 0,57 + 0,26 - 1,55 = 1,24;$$

$$\hat{y}_4 = 3,10 + 0,57 + 0,26 - 1,55 = 2,38;$$

$$\hat{y}_5 = 3,10 - 0,57 - 0,26 + 1,55 = 3,82;$$

$$\hat{y}_6 = 3,10 + 0,57 - 0,26 + 1,55 = 4,96;$$

$$\hat{y}_7 = 3,10 - 0,57 + 0,26 - 1,55 = 4,34;$$

$$\hat{y}_8 = 3,10 + 0,57 + 0,26 + 1,55 = 5,48.$$

Далее составляем таблицу, в которую заносим все полученные экспериментальные \bar{y}_u и расчетные \hat{y}_u значения механической скорости, а также все исходные данные, необходимые для расчета дисперсии адекватности $S_{ад}^2$ (табл. 5.22).

Таблица 5.22

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Номер опыта	\bar{y}_u	\hat{y}_u	$\bar{y}_u - \hat{y}_u$	$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$
1	0,76	0,72	0,04	0,0016
2	2,09	1,86	0,23	0,0529
3	1,27	1,24	0,03	0,0009
4	2,08	2,38	-0,30	0,0900
5	3,57	3,82	-0,25	0,0625
6	4,95	4,96	-0,01	0,0001
7	4,53	4,34	0,19	0,0361
8	5,56	5,48	0,08	0,0064

Из табл. 5.22 подсчитываем сумму квадратов отклонений:

$$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 = 0,0016 + 0,0529 + 0,0009 + 0,0900 + 0,0625 + 0,0001 + 0,0361 + 0,0064$$

$$+ 0,0625 + 0,0001 + 0,0361 + 0,0064 = 0,2505.$$

Дисперсию адекватности $S^2_{ад}$ рассчитываем по формуле (5.29):

$$S^2_{ад} = \frac{3}{8-4} \cdot 0,2505 = 0,1879.$$

Так как в данном случае $S^2_{ад} < S^2_y$ ($0,1879 < 0,2030$), то гипотезу об адекватности модели (5.36) принимаем, не выполняя при этом расчета (5.36) и не проверяя условия (5.31).

Анализ модели

Полный факторный эксперимент типа 2^3 был использован для нахождения уравнения (5.36), описывающего связь между механической скоростью бурения и основными технологическими параметрами— осевой нагрузкой, количеством промывочной жидкости и частотой вращения.

Из анализа уравнения регрессии можно заключить, что все три параметра режима бурения оказывают положительное влияние на механическую скорость. Об этом свидетельствуют знаки при коэффициентах. Что касается численной величины коэффициентов, то они показывают силу влияния соответствующего фактора на параметр оптимизации. Так, в нашем примере при выбранных интервалах варьирования наибольшее влияние на механическую скорость бурения оказывает частота вращения ($b_3=1,55$), наименьшее – расход промывочной жидкости ($b_2=0,26$).

Наибольшее значение механической скорости бурения было получено, когда все факторы были на верхнем уровне (+1). Эти уровни факторов ($p=16$ кН, $Q = 70$ л/мин, $n = 576$ об/мин) могут быть приняты за основные при планировании следующего этапа эксперимента.

Анализ квадратов отклонений $(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$ по строкам (см. табл. 5.22) показывает, что наибольший вклад в дисперсию адекватности вносят опыты 2, 4, 5 и 7. Отсюда рекомендация: повторить эти опыты и после уточнения их значений можно переходить к крутому восхождению.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность полного факторного эксперимента?
2. Как производится выбор области проведения эксперимента, основного уровня и интервалов варьирования факторов?
3. Что такое кодирование факторов?
4. Опишите матрицу планирования и ее свойства.
5. Каков принцип построения дробной реплики от полного факторного эксперимента?
6. Как реализуется план эксперимента при равномерном дублировании опытов?
7. Объясните алгоритм расчета полного факторного эксперимента при равномерном дублировании опытов.
8. Опишите интерпретацию результатов эксперимента и принятие решений после построения модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного пособия сделана попытка в максимально доступной и понятной форме изложить планирование многофакторного эксперимента для поиска оптимальных условия процесса бурения на этапе получения математической модели в виде полинома первой степени.

Для этого объект исследования рассматривается как кибернетическая система, характеризующаяся совокупностью входных переменных (факторов) и выходной величины (параметров оптимизации), связанных между собой определенным соотношением, представленным после реализации эксперимента в виде уравнения регрессии.

Изменение стратегии исследования технологических объектов связано с применением ряда методологических концепций, внесенных в теорию и практику эксперимента математической статистикой и кибернетикой.

На предварительном этапе исследования производится постановка небольшого числа опытов и обработка результатов наблюдений с помощью методов математической статистики. Это дает некоторое представление о свойствах и поведении изучаемого объекта и способствует повышению эффективности его исследования на последующих этапах.

Так, по данным предварительного исследования, становится возможным определить: 1) области существования факторов; 2) основные (нулевые) уровни и интервалы варьирования факторов; 3) предварительное число параллельных опытов; 4) число факторов и их взаимодействий, включаемых в план полного факторного эксперимента или дробной реплики.

В соответствии с выбранной моделью и задачами исследования намечается план эксперимента, реализация которого является наиболее ответственной частью работы. Здесь требуется высокая культура эксперимента, тщательное соблюдение условий рандомизации опытов.

Обработка результатов с помощью методов наименьших квадратов приводит к получению математической модели объекта в области проведения эксперимента. После получения полинома проводится проверка статистической значимости коэффициентов и его адекватности.

Анализ полученной математической модели позволяет наметить направление движения из исходной точки, наиболее быстро приводящее к оптимизации выбранного параметра. Дальнейшие исследования связаны с применением метода крутого восхождения и планов второго порядка.

Библиографический список

Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976.

Башкатов, Д. Н. Оптимизация процесса бурения / Д. Н. Башкатов. – Нижний Новгород, 2007.

Бражников, В. А. Информационные устройства для определения эффективности процесса бурения / В. А. Бражников, В. А. Кузнецов. – М.: Недра, 1988.

Ганджумян, Р. А. Математическая статистика в разведочном бурении / Р. А. Ганджумян. – М.: Недра, 1990.

Ермаков, С. М. Статистическое моделирование / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – М.: Недра, 1978.

Игнатов, В. И. Организация и проведение эксперимента в бурении / В. И. Игнатов. – М.: Недра, 1978.

Козловский, Е. А. Оптимизация процесса бурение (структура и элементы управления). – М.: МГГА, 2000.

Крутов, В. Н. Основы научных исследований / В. Н. Крутов, Н. М. Глушко, В. В. Попов [и др.] – М.: Высшая школа, 1989.

Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1981.

Ошкордин, О. В. Качество разведочного бурения / О. В. Ошкордин, А. А. Мецгер, С. Г. Фролов; СГИ. – Свердловск, 1990.

Ошкордин, О. В. Технологический опыт как ресурс бурового производства: науч. изд. – Екатеринбург: Изд-во УГГГУ, 2003. – 156 с.



**ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
Кафедра технологии и техники разведки МПИ**

Ф.П. Сердюков

ОПТИМИЗАЦИЯ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Методические указания для практических занятий
студентов по дисциплине
«Оптимизация в геологоразведочном производстве»*

*Для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки*

Очное, заочное

**Екатеринбург
2020**

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение задания по курсу «Оптимизация в геологоразведочном производстве» имеет целью закрепить и углубить знания по исследованию объекта и его научном анализе, функционирование которого желательно в оптимальном режиме, где центральное место занимает эксперимент. Для повышения эффективности экспериментальных исследований применяют математические методы, теорию планирования эксперимента и методы обработки результатов исследований.

Задание выполняются на персональных компьютерах, и отчет о выполнении должен быть составлен согласно общим правилам оформления аттестационных и квалификационных работ. Для выполнения заданий необходимы базовые навыки работы в текстовом редакторе *Word* и электронных таблицах *MS Excel*.

Расчетно-графическое задание «Полный факторный эксперимент 2³»

Цель и условие задания

Цель задания: освоить методы планирования и обработки полного факторного эксперимента.

Условие задания: Объектом экспериментальных исследований является новая конструкция коронки. Параметром исследований выбрана механическая скорость бурения. В качестве факторов приняты осевая нагрузка, частота вращения и расход промывочной жидкости, которыми варьируют в следующих пределах:

- $8 \leq x_1 \leq 16$ кН;
- $70 \leq x_2 \leq 40$ л/мин;
- $340 \leq x_3 \leq 580$ об/мин

Верхние и нижние границы интервалов варьирования выбраны за соответствующие уровни факторов. Вероятность взаимодействия факторов не исключается. Число параллельных опытов во всех точках плана равно трем. План полного факторного эксперимента 2³ и результаты определения параметра исследований приведены в приложении 1 в таблицах соответствующих вариантов.

Требуется: Построить математическую модель с учетом взаимодействия факторов. При выполнении статистических процедур уровень значимости табличных критериев следует принять равным 0,05.

Содержание отчета:

- условие задания;
- вариант рабочей матрицы экспериментов с использованием рандомизации опытов (включая параллельные опыты);
- расчет коэффициентов уравнения с учетом взаимодействия факторов и целевую функцию в виде неполного квадратичного полинома;
- расчет относительной погрешности вычисленных по этому уравнению значений параметра для всех строк плана;
- оценка воспроизводимости результатов экспериментов при помощи *G*-критерия Кохрена;
- проверка значимости отдельных коэффициентов построенного уравнения с помощью *t*-критерия Стьюдента и определение целевой функции, состоящей только из значимых эффектов;
- проверку адекватности модели с помощью *F*-критерия Фишера;
- анализ полученных результатов.

1. Пример применения полного факторного эксперимента с равномерным дублированием опытов

Применение полного факторного эксперимента типа 2^k проиллюстрируем следующим примером.

В определенных геолого-технических условиях изучали зависимость механической скорости от технологических параметров режима бурения: осевой нагрузки P , расхода промывочной жидкости Q и частоты вращения n .

Локальную область определения факторов установили на основе априорных сведений. Основной (нулевой) уровень и интервал варьирования для каждого фактора были выбраны произвольно. Интервалы варьирования факторов и их натуральные значения на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в табл. 1.

Выбор модели и построение матрицы планирования. На первом этапе исследования для оценки влияния указанных факторов на параметр оптимизации (механическую скорость) и математического описания процесса бурения была использована модель вида

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (1)$$

Матрица планирования эксперимента с расчетными столбцами взаимодействия факторов и результатами бурения представлена в табл. 2. В соответствии с выбранным планом было выполнено рандомизированно во времени 8 опытов. Порядок реализации указан в табл. 2. Каждый опыт был повторен три раза.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Интервалы варьирования $\Delta\tilde{x}_i$	Уровни факторов		
		основной 0	верхний +1	нижний -1
Осевая нагрузка x_1 , кН	4	12	16	8
Расход промывочной жидкости x_2 , л/мин	35	55	70	40
Частота вращения x_3 , об/мин	120	460	576	340

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента типа 2^3

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,80	0,78	0,69
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	2,00	1,80	2,48
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	1,28	1,20	1,34
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	2,00	2,06	2,18
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	4,00	3,60	3,12
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	5,54	4,80	4,50
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	4,24	5,54	3,80
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	5,54	5,14	6,00

Расчет дисперсии воспроизводимости

По формуле определяем средние значения параметра оптимизации (механической скорости бурения) \bar{y}_u для каждой строки матрицы планирования по параллельным опытам:

$$\begin{aligned}\bar{y}_1 &= \frac{0,80 + 0,78 + 0,69}{3} = 0,76; \quad \bar{y}_5 = \frac{4,00 + 3,60 + 3,12}{3} = 3,57; \\ \bar{y}_2 &= \frac{2,00 + 1,80 + 1,05}{3} = 2,09; \quad \bar{y}_6 = \frac{5,54 + 4,80 + 4,50}{3} = 4,95; \\ \bar{y}_3 &= \frac{1,28 + 1,20 + 1,24}{3} = 1,27; \quad \bar{y}_7 = \frac{4,24 + 5,54 + 3,80}{3} = 4,53; \\ \bar{y}_4 &= \frac{2,00 + 2,06 + 2,18}{3} = 2,08; \quad \bar{y}_8 = \frac{5,54 + 5,14 + 6,00}{3} = 5,56.\end{aligned}$$

Для удобства вычислений составим таблицу (табл. 3) и для каждого опыта по формуле рассчитаем построчные дисперсии S_u^2 :

$$\begin{aligned}S_1^2 &= \frac{0,0016 + 0,0004 + 0,0049}{3-1} = 0,0035; \\ S_2^2 &= \frac{0,0081 + 0,0841 + 0,1521}{3-1} = 0,1222; \\ S_3^2 &= \frac{0,0001 + 0,0049 + 0,0049}{3-1} = 0,0050; \\ S_4^2 &= \frac{0,0064 + 0,0004 + 0,0100}{3-1} = 0,0084; \\ S_5^2 &= \frac{0,1949 + 0,0009 + 0,2025}{3-1} = 0,1942; \\ S_6^2 &= \frac{0,3481 + 0,0225 + 0,2025}{3-1} = 0,2866; \\ S_7^2 &= \frac{0,0841 + 1,0201 + 0,5329}{3-1} = 0,8186; \\ S_8^2 &= \frac{0,0004 + 0,1764 + 0,1936}{3-1} = 0,1852.\end{aligned}$$

Таблица 3

Расчет дисперсии опыта

Номер опыта	Механическая скорость бурения, м/ч				$y_{u1} - \bar{y}_u$	$y_{u2} - \bar{y}_u$	$y_{u3} - \bar{y}_u$	$(y_{u1} - \bar{y}_u)^2$	$(y_{u2} - \bar{y}_u)^2$	$(y_{u3} - \bar{y}_u)^2$	S_u^2
	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	\bar{y}_u							
1	0,80	0,78	0,69	0,76	+0,04	+0,02	-0,07	0,0016	0,0004	0,0049	0,0035
2	2,00	1,80	2,48	2,09	-0,09	-0,29	+0,39	0,0081	0,0841	0,1521	0,1222
3	1,28	1,20	1,34	1,27	+0,01	-0,07	+0,07	0,0001	0,0049	0,0049	0,0050
4	2,00	2,06	2,18	2,08	-0,08	-0,02	+0,10	0,0064	0,0004	0,0100	0,0084
5	4,00	3,60	3,12	3,57	+0,43	+0,03	-0,45	0,1849	0,0009	0,2025	0,1942
6	5,54	4,80	4,50	4,95	+0,59	-0,15	-0,45	0,3481	0,0225	0,2025	0,2866
7	4,24	5,54	3,80	4,53	-0,29	+1,01	-0,73	0,0841	1,0201	0,5329	0,8186
8	5,54	5,14	6,00	5,56	-0,02	-0,42	+0,44	0,0004	0,1764	0,1936	0,1852
Σ				24,8							1,6237
				1							

Проверяем однородность ряда построчных дисперсий S_u^2 , для чего по формуле рассчитаем величину критерия Кохрена. В данном случае

$$\sum_{u=1}^N S_u^2 = 1,6237 \text{ и } S_{u_{\max}}^2 = 0,8186$$

(см. табл.3), поэтому

$$G_p = \frac{0,8186}{1,6237} = 0,5042 .$$

Расчетное значение критерия сравниваем с табличным для степеней свободы $\nu_1 = 3 - 1 = 2$, $\nu_2 = 8$ и при заданном уровне значимости 0,05

$$G_T = 0,5157 > G_p = 0,5042.$$

Поскольку выполняется условие, ряд дисперсий S_u^2 можно считать однородным, и поэтому по формуле рассчитываем дисперсию воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{1,6237}{8} = 0,2030.$$

Погрешность эксперимента, согласно формулы:

$$S_y = \sqrt{0,2030} \approx 0,45 .$$

Расчет коэффициентов регрессии

Для расчета коэффициентов воспользуемся расширенной матрицей планирования (см. табл. 2) и полученным средним значением параметра оптимизации y_u по каждой строке (см. табл. 3). Коэффициенты подсчитываем по формулам. Их значения оказались следующими:

$$b_0 = \frac{0,76 + 2,09 + 1,27 + 2,08 + 3,57 + 4,95 + 4,53 + 5,56}{8} = 3,10 ;$$

$$b_1 = \frac{-0,76 + 2,09 - 1,27 + 2,08 - 3,57 + 4,95 - 4,53 + 5,56}{8} = 0,57 ;$$

$$b_2 = \frac{-0,76 - 2,09 + 1,27 + 2,08 - 3,57 - 4,95 + 4,53 + 5,56}{8} = 0,26 ;$$

$$b_3 = \frac{-0,76 - 2,09 - 1,27 - 2,08 + 3,57 + 4,95 + 4,53 + 5,56}{8} = 1,55 ;$$

$$b_{12} = \frac{0,76 - 2,09 - 1,27 + 2,08 + 3,57 - 4,95 - 4,53 + 5,56}{8} = -0,11 ;$$

$$b_{13} = \frac{0,76 - 2,09 + 1,27 - 2,08 - 3,57 + 4,95 - 4,53 + 5,56}{8} = 0,03 ;$$

$$b_{23} = \frac{0,76 + 2,09 - 1,27 - 2,08 - 3,57 - 4,95 + 4,53 + 5,56}{8} = 0,13 ;$$

$$b_{123} = \frac{-0,76 + 2,09 + 1,27 - 2,08 + 3,57 - 4,95 - 4,53 + 5,56}{8} = 0,02$$

После расчета всех коэффициентов уравнение (1) принимает вид

$$\hat{y} = 3,10 + 0,57x_1 + 0,26x_2 + 1,55x_3 - 0,11x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,13x_2x_3 + 0,02x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Проверка статистической значимости коэффициентов

Проверку статистической значимости коэффициентов проводим двумя равноценными способами. Для этого вначале по формуле вычисляем среднеквадратическое отклонение S_{b_i} , которое для всех коэффициентов одинаковое и численно равно

$$S_{b_i} = \frac{0,45}{\sqrt{3 \cdot 8}} = 0,09.$$

По первому способу, согласно формуле, получаем следующие расчетные значения критерия Стьюдента:

$$t_0 = \frac{3,10}{0,09} = 34,44; \quad t_1 = \frac{109}{6,33} = 17,22; \quad t_2 = \frac{0,26}{0,09} = 2,89; \quad t_3 = \frac{1,55}{0,09} = 17,22;$$

$$t_{12} = \frac{0,11}{0,09} = 1,22; \quad t_{13} = \frac{0,03}{0,09} = 0,33; \quad t_{23} = \frac{0,13}{0,09} = 1,44; \quad t_{123} = \frac{0,02}{0,09} = 0,22$$

и сравниваем их с табличным для степеней свободы $\nu = 8(3 - 1) = 16$ и заданной доверительной вероятности 0,95 ($t_T = 2,12$). Коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} оказались статистически незначимыми, так как условие не выполняется, а именно $t_{12} = 1,22 < t_T = 2,12$; $t_{13} = 0,33 < t_T = 2,12$ и т. д.

По второму способу определяем величину доверительного интервала Δb_i по формуле и получаем для всех коэффициентов его численное значение

$$\Delta b_i = 2,12 \cdot 0,09 = 0,19.$$

Согласно условию, статистически значимыми признаются коэффициенты, величина которых равна доверительному интервалу или больше его. В данном случае это коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 . Статистически незначимые коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} из модели (2) исключаются, так как $b_{12} = |0,11| < \Delta b_i = 0,19$; $b_{23} = 0,03 < \Delta b_i = 0,19$ и т. д.

После исключения статистически незначимых коэффициентов b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} получено следующее уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 3,10 + 0,57x_1 + 0,26x_2 + 1,55x_3. \quad (3)$$

Проверка адекватности модели

Прежде всего определим с помощью уравнения (3) расчетные значения механической скорости бурения. Напомним, что все x_i в данное уравнение входят в кодированной форме, а поэтому расчетное значение механической скорости получаем с учетом условий опытов, приведенных в таблице 2:

$$\hat{y}_1 = 3,10 - 0,57 - 0,26 - 1,55 = 0,72;$$

$$\hat{y}_2 = 3,10 + 0,57 - 0,26 - 1,55 = 1,86;$$

$$\hat{y}_3 = 3,10 - 0,57 + 0,26 - 1,55 = 1,24;$$

$$\hat{y}_4 = 3,10 + 0,57 + 0,26 - 1,55 = 2,38;$$

$$\hat{y}_5 = 3,10 - 0,57 - 0,26 + 1,55 = 3,82;$$

$$\hat{y}_6 = 3,10 + 0,57 - 0,26 + 1,55 = 4,96;$$

$$\hat{y}_7 = 3,10 - 0,57 + 0,26 - 1,55 = 4,34;$$

$$\hat{y}_8 = 3,10 + 0,57 + 0,26 + 1,55 = 5,48.$$

Далее составляем таблицу, в которую заносим все полученные экспериментальные \bar{y}_u и расчетные \hat{y}_u значения механической скорости, а также все исходные данные, необходимые для расчета дисперсии адекватности $S_{ад}^2$ (табл. 4).

Таблица 4

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Номер опыта	\bar{y}_u	\hat{y}_u	$\bar{y}_u - \hat{y}_u$	$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$
1	0,76	0,72	0,04	0,0016
2	2,09	1,86	0,23	0,0529
3	1,27	1,24	0,03	0,0009
4	2,08	2,38	-0,30	0,0900
5	3,57	3,82	-0,25	0,0625
6	4,95	4,96	-0,01	0,0001
7	4,53	4,34	0,19	0,0361
8	5,56	5,48	0,08	0,0064

Из таблицы 4 подсчитываем сумму квадратов отклонений:

$$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 = 0,0016 + 0,0529 + 0,0009 + 0,0900 + 0,0625 + 0,0001 + 0,0361 + 0,0064 = 0,2505.$$

Дисперсию адекватности $S_{ад}^2$ рассчитываем по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{3}{8-4} \cdot 0,2505 = 0,1879.$$

Так как в данном случае $S_{ад}^2 < S_y^2$ ($0,1879 < 0,2030$), то гипотезу об адекватности модели (3) принимаем, не выполняя при этом расчета (3) и не проверяя условия.

Анализ модели

Полный факторный эксперимент типа 2^3 был использован для нахождения уравнения (3), описывающего связь между механической скоростью бурения и основными технологическими параметрами — осевой нагрузкой, количеством промывочной жидкости и частотой вращения.

Из анализа уравнения регрессии можно заключить, что все три параметра режима бурения оказывают положительное влияние на механическую скорость. Об этом свидетельствуют знаки при коэффициентах. Что касается численной величины коэффициентов, то они показывают силу влияния соответствующего фактора на параметр оптимизации. Так, в нашем примере при выбранных интервалах варьирования наибольшее влияние на механическую скорость бурения оказывает частота вращения ($b_3=1,55$), наименьшее — расход промывочной жидкости ($b_2=0,26$).

Наибольшее значение механической скорости бурения было получено, когда все факторы были на верхнем уровне (+1). Эти уровни факторов ($p=16$ кН, $Q=70$ л/мин, $n=576$ об/мин) могут быть приняты за основные при планировании следующего этапа эксперимента.

Анализ квадратов отклонений $(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$ по строкам (см. табл. 4) показывает, что наибольший вклад в дисперсию адекватности вносят опыты 2, 4, 5 и 7. Отсюда рекомендация: повторить эти опыты и после уточнения их значений можно переходить к крутому восхождению.

Варианты задания

Вариант 1

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,35	0,43	0,41
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,72	0,75	0,73
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,53	0,58	0,55
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,84	0,86	0,85
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,41	0,48	0,44
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,86	0,87	0,86
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,62	0,65	0,64
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	0,97	0,98	0,96

Вариант 2

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,33	0,4	0,36
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,65	0,77	0,68
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,48	0,58	0,5
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,76	0,89	0,8
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,38	0,46	0,39
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,77	0,91	0,81
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,55	0,67	0,59
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	0,88	1,02	0,91

Вариант 3

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,39	0,47	0,45
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,79	0,83	0,80
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,58	0,64	0,61
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,92	0,95	0,94
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,45	0,53	0,48
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,95	0,96	0,95
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,68	0,72	0,70
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,07	1,08	1,06

Вариант 4

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,33	0,41	0,39
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,69	0,71	0,70
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,50	0,55	0,52
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,80	0,82	0,81
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,39	0,46	0,42
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,82	0,83	0,82
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,59	0,62	0,61
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	0,92	0,93	0,91

Вариант 5

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,52	0,50	0,44
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,88	0,85	0,84
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,69	0,66	0,63
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,00	0,99	0,97
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,58	0,53	0,50
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,01	1,00	1,00
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,77	0,75	0,73
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,13	1,11	1,12

Вариант 6

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,48	0,40	0,46
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,80	0,77	0,78
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,63	0,58	0,60
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,91	0,89	0,90
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,53	0,46	0,49
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,92	0,91	0,91
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,70	0,67	0,69
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,03	1,02	1,01

Вариант 7

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,36	0,44	0,42
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,73	0,76	0,74
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,54	0,59	0,56
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,86	0,88	0,87
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,42	0,49	0,45
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,88	0,89	0,88
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,63	0,66	0,65
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	0,99	1,00	0,98

Вариант 8

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,50	0,42	0,52
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,88	0,87	0,91
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,67	0,64	0,70
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,03	1,02	1,04
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,53	0,50	0,58
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,04	1,04	1,05
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,77	0,75	0,79
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,16	1,17	1,19

Вариант 9

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,38	0,47	0,45
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,79	0,82	0,80
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,58	0,64	0,60
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,92	0,94	0,93
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,45	0,53	0,48
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,94	0,95	0,94
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,68	0,71	0,70
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,06	1,07	1,05

Вариант 10

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,45	0,37	0,47
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,83	0,82	0,86
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,62	0,59	0,65
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,98	0,97	0,99
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,48	0,45	0,53
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,99	0,99	1,00
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,72	0,70	0,74
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,11	1,12	1,14

Вариант 11

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,42	0,49	0,51
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,86	0,87	0,89
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,63	0,66	0,69
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,00	1,01	1,03
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,49	0,52	0,57
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,03	1,03	1,04
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,74	0,76	0,77
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,16	1,14	1,17

Вариант 12

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,68	0,60	0,66
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,00	0,97	0,98
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,83	0,78	0,80
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,11	1,09	1,10
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,73	0,66	0,69
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,12	1,11	1,11
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,90	0,87	0,89
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,23	1,22	1,21

Вариант 13

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,47	0,58	0,55
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,97	1,01	0,98
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,71	0,78	0,74
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,13	1,15	1,14
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,55	0,64	0,59
6	8	+	+	-	+	+	-	-	-	1,15	1,17	1,15
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,83	0,87	0,86
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,30	1,32	1,29

Вариант 14

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,56	0,47	0,54
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,91	0,88	0,89
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,73	0,67	0,69
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,03	1,01	1,02
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,62	0,54	0,57
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,04	1,03	1,03
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,80	0,77	0,79
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,16	1,15	1,14

Вариант 15

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,43	0,51	0,54
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,93	0,94	0,97
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,67	0,70	0,74
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,09	1,10	1,11
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,51	0,55	0,60
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,11	1,11	1,13
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,79	0,82	0,83
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,26	1,25	1,28

Вариант 16

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{и1}$	$y_{и2}$	$y_{и3}$
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,71	0,63	0,69
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,03	1,00	1,01
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,86	0,81	0,83
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,14	1,12	1,13
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,76	0,69	0,72
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,15	1,14	1,14
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,93	0,90	0,92
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,26	1,25	1,24

Вариант 17

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,67	0,56	0,64
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,10	1,06	1,07
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,87	0,80	0,83
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,24	1,22	1,23
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,73	0,64	0,68
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,26	1,24	1,24
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,96	0,92	0,95
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,41	1,39	1,38

Вариант 18

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,70	0,59	0,67
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,13	1,09	1,10
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,90	0,83	0,86
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,27	1,25	1,26
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,76	0,67	0,71
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,29	1,27	1,27
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,99	0,95	0,98
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,44	1,42	1,41

Вариант 19

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,57	0,69	0,66
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,12	1,16	1,13
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,84	0,91	0,87
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	1,30	1,32	1,31
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,66	0,76	0,70
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	1,32	1,34	1,32
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,97	1,01	1,00
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,49	1,50	1,47

Вариант 20

Номер опыта	Порядок реализации	Планирование				Расчет				Параметр оптимизации		
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}
1	6	+	-	-	-	+	+	+	-	0,38	0,46	0,48
2	2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,83	0,84	0,86
3	5	+	-	+	-	-	+	-	+	0,60	0,62	0,66
4	1	+	+	+	-	+	-	-	-	0,97	0,98	0,99
5	7	+	-	-	+	+	-	-	+	0,46	0,49	0,54
6	8	+	+	-	+	-	+	-	-	0,99	0,99	1,01
7	3	+	-	+	+	-	-	+	-	0,71	0,73	0,74
8	4	+	+	+	+	+	+	+	+	1,13	1,11	1,14

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкатов Д.Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. М.: Недра, 1985, – 181 с.
2. Башкатов Д.Н. Оптимизация процесса бурения. – Н. Новгород: Красная книга, 2006, 331 с.
3. Ганджумян Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении: Справочное пособие. М.: Недра, 1990, 218 с.
4. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве: учебник / В.В. Нескоромных, В.Г. Храменков // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013, 256 с.
5. Еркалов В.И., Усов Г.А., Сердюков Ф.П. Планирование эксперимента в бурении. – Екатеринбург, 2017, 116 с.