

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов

**ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ПРИ БУРЕНИИ
СКВАЖИН**

Монография

Днепропетровск
НГУ
2012

УДК 622.244.4
ББК 33.131
Д 13

Рекомендовано до видання вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 11 від 21.12.2012).

Рецензенти:

Я.С. Коцкулич, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри буріння нафтових і газових свердловин (Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу);

І.О. Садовенко, д-р техн. наук, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології (Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»).

Давиденко А.Н.

Д 13 Прямая и обратная схемы очистки при бурении скважин: моногр. / А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 101 с.

ISBN 978 – 966 – 350 – 387 – 5

Даны сведения об основных методиках определения расхода очистного агента при прямой схеме циркуляции. Проанализировано влияние параметров очистного агента на забойные процессы разрушения пород и транспортировки частиц шлама.

Показана взаимосвязь между физико-геометрическими характеристиками частиц шлама и циркуляционными процессами на забое и в стволе скважины.

Изучены особенности схемы циркуляции очистного агента, связанные с разнообразием геолого-технических факторов.

Рассмотрены технологические аспекты метода бурения с гидротранспортом керна.

Предназначена для специалистов, которые занимаются буровыми работами, а также будет полезна студентам технических вузов и геологоразведочных факультетов.

ISBN 978 – 966 – 350 – 387 – 5

© О.М. Давиденко, А.О. Игнатов, 2012

© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ЦИРКУЛЯЦИИ ОЧИСТНОГО АГЕНТА.....	5
1.1 Транспортировка продуктов разрушения при прямой схеме циркуляции очистного агента.....	7
1.2 Основные требования к качеству очистки ствола и забоя скважины и факторы, определяющие их чистоту.....	12
1.3 Технические средства бурения скважин с обратной схемой циркуляции очистного агента.....	21
1.4 Зарубежная практика бурения скважин с применением двойной бурильной колонны.....	26
1.5 Особенности обратной схемы циркуляции очистного аген- та, связанные с геолого-техническими факторами.....	29
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1.....	34
РАЗДЕЛ 2 ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЕРНО-ШЛАМОВОГО МАТЕРИАЛА С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ.....	35
2.1 Гранулометрический анализ шлама.....	35
2.2 Определение скорости относительного движения шлама....	39
2.3 Определение скорости относительного движения керна.....	47
2.4 Некоторые экспериментальные сведения о движении керна по двойной бурильной колонне.....	49
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.....	52
РАЗДЕЛ 3 КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЦИОНАЛЬНЫЙ РАСХОД ОЧИСТНОГО АГЕНТА.....	54
3.1 Учет формы и размеров частичек шлама при проектирова- нии режима очистки.....	54
3.2 Анализ методик определения расхода очистного агента.....	59
3.3 Влияния концентрации твердой фазы на величину расхода очистного агента.....	63
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3.....	63

РАЗДЕЛ 4	ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КЕРНА ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ.....	70
4.1	Характер влияния составляющих перепада давления на транспортировку керна.....	70
4.2	Изучение влияния геометрических размеров керновой магистрали, плотности и длины образцов породы на скорость движения керна.....	77
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4.....	80
РАЗДЕЛ 5	ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КЕРНА ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ.....	82
5.1	Вклад в относительную скорость керна составляющих перепада давления на транспортировку образцов породы.....	82
5.2	Изучение влияния геометрических параметров внутренней колонны, линейных и плотностных характеристик керна на скорость его движения.....	88
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5.....	92
	ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	94
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Освоение месторождений полезных ископаемых требует проведения широкомасштабных инженерно-геологических изысканий с целью получения надежной информации о запасах путем бурения скважин.

Сооружение скважин является чрезвычайно капиталоемким. По этой причине поиск резервов повышения производительности буровых работ – важнейшая задача.

Разведочное бурение – основной вид геологоразведочных работ. Повышение эффективности этих работ связано с созданием прогрессивного бурового оборудования и инструмента, модернизацией уже существующего, а также необходимостью уделения внимания вопросам оптимизации процесса сооружения скважин.

Рекомендации по технологии бурения геологоразведочных скважин, выбору способа бурения, типа оборудования и породоразрушающего инструмента а, особенно, методики проектирования параметров режима бурения недостаточно обоснованы, что тормозит освоение новой техники и прогрессивной технологии при бурении геологоразведочных скважин.

Одну из основных частей расходов на строительство скважин составляют расходы на удаление продуктов разрушения с забоя на поверхность. По данным широкомасштабных исследований на очистку забоя от шлама и вынос его на поверхность используется до 70 – 80% всей энергии, затрачиваемой на бурение скважин. Такое положение обусловлено отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору основных параметров процесса очистки, которые носят преимущественно качественный характер.

Подъем продуктов разрушения до дневной поверхности происходит в результате совместного действия подъемных сил потока очистного агента и сил проскальзывания транспортируемых продуктов. Рекомендуемые скорости восходящего потока недостаточно дифференцированы для конкретных условий бурения, отсутствует единое мнение о влиянии режимов течения, показателей свойств буровых растворов и частоты вращения бурильных труб на транспортирующую способность восходящего потока бурового раствора. Традиционные расчеты транспортирующей способности базируются на экспериментах по определению скорости осаждения частиц шлама в покоящихся жидкостях, что связано с многофакторностью циркуляционных процессов и невозможностью точного определения характеристик восходящего потока очистного агента. Однако это не является препятствием на пути поиска подходящих решений, предотвращающих возникновение осложнений и аварий, связанных с неверным подбором параметров режима очистки скважин. Поэтому целесообразно изучение вопросов о свободном движении твердых частиц в жидкости, а также о несущей способности очистного агента в процессе циркуляции.

Характерной особенностью технического прогресса в бурении геологоразведочных скважин является широкое внедрение технологии, позволяющей сократить время вспомогательных операций – в первую очередь метод бурения с непрерывным выносом на поверхность выбуренной породы.

В основе технологии бурения с гидротранспортом керна лежит метод непрерывного удаления с забоя выбуренного керна и транспортировке его на поверхность потоком очистного агента, что обеспечивается при использовании двойной бурильной колонны, специальных забойных снарядов и конструкций породоразрушающего инструмента.

Данная технология бурения применяется при разведке месторождений бурых углей, строительных материалов, и при сооружении гидрогеологических скважин.

В большинстве случаев в качестве промывочной жидкости используется вода и глинистый раствор, однако с появлением в разрезе неустойчивых, трещиноватых пород и увеличении глубины возникают осложнения. Нарушается устойчивость стенок скважины и наблюдается частичная потеря циркуляции, которая характеризуется прерывистым восходящим потоком, что отрицательно сказывается на привязке пробы к глубине скважины, а также нередко приводит к остановке процесса бурения.

Большое влияние на качество очистки забоя и устойчивость стенок скважины оказывает наличие и схема циркуляции промывочной жидкости в затрубном пространстве.

Одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является применение различных типов промывочной жидкости и реагентов для их обработки, разработки схемы циркуляции в зависимости от характеристики геологического разреза, определении величины расхода промывочной жидкости для обеспечения необходимой очистки забоя скважины.

Таким образом, актуальность создания научно обоснованной методики проектирования параметров режима промывки обусловлена потребностями геологоразведочной отрасли Украины.

Авторы ставили перед собой задачей ознакомление читателей с теоретическими основами процессов транспортировки продуктов разрушения и путями возможного совершенствования и повышения эффективности отдельных технологических аспектов прямой и обратной схем очистки скважин.

Особую благодарность авторы выражают д.т.н., проф. А.А. Кожевникову за большую помощь в написании подразделов «2.2 Определение скорости относительного движения шлама» и «3.1 Учет формы и размеров частичек шлама при проектировании режима очистки».

Использование материалов исследователей, занимавшихся изучением вопросов теории движения твердых частиц в жидкости и непосредственно очисткой скважин от продуктов разрушения, отражено в списке литературы.

РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ЦИРКУЛЯЦИИ ОЧИСТНОГО АГЕНТА

1.1 Транспортировка продуктов разрушения при прямой схеме циркуляции очистного агента

Расход промывочной жидкости – такой же важный параметр режима бурения, как осевая нагрузка и частота вращения бурового снаряда.

Процесс сооружения скважины сопровождается образованием шлама (разрушенная породоразрушающим инструментом горная порода). Эффективность бурения в сложных горно-геологических условиях во многом зависит от качественной очистки забоя скважины и самого бурового раствора от шлама. Этим вопросам посвящено большое количество работ, в которых основное внимание уделяется установлению необходимой скорости восходящего потока, обеспечивающего вынос частиц выбуренной породы [1 – 6].

При прямой схеме циркуляции очистной агент нагнетается буровым насосом (компрессором) по колонне бурильных труб, проходит по кольцевому пространству между колонковой трубой и керном, захватывает при этом шлам, охлаждает породоразрушающий инструмент и по кольцевому пространству между бурильными трубами и стенками скважины выходит на поверхность.

Прямая схема очистки отличается простотой выполнения и обеспечивает процесс бурения в условиях поглощения промывочной жидкости, но необходимость создания высокой скорости восходящего потока в затрубном пространстве (при жидкостной очистке) приводит в мягких породах к размыву стенок скважины. Кроме того, динамическое воздействие промывочной жидкости понижает выход керна в мягких и породах средней крепости и в случае внезапного прекращения циркуляции промывочной жидкости часто приводит к захвату бурового снаряда в скважине [5 – 6].

Наибольший вклад в решение вопросов, связанных с проектированием режима очистки скважин (при прямой схеме циркуляции) внесли Агабальянц Э.Г., Ангелопуло О.К., Баранов В.С., Булатов А.И., Городнов В.Д., Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г., Дедусенко Г.Я., Жигач К.Ф., Жуховицкий С.Ю., Зарипов С.З., Ивачев Л.М., Кистер Э.Г., Конесев Г.В., Круглицкий Н.Н., Кудряшов Б.Б., Липкес М.И., Марамзин А.В., Мариампольский Н.А., Мирзаджанзаде А.Х., Михайлова Н.Д., Паус К.Ф., Ребиндер П.А., Резниченко И.Н., Роджерс В.Ф., Рязанов Я.А., Шищенко Р.И., Эпштейн Е.Ф., Яковлев А.М., Ятров С.Н. и др.

Практикой бурения установлено: если содержание шлама в промывочной жидкости превышает 5% по объему, это грозит аварией [3].

Наличие значительного объема шлама на забое приводит к снижению скорости бурения. Это может вызвать ошибочное мнение, что вскрыты более твердые или абразивные породы. На самом же деле в таких случаях часто имеет

место многократное измельчение шлама, после чего он выносится потоком бурового раствора. Все это требует дополнительных затрат и средств, несмотря на то, что гидравлическая программа бурения полностью соблюдается.

При разбурировании мягких пород (глин, мела и др.) может произойти укрупнение мелких частиц выбуренной породы путем их слипания, в результате чего резко снижается способность бурового раствора выносить шлам из скважины. Могут быть и другие причины снижения транспортирующей способности бурового раствора вследствие уменьшения скорости восходящего потока, что приводит к ухудшению очистки скважины от шлама. Чаще всего это наблюдается в кавернах, в которых снижение скорости восходящего потока способствует накоплению в них шлама.

При наличии в скважине одной или нескольких каверн, как правило, процесс бурения сопровождается длительными проработками уже пройденного бурением ствола скважины и выносом больших объемов осыпавшихся со стенок скважины частиц породы и накоплению в кавернах шлама.

Осуществление выноса шлама увеличением производительности буровых насосов в этих условиях оказывается малоэффективным вследствие резкого увеличения гидравлических сопротивлений и появления других негативных явлений. Для борьбы с осложнениями обычно увеличивают плотность бурового раствора. Однако увеличение плотности бурового раствора ограничено, так как возрастает репрессия на пласт, приводящая к раскрытию трещин и поглощению бурового раствора. При поглощении раствора скорость восходящего потока также снижают, и вновь создаются условия, когда шлам не выносится из скважины.

Расход очистного агента определяет скорость движения потока в различных сечениях буровой скважины. В каждом конкретном случае бурения существует рациональный расход очистного агента, при котором с наименьшими затратами могут быть получены лучшие результаты бурения.

Энергия потока очистного агента обеспечивает очистку забоя от разрушенной породы, вынос шлама из скважины, охлаждение породоразрушающего инструмента, способствует разрушению породы на забое, используется для привода забойных двигателей и механизмов. Для решения каждой конкретной из этих задач необходима определенная энергия потока.

Чрезмерный расход очистного агента может оказывать отрицательное влияние на процесс бурения, вызывая разрушение керна, способствуя его самозаклиниванию, создавая силы гидравлического подпора и другие вредные воздействия, а также вызывает неоправданные затраты энергии и повышенный износ оборудования. Выбор рационального расхода должен производиться с учетом всех этих обстоятельств; он является важной задачей, определяющей эффективность процесса бурения. Минимальный расход очистного агента в общем случае должен обеспечивать решение трех основных задач промывки: очистку забоя скважины от разрушенной породы, очистку ствола скважины, охлаждение породоразрушающего инструмента.

Расход должен быть достаточным для надежного и устойчивого транспортирования шлама с забоя к устью скважины.

Расход очистного агента при бурении с прямой промывкой устанавливаются, учитывая один из рекомендованных параметров:

- 1) скорость восходящего потока в скважине;
- 2) удельный расход на 1 см диаметра породоразрушающего инструмента;
- 3) расход в зависимости от условий бурения [3 – 6].

В основе многочисленных существующих методик расчета выноса шлама при бурении лежат известные закономерности движения шара в жидкой или газообразной среде. Для определения критической скорости предложено большое количество формул (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Зависимости для определения скорости оседания твердого тела в жидкости [1 – 6]

Автор исследования	Расчетная формула	Условные обозначения	Примечания
Стокс	$u = \frac{d^2(\rho - \rho_{жс})g}{18\mu}$	d – размер частиц, $\rho, \rho_{жс}$ – плотность частицы породы и жидкости, g – ускорение свободного падения, μ – динамическая вязкость	Формула справедлива при $Re < 1$
П. Риттингер	$u = k \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_{жс}} - 1 \right)}$	k – постоянная Риттингера	
Вильямс, Брус	$u = \frac{k}{1 + \frac{d}{D_{эк}}} \sqrt{\frac{h}{d}} \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_{жс}} - 1 \right)}$	$D_{эк}$ – эквивалентный диаметр кольцевого пространства, h – оптимальный размер частиц	
Р. И. Шищенко В. Д. Бакланов	$u = ak \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_{жс}} - 1 \right)}$	a – коэффициент уширения скважины (1,1 – 1,3)	
Уокер Мейез	$u = \sqrt{\frac{2gd(\rho - \rho_{жс})}{1,12\rho_{жс}}}$		
П. В. Лященко	$u = \frac{\nu}{d} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar + 2,3}}{2,3} - 1 \right)$	ν – коэффициент кинематической вязкости, Ar – безразмерный параметр Архимеда	

Большинство расчетных формул применяемых в бурении, являются приближенными, кроме того, эти формулы выведены из условия, что раствор, в котором оседают частицы, неподвижен, а также в них не учтены стесненные условия движения частиц.

На скорость оседания частиц влияет ряд факторов, а именно: разность плотностей частицы и раствора, размер и форма частиц, вязкость раствора, эффект турбулизации жидкости в непосредственной близости к частице – эти факторы лишь частично учтены в предлагаемых формулах. В настоящее время в практике инженерных расчетов необходимой скорости восходящего потока исходят из следующего – вынос частиц шлама по стволу скважины происходит в результате возникновения сил взаимодействия потока очистного агента с твердым телом.

Прогнозировать скорость осаждения частиц выбуренной породы достаточно сложно. Во-первых, из-за широкого диапазона размеров частиц шлама; во-вторых, вследствие того, что частицы имеют самую разнообразную форму, и, в-третьих, потому, что большинство буровых растворов по своей природе отличаются от ньютоновских жидкостей, для которых в основном и проводились исследования.

В работе [7] показан графический способ определения параметров режима промывки. Представлены номограммы, построенные с условием постоянных и переменных параметров промывочного раствора, с помощью которых представляется возможным выбрать рациональное соотношение диаметра промывочного отверстия долота, в зависимости от количества, подаваемого к забой промывочного раствора, давления оказываемого на забой струей раствора, выходящего из долота и гидравлическими потерями в долоте. Также на этих номограммах можно найти рациональное соотношение диаметров насадок долота и количества подаваемого на забой промывочного раствора, создающего гидромониторный эффект.

Кроме того, представлена номограмма, в которой показано влияние количества промывочного раствора на скорость подъема частиц выбуренной породы диаметром 5, 10 и 15 мм.

Многие авторы полагают[3], что при бурении шарошечными долотами скорость восходящего потока промывочной жидкости в скважине не должна превышать 0,25 м/с. Ф.С. Никитин считает [7], что скорость восходящего потока в затрубном пространстве должна быть не менее 0,35 – 0,40 м/с. при форсированных режимах бурения он рекомендует минимально допустимую скорость довести до 0,7 – 0,8 м/с, чтобы обеспечить максимальную очистку забоя от выбуренных частиц и исключить необходимость повторного переизмельчения этих частиц. В.С. Федоров считает [8], что эта скорость должна составлять 1,45 – 0,50 м/с.

Некоторые исследователи полагают [9 – 10], что скорость промывочной жидкости в скважине не должна быть выше 1,2 м/с, так как превышение этой скорости повлечет за собой размыв стенок скважины. А.А. Линеvский считает

указанную скорость предельной для мягких, но устойчивых пород; для неустойчивых пород он предлагает снижать скорость до 0,8 м/с. Однако Н.И. Шацов, исходя из опытов бурения в США, считает, что указанные пределы скоростей занижены, и стенки скважины не размываются даже при скорости 4 м/с.

Однако, в общем случае, исходят из следующего [11]: при бурении в глинах, глинистых сланцах и песках скорость восходящего потока должна быть в пределах 0,9 – 1,3 м/с, а при бурении в скальных породах 0,7 – 1,0 м/с. Кроме того, по рекомендациям Б.Б. Кудряшова необходимо придерживаться следующих норм: при бурении роторным способом под кондуктор скорость восходящего потока следует поддерживать в интервале 0,3 – 0,5 м/с под техническую колонну 0,5 – 0,8 м/с и под эксплуатационную 0,8 – 1,2 м/с.

Согласно работе [10], удельный расход бурового раствора при роторном способе и электробурении должен быть в пределах 0,035 – 0,05 л/(с·см²), а при бурении гидравлическими забойными двигателями – не превышать 0,07 л/(с·см²).

Становится очевидным, что регламентируемые скорости восходящего потока недостаточно дифференцированы в зависимости от литологической характеристики горных пород, показателей свойств буровых растворов и геометрических размеров кольцевого пространства. В связи с зависимостью процессов гидротранспорта шлама и забойных давлений от скорости восходящего потока, последняя представляет собой основу проектного решения, однако в традиционных гидравлических расчетах фигурирует в качестве исходной информации.

При бурении с использованием жидких очистных агентов охлаждение породоразрушающего инструмента, как показывают проведенные исследования [12], обеспечивается при самых малых расходах промывочной жидкости, и не определяет минимум расхода, он выбирается из условия очистки забоя и выноса шлама по стволу скважины.

Конкретные рекомендации, основанные на производственном опыте не всегда удобны для использования ввиду большого количества сочетаний типов и размеров инструмента и пород, носят общий характер, не охватывают все возможные случаи геологоразведочного бурения, не имеют связи с другими режимными параметрами процесса бурения (частота вращения и осевая нагрузка), не учитывают размеры сечения кольцевого пространства [1, 4, 8, 13].

Необходимо отметить некоторые особенности промывки наклонных скважин [14 – 16]. Очистка забоя и ствола при бурении наклонных скважин несколько отличается от таковой в вертикальных. В вертикальной скважине даже при незначительном превышении скорости движения потока над скоростью оседания частицы породы наблюдается их вынос из скважины. С уменьшением угла наклона ствола скважины к горизонту, условия транспортирования ухудшаются, так как против силы тяжести, вызывающей выпадение частиц шлама на стенку скважины, действует только часть взвешивающей силы, что ведет к необходимости увеличения скорости восходящего потока, а, следовательно, и

расхода жидкости. Наиболее тяжелые условия транспортирования наблюдаются на горизонтальных участках ствола скважины.

По данным зарубежных исследователей [3] при алмазном бурении необходимо создавать скорости восходящего потока в размывающихся породах 0,3 м/с, а в устойчивых 0,4 м/с. Увеличение скорости более 0,5 м/с технологически нецелесообразно. Для расчета подачи бурового насоса, обеспечивающей указанные скорости восходящего потока, ведущими зарубежными фирмами принята формула:

$$Q = qS, \quad (1.1)$$

где q – удельный расход промывочной жидкости на единицу площади зазора между бурильными трубами и скважиной, S – площадь затрубного зазора.

Удельный расход жидкости изменяется в пределах 1,8 – 3 л/(мин·см²); для нормальных условий бурения принимают $q = 2,4$ л/(мин·см²).

1.2 Основные требования к качеству очистки ствола и забоя скважины и факторы, определяющие их чистоту

Как известно, бурение скважин без осложнений и качество их цементирования зависит от правильного решения вопросов связанных с промывкой скважины. В настоящее время без хорошо организованной промывки забоя и ствола скважины немыслимо дальнейшее развитие глубокого и сверхглубокого бурения. Однако решение вопросов совершенствования промывки скважин довольно сложно, что объясняется наличием большого количества работ на эту тему и существованием в выводах авторов значительных расхождений.

При бурении скважин вынос выбуренной породы на дневную поверхность происходит двумя путями: мелкие частицы шлама (размером менее 0,5 мм) «переходят в раствор», резко увеличивая его вязкость и содержание твердой фазы, крупные же обломки горных пород выносятся на дневную поверхность за счет скоростного напора промывочной жидкости.

Накопление выбуренной породы на забое зависит от механических, гидравлических и технологических факторов, имеющих место в процессе бурения, от плотности и прочности разбуриваемых горных пород, режима их разрушения долотом. Так, при высоких осевых нагрузках на долото, разбуривание слабopочных пород вызывает повышение скоростей бурения в начале рейса долота, но затем вследствие обильного накопления выбуренной породы на забое резко снижаются темпы углубления скважины.

Выбуренная порода накапливается часто на забое при подаче недостаточного количества бурового раствора, который не обеспечивает выноса и транспортировки разрушенной породы с забоя скважины.

Несоответствие количества подаваемой промывочной жидкости на забой может привести к тому, что на забое образуется до 85 – 95% крупного шлама, на измельчение которого требуется до 50 – 75% мощности, подводимой к буровому долоту. Кроме того, увеличение содержания твердой фазы в буровом рас-

творе ведет к резкому снижению буримости горных пород, возрастанию абразивного износа бурового инструмента, что снижает его работоспособность и долговечность. При таких условиях бурения трудно получить высокие технико-экономические показатели, поскольку такой режим бурения неэффективен [16 – 18].

Не менее важную роль в накоплении выбуренной породы играет режим промывки скважины.

Вынос частиц выбуренной породы потоком бурового раствора может быть осуществлен тогда, когда восходящая скорость бурового раствора будет превосходить скорость погружения частицы и абсолютную скорость подъема ее с забоя скважины. Однако в реальном потоке бурового раствора в скважине распределение скоростей по сечению потока зависит от многих факторов: формы сечения ствола скважины, реологических свойств бурового раствора, режима и скорости истечения бурового раствора, формы и плотности обломков твердых тел, соотношение между линейными размерами частиц шлама и поперечными размерами кольцевого пространства скважины и т.д. Поэтому скорость выноса выбуренных частиц потоком промывочной жидкости носит весьма сложный характер, который еще слабо изучен и требует как лабораторного, так и промыслового изучения.

Сложность оценки выноса выбуренной породы с забоя скважины и в затрубном пространстве обусловлена, прежде всего, пульсацией скоростей потока, изменением скоростей течения по стволу вследствие кавернозности, изменения его конфигурации и т.п.

Очистка забоя скважины от выбуренной породы представляет собой сложный гидродинамический процесс. В большинстве работ по промывке скважин рассматривается лишь вынос выбуренной породы из кольцевого пространства скважины. Достаточно мало сведений по вопросу выноса шлама при промывке наклонных скважин [16].

Режим промывки забоя скважины существенно сказывается на реализации гидравлической мощности струи бурового раствора при разрушении горной породы гидромониторными долотами [2].

Повышение реологических характеристик системы бурового раствора ухудшает очистку забоя от выбуренной породы, увеличивает гидродинамические сопротивления и потери давления в циркуляционной системе скважины.

Выполнение различных операций, связанных с проводкой скважин и возникающие при этом явления (например, изменения гидродинамического давления, в скважине возникающие при спускоподъемных операциях), также влияют на транспортирующую и удерживающую способность промывочной жидкости [21].

В поддержании ствола скважины в чистом состоянии большое значение имеет применение промывочных жидкостей, свободных от посторонних твердых частиц (выбуренной породы), что должно достигаться высококачественной очисткой промывочной жидкости от бурового шлама. На рис. 1.1 приведены

зависимости основных показателей бурения от содержания твердой фазы в буровом растворе [22].

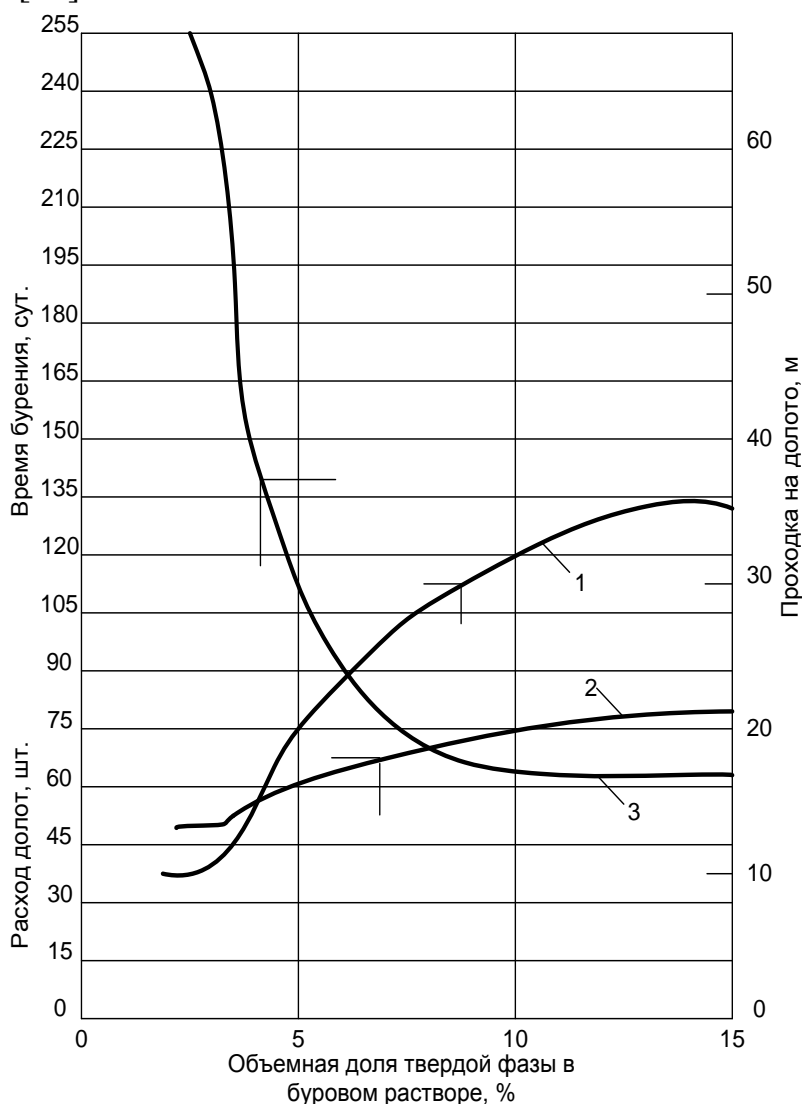


Рис. 1.1. Влияние твердой фазы в буровом растворе на показатели бурения: 1 – расход долот; 2 – время бурения; 3 – проходка на долото.

С увеличением содержания твердой фазы в буровом растворе можно бороться двумя способами: регулирование процесса диспергирования с помощью химических реагентов или разбавлением раствора. Однако химическая обработка стоит дорого, а разбавление приводит к повышенному расходу основных химических реагентов, используемых для регулирования свойств самого раствора.

Установившейся процесс работы породоразрушающего инструмента на забое скважины должен всегда представлять собой состояние динамического равновесия процессов разрушения горной породы и удаления продуктов разрушения в кольцевое пространство [3, 16, 23]. Поэтому для правильного понимания вопросов промывки забоя скважины необходимо хорошо знать основные

закономерности указанных процессов и влияние различных факторов на эти процессы.

На степень очистки забоя скважины от частиц разрушенной породы оказывает влияние ряд факторов [1, 3, 24]:

1. Скорость потока и расход очистного агента. Из этих взаимосвязанных факторов наибольшее значение имеет скорость потока, причем ее горизонтальная составляющая направлена вдоль забоя. Величина расхода очистного агента влияет главным образом на удаление разрушенной породы по стволу скважины, скорость же потока непосредственно обеспечивает удаление частиц шлама с самого забоя [4].

При движении очистного агента на забое скважины скорость его потока касательна к поверхности забоя, и частица шлама, расположенная на дне потока, испытывает действие силы, которая отрывает ее от забоя и удерживает во взвешенном состоянии. Подъемная сила возникает вследствие несимметричного обтекания ее потоком за счет неравномерности профиля скоростей в движущемся потоке очистного агента, вертикальных составляющих турбулентной пульсации скорости потока, а также возникающих в придонном слое потока вихрей. Подъем частицы шлама с забоя скважины возможен только в том случае, если вертикальные составляющие турбулентных пульсаций скорости в потоке существенно превысят скорость падения частиц в данной промывочной жидкости [25].

Движение промывочного агента между резцами коронки непосредственно на забое скважины сопровождается большим или меньшим уровнем турбулентности потока, значение которого определяется величиной критерия Рейнольдса.

При малых скоростях движения очистного агента в пространстве под торцом коронки может установиться ламинарный режим движения потока с параболическим распределением скоростей по сечению. При критическом значении параметра Рейнольдса ламинарный режим переходит в турбулентный [26], при котором профиль скоростей характеризуется более быстрым нарастанием скоростей у поверхности забоя, а затем и более равномерным их распределением. При турбулентном движении потока у стенки канала всегда будет существовать ламинарный подслой, жидкость в котором движется только ламинарно и где в наиболее высокой степени проявляются ее вязкостные свойства.

Проводимый в настоящее время расчет необходимого количества промывочного агента для очистки скважины из условия выноса частиц шлама в кольцевом пространстве скважины и без учета процессов очистки забоя приводит к тому, что потребная скорость восходящего потока определяется в основном только плотностью промывочного агента [26]. Уменьшение или увеличение плотности приводит соответственно к увеличению или к уменьшению потребной скорости восходящего потока промывочного агента, и инерционные силы потока в этом случае остаются практически неизменными. Вязкость промывочного агента в таких расчетах не учитывается, хотя существенно влияет на вели-

чину критерия Рейнольдса и соответственно на уровень турбулентности потока, определяющий эффективность процесса очистки.

Увеличение расхода имеет и отрицательное влияние, так как увеличивается гидродинамическое давление на забой, которое прижимает частицы к забою и затрудняет их удаление. Для совершенствования очистки с учетом этих факторов надо так подбирать породоразрушающий инструмент, чтобы максимально использовать горизонтальную составляющую скорости потока [27].

Практика показала, что наилучшие условия очистки забоя создаются при продувке скважин воздухом, так как благодаря высоким скоростям потока и низкой вязкости воздуха уровень турбулентности потока наиболее высок, а толщина ламинарного подслоя наименьшая [28]. Ухудшение условий очистки при промывке скважины глинистым раствором связано с увеличением вязкости раствора, что приводит к увеличению толщины ламинарного подслоя и снижению уровня турбулентности потока, а также энергетическим затратам на перенос собственно глинистых частиц, т.е. твердой фазы раствора. Повышение показателей работы породоразрушающего инструмента при использовании растворов с содержанием твердой фазы, например малоглинистых или полимерных [29], объясняется усилением в потоке турбулентных пульсаций.

Таким образом, расчет потребной скорости восходящего потока промывочного агента и его расход должен с учетом процессов очистки забоя скважины и вязкостных свойств применяемого очистного агента [9].

2. Величина плотности очистного агента оказывает двойное влияние на очистку забоя. С увеличением плотности увеличивается выносная способность очистного агента и гидравлическая сила потока. С другой стороны, с увеличением его плотности возрастает гидростатическое давление на забой, которое увеличивает прочность породы, затрудняя ее разрушение, и усиливает прижатие уже отделенных частиц к забою за счет разности давления сверху и снизу частицы (дифференциальное давление). Отрицательное воздействие плотности, по мнению ряда авторов, имеет преобладающее влияние. При прочих равных условиях наилучшие результаты по очистке забоя получаются при использовании газожидкостных агентов, у которых выносная способность значительно выше, чем у газа, но слабо сказывается вредное влияние гидростатического давления [16].

3. Время воздействия потока на забой. Этот фактор связан с частотой вращения, типом породоразрушающего инструмента и конструкцией его промывочных каналов [30 – 31].

4. Влияние размеров частиц горной породы. На границе потока и неподвижной поверхности скорость его равна нулю и постепенно возрастает с удалением от поверхности раздела, переходя от ламинарного в турбулентный режим. При этом крупные частицы, отделенные от забоя, больше выступающие над его поверхностью, попадают в турбулентную область потока с высокой скоростью и легче выносятся с забоя. Мелкие частицы, прижатые к забою, удаляются хуже. Поэтому очистка забоя происходит лучше при использовании ин-

струмента и способов бурения (шарошечные долота, ударно-вращательное бурение) и в породах, дающих более крупные частицы шлама [19 – 20].

5. На интенсивность очистки забоя могут оказывать существенное влияние некоторые свойства очистного агента. Роль плотности и вязкости очистного агента уже рассмотрена выше. Важное значение для очистки забоя имеет способность агента предотвращать слипание частиц. Таким свойством обладают агенты, содержащие поверхностно – активные вещества (ПАВ) и газожидкостные смеси. ПАВ, обладая высокой проникающей способностью, улучшает очистку и облегчает разрушение породы [32].

Частицы шлама являются продуктом разрушения горных пород, поэтому изучение их фракционного состава, формы и размеров может дать обширную информацию о процессе бурения. Однако отбор проб шлама на устье скважины будет представительным, если будет точно известна глубина образования данного шлама и скорость его подъема, что особенно важно при изучении процессов бурения непосредственно в производственных условиях [25].

Размер частиц шлама при любых способах бурения характерен большим диапазоном: от нескольких микрон до сантиметров [33 – 38]. Для оценки возможности транспортирования шлама потоком очистного агента принимается обычно средний размер частиц, которые вместе с более мелкими фракциями составляют основную часть образующегося шлама. Крупность обломков разрушенной породы зависит от ряда факторов: состава и прочностных свойств горных пород, типа породоразрушающего инструмента и способа разрушения, технологических параметров режима бурения и характера промывки забоя скважины. Как правило, при высокой эффективности процесса бурения образуется большое количество крупной фракции бурового шлама, и, наоборот, чем ниже механическая скорость проходки, тем мельче шлам. Вторичное измельчение уже оторванных от забоя обломков породы с технической точки зрения нежелательно, так как приводит к дополнительному расходу энергии на бурение, непроизводительному износу породоразрушающего инструмента и снижению общего коэффициента полезного действия процесса бурения. Кроме того, буровой шлам зачастую является единственным носителем информации о составе и свойствах горных пород, и в этом случае представляет интерес его гранулометрический состав. Кроме того, следует отметить, что отдельные частицы на забое могут быть больше среднего размера в 3 – 5 раз. Последнее обстоятельство, по мнению исследователей, не оказывает заметного влияния на очистку скважины, так как эти более крупные частицы, поднимаясь над забоем, подвергаются воздействию боковых поверхностей вращающегося бурового снаряда, измельчаются и уже, затем транспортируются потоком очистного агента.

Средний размер частиц шлама зависит, прежде всего, от конструкции породоразрушающего инструмента. Размер частиц больше при бурении в трещиноватых и зернистых породах, при ударном воздействии инструмента, при бурении с большой осевой нагрузкой и малой частотой вращения [39 – 41].

Считается, что ствол скважины находится в хорошем состоянии, если в нем отсутствуют затяжки, посадки и прихваты бурильного инструмента, проработки тех или иных интервалов. Особенно опасны указанные осложнения при бурении глубоких скважин, когда и бурильная колонна, и буровая установка работают с нагрузками, близкими к допускаемым. В сильно осложненном стволе могут происходить аварии, которые приводят не только к снижению производительности труда, но и к частичной или полной потере ствола скважины; затрудняется успешный спуск обсадных колонн до проектной глубины; очень часто затягиваются геофизические исследования, а иногда они заканчиваются аварийными работами.

Одной из основных причин плохого состояния ствола скважины является сильная зашламленность его. Вся, попадающая в ствол скважины порода, должна своевременно удаляться на дневную поверхность. Эта порода поступает обычно не только с забоя скважины, но и с ее стенок как в результате желобообразования, но и проработки ствола скважины, вызванной сужением его из-за пластической деформации и разбухания горной породы на стенках скважины, так и в результате осыпей и обвалов.

Как правило, размер частиц горной породы, поступающих на забой вследствие нарушения прочности стенок скважины, во много раз больше размер частиц, выбуриваемых на забое, и вынос их на дневную поверхность значительно труднее.

Источниками накопления бурового шлама, вызывающего сальникообразование и осложнения, часто служат места всевозможных (в особенности резких) расширений кольцевого пространства.

В поддержании ствола скважины в чистом состоянии большое значение имеет применение промывочных жидкостей, свободных от посторонних твердых частиц, что должно достигаться высококачественной очисткой промывочной жидкости от бурового шлама. Задача эта очень сильно осложняется при разбурировании горных пород склонных к быстрому диспергированию и растворению в промывочной жидкости, для исключения или минимизации указанных явлений следует ограничивать продолжительность контакта бурового шлама с промывочной жидкостью [42].

Для нормального течения процесса бурения необходимо удалять из забоя частицы шлама, выносить из призабойной зоны и транспортировать либо на поверхность, либо в специальный шламоборник, установленный в нижней части бурового снаряда. Недостаточная очистка скважины приводит к накоплению шлама, затрудняет процесс бурения и может вызвать аварию в скважине. Вследствие этого, только лишь на очистку забоя от выбуренной породы и вынос ее на дневную поверхность приходится свыше 70% всей энергии затрачиваемой на сооружение скважин. Эффективность очистки скважины зависит от таких факторов, как размер и форма частиц шлама, скорость восходящего потока и условия его движения, параметры очистного агента [3, 16].

Тем не менее, до настоящего времени нет единой методики для установления определяющих параметров формы частиц бурового шлама [4].

К. Уильямс считает возможным при расчете скоростей падения частиц шлама учитывать их форму с помощью параметра δ характеризующего степень сплюснутости частиц и определяемого по формуле

$$\delta = t/d_q, \quad (1.2)$$

где t – толщина частицы; d_q – диаметр частицы.

Причем можно принимать в качестве d_q максимальный диаметр окружности описанной около частицы, и в качестве t толщину частицы, замеренную по нормали к плоскости этой окружности.

Несмотря на то, что форма частиц шлама весьма разнообразна, ее всегда можно уподобить определенной геометрической фигуре. При этом следует помнить, что мелкие шероховатости и углубления на поверхности частицы в процессе ее обтекания заполняются жидкостью, образующей неподвижный слой [43]. Это придает частицам большую обтекаемость.

Движение восходящего потока в бурящейся скважине имеет ряд особенностей, влияющих на условия транспортирования частиц шлама:

1. Разнообразие форм частиц шлама, как для разных условий бурения, так и одновременно в одном потоке.

2. Широкий диапазон размеров частиц, одновременно поднимаемых потоком, и наличие некоторого количества частиц более крупных, чем средний расчетный размер.

3. Стесненные условия движения потока с частицами в кольцевом пространстве скважины или внутри бурильных труб.

4. Сложный характер движения потока, вызванный вращением бурового снаряда.

5. Возможное эксцентричное расположение бурильных труб в скважине.

Хотя каждый из указанных факторов оказывает свое влияние на характер транспортирования частиц шлама, учесть их все весьма затруднительно.

Наиболее существенное влияние, которое должно учитываться при расчетах по выносу шлама, оказывает стесненность пространства и вращение колонны.

Ограниченность пространства кольцевого зазора или сечения бурильной трубы будет оказывать влияние на вынос частиц за счет изменения скорости потока по сечению. Частицы шлама в общем случае за счет разности скоростей потока на их границах (действие «подъемной» силы) перемещаются к ядру потока и транспортируются с большей скоростью, чем в неограниченном потоке с такой же средней скоростью.

В настоящее время бурение скважин осуществляется с вращением бурильной колонны в скважине. Вращение колонны труб оказывает двойное влияние на характер движения потока очистного агента и соответственно на условия выноса шлама. При концентричном расположении бурильных труб относительно скважины их вращение передается потоку очистного агента и происхо-

дит его частичное «закручивание», т. е. помимо поступательного движения возникает вращательное движение потока, и траектория его движения становится спиральной [22, 44]. Закручивание потока приводит к увеличению его суммарной скорости и в результате – к увеличению его выносной способности, хотя время подъема частиц может увеличиться за счет увеличения пути их движения до поверхности (по спирали). При эксцентричном расположении труб, которое является наиболее характерным для разведочного бурения, скорость движения очистного агента в кольцевом сечении распределяется неравномерно и в узких частях сечения возникают застойные зоны, где очистной агент вообще не движется. Частицы шлама, попадая в застойные зоны, останавливаются, происходит накопление шлама и скважина зашламовывается. Вращение колонны в таких случаях обеспечивает равномерное перемешивание потока по всей площади кольцевого сечения, что способствует лучшему выносу шлама.

Опыты, проведенные А.С. Денисовым [45], установили, что частицы твердого тела размером 0,295 – 0,417 мм падают при вращении бурильной колонны ($n = 88 \text{ мин}^{-1}$) медленнее на 61,5%, а потребная скорость восходящего потока в этом случае может быть уменьшена на 97,5%.

Таким образом, число оборотов не только влияет на проходку в отношении увеличения темпов разрушения породы, но и должно рассматриваться как один из главнейших факторов, обуславливающих интенсивность выноса выбуренной породы.

Позднее американскими исследователями [22] были поставлены специальные опыты в скважине, обсаженной колонной обсадных труб на всю глубину, для выяснения основных параметров, влияющих на вынос частиц твердого тела из скважины. Были исследованы 23 различные жидкости и установлено, что при вращении бурильных труб подъемная сила потока промывочной жидкости возрастает значительно при структурном режиме течения, при турбулентном – в меньшей степени, причем, достигнув некоторого наивысшего значения, стабилизируется. Увеличение числа оборотов колонны с 35 до 150 мин^{-1} уже мало влияет на скорость подъема. Неожиданным оказался вывод, что раствор с малой вязкостью и малой прочностью структуры имеет большую подъемную силу, особенно для малых частиц, чем раствор с высокими структурно-механическими свойствами. Такое явление позднее объяснено следующим: режим движения раствора с высокой вязкостью обычно структурный, а условия подъема плоских частиц при этом режиме неблагоприятные. Если плоская частица располагается наибольшей поверхностью, т.е. плоскостью перпендикулярно потоку, то за счет различных скоростей каждого слоя жидкости структурного потока происходит поворот частицы на 90° . Плоская поверхность становится параллельно направлению движения и оттесняется в область низших скоростей к стенке скважины. При маловязких растворах обеспечивался турбулентный режим движения жидкости, при котором это явление не наблюдается, так как эпюра скоростей турбулентного потока почти равномерная, и частицы

движутся вверх вместе со всем потоком. Отсюда следует, что влияние турбулизации потока на выносную способность жидкости превосходит значения структурно-механических его свойств.

Учесть количественно влияние вращения бурового снаряда на условия выноса частиц шлама сложно. Практически учет положительного влияния вращения бурового снаряда на условия выноса шлама заключается в том, что промывка скважины без бурения (в начале или в конце рейса) должна производиться с вращением снаряда [4].

Поток очистного агента должен обеспечивать:

1. Наиболее полную и быструю очистку забоя от разрушенной породы.
2. Вынос основной массы шлама из скважины или в шламоборник.
3. Достаточное охлаждение породоразрушающего инструмента.
4. Содействие разрушению породы на забое за счет понижения твердости породы и за счет гидромониторного эффекта.
5. Эффективную работу забойных машин или механизмов: турбобуров, гидро- и пневмоударников, эжекторных снарядов и т. п.

Одновременно необходимо не допускать заметного проявления отрицательных воздействий потока очистного агента, связанных с большими расходами, а именно:

1. Размыв стенок скважины.
2. Размыв и разрушение керна, усиление самозаклинивания керна.
3. Возрастание сил гидравлического подпора.
4. Нарушение работы или разрушение породоразрушающего инструмента – размыв матрицы коронки, заполирование алмазов.
5. Повышенный износ насоса или компрессора и излишние затраты энергии.

Определение рационального расхода очистного агента в большинстве случаев заключается в выявлении границ минимального и максимального расходов при подаче агента, за пределами которых происходит ухудшение показателей бурения. Между минимальным и максимальным значениями расходов существует зона, внутри которой и принимается конкретное значение количества очистного агента, подаваемого в скважину в зависимости от конкретных условий бурения.

1.3 Технические средства бурения скважин с обратной схемой циркуляции очистного агента

В основе технологии бурения с гидро- и пневмотранспортом керна и шлама лежит метод непрерывного удаления с забоя выбуренного породного материала и транспортировки его на поверхность потоком очистного агента, что обеспечивается при использовании двойной концентрической колонны бурильных труб, специальных забойных снарядов и конструкций породоразрушающего инструмента. Промывочная жидкость или сжатый воздух нагнетают-

ся в зазор между наружной и внутренней трубами, захватывают с забоя шлам или керн и выносят их на поверхность по центральному каналу [46].

К 1960 г. в США была изготовлена и испытана опытная установка «Коредрилл» для бурения скважин в рыхлых и плотных осадочных породах на глубину до 750 м с диаметром бурения 121 мм – это был первый в мире комплекс технических средств для бурения с применением двойной колонны бурильных труб. Диаметр получаемого керна был 50,8 мм, бурильных труб – 114 мм. Внутренний диаметр керноприемной трубы 63,5 мм. Фирмой «Коре Рековери Инк» в 1966 г. разработана установка для бурения скважин глубиной до 900 м с применением двойной колонны бурильных труб и непрерывным отбором керна. В Техасе в 1960 г. была испытана буровая установка «Конкоре – 2000», которая позволяет бурить нефтяные и газовые скважины с непрерывным выносом керна на поверхность, при максимальной глубине бурения достигающей 1350 м. Установкой «Конкоре – 2000» можно бурить как с выносом керна, так и сплошным забоем [47].

В отечественной практике бурения подобная технология не применялась, и технические средства отсутствовали.

Экспериментальные исследования по бурению скважин с непрерывным выносом керна по двойной колонне бурильных труб были начаты в 1968 г. ВПО «Союзгеотехника» [48].

Исследования проводились с использованием установки ВВС – 20DH (Великобритания). По результатам исследований в ВПО «Союзгеотехника» были созданы образцы комплекса технических средств для бурения с обратной промывкой. В состав комплекса входили твердосплавные коронки диаметром 76 мм, керноломные устройства, двойные бурильные трубы диаметром 73 мм, промывочный сальник – вертлюг и система обвязки устья скважины. Комплекс предназначен для бурения скважин глубиной до 100 м. Диаметр получаемого керна 32 мм. В последующие года в СКБ были разработаны комплексы технических средств КГК – 100 и КГК – 300 для бурения скважин с обратной промывкой и гидравлической транспортировкой керна на поверхность по двойной колонне бурильных труб.

Комплекс КГК – 100 (КГК – 300) предназначен для бурения скважин глубиной до 100 м (300 м) в мягких породах II – IV категорий по буримости с прослоями пород V – VII категорий при поисково-съёмочных работах, геологическом картировании и разведке месторождений полезных ископаемых (рис. 1.2). Выбуренная порода и керн улавливаются лотками керноприемного устройства, смонтированного над передвижной емкостью, которая позволяет создать замкнутую схему циркуляции промывочной жидкости. Бурение скважин выполняется без крепления их обсадными трубами, так как стенки скважины не подвергаются эрозионному воздействию потока промывочной жидкости. Система нагнетания и отвода промывочной жидкости включает нагнетательный и керноотводящий рукава, а также вентиль, с помощью которого можно оперативно

изменять направление потока жидкости в центральном канале колонны с обратного на прямое [49].

В общем виде технологический процесс бурения скважин с применением двойной бурильной колонны отличается от традиционного колонкового способа бурения отсутствием периодического подъема на поверхность забойного снаряда для извлечения из колонковой трубы керна. Снаряд поднимают лишь для замены пришедшего в негодность породоразрушающего инструмента или в аварийных ситуациях [50 – 51].

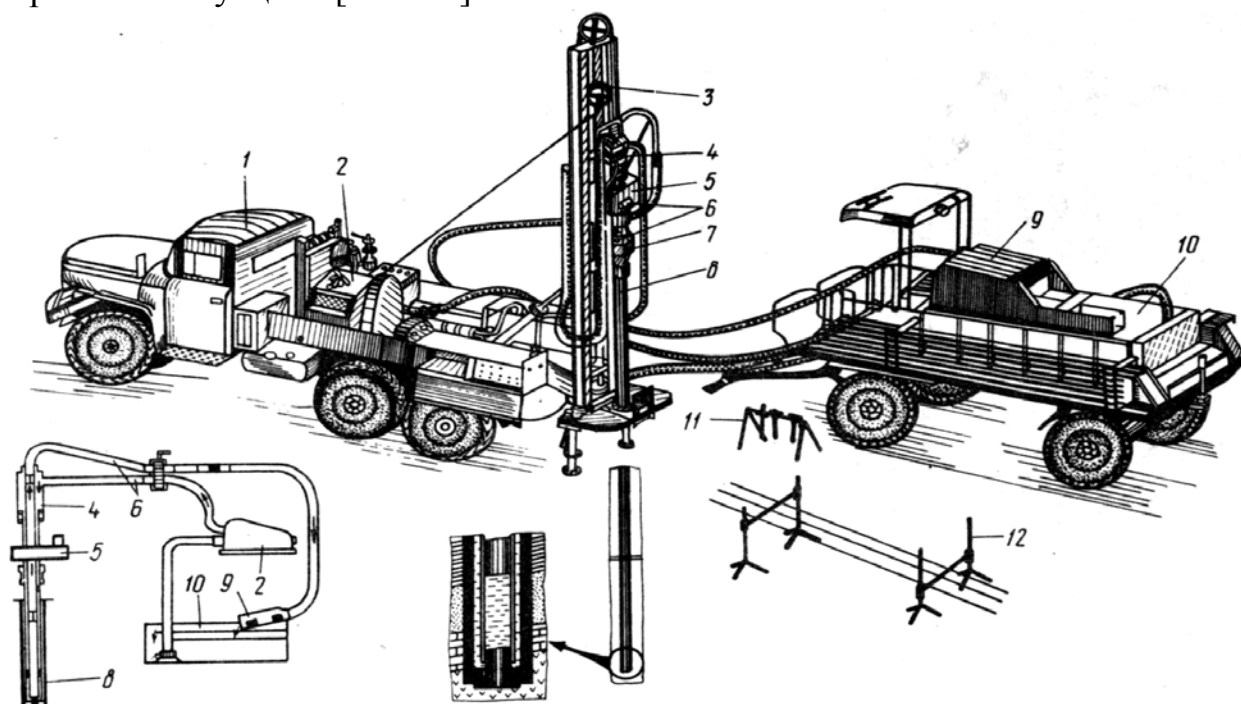


Рис. 1.2 Комплекс технических средств КГК

1 – буровая установка УРБ 2А – 2 ГК; 2 – буровой насос НБ 4; 3 – мачта; 4 – сальник; 5 – подвижный вращатель; 6 – промывочный рукав; 7 – элеватор; 8 – бурильные трубы; 9 – кернаприемное устройство; 10 – прицеп – емкость; 11 – вспомогательный инструмент; 12 – специальный стеллаж.

Эта особенность предъявляет определенные требования к отработке породоразрушающего инструмента, особенно в разрезах с прослоями твердых абразивных пород. Так, при большом уменьшении наружного диаметра породоразрушающего инструмента возрастает время, затрачиваемое на разбуривание закопченного участка скважины, и опасность заклинивания и прихвата инструмента.

Другая не менее важная особенность технологии – применение принципиально новой системы обратной промывки (продувки). Промывочная жидкость подается насосом через напорный шланг системы промывки и сальник в кольцевой канал двойной бурильной колонны, доходит до коронки и, подхва-

тив разбуренную породу, поднимается по центральному каналу на поверхность. Минимальный переток промывочной жидкости в затрубное пространство или полное его отсутствие обеспечивается перекрытием центрального отверстия коронки, поступающим из – под ее торца керношламовым материалом. Изолирующие качества выбуренной породы позволяют реализовать внутреннюю циркуляцию промывочной жидкости при бурении с гидротранспортом керна. Порода в сочетании с элементами коронки образует пакер, работоспособность которого определяет стабильность внутренней циркуляции и всего процесса бурения.

При данной схеме промывки отсутствует прямой контакт потока очистного агента и выбуриваемой породы со стенками скважины, что предохраняет последние от размыва [52 – 53]

Опыт бурения геологоразведочных скважин с продувкой сжатым воздухом показал, что при наличии компрессоров производительностью 9 – 10 м³/мин при давлении 0,7 – 0,8 МПа можно бурить скважины глубиной до 250 м с хорошими технико-экономическими показателями [54 – 55].

К числу основных достоинств указанного способа относят: снижение расхода промывочной жидкости; снижение числа спускоподъемных операций; уменьшение искривления скважины; высокие механические скорости бурения (это обусловлено рядом факторов: хорошей очисткой забоя от выбуренной породы, предупреждающей повторное переизмельчение керна и шлама; снижением гидростатического и гидродинамического давления на забое скважины; уменьшением числа подклиниваний керна и шлама в забойном снаряде, а также облегчением ликвидации подклиниваний без подъема инструмента на поверхность); высокая достоверность опробования, что обусловлено оперативным выносом на поверхность всего объема выбуренной породы; возможность эффективного бурения в осложненных условиях [56].

Вместе с тем существует и ряд недостатков: сложность конструкции двойной колонны бурильных труб, сложность конструкции вертлюга, возможность заклинивания керна в центральном канале.

Основные задачи по совершенствованию технологии бурения с гидротранспортом керна изложены в работе [57]. К наиболее актуальным задачам в области теории гидротранспорта керна следует отнести: разработка методики определения скорости движения керна и шлама в центральном канале двойной бурильной колонны; исследование влияния механической скорости на показатели режима транспортирования керна; разработка методики определения гидравлических сопротивлений в двойной бурильной колонне; определение геометрических размеров бурильной колонны.

При бурении скважин с непрерывным выносом керна восходящим потоком возникает необходимость определения такого расхода промывочной жидкости, при котором бы обеспечивалась полная очистка забоя от разрушенной породы и соблюдались заданные условия транспортировки керна по внутреннему каналу двойной бурильной колонны.

Закономерности движения твердого тела плохо обтекаемой формы (каким и является керн) в восходящем потоке промывочной жидкости в условиях малых зазоров между керном и трубой в настоящее время мало изучены.

Как известно, комплекс с гидротранспортом керна предназначен для бурения по породам II – IV категорий по буримости – это глины, суглинки, слабосцементированные пески, аргиллиты, песчано-гравийные отложения.

Бурение по несвязным породам осуществляется с максимальными механическими скоростями, исходя из этого необходимо подбирать такую производительность насоса, которая обеспечивала бы соответствующую очистку забоя скважины.

Теоретически 90% центрального канала, при бурении по плотным породам, заполнено керном и лишь 10% кольцевой площади остается для прохода шлама. Объем шлама, образующегося в единицу времени, почти в 4,5 раза превосходит объем керна. В этом случае разница площадей каналов для прохождения керна и шлама порождает его сжатие, напрессовку его на керн, что нарушает его структуру, поэтому следует обеспечить такую производительность насоса, которая бы сводила к минимуму время контакта шлама с керном [58].

Однако в настоящее время, вопросы транспортирования шлама и керношламовой смеси по центральному каналу двойной бурильной колонны практически не рассматриваются в литературе [59 – 60].

Влияние наличия керна в центральном канале на величину перепада давления исследуется в работе [61]. В результате проведенных исследований указывается, что перепад давления на транспортировку керна незначителен, однако этот вопрос требует дальнейшего исследования с учетом различных механических скоростей бурения.

При вращении двойной бурильной колонны, керн, находящийся в центральном канале колонны под действием центробежных сил будет отбрасываться на стенку внутренней трубы, следовательно, величина перепада давления при эксцентричном расположении керна будет отличаться от величины перепада давления при транспортировании керна находящегося по центру внутренней трубы. Поэтому, необходима разработка методики, позволяющей учитывать указанные условия.

Для быстрого развития комплекса технических средств бурения с гидротранспортом керна целесообразно вести поиск путей расширения областей применения метода (например, увеличение глубины бурения) за счет совершенствования бурового инструмента и, прежде всего, его главного элемента – двойной бурильной колонны.

Методика определения геометрических размеров двойной бурильной колонны предложена в работе [62]. В качестве определяющих параметров приняты диаметр керна и минимальная ширина кольцевого забоя скважины без учета гидравлических параметров. Поэтому, существенные потери давления в существующей двойной бурильной колонне наблюдаются в кольцевом канале.

Как указывается в работе [63] для увеличения глубины бурения необходимо разработать конструкцию двойной колонны бурильных труб, отвечающую кроме технологических параметров и минимуму суммарных гидравлических потерь в центральном и кольцевом канале. Предельная глубина бурения регламентируется допустимыми гидравлическими потерями при использовании конкретного насоса.

Для получения наименьших гидравлических сопротивлений при прокачивании промывочной жидкости в кольцевом и центральном канале нужно стремиться достигнуть одинаковой скорости нисходящего и восходящего потоков промывочной жидкости. Это возможно при создании равных площадей гидравлических контуров.

Внутренний диаметр колонны для бурения с гидротранспортом керна определяется из условий свободного прохода керна через колонну. Во всех случаях необходимо стремиться к минимальной разнице диаметра керна и внутреннего диаметра колонны. Это существенно уменьшает габариты колонны.

Анализируя работы [57, 59 – 60, 64] можно сказать, что одной из причин тормозящих широкое распространение бурения с гидротранспортом керна является отсутствие методики разработки технологии бурения для конкретных геологических условий.

1.4 Зарубежная практика бурения скважин с применением двойной бурильной колонны

В зарубежной практике выбуренная порода при всех разновидностях этого метода выносится сжатым воздухом или аэрированным раствором при бурении сплошным забоем. Керновый материал отбирается из ограниченных интервалов [65].

За рубежом в последние годы создана аппаратура и отработана методика экспресс – анализа проб непосредственно на буровой. Применение такой аппаратуры это – качественно новый этап в развитии техники и технологии разведочного бурения, когда ускоряется и удешевляется процесс бурения путем увеличения объемов бескернового бурения и использования наиболее эффективных комбинаций методов бурения сплошным забоем скважин малого диаметра, с возможностью выполнения экспресс – анализа, как в процессе бурения, так и после его завершения. Результатом работы будет не поднятый керн, а получение графика изменения содержания полезного ископаемого по глубине скважины.

Современные технические средства обеспечивают эффективное применение этого метода бурения в мягких и средней твердости породах в диапазоне глубин от 50 до 600 м. Отсутствие контакта породы, выносимой на поверхность по центральному каналу бурильной колонны, со стенками скважины и большая скорость выноса (3 – 5 м/с при использовании воды и 20 м/с – воздуха), при

полной очистке забоя, обеспечивают высокое качество геологической информации, получаемой в результате проведения буровых работ.

В зарубежной литературе имеются сообщения, что метод бурения с пневмотранспортом раздробленной породы при бескерновом бурении эффективно применяется при разведке угля, россыпных и жильных месторождений золота, при гидрогеологических исследованиях, а также при геологических исследованиях в наносных толщах пород.

Зарубежные специалисты полагают, что при разведке рудных месторождений с низким содержанием полезного компонента, где требуется высокая точность опробования, метод бурения с двойной колонной бурильных труб и опробованием по дробленным в процессе бурения фракциям породы имеет особенно большие перспективы [66].

Показатели опробования, полученные по дробленным фракциям породы, практически всегда выше, чем при опробовании по керну, и очень близки к результатам анализа проб, взятых непосредственно из горных выработок.

За рубежом получили промышленное распространение три технологические разновидности бурения с использованием двойных колонн: вращательный, виброударно-вращательный, вибрационный. Область применения вращательного бурения – мягкие породы аллювиальных отложений и породы средней твердости, типа известняков, сланцев, песчаников, конгломератов, карбонатных пород и зон выветривания кварцитов и джеспилитов. Виброударно-вращательный метод эффективен при разбурировании гравийно-галечниковых отложений, вибрационный – донных отложений морей и океанов в зоне шельфа [67 – 69].

Наиболее распространен вращательный метод. При бурении с выносом разрушенных фракций породы через двойную колонну в мягких и средней твердости породах и даже твердых в качестве породоразрушающего инструмента применяются лопастные и шарошечные долота и при незначительных изменениях в конструкции низа бурильной колонны погружные пневмоударные машины. При бескерновом бурении возможно увеличение в породах средней твердости, т.к. исключается самозаклинивание керна в центральном канале бурильной колонны или в коронке. Для вращательного бурения применяют двойные бурильные трубы диаметром от 48 до 114 мм с соединением труба в трубу и замковыми.

При бурении геологоразведочных скважин с пневмотранспортом разбуренной породы наибольшее распространение получили двойные бурильные трубы диаметром 114 мм и несколько реже диаметром 89 и 101,5 мм, что, вероятно, обусловлено стойкостью породоразрушающего инструмента, при бурении сплошным забоем трубы меньших диаметров пока применяют весьма ограниченно. Колонны с гладкоствольными соединениями следует использовать при геологоразведочном бурении на твердые полезные ископаемые, а колонны с замковыми соединениями – при гидрогеологическом бурении.

В двойных бурильных трубах с замковым соединением диаметр центрального проходного канала больше, чем в трубах с гладкоствольным соединением.

Для вращательного бурения с выносом выбуренной породы с забоя очистным агентом через двойную концентрическую колонну труб характерно значительное превышение разбуриваемой площади забоя по отношению к площади проходного канала колонны труб, через который удаляется выбуренная порода. Это обусловлено как конструктивными возможностями, так и технологической необходимостью обеспечить зазор между стенками скважины и колонной бурильных труб с целью уменьшения трения колонны о породу.

Конструкция двойной бурильной колонны может быть оценена по отношению площади забоя к площади центрального проходного канала и площади кольцевого сечения между наружной и внутренней трубами к площади центрального канала. В первом случае уменьшение этого отношения свидетельствует о большой пропускной способности колонны и более эффективной очистке забоя. Во втором случае, если отношение меньше единицы, возрастают потери давления в кольцевом зазоре и расход очистного агента, необходимого для создания скорости, обеспечивающей вынос породы. При отношении большем единицы уменьшается диаметр керна при одновременном увеличении площади разрушения. Таким образом, при вращательном бурении с двойной колонной площадь забоя в 3 – 5 раз превышает площадь ее центрального канала [65].

Технологическая схема очистки забоя от выбуренной породы в основном предусматривает поступление очистного агента (сжатого воздуха, аэрированного раствора или промывочной жидкости) непосредственно на забой. Имеются две разновидности циркуляции очистного агента в призабойной зоне. Первая обеспечивает поступление очистного агента из межтрубного зазора двойной колонны труб через центральное отверстие породоразрушающего инструмента на забой и вынос разбуренной породы через наклонные каналы в специальном переходнике, соединяющие затрубный зазор в призабойной зоне с центральным каналом двойной концентрической колонны. Вторая предусматривает выход очистного агента из межтрубного зазора двойной колонны труб через отверстие в специальной компоновке в призабойную зону и удаление разбуренной породы через центральное отверстие в долоте и далее в центральный канал [70].

В обеих схемах очистки забоя от выбуренной породы предусмотрена изоляция затрубного зазора несколько выше отверстий, через которые либо очистной агент попадает в призабойную зону, либо разбуренная порода – в центральный канал двойной колонны труб.

Следует также заметить, что в зарубежной практике нашла применение нагнетательная обратная промывка с непрерывным подъемом керна по одинарной колонне труб, в разрезах, не осложненных поглощениями. При встрече проницаемых пород зоны поглощения ликвидируются установкой обсадных труб либо тампонажем быстросхватывающимися смесями.

1.5 Особенности обратной схемы циркуляции очистного агента, связанные с геолого-техническими факторами

В отличие от обычной технологии, бурение с гидротранспортом керна позволяет беспрепятственно проходить скважины в зонах поглощения промывочной жидкости, в водонапорных песках и набухающих разновидностях глин, в мерзлых породах, теряющих устойчивость при оттаивании.

Неблагоприятными условиями для бурения этим методом являются наличие в толще мягких отложений пропластков пород VIII – IX категории даже небольшой мощности с частой перемежаемостью абразивных твердых и мягких пород, галечного материала, а также необходимость заглубления в породы кристаллического фундамента на глубины более 3 м [71].

Правильность ведения технологического процесса при бурении с гидротранспортом керна приобретает особенно большое значение, поскольку определяет не только технико-экономические показатели, но и в целом получение положительного результата.

Специфика процесса бурения заключается в высоких скоростях его протекания, образовании большого объема разрушенной породы в единицу времени, некоторой неопределенности распределения потока промывочной жидкости в призабойной зоне.

При отработке технологии и режимов бурения должно обеспечиваться эффективное разрушение породы, своевременное отделение и удаление керна, вынос шлама из-под торца коронки, стабилизация стенок скважины, предотвращение образования сальников на колонне и подклинок керна в ее внутреннем канале [64].

Разнообразие геологических условий и свойств буримых пород, видов работ, на которых применяется данный метод, требуют разработки в каждом случае широкого круга технологических вопросов, начиная с выбора породоразрушающего инструмента, определения рациональных режимов бурения, способов стабилизации скважины при бурении с применением различных промывочных жидкостей и схем циркуляции, методов отбора проб и т.д.

При бурении с гидротранспортом керна твердосплавными коронками буримость пород не может быть достаточно полно охарактеризована средней категорией. Важным фактором является величина и мощность твердых пропластков, которые решающим образом влияют на ресурс породоразрушающего инструмента.

Увеличение мощности пропластков и повышение их твердости до VIII и более категории по буримости делает невозможным применение твердосплавных коронок. В таких случаях практикуется перебуривание отдельных интервалов с прямой промывкой шарошечными долотами или обычными колонковыми снарядами с алмазными коронками. Колонковые снаряды применяются также при отборе керна коренных пород.

При бурении с гидротранспортом керна следует различать параметры режима бурения, которые устанавливаются оператором, и показатели процесса бурения, зависящие от геолого-технических условий, физико-механических свойств пород, состояния ствола скважины, обводненности и т.д. К первым относятся осевая нагрузка, частота вращения и интенсивность промывки, ко вторым – механическая скорость, крутящий момент, усилие подъема инструмента и давление промывочной жидкости.

Косвенными показателями правильности режима бурения являются интенсивность и загрузка восходящего потока промывочной жидкости, а также уровень жидкости в затрубном пространстве и состояние керна материала.

Значения параметров и их сочетания в конкретных условиях корректируются исходя из достигаемых скоростей, и возникающих при бурении крутящих моментов [72].

В табл. 1.2 приведены технологические параметры процесса бурения с гидротранспортом керна в породах с различными физико-механическими свойствами, разработанные на основании лабораторных и промышленных исследований [9], а в табл. 1.3 приведены циркуляционные характеристики насоса НБ 4 – 320/63, поставляемого в комплекте установок КГК – 100(300) и двойной буровой колонны.

Таблица 1.2

Параметры режима бурения и расхаживания в различных породах

Породы	Бурение			Расхаживание	
	Частота вращения, с ⁻¹	Нагрузка на забой, кг	Подача жидкости, дм ³ /мин	Интервал, м	Высота, м
Вязкие глины и суглинки	5,4	560 – 900	200 – 320	1 – 1,5	1 – 1,5
Пески, супеси	5,4	450 – 900	125	2 – 2,5	0,5
Гравийно-галечниковые отложения	2,3 – 2,8	600 – 1000	180 – 260	0,3 – 1,0 (перед наращиванием осуществлять 3 – 7 расхаживаний на высоту 3 – 4 м)	0,2 – 0,5 (перед наращиванием осуществлять 3 – 7 расхаживаний на высоту 3 – 4 м)
Алевриты, аргиллиты	4,2	700 – 1200	180	0,3 – 0,5	0,1 – 0,5
Песчаники, известняки	4,2	800 – 1600	180	0,1 – 0,5	0,1 – 0,5
Окремненные породы	4,2	1500 – 1800	180	0,05 – 0,1	0,05 – 0,1

В мягких породах основным параметром, характеризующим процесс бурения, является скорость подачи, а при бурении твердых пород – осевая нагрузка.

Наиболее эффективно и наименее энергоемко бурение с применением малых и средних осевых усилий на забой – примерно 3000 – 7000 Н при частоте вращения инструмента 4,2 – 5,4 с⁻¹ и подаче промывочной жидкости 180 л/мин.

Бурение с выносом керна принципиально возможно и при подаче жидкости в количестве 60 – 70 л/мин, поскольку при этом обеспечивается движение керна вверх со скоростью 0,6 м/с. Однако следует иметь в виду, что при бурении в рыхлых породах с подачей воды менее 100 л/мин возможны зашламование центрального канала бурильной колонны и увеличение частоты подклинивания в нем керна [51]. Давление нагнетания для подачи воды 200 л/мин составляет на глубине 100, 200 и 300 м соответственно 0,8 – 1; 1,8 – 2,2 и 3,2 – 3,5 МПа.

Таблица 1.3

Циркуляционные характеристики насоса НБ 4 – 320/63, поставляемого в комплекте установок КГК – 100(300)

Подача жидкости, л/мин	Подача жидкости, л/мин	Скорость течения жидкости во внутренних трубах двойной бурильной колонны, м/с
32	0,00053	0,39
55	0,00092	0,67
88	0,0015	1,09
125	0,0021	1,53
180	0,003	2,18
320	0,0053	3,85

При бурении в сложных геолого-технических условиях возникает необходимость в специальных технологических мерах, направленных на уменьшение интенсивности поглощения промывочной жидкости, стабилизацию стенок скважины, обеспечение соответствия ресурса породоразрушающего инструмента глубине скважины.

Важным средством повышения эффективности бурения с гидротранспортом керна является выбор соответствующей промывочной жидкости [52].

В большинстве случаев используется техническая вода, которая позволяет бурить без осложнений и с достаточными скоростями в таких условиях, в которых при обычном колонковом способе применяется глинистый раствор. При этом расход жидкости снижается в несколько раз. Однако по мере усложнения геолого-технических условий – появления в разрезе неустойчивых пород и увеличения глубин – возникает необходимость применения специальных жидкостей и схем циркуляции.

Промывочные жидкости для бурения с гидротранспортом керна в осложненных условиях должны обладать высокой несущей способностью при срав-

нительно небольшой вязкости, низким фильтрационным расходом и хорошими кольматирующими свойствами (табл. 1.4).

Эффективность бурения зависит также от свойств и уровня промывочной жидкости в затрубном пространстве и способа его поддержания.

Керновый материал в зависимости от физико-механических свойств пород обычно представлен тремя разновидностями [50 – 51, 73]:

– «столбиками» – образующимися при бурении глин, меловых отложений и других плотных пород; длина столбика, обеспечиваемая конструкцией кернолома, обычно составляет 15 – 20 см, а его диаметр 28 – 38 мм; однако при перебурке пластичных пород его длина значительно увеличивается и на поверхность керн поступает практически одним сплошным конгломератом;

– «пульпой» – характерной для почвенного слоя, суглинков, песков, коры выветрелых кристаллических пород, контактов мела, отдельных разновидностей глин, бурового угля; пульпа представлена различными по величине кусочками породы;

– «лепестками», образующимися при расхаживании бурового снаряда в ходе проработки ствола скважины, а также при бурении слабопластичных пород; представляют собой вытянутые полоски длиной 30 – 70 мм и толщиной 5 – 10 мм.

Таблица 1.4

Рецептура промывочных агентов для различных геолого-технических условий бурения

Глубина скважины, м	Характеристика пород в разрезе	Рецептура промывочной жидкости	
		В колонне	В затрубном пространстве
До 150	Глинистые породы, окисленные коры выветривания, 8% неустойчивых слабосвязанных пород	Вода или вода и 2% К – 9	Скважинная вода (естественный глинистый раствор)
До 150	Глинистые породы, коры выветривания с содержанием до 12% щебнистого материала, мощность неустойчивых пород до 15м	Вода или 2 – 3% К – 9	Глинистый раствор вязкостью до 30 с бентонитом без полимерных добавок
До 200 – 300	Глинистые породы, суглинки трещиноватые, коры выветривания. Прослойки песка до 1,5 м.	Вода или 2 – 3% К – 9	Глинистый раствор вязкостью до 35 с содержанием К – 9 до 2,5%
До 300	Глинистые породы, коры выветривания с содержанием щебня, пропластками алевролитов, песчаников, хлорит-сероцитовых и углесодержащих сланцев. Мощность трещиноватых и неустойчивых интервалов до 25%	Глинистый раствор с добавкой 3 – 4% К – 9, вязкость 30 – 35, плотность до 1,1 г/см ³	Тоже, что и колонне (закачивание с забоя и подлив через устье)

Керношламовый материал позволяет:

- изучить рыхлые породы мезозойского и кайнозойского возраста с целью построения стратиграфических схем их залегания;
- изучить рыхлые слабо литофицированные отложения и геологические тела сложного пространственного размещения с пестрым литофациальным составом;
- четко определить контакты суглинков и глин с продуктивными угольными пластами;
- обнаружить элементы – индикаторы меди, свинца, цинка при геохимических поисках глубинных вторичных ореолов рассеяния полиметаллического оруденения;
- литологически расчленить разрезы и изучить элементы тектонического строения;
- оценить общую угленосность, установить границы зоны окисления пластов, определить зольность углей;
- оценить запасы, изучить фундамент и рыхлые отложения, опробовать нерудные полезные ископаемые (в комплексе с колонковым способом бурения).

Керновый материал позволяет также проводить все современные виды опробования, включая палеомагнитный, микропалеонтологический, литологический, термический и другие анализы.

При бурении по полезному ископаемому необходимо обеспечить точную привязку отобранного керна к глубине скважины и максимально сохранить структуру и объемный выход керна. Эти два основных требования обеспечиваются специальными приемами технологии бурения. В целях предотвращения перемешивания материалов в лотке при отборе пробы по полезному ископаемому следует заранее снизить подачу жидкости до 100 – 120 л/мин [50 – 51].

Для получения керна с минимально нарушенной структурой из пластичных пород коронку задавливают в забой на 0,1 – 0,3 м без вращения с промывкой. Отрыв столбика керна осуществляется включением вращения.

После заполнения керном одного или нескольких лотков в керноприемном устройстве производится укладка материала в ящики, которые устанавливаются на борту емкости.

Выносимый материал из несвязных пород типа песков отбирается из коробчатых шламосборников, с поддона устройства. При расстановке этикеток в керновых ящиках необходимо учитывать, что в пластичных породах линейный выход керна может достигать 150 – 200 % и более [50, 73].

Сопоставление геологических данных, полученных по результатам бурения обычным колонковым способом и с гидротранспортом керна, показывает, что в последнем случае возможно более точное построение разреза благодаря обнаружению пропластков, разрушаемых при обычном, в том числе и безнасосном, способе бурения. Это подтверждается и геофизическими данными, выявляющими глубины и мощность пропластков различных пород с точностью не

менее $\pm 0,2$ м, что находится в пределах точности интерпретации каротажных диаграмм. Керн при применении метода бурения с гидротранспортом образцов породы не загрязнен глинистым раствором, что повышает его качество и достоверность анализов.

С целью получения надежной геологической информации технология бурения, методика отбора проб и их привязка к глубине должны быть отработаны для каждого вида полезного ископаемого с учетом конкретных геолого-технических условий.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1

1. Даны сведения об основных методиках определения расхода очистного агента при прямой схеме циркуляции.

2. Проанализировано влияние параметров очистного агента на забойные процессы разрушения пород и транспортировки частиц шлама.

3. Показана взаимосвязь между физико-геометрическими характеристиками частиц шлама и циркуляционными процессами на забое и в стволе скважины.

4. Приведена краткая историческая справка о развитии метода бурения с обратной циркуляцией очистного агента (гидротранспорт керна).

5. Изучена зарубежная практика бурения с применением обратной схемы циркуляции.

6. Показаны особенности схемы циркуляции очистного агента, связанные с разнообразием геолого-технических факторов.

7. Рассмотрены технологические аспекты метода бурения с гидротранспортом керна.

РАЗДЕЛ 2 ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЕРНО-ШЛАМОВОГО МАТЕРИАЛА С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

2.1 Гранулометрический анализ шлама

Большой интерес для теории и практики проектирования режимных параметров процесса бурения горных пород представляет вопрос о гранулометрическом составе продуктов разрушения. В значительной мере последний является показателем скорости бурения и величины затрат энергии на 1 м проходки. По гранулометрическому составу продуктов разрушения можно судить о совершенстве конструкции породоразрушающего инструмента и рациональности режимов его работы. Без учета гранулометрического состава буровых шламов практически невозможна разработка эффективных (в отношении скорости и энергоемкости) способов очистки скважин, а также точных и удобных в практическом отношении методов их расчета. Кроме того, гранулометрический состав продуктов разрушения, выходящих из устья скважины, определяет эффективность работы шламоотделяющих средств, а возможность его оценки имеет большое значение при решении задачи очистки воздуха в подземных выработках. По общим вопросам гранулометрии имеется достаточно обширная литература, например [74 – 75]. Применительно к бурению скважин гранулометрией продуктов разрушения занимались вскользь, и в литературных источниках содержатся об этом только отрывочные сведения.

Установлено, что размеры частиц бурового шлама перечисленных горных пород распределяются по логарифмически нормальному закону. А. Н. Колмогоров [75] доказал теоретическим путем, что при дроблении получаемые размеры частиц должны соответствовать логарифмически нормальному закону, а сам закон получил достаточную экспериментальную проверку у геологов (на естественно раздробленных материалах) и обогатителей (при дроблении на различных мельницах).

Однако этот закон не подвергался серьезной экспериментальной проверке на частицах с очень малыми размерами (0,05 мм и тоньше), при которых могут сказываться эффекты, связанные со строением дробимого материала. Кроме того, для разработки рациональной очистки скважин и методов ее расчета необходимо знать фракционный состав продуктов разрушения не только на самом забое, но и на устье скважины (в зависимости от характера пересекаемого геологического разреза, конструкции и глубины скважины и других факторов они могут сильно различаться).

В работах [33 – 34, 38] приведены следующие результаты изучения гранулометрического состава шлама. При вращательном бурении наибольшая вероятность встречи частиц с размером от 1 до 15 мкм, а при ударно-вращательном – от 5 до 40 мкм, в зависимости от типа коронки. Выполненные экспериментальные исследования позволили проанализировать влияние ряда факторов на дисперсионный состав бурового шлама.

Исследование влияния состава и свойств горных пород на дисперсионный состав продуктов разрушения при бурении мелкоалмазными коронками

проводился на роговике, мраморе, песчанике. Роговик обладал плотной, массивной, однородной микропрожилковой текстурой и мелкозернистой, размернозернистой структурой. Представлен кварцем и полевым шпатом (75%), остальное – актинолит и хлорит. По буримости относится к X, XI категориям. Сульфидизированный мрамор, напротив, представлен более мягкими минералами: кальцитом (75%), биотитом (18%), пиритом (10%), эпидотом (остальное). Обладал массивной, плотной однородной текстурой и порфиробластовой структурой, по буримости относился к VI категории. Песчаник имел массивное сложение, слоистый, мелкозернистый с чешуйками слюды и сильно разрушенным полевым шпатом. По буримости относился к VII категории.

Бурение всех пород проводилось одной коронкой 01А4 диаметром 46 мм. Оказалось, что при вращательном бурении мелкоалмазными коронками строение и свойства пород почти не сказываются на геометрических параметрах бурового шлама.

Исследование влияния зернистости алмазов на гранулометрический состав продуктов разрушения производилось при вращательном и ударно-вращательном способах бурения коронками, армированными естественными и искусственными алмазами. Сравнивая параметры шлама, полученного при бурении естественными и искусственными алмазами, легко заметить, что при бурении искусственными алмазами вероятные размеры частиц шлама в 2 – 5 раз больше, чем при бурении коронками, армированными естественными алмазами. Диапазон же варьирования размеров частиц бурового шлама увеличился незначительно. При бурении вращательным способом размер частиц доходил до 2 мм, а при ударно-вращательном – до 3 мм. В том и другом случае бурение велось с гидроударником ГВ-5 и почти на одних и тех же режимах.

Влияние динамических нагрузок на дисперсионный состав бурового шлама можно проследить по шламу полимиктового песчаника, полученного при бурении коронками 01АЗД75К30 и 01МЗД90К60 при одних и тех же режимах бурения. При вращательном бурении частиц размером до 0,005 мм (15 – 25%), а при ударно-вращательном – от 4 до 13%, в то же время при ударно-вращательном бурении значительно увеличивается выход крупных частиц. Так, при вращательном бурении частиц крупнее 0,1 мм 4 – 5%, а при ударно-вращательном – от 13 до 16%. В целом при бурении коронками с естественными алмазами, при наложении динамических нагрузок выход крупных частиц значительно увеличивается.

Влияние интенсивности очистки на размеры частиц бурового шлама изучалось при бурении полимиктового и степановского песчаников вращательным способом. Обе породы бурились при постоянных режимах, варьировалась только интенсивность очистки забоя. Песчаники довольно сильно отличались друг от друга по свойствам. Твердость полимиктового песчаника в 1,5 раза была выше, чем у степановского. В то же время коэффициент пластичности у степановского песчаника в 2 раза выше, чем у полимиктового. Абразивность и динамическая прочность у обоих песчаников была примерно одинакова.

Несмотря на ощутимые различия в механических свойствах песчаников и значительные варьирования интенсивности промывки забоя, результат диспер-

сионного разделения бурового шлама в качественном отношении оказался одним и тем же. Различие носит лишь качественный характер. При бурении с более интенсивной промывкой выход мелких фракций уменьшился, а крупных – увеличился. Расхождение особенно значительно для крупных фракций и менее значительно – для мелких. Это указывает на вторичное измельчение продуктов разрушения при слабой промывке.

Влияние частоты вращения на дисперсионный состав продуктов разрушения можно проследить на диорите, кремнисто-полевошпатовом роговике, степановском песчанике и сульфидизированном мраморе. Из экспериментальных данных следует, что с увеличением частоты вращения (при постоянной интенсивности промывки забоя) выход мелких фракций возрастает, а крупных – уменьшается. Однако эта тенденция не очень значительная.

Влияние усилия подачи породоразрушающего инструмента на дисперсионный состав продуктов разрушения прослеживается на граувакковом песчанике, кремнисто-полевошпатовом роговике, степановском песчанике и сульфидизированном мраморе. По экспериментальным данным следует, что увеличение усилия подачи приводит к сокращению мелких и увеличению крупных фракций. Причем усилие подачи на размеры шламовых частиц оказывает большее влияние, чем частота вращения. Эта тенденция четче выражена при бурении твердых пород и слабее – более слабых.

Влияние механической скорости бурения на дисперсионный состав продуктов разрушения изучалось при бурении кварцево-полевошпатового роговика вращательным способом коронкой 01МЗ. Изменение механической скорости бурения достигалось за счет одновременного варьирования усилия подачи и частоты вращения бурового снаряда. Если бы изменение режимных параметров не приводило к изменению механической скорости бурения, то одновременное увеличение усилия подачи и частоты вращения инструмента практически не приводило бы к изменению распределения частиц по фракциям, ибо, как следует из изложенного, рост подачи приводит к укрупнению частиц, а рост частоты вращения – к уменьшению. Так как усилие подачи сильнее влияет на дисперсионный состав, то его увеличивали незначительно (на 31 %), а частоту вращения – в значительно больших пределах (в 2 раза). Интенсивность промывки в обоих случаях оставалась на одном и том же уровне. Дисперсионное разделение шлама, полученного при этих режимах бурения, показало, что увеличение механической скорости бурения приводит к значительному сокращению мелких фракций и увеличению крупных. Так, наиболее вероятный диаметр частиц шлама увеличился с 6,9 до 12,3 мкм, а мелких частиц с диаметром до 5 мкм снизился с 42 до 23 %.

Таким образом, увеличение частоты вращения породоразрушающего инструмента при незначительном увеличении усилия подачи не только положительно сказывается на механической скорости бурения, но и приводит к увеличению физического к. п. д. процесса разрушения горных пород.

Исследованиями, проведенными в Иркутском политехническом институте (ИПИ) [38], установлен следующий гранулометрический состав шлама при бурении твердосплавными коронками (табл. 2.1). Бурение осуществлялось на

специальном лабораторном стенде, станком с гидравлической подачей. В качестве породоразрушающего инструмента использовалась твердосплавная коронка диаметром 46 мм. Бурение производилось при следующих режимных параметрах: частота вращения – 250 мин^{-1} , осевая нагрузка 300 даН на коронку, количество промывочной жидкости – 20 л/мин.

Таблица 2.1

Гранулометрический состав шлама по данным ИПИ

Размер частиц, мм	до 0,05	0,05-0,063	0,063-0,1	0,1-0,16	0,16-0,2	0,2-0,315	больше 0,315
Содержание, %	29,71	27,06	12,21	7,78	5,06	5,67	12,51

В работе [76] представлены данные по гранулометрическому составу шлама полученные непосредственно на бурящихся скважинах при различных сочетаниях параметров режима бурения. Породоразрушающими инструментами являлись 85 и 118 мм коронки. Подаваемый на забой расход глинистого раствора колебался в пределах 2,5 – 18 л/с. Нагрузка изменялась в пределах 800-2200 даН, а число оборотов $146 - 241 \text{ мин}^{-1}$. На основании данных построены графики зависимости фракционного состава от диаметра выбуренных частиц при различных сочетаниях режимных параметров (рис. 2.1).

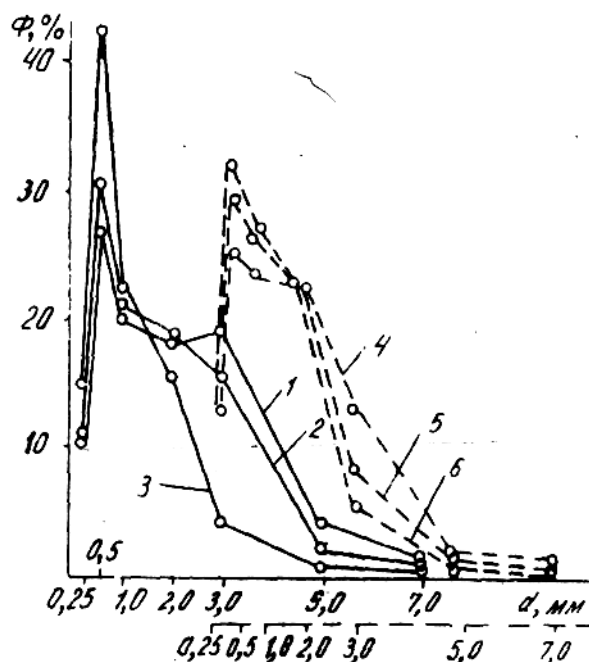


Рис. 2.1 График зависимости фракционного состава от диаметра выбуренных частиц:

- при бурении 85 мм коронкой; 1 – при нагрузке 1200; 2 – 1100; 3 – 825 даН.
- при бурении 118 мм коронкой; 4 – при нагрузке 1350; 5 – 1175; 6 – 1100 даН.

Как видно из графика, из всех фракций максимальным по процентному содержанию является 0,5 мм фракция. Эта же фракция, с максимальным значе-

нием при всех кривых, -которые выражают зависимость фракционного состава от диаметра при определенной нагрузке, уменьшает свое абсолютное значение с возрастанием осевой нагрузки. Так, для 85 мм коронки с возрастанием осевой нагрузки она уменьшается с 42 до 35%. Уменьшается также 0,25 мм фракция. Остальные фракции увеличиваются. Так, например, при нагрузке 825 даН 3 мм фракция составляет 4%, в то время, как при нагрузке 1100 даН она равняется 15,5%, а при 1200 даН – 19%.

Таким образом, с увеличением диаметра частиц процентное содержание фракции возрастает до определенного предела (до 0,5 мм), затем снижается, а с увеличением осевой нагрузки процентное содержание 0,25 и 0,5 мм фракций уменьшается, а остальных фракций – возрастает.

Наиболее обширные данные имеются о гранулометрическом составе продуктов разрушения при шарошечном бурении. Установлено [37, 77 – 78], что при разбурировании горных пород разные венцы шарошек долота образуют различный по крупности шлам. В случае применения зубчатых долот наиболее крупные частицы шлама формируются под ведущими венцами, образующими рейку. Анализ полученного материала показал, что при совершенной очистке забоя бурящихся скважин и объемном разрушении горных пород наибольшая по содержанию фракция (10 – 22%) в шламе представлена частицами размерами 3 – 5 мм. Доля частиц размерами от 7 до 10 мм составляет 5 – 10%. Частиц крупнее 10 мм в буровом шламе менее 6%. Безусловно, эти данные ориентировочны и должны уточняться по мере накопления материалов по шламовому анализу.

2.2 Определение скорости относительного движения шлама

Расход промывочной жидкости – такой же важный параметр режима бурения, как осевая нагрузка и частота вращения бурового снаряда.

Количество промывочной жидкости, подаваемой в скважину, играет доминирующую роль в формировании керна при бурении в рыхлых слабосвязанных и в подверженных химическому воздействию промывочной жидкости породах.

Энергия потока очистного агента обеспечивает очистку забоя от разрушенной породы, вынос шлама из скважины, охлаждение породоразрушающего инструмента, способствует разрушению породы на забое, используется для привода забойных двигателей и механизмов. Для решения каждой конкретной из этих задач необходима определенная энергия потока [5].

Чрезмерный расход очистного агента может оказывать отрицательное влияние на процесс бурения, вызывая разрушение керна, способствуя его самозаклиниванию, создавая силы гидравлического подпора и другие вредные воздействия, а также вызывает неоправданные затраты энергии и повышенный износ оборудования. Выбор рационального расхода должен производиться с учетом всех этих обстоятельств; он является важной задачей, определяющей эффективность процесса бурения. Минимальный расход очистного агента в общем случае должен обеспечивать решение трех основных задач промывки:

очистку забоя скважины от разрушенной породы, очистку ствола скважины, охлаждение породоразрушающего инструмента.

Распределение скоростей по сечению потока зависит от ряда факторов: формы сечения, рода жидкости, режима течения и т.д. неравномерность скорости потока характеризуется отношением максимальной скорости ω_{max} в некотором сечении к средней объемной скорости ω_{cp} в том же сечении, т.е. выражается отношением [17]

$$\alpha = \omega_{max} / \omega_{cp}. \quad (2.1)$$

Известно, что для потока вязкой жидкости в круглой трубе при ламинарном режиме $\alpha=2$; при турбулентном режиме α достигает значений близких к единице. При структурном режиме течения вязко-пластичных жидкостей в зависимости от средней скорости и реологических параметров это отношение изменяется почти от 1 до 1,6.

Таким образом, в зависимости от положения выносимой частицы в потоке скорость ее выноса может изменяться в достаточно широких пределах, и это может явиться причиной того, что определенный процент частиц попавших в зону меньших скоростей, не будет выноситься, хотя значение $u \leq \omega_{cp}$.

В общем случае зависимость механической скорости проходки V_{mex} от расхода промывочной жидкости Q описывается уравнением [8]

$$V_{mex} = Q / (a + bQ) \quad (2.2)$$

где a и b – величины, зависящие от свойств проходимых пород, качества промывочной жидкости, конструкции породоразрушающего инструмента, размера кольцевого пространства и скорости вращения инструмента.

В основе многочисленных существующих методик расчета выноса шлама при бурении лежат известные закономерности движения шара в жидкой или газообразной среде.

Транспортирование частиц разрушенной породы по стволу скважины характеризуется абсолютной скоростью частицы $V_{ч}$, которая связана со средней скоростью потока жидкости в кольцевом пространстве $V_{ж}$ соотношением [4]

$$V_{жс} = u + V_{ч}, \quad (2.3)$$

где u – скорость оседания частицы шлама в неподвижной жидкости, м/с.

Поскольку одна из величин $V_{ж}$ или $V_{ч}$ известна, то для определения другой необходимо найти величину u . При этом возможны такие соотношения скоростей рис. 2.2.

Уравнение движения твердой частицы составляют исходя из законов механики и сумму всех сил, действующих на частицу, приравнивают к силе инерции. В условиях гидроподъема это сделать легко, потому, что траектория частицы известна и направления действия всех сил совпадают с направлением движения частицы [79].

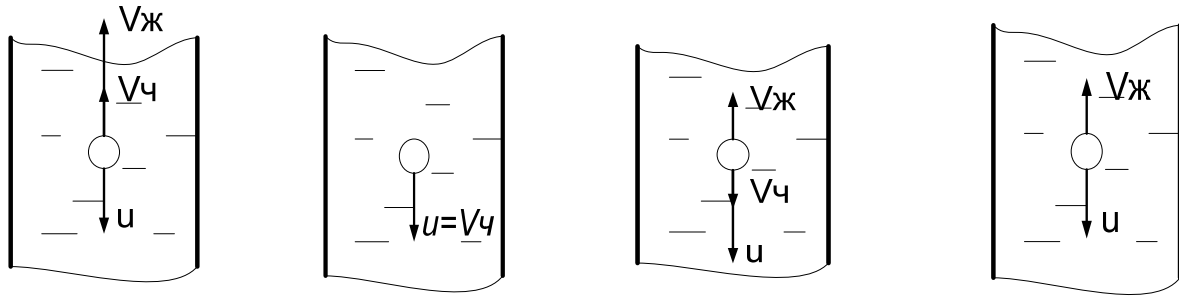
На тело, которое погружается в неограниченном объеме, кроме силы инерции действует сила тяжести

$$G_T = \rho g V, \quad (2.4)$$

и Архимедова сила

$$P_A = \rho_{жс} g V, \quad (2.5)$$

где $\rho_{ж}$ и ρ – соответственно плотность жидкости и тела, которое погружается, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; V – объем тела, погруженного в жидкость, м³.



$V_{ж} > u$
 $V_{ч} = V_{ж} - u$
 Частичка движется вверх

$V_{ж} = 0$
 $u + V_{ч} = 0$
 $V_{ч} = u$
 Частичка оседает

$0 < V_{ж} < u$
 $V_{ж}' = u + V_{ч}$
 $V_{ч} = V_{ж}' - u$
 Частичка оседает с некоторой скоростью

$V_{ж} = u$
 $u = V_{ж} + V_{ч}$
 $V_{ч} = u$
 Частичка неподвижна, «витает»

Рис. 2.2 Схемы возможных соотношений скорости движения жидкости и оседания частиц

При появлении относительной скорости между телом и жидкостью возникает сила сопротивления

$$R = Cf \frac{\rho_{ж} u^2}{2}, \tag{2.6}$$

где f – площадь проекции поверхности тела на нормаль к вектору скорости (миделево сечение), м²; C – коэффициент сопротивления, который зависит от формы тела и режима обтекания; u – скорость тела относительно жидкости, м/с; m_T – масса тела, кг.

Уравнение движения тела под действием этих сил можно записать в виде

$$G_T - P_A - R = m_T \frac{du}{dt}. \tag{2.7}$$

Подставляя значения для G_T , P_A и R в уравнение (2.7) получим

$$m_T \frac{du}{dt} = \rho_{ж} g V \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) - Cf \frac{\rho_{ж} u^2}{2}. \tag{2.8}$$

При неустановившемся движении появляется действие силы инерции, расчеты показывают, что длительность начального периода движения тела из состояния покоя обычно мала, и его можно не принимать во внимание. В общем случае рассматривают движение установившееся и поэтому силу инерции в уравнении (2.8) приравнивают нулю, тогда

$$\rho_{ж} g V \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) = Cf \frac{\rho_{ж} u^2}{2}. \tag{2.9}$$

После преобразований из уравнения (2.9) получаем

$$u = \sqrt{\frac{V}{f} \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}. \quad (2.10)$$

Для частицы шаровой формы объем определяется по формуле

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (2.11)$$

где d – диаметр шара, м.

Проекцией поверхности тела в форме шара на нормаль к вектору скорости будет круг, площадь которого определяется формулой

$$f = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2.12)$$

Подставив (2.11) и (2.12) в (2.10), после преобразований получим

$$u = \sqrt{\frac{4g}{3C} d \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right)}. \quad (2.13)$$

Обозначив в (2.13) отношение $\sqrt{\frac{4g}{3C}}$ через K , получим формулу, которая широко известна под названием формулы Риттингера и довольно распространена в практике инженерных расчетов режима промывки скважин

$$u = k \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right)}. \quad (2.14)$$

При определении скорости оседания частиц шлама в потоке промывочной жидкости также рекомендуют применять формулу Стокса [17], которая имеет следующий вид

$$u = \frac{d^2 (\rho - \rho_p) g}{18\mu}, \quad (2.15)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости.

Эта формула дает удовлетворительные результаты, если число Рейнольдса при обтекании частицы не превышает единицы.

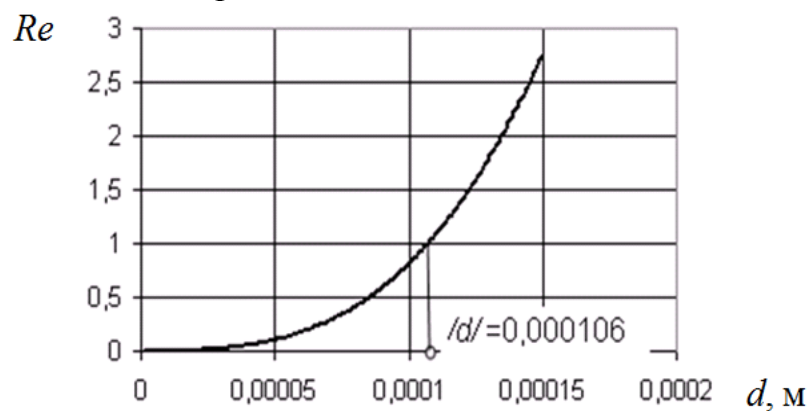


Рис. 2.3 График функции $Re = f(d)$.

Поскольку u является функцией d , то можно установить предельный диаметр частицы $/d/$, при котором число Рейнольдса не будет превышать единицы, для этого на рис. 2.3 построена зависимость $Re = f(d)$.

Из данных рис. 2.3 имеем, что число Рейнольдса не превышает единицы при диаметре частицы $1,06 \cdot 10^{-4}$ м.

Также при расчетах используют формулу [6] при участии параметра Архимеда Ar

$$u = \frac{v}{d} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar + 2,3}}{2,3} - 1 \right), \quad (2.16)$$

где Ar – безразмерный параметр Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_{ж})}{v^2 \rho} g. \quad (2.17)$$

Эта формула получена на основании логарифмического закона критериальной зависимости, которая описывает «стандартную кривую» $C = f(Re)$ в диапазоне $Re = 0,5 - 10^5$.

Формулы, которые применяют при расчетах относительной скорости не учитывают влияние стенок скважины и бурильных труб, которые ограничивают кольцевое пространство.

Для восходящего потока жидкости экспериментальными исследованиями [23], которые были проведены во ВНИИБТ (Всероссийский научно-исследовательский институт буровой техники), было установлено, что такое влияние имеет место, и с учетом этого фактора была определена следующая формула для определения относительной скорости

$$u = \sqrt{\frac{2gl}{C_{Л}} \left(\frac{\rho}{\rho_{р}} - 1 \right)}, \quad (2.18)$$

где l – характерный размер частички шлама, м; $C_{Л}$ – коэффициент лобового сопротивления, который определяется по формуле

$$C_{Л} = \left(\frac{D_{с} - d_{БТ}}{l} \right)^{-0.18}, \quad (2.19)$$

где $D_{с}$ и $d_{БТ}$ – диаметры скважины и бурильных труб соответственно, м

В зарубежной практике проектирования режима промывки скважин пространство получила формула Уокера – Мейеза [22]

$$u = \sqrt{\frac{2gd(\rho - \rho_{ж})}{1,12\rho_{ж}}}. \quad (2.20)$$

Следует указать, что авторы, которые приводят указанные зависимости не оговаривают область их применения, а именно: тип и параметры промывочной жидкости, форму и размер частиц, потому возникает вопрос о том, каким условиям бурения соответствуют эти зависимости.

Для прикладных расчетов рекомендуется [5 – 6, 19 – 20] принимать величину $V_{ч}$ в доле от u

$$V_{ч} = (0,2 - 0,3)u. \quad (2.21)$$

Расход промывочной жидкости Q вычисляют по формуле:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_C^2 - d_{БТ}^2) V_{ж}, \quad (2.22)$$

где D_C – диаметр скважины, м; $d_{БТ}$ – диаметр бурильных труб, м.

На практике используют следующие рекомендации (табл. 2.2) относительно скоростей восходящего потока [80].

Таблица 2.2

Рекомендованные скорости восходящего потока

Породоразрушающий инструмент	Скорость восходящего потока при промывании, м/с	
	водой	глинистым раствором
Долота режущего типа	0,6 – 1,0	0,6 – 0,8
Шарошечные долота	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6
Твердосплавные коронки	0,25 – 0,6	0,2 – 0,5
Алмазные коронки	0,5 – 0,8	0,4 – 0,6

Из (2.1) и (2.19) вытекает, что

$$V_{ж} = (1,2 - 1,3)u, \quad (2.23)$$

тогда

$$u = \frac{V_{ж}}{(1,2 - 1,3)}. \quad (2.24)$$

Исходя из данных табл. 2.2 и (2.24), имеем следующие (табл. 2.3) расчетные скорости оседания частичек шлама [81].

Таблица 2.3

Расчетные скорости оседания частичек шлама

Породоразрушающий инструмент	Скорость оседания частичек шлама при промывке, м/с	
	водой	глинистым раствором
Долота режущего типа	0,48 – 0,8	0,48 – 0,64
Шарошечные долота	0,48 – 0,64	0,32 – 0,48
Твердосплавные коронки	0,2 – 0,48	0,16 – 0,4
Алмазные коронки	0,4 – 0,64	0,32 – 0,48

Как уже было показано выше, размер частичек шлама при разных способах бурения характеризуется большим диапазоном. Средний размер частичек шлама зависимость от многих факторов, среди которых первое место занимает конструкция породоразрушающего инструмента.

Частички бурового шлам можно условно разделить на три группы: шлам характерный для алмазного бурения, для твердосплавного и для шарошечного.

Результаты расчетов скорости оседания частичек шлама характерных для алмазного бурения приведены на рис 2.4.

Данные рис. 2.4 свидетельствуют о том, что существует две группы формул, расчетные значения по которым значительно отличаются. К первой группе

относятся формулы Стокса та Архимеда, которые дают величины относительной скорости оседания u , которой не превышает 0,01 м/с. К другой группе относятся формулы ВНИИБТ, Риттингера и Уокера-Мейеза, где u принимает значения до 0,06 м/с. Однако это в любом случае почти на порядок меньше, чем u по данным табл. 2.3.

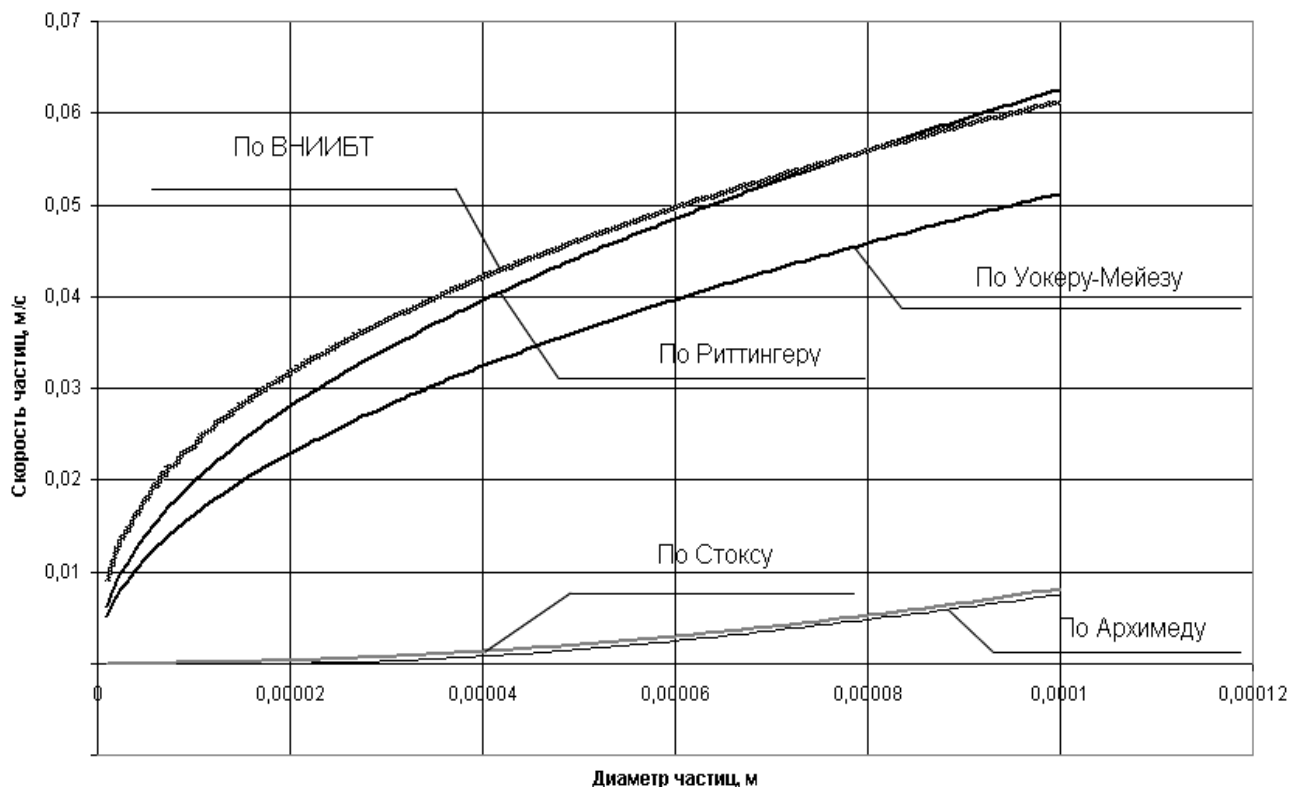


Рис. 2.4 Зависимость скорости оседания частичек, характерных для алмазного бурения, от их диаметра

На рис. 2.5 и 2.6 представлены расчетные зависимости скоростей оседания частичек размером до $5 \cdot 10^{-3}$ м, что характерно для частичек шлама при твердосплавном и шарошечном бурении долотами геологоразведочного сортамента.

Данные расчетов (рис. 2.5) для твердосплавного бурения свидетельствуют о сохранении качественной зависимости скоростей оседания по разным формулам. Следует заметить, максимальные расчетные значения скорости $u=0,2$ м/с (формула Риттингера), только при крупности шлама в 0,001 м (1 мм) приближается к минимальной рекомендуемой скорости по табл. 2.3. Зона действия формулы Стокса ограничена значениями крупности шлама в $1,06 \cdot 10^{-4}$ м (рис. 2.3).

Зависимости скорости оседания частичек шлама при шарошечном бурении (рис. 2.6) носят одинаковый характер, хотя имеются численные расхождения.

Однако все расчетные значения скорости оседания значительно ниже, чем данные табл. 2.3. Только при крупности шлама в 5 мм расчетные скорости по

формулам Архимеда и Риттингера приближаются к минимальному значению (0,48 м/с) по данным табл. 2.3.

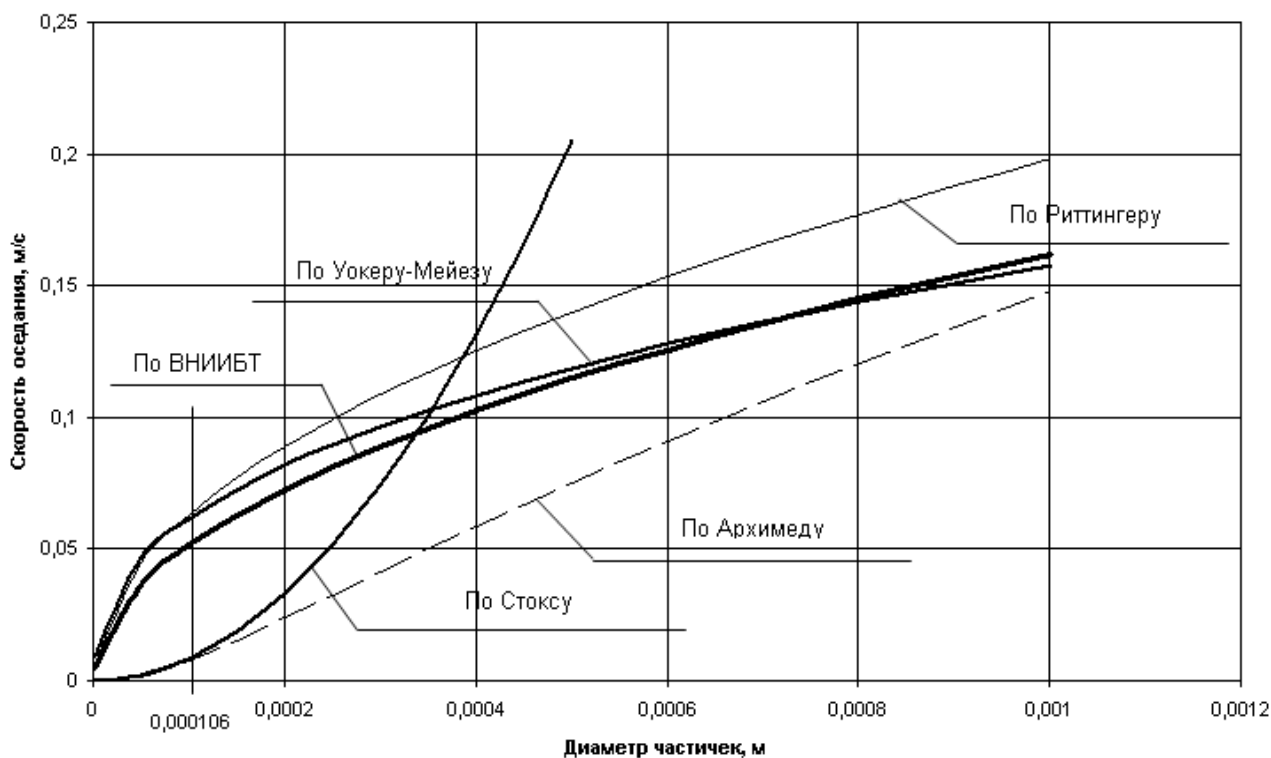


Рис. 2.5 Зависимость скорости оседания частичек, характерных для твердосплавного бурения, от их диаметра

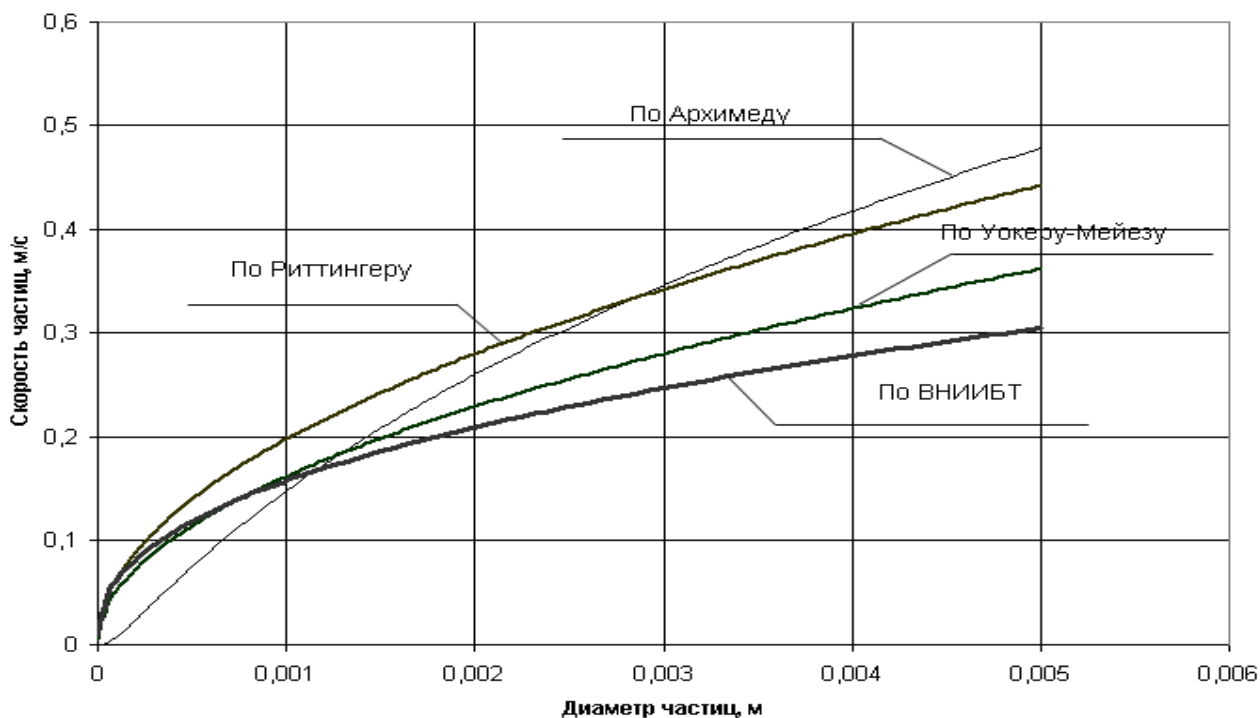


Рис. 2.6 Зависимость скорости оседания частиц, характерных для шарошечного бурения, от их диаметра

2.3 Определение скорости относительного движения керна

Закономерности движения твердого тела плохо обтекаемой формы (каким и является керн) в восходящем потоке промывочной жидкости в условиях малых зазоров между керном и трубой в настоящее время мало изучены, т.к. большинство исследователей в основном изучали транспорт бурового шлама по стволу скважин. В работе [82] рассматриваются вопросы транспортирования частиц горных пород в форме дисков, удлиненных частиц и их осколков.

Движение керна по внутреннему каналу бурильной колонны полностью характеризуется скоростью керна V_k , которая связанная со средней скоростью потока жидкости в трубе ω_0 соотношением:

$$V_k = \omega_0 - u_k, \quad (2.25)$$

где u_k – относительная скорость керна (относительно жидкости).

Таким образом, расчёт движения керна сводится к решению уравнения (2.25). В ВИГРе (Всероссийский институт методики и техники разведки), была рассмотрена задача о движении керна в восходящем потоке жидкости [61], при условии, что керн находится в состоянии равновесия, т.е. сумма всех действующих на керн сил равна нулю, движение жидкости и керна установившееся (рис. 2.7).

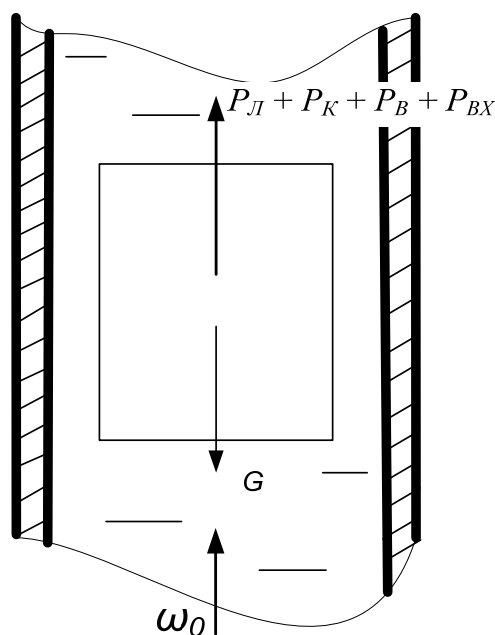


Рис. 2.7 Схема силовых отношений при движении керна к колонне труб

Следовательно, относительная скорость u_k находится из условия равновесия:

$$P_L + P_K + P_B = G \quad (2.26)$$

где P_L – сила лобового сопротивления, Н; P_K – сила гидравлического сопротивления в кольцевом зазоре между керном и трубой, Н; P_B – сила гидравлического сопротивления на выходе потока из кольцевого зазора «керн – труба», Н; G – собственный вес керна, погружённого в жидкость, Н.

$$P_n = C_x \cdot F_m \frac{\rho \cdot \omega_m^2}{2} = C_x \cdot F_m \frac{\rho}{2} (\omega_0 - V_k)^2 \frac{K_l^2}{(1 - \tau F)^2} \quad (2.27)$$

$$P_k = \frac{\lambda_k \cdot l}{d_2} \cdot F_m \cdot \frac{\rho \cdot (\omega_0 - V_k)^2}{2} \cdot \frac{1}{(1 - F)^2} \quad (2.28)$$

$$P_g = \xi \cdot F_m \cdot \frac{\rho \cdot (\omega_0 - V_k)^2}{2} \cdot \frac{1}{(1 - F)^2} \quad (2.29)$$

При подстановке в уравнение (2.26) выражений определяющих каждое из слагаемых и решении относительно u_k получена зависимость:

$$u_k = \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \frac{(1 - F)^2}{F^2 + C_x K_l^2 \left(\frac{1 - F}{1 - \tau F}\right)^2 + \frac{\lambda_{kn} \cdot l_k}{d_2}}} \quad (2.30)$$

где ρ_k и ρ – плотность керна и промывочной жидкости соответственно, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; l_k – длина керна, м; F – отношение площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна F_m ; C_x – коэффициент лобового сопротивления тела, зависящий от формы тела и параметра Рейнольдса (рис. 2.8); K_l – коэффициент неравномерности скорости потока по его сечению, зависящий от параметра Рейнольдса; τ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние формы тела и стеснения поперечного сечения трубы; λ_{kn} – безразмерный коэффициент сопротивления по длине керна; d_2 – гидравлический диаметр канала, м.

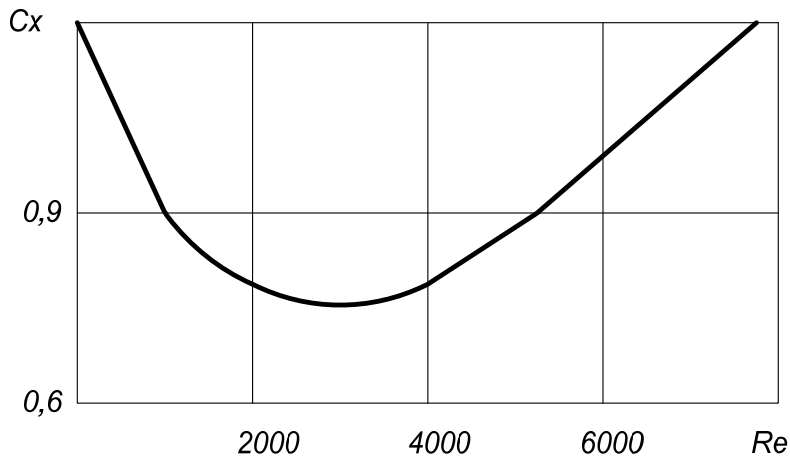


Рис. 2.8 К определению коэффициента лобового сопротивления C_x [83]

$$F_0 = \frac{\pi d_2^2}{4}, \quad (2.31)$$

где d_2 – внутренний диаметр центрального канала, м.

$$F_m = \frac{\pi d_k^2}{4}, \quad (2.32)$$

где d_k – диаметр керна, м.

В табл. 2.4 приведены значения отношения площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна F_m для образцов породы, диаметр которых лежит в пределах $d_k = 0,038 \div 0,042$, что характерно для большинства геологических разрезов, изучаемых с помощью комплексов КГК – 100(300).

Таблица 2.4

Значения отношения площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна F_m

F_m	0,00113	0,00107	0,00102	0,00096	0,00091	0,00085	0,0008	0,000875	0,00071	0,00067	0,00062
F_0	0,0014										
F	0,807	0,764	0,729	0,686	0,69	0,607	0,571	0,536	0,507	0,479	0,443

Необходимо отметить, что в формуле (2.30) не учтена сила гидравлического сопротивления на входе потока в кольцевой зазор «кern – труба» P_{BX} , определяемая формулой Вейсбаха:

$$P_{BX} = \xi \cdot F_m \frac{\rho}{2} (\omega_0 - V_k)^2 \frac{l}{(1-F)^2}, \quad (2.33)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления; для случая турбулентного течения зависит только от отношения площадей узкого и широкого сечений F_{kn} и F_0 соответственно и вычисляется по формуле:

$$\xi = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{F_{kn}}{F_0}\right)^2 = 0,5 \cdot \left[1 - \frac{(F_0 - F_m)}{F_0}\right]^2 = 0,5 \cdot (F)^2. \quad (2.34)$$

После соответствующих преобразований формула (2.30) имеет вид:

$$u_k = \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \frac{(1-F)^2}{F^2 + 0,5(F)^2 + C_x K_l^2 \left(\frac{1-F}{1-\tau F}\right)^2 + \frac{\lambda_{kn} \cdot l_k}{d_s}}}. \quad (2.35)$$

Следовательно, с учетом силы гидравлического сопротивления на входе потока в кольцевой зазор «кern – труба» P_{BX} , уравнение (2.26) переписывается следующим образом:

$$P_L + P_K + P_B + P_{BX} = G. \quad (2.36)$$

2.4 Некоторые экспериментальные сведения о движении керна по двойной бурильной колонне

При бурении скважин с гидротранспортом керна скорость его подъема зависит от скорости восходящего потока очистного агента. Теоретически скорость движения керна по восходящей магистрали можно определить, решив систему уравнений, регламентирующую перепады давлений в кольцевом сечении, образованном кернам и внутренним каналом кернаподъемной магистрали,

а также на торце керна, необходимых для удержания его во взвешенном состоянии, что было наглядно показано в подразделе 2.1.

Экспериментальными исследованиями в стендовых условиях установлено, что при разности в диаметрах транспортного канала керна, равной 3 – 10 мм, зависимость между скоростью подъема образцов V_k и скоростью движения жидкости ω_0 (при $0,8 \text{ м/с} < \omega_0 < 1,7 \text{ м/с}$) выражается линией, близкой к прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом около 60° .

Приведем пример, для одного из образцов ($\rho_k=2550 \text{ кг/м}^3$; $d_k=25,5 \text{ мм}$) скорость потока жидкости в кольцевом пространстве между трубой и керном, удерживающая его во взвешенном состоянии при зазоре $\delta = 3,5 \text{ мм}$, $Re \approx 10^4$ и $\lambda_{кп} = 0,05$, составляет 1,3 м/с. При этом скорость потока в керноподъемной магистрале исходя из условий неразрывности потока, составит 0,47 м/с.

Также исследования показали, что образец с приведенными параметрами двигался со скоростью 0,18 м/с при скорости потока жидкости в трубе 0,62 м/с. Следовательно, скорость потока, необходимая для удержания данного образца во взвешенном состоянии, должна составить 0,44 м/с. Таким образом, погрешность в определении скорости экспериментальным и аналитическим путем равна 0,03 м/с или 6,4 %. С увеличением скорости восходящего потока наблюдается сближение ее со скоростью движения керна [84 – 88].

Приведенные данные свидетельствуют, что с увеличением скорости восходящего потока соотношение V_k/ω_0 изменяется в сторону увеличения, причем возрастание плотности образцов не нарушает этой тенденции.

Практические наблюдения за бурением скважин свидетельствуют, что при скоростях восходящего потока в бурильной колонне более 2 м/с скорость движения керна близка к скорости движения потока. Объясняется это тем, что помимо гидравлических сопротивлений, воздействующих на керн, необходимо учитывать гидравлические сопротивления на входе потока в кольцевой зазор между керном и каналом труб $P_{ВХ}$, а также на выходе из него $P_{В}$. Возрастание скорости движения потока до определенной величины приводит к его турбулизации и образованию завихрений на входе в зазор между керном и транспортным каналом труб. В этих условиях мгновенные (элементарные) приращения скорости могут привести к тому, что $P_{ВХ}$ становится определяющим в суммарной величине перепада давления на транспортировку керна, поэтому периодически возникает «поршневой эффект», при котором скорость движения керна приближается к скорости движения потока в транспортном канале.

В диапазоне скоростей потока 0,4 – 0,9 м/с на графике относительного движения керна имеется перегиб, характерный для движения всех испытанных образцов и обусловленный, видимо, изменением режима движения жидкости от ламинарного к турбулентному, при котором скорость движения образцов возрастает вследствие завихрений потока, а затем интенсивность приращения скорости подъема керна несколько стабилизируется.

Рассчитанные значения критерия Рейнольдса для образцов диаметров 27,5 и 29,3 мм, поднимающихся по трубе диаметром 32 мм, составили для скоростей восходящего потока 0,62 и 0,83 м/с соответственно $(1,01 \div 1) 10^4$ и $(1,32$

÷ 3) 10^4 . Известно, что поток является ламинарным при значениях числа Re от $2,4 \cdot 10^3$ до 10^4 . При скорости движения воды в трубе, равной 0,62 м/с, происходит изменение характера режима потока от ламинарного к турбулентному, поскольку значения Re для образцов составляют 10^4 и $1,01 \cdot 10^4$. При повышении скорости движения жидкости турбулизация потока возрастает. Если $V_k \approx \omega_0$, то такую скорость можно считать «эффективной», так как она определяет время движения образцов к поверхности. Дальнейшее увеличение ω_0 в транспортном канале приводит к существенному увеличению гидравлических сопротивлений в бурильной колонне и неоправданным затратам мощности на привод насосного оборудования при незначительном сокращении времени подъема керна. Для бурильных колонн с транспортным каналом 35 – 54 мм эффективные значения скоростей восходящего потока находятся в пределах 2,5 – 2,8 м/с.

Минимальная скорость восходящего потока может быть определена из условия обеспечения выноса шлама по видоизмененной формуле Риттингера или П.П. Шумилова. При использовании технической воды она находится в пределах 0,8 – 1,2 м/с.

Общие потери давления на подъем керна к поверхности не являются причиной для ограничения глубины бурения. При длине образцов породы 100 мм, глубине скважины 100 м и скорости бурения 100 м/ч образцы будут отделяться от забоя через каждые 3,6 с и двигаться к поверхности с интервалом 3,6 м. Скорость движения жидкости в зазоре между керном и трубой составит около 2,3 м/с, а перепад давления на одном образце будет равен 0,052 МПа. При этом общие потери давления на подъем всех образцов, одновременно движущихся к поверхности (около 30 шт.), составят 0,15 МПа.

При бурении скважин с гидротранспортом керна используется буровая установка с подвижным вращателем, позволяющим осуществлять наращивание труб без отрыва снаряда от забоя, что обеспечивает вынос всех образцов на поверхность и почти полностью исключает возможность их потери в результате выпадения на забой и разбуривания. Если же технические средства не позволяют осуществлять наращивания бурильных труб без отрыва породоразрушающего инструмента от забоя, то при проведении этой операции керн, не вынесенный на поверхность, может выпасть из труб и осложнить последующее дохождение до забоя. В этом случае перед наращиванием инструмента необходимо осуществлять закачивание промывочной жидкости в объеме, достаточном для выноса всего керна на поверхность или подъема его на высоту, с которой образцы не успеют опуститься на забой скважины.

Если известно время T наращивания трубы, скорость подъема керна V_k и скорость его опускания u_k в заполненных водой трубах, то можно определить время T_{II} , необходимое для прокачивания жидкости с целью подъема керна на необходимую высоту перед наращиванием инструмента.

Как правило, продолжительность основных операций (бурение, наращивание) с увеличением глубины скважины не меняется, в то же время ожидание выноса керна на глубине 300 м становится сопоставимым с временем углубки интервала на величину бурильной трубы и в 5 – 6 раз превышает затраты вре-

мени на наращивание очередной трубы. Это объясняется не только увеличением длины транспортного канала, но и большими потерями очистного агента с ростом глубины, необходимостью снижения количества закачиваемой в скважину жидкости из-за высоких гидравлических сопротивлений, а также возрастанием частоты подклинок керна. При глубине скважины 400 м время ожидания полного выноса керна на поверхность составляет 15 – 16 мин, что в 2 – 3 раза превышает затраты времени на углубку интервала. Скорости опускания образцов u_k сравнительно невелики (0,3 – 0,5 м/с), а операция «наращивание» на установках с подвижным вращателем независимо от глубины занимает не более 1,5 мин, поэтому если перед наращиванием очередной трубы керн в колонне будет поднят на определенную высоту, то между ним и следующим столбиком керна появятся интервалы, по которым можно осуществлять привязку керна к глубине скважины. Из условий привязки керна к определенному интервалу, которая в основном производится по длине колонны бурильных труб, необходимо чтобы T_{II} обеспечивало высоту подъема керна, как минимум вдвое превышающую интервал опускания керна за время наращивания очередной трубы. Если это время принять равным 90 с, то для предотвращения опускания на забой керна его следует поднять на высоту, как минимум, 50 м. Приняв двойной запас этой величины, можно получить четкие интервалы, разделяющие «порции» керна, получаемые после углубки одной трубы [84 – 88].

При промышленных испытаниях комплекса КГК – 300 установлено, что в скважинах глубиной свыше 300 м, пробуренных с неполным подъемом керна (когда время ОВК искусственно сокращалось до 50 с и часть керна оставалась в бурильной колонне), между моментами поступления керна при углубке предыдущей и последующей труб существует промежуток времени в 25 – 30 с. Точность привязки образцов к интервалам глубин по перерывам в поступлении керна составляла 0,2 – 0,6 м (по данным геофизических исследований). Если указанная точность удовлетворяет потребителя, таким технологическим приемом можно пользоваться для сокращения затрат времени на ожидание выноса керна при бурении глубоких скважин. В основном же при бурении с гидротранспортом керна привязка образцов к истинной глубине их залегания осуществляется по длине бурильной колонны, трубы которой изготовлены с точностью ± 5 см, после полного подъема образцов на поверхность. В большинстве случаев интервал углубки, после которого осуществляется полный подъем образцов на поверхность, привязка их к глубине составляет 2 – 4 м, что обеспечивает построение геологического разреза с точностью 0,15 – 0,40 м [84 – 88].

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

1. Приведены основные обзорные сведения по гранулометрическому составу продуктов разрушения образующихся при бурении скважин различным породоразрушающим инструментом.
2. Дан исчерпывающий анализ основных аналитических зависимостей, определяющих гидравлическую программу промывки скважины.

3. Показаны существенные расхождения в результатах расчетов скоростных соотношений по различным формулам и методикам, что позволяет сказать о их принципиальном отличии как в отношении взглядов на механизм транспортировки продуктов разрушения, так и условий их применения. Приведенные графические данные наглядно иллюстрируют отмеченные обстоятельства.

4. Проанализирована формула определения относительной скорости керна u_K , полученная на основании закономерностей движения образцов породы цилиндрической формы в стесненных условиях, внутри круглого канала.

5. Указано на некоторое несоответствие формулы определения относительной скорости керна u_K реальным условиям движения образцов цилиндрической формы внутри двойной бурильной колонны.

6. Получена новая зависимость, определяющая относительную скорость керна u_K с учетом всех параметров перепада давления на транспортировку керна.

7. Изучены основные технологические методы и приемы ведения процесса бурения с применением комплексов с гидротранспортом керна, в приложении к которым будут вестись дальнейшие аналитические исследования и расчеты.

РАЗДЕЛ 3 КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЦИОНАЛЬНЫЙ РАСХОД ОЧИСТНОГО АГЕНТА

3.1 Учет формы и размеров частичек шлама при проектировании режима очистки

Несомненно, что форма и размер частиц шлама являются отправным пунктом при расчетах промывки скважины. Однако этому вопросу стали уделять большое внимание лишь в последние годы. Одни авторы считают, что частицы имеют пластинчатую форму, другие утверждают, что при бурении образуются частицы в виде октаэдров, третьи доказывают, что они имеют чечевицеобразную форму.

Тем не менее, до настоящего времени нет единой методики для установления определяющих параметров формы частиц бурового шлама.

К. Уильямс считает возможным при расчетах скоростей падения частиц шлама учитывать их форму с помощью параметра δ , характеризующего степень сплюснутости частиц и определяемого по формуле [4]

$$\delta = \frac{t}{d_0}, \quad (3.1)$$

где t – толщина частицы; d_0 – диаметр частицы.

Причем можно принимать в качестве d_0 – максимальный диаметр окружности, описанной около частицы, и в качестве t – толщину частицы, замеренную по нормали к плоскости этой окружности.

Назовем d_0 эквивалентным диаметром максимального миделева сечения. Величина δ может изменяться в широких пределах от величин, близких к единице у частиц объемной многогранной формы, до значений, близких к нулю в случае частиц пластинчатой формы.

Изучение шлама, отобранного при бурении на различных площадях, показало, что форма частиц его весьма различна. Но как ни разнообразна форма частиц шлама, ее всегда в какой – то мере можно уподобить определенной геометрической фигуре.

При этом следует помнить, что все мелкие шероховатости и углубления на поверхности частицы в процессе ее обтекания заполняются жидкостью, образующей неподвижный слой. Это придает частицам большую обтекаемость.

Как было показано выше, соотношение (2.14) получено из условия, что частицы разрушенной породы имеют шарообразную форму. Однако исследованиями процесса разрушения горных пород при бурении было выявлено, что частицы шлама имеют самую разнообразную форму.

К примеру, исследованиями [39 – 41] было показано, что основная масса породы находящейся впереди резца твердосплавной коронки, отделяется сравнительно крупными элементами пластинчатой формы. Исследования проводились при величине заглубления резца равной 1,0; 1,5; 2,0 мм. Пластинчатая форма продуктов разрушения имела место при всех трех величинах заглубления резца, причем крупность пластинок увеличивалась с увеличением заглуб-

ления резца. Соотношение сторон пластинок колебалось в пределах 1:3:6 – 1:4:10.

Действительно частицы шлама при твердосплавном бурении имеет форму пластины, у которой одно измерение значительно больше двух других. Шлам скважин алмазного и шарошечного бурения также характеризуется большим разнообразием форм. Но как ни разнообразна форма частиц шлама, ее всегда в какой-то мере можно уподобить определенной геометрической фигуре.

Обратившись к выражению (2.13) напомним, что соотношение $\sqrt{\frac{4g}{3C}}$ обозначенное через K , получено из геометрических характеристик шарообразного тела, а именно K является, кроме прочего, функцией проекции поверхности тела в форме шара на нормаль к вектору скорости.

С помощью коэффициента K учитывают различные формы частиц шлама, среди которых выделяют четыре основные: шар, куб, диск или цилиндр и параллелепипед. Нетрудно заметить, что K также является функцией коэффициента сопротивления C , который необходимо знать, чтобы определить K . В свою очередь C является функцией числа Рейнольдса. В работе [44] приводится графическая зависимость $C = f(Re)$ для определения значения коэффициента C для различных геометрических форм (рис. 3.1). Однако использовать эту зависимость не представляется возможным, т.к. необходимо заведомо знать скорость погружения частицы.

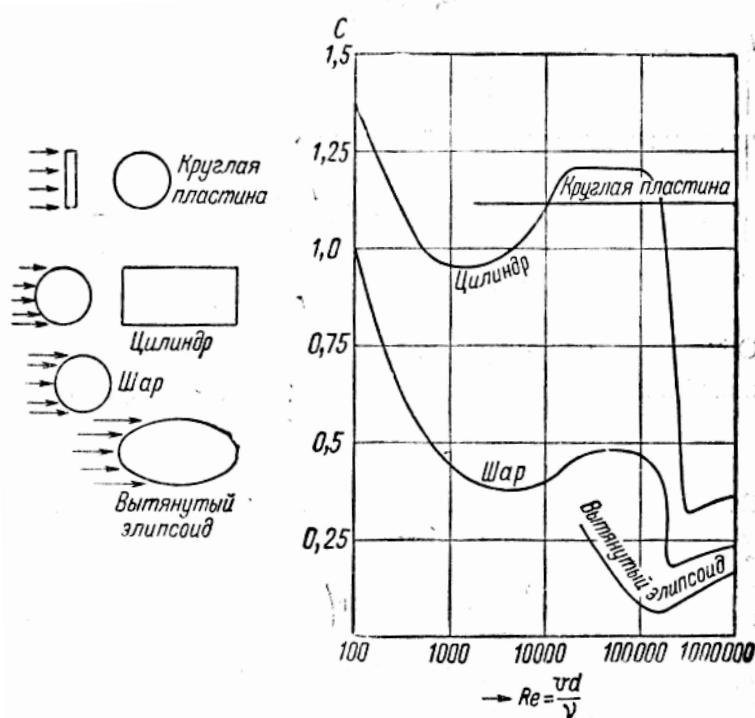


Рис. 3.1 Диаграмма определения коэффициента C в зависимости от числа Рейнольдса [44]

В работе [89] приводятся численные значения коэффициента C (табл. 3.1), при оседании частиц в воде, для условий гидротранспорта.

Следует отметить, что значения коэффициента C значительно расходятся со значениями C , приведенными на рис. 3.1, кроме того в указанной работе не указаны критерии выбора того или иного значения коэффициента.

Таблица 3.1

Значения коэффициента C для некоторых тел

Шар с гладкой поверхностью	0,38 – 0,44
Шар с шероховатой поверхностью	0,62 – 0,66
Куб	1,0 – 1,2
Гравий хорошо окатанный	0,8 – 1,3
Уголь кусковой, кубообразной формы, окатанный	1,0 – 1,4
Порода кусковая, кубообразной формы	1,1 – 1,5

Для расчета гидротранспорта в [89] предлагается пользоваться не зависимостью $C = f(Re)$ для шара (рис. 3.1), а непосредственно зависимостью величины C от размера транспортируемого материала. Эта зависимость находится путем подстановки в уравнение (2.9) величины u из выражения числа Рейнольдса

$$u = \frac{\nu Re}{d}, \quad (3.2)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

В результате подстановки

$$C = \frac{4g}{3Re^2 \nu^2} d^2 \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right). \quad (3.3)$$

Задаваясь значениями C и определяя величины Re по графику (рис. 3.1), можно вначале получить зависимость $C = f(d)$ в виде таблицы, а затем построить график. На рис. 3.2 показаны зависимости $C = f(d)$ для шара и частиц угля полученные указанным способом.

В работе [6] приведены непосредственно значения коэффициента K : для шарообразных частиц $K = 4,5 - 5,1$; для округлых и компактных $K = 3,5 - 4,5$; для частиц удлиненной формы $K = 2,0 - 3,5$.

Очевидно, что

$$C = \frac{4}{3} \frac{g}{K^2}. \quad (3.4)$$

Подставляя вышеприведенные значения значения K в формулу (3.4) мы получим значения коэффициента C . Для шарообразных частиц $C = 0,8 - 0,5$; для округлых и компактных $C = 1,07 - 0,8$; для частиц удлиненной формы $C = 3,27 - 1,07$.

Отметим, что специальными исследованиями [89] было установлено, что при малых (менее 10) значениях критерия Re частицы падают «ребром». При больших значениях Re падение всех частиц происходит в таком положении, при котором достигаются минимальные затраты энергии, а они обычно связаны с малой скоростью движения частиц. Иными словами, в первом случае частица разворачивается при оседании так, чтобы плоскость ее минимального миделе-

вого сечения располагалось горизонтально, во втором случае нормально вектору скорости расположено ее максимальное миделево сечение.

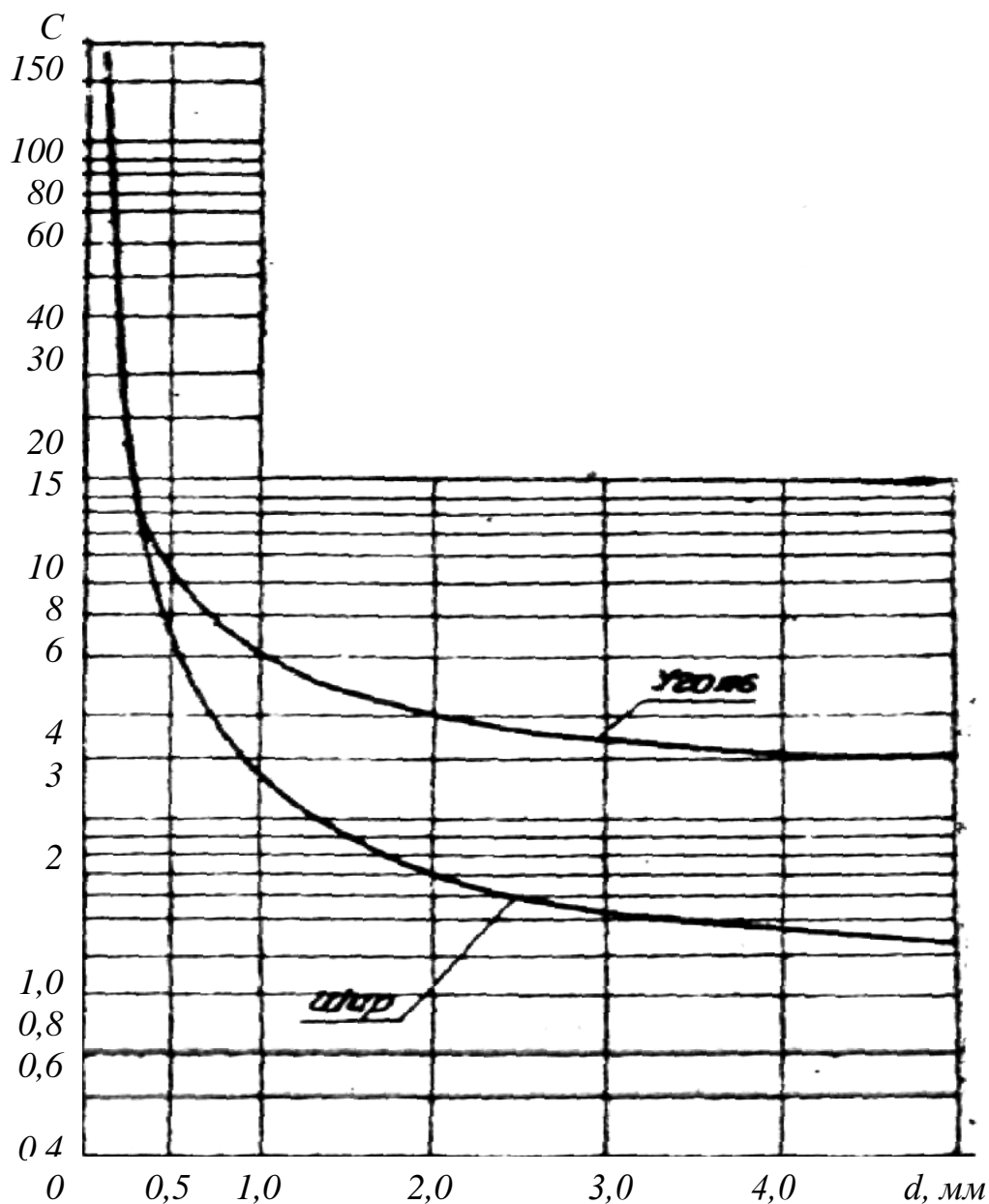


Рис. 3.2 Зависимость коэффициента сопротивления C от размеров твердых тел [89]

Сказанное является достаточным обоснованием того, что не правомерно в формуле (2.10) заменять значение V – выражением для определения объема шара, а значение f – выражением для определения площади окружности, при расчете скорости оседания частиц, форма которых отличается от шарообразной.

В случае определения скорости оседания частиц шарообразной формы во всех случаях, она будет выражаться соотношением (2.13).

Для дальнейших рассуждений необходимо введение понятия характерный размер частицы

$$l = \frac{V}{f}. \quad (3.5)$$

Тогда зависимость для определения скорости оседания частиц примет вид

$$u = \sqrt{l \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}} \quad (3.6)$$

При определении скорости оседания частиц в форме куба, диска (под диском понимается цилиндр с высотой меньшей, чем диаметр основания), цилиндра или параллелепипеда, как было показано выше, возможны два случая оседания частиц. В табл. 3.2 приведены возможные варианты ориентации частиц различной формы при оседании в жидкости и формулы для определения площадей горизонтальных проекций и объемов оседающих частиц [90 – 91].

Таблица 3.2

Некоторые зависимости характеризующие процесс оседания частиц различной формы

Форма частицы	Элемент геометрии формы частицы, который расположен перпендикулярно вектору скорости	Формула для определения площади проекции частицы на горизонтальную плоскость	Формула для определения объема оседающей частицы	Примечания
Куб	Грань	$f = a^2$	$V = a^3$	a – длина грани куба, м
	Ребро	$f = a^2 \sqrt{2}$		
Диск (цилиндр)	Основание	$f = \frac{\pi d_o^2}{4}$	$V = \frac{\pi d_o^2}{4} H$	d_o – диаметр основания диска (цилиндра), м, H – высота диска (цилиндра), м
	Образующая	$f = d_o H$		
Параллелепипед	Основание	$f = cd$	$V = cdh$	c и d – длина сторон прямоугольника лежащего в основании параллелепипеда, м, h – высота ребра параллелепипеда, м
	Грань	$f = dh$		

В табл. 3.3 приведены значения характерных размеров l различных по геометрическим параметрам частиц и формулы для определения скорости оседания частиц с учетом их формы (по данным гранулометрии продуктов разрушения буровых скважин) [90].

Таблица 3.3

Значения характерных размеров частиц и формулы для определения скорости их оседания

Форма частицы	Элемент геометрии формы частицы, который расположен перпендикулярно вектору скорости	Характерный размер l	Формула для определения скорости оседания частиц
Куб	Грань	$l = a$	$u = \sqrt{a \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
	Ребро	$l = a\sqrt{2}$	$u = \sqrt{a\sqrt{2} \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
Диск (цилиндр)	Основание	$l = H$	$u = \sqrt{H \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
	Образующая	$l = \frac{\pi d_o}{4}$	$u = \sqrt{\frac{\pi d_o}{4} \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
Параллелепипед	Основание	$l = h$	$u = \sqrt{h \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
	Грань	$l = c$	$u = \sqrt{c \left(\frac{\rho}{\rho_{ж}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$

Следует отметить, что полученные аналитические выражения могут быть использованы не только в практических расчетах строительства скважин, но также они будут полезны и в смежных отраслях, например в обогащении полезных ископаемых, гидравлическом транспортировании и т.д.

3.2 Анализ методик определения расхода очистного агента

Рациональный расход очистного агента, подаваемого на забой скважины, должен обеспечивать наилучшие результаты бурения в данных геолого-технических условиях. При выборе рационального расхода должна учитываться вся совокупность воздействия очистного агента на процессы на забое и в стволе скважины, его положительные и отрицательные влияния.

При бурении с использованием жидких очистных агентов охлаждение породоразрушающего инструмента обеспечивается при самых малых расходах промывочной жидкости и не определяет минимум расхода. Минимальный расход в этом случае выбирается из условия очистки забоя и выноса шлама по стволу скважины.

В настоящее время используются три критерия для определения минимального расхода промывочной жидкости: величина скорости восходящего потока, удельный расход на 1 мм диаметра коронки; конкретные значения расхода для каждого типа и размера породоразрушающего инструмента и свойств буримых пород. Скорость восходящего потока очистного агента $V_{ж}$, которая обеспечивает вынос шлама с забоя скважины, определяют по формуле 2.3, а необходимый расход очистного агента Q определяют по формуле 2.22. Скорость u в формуле (2.3) вычисляют по формуле (2.13).

Кроме того, на практике используют рекомендации по скорости восходящего потока промывочной жидкости (табл. 2.2).

Скорость выноса частиц $V_{ч}$ должна обеспечить достаточную чистоту кольцевого пространства ствола скважины, которая зависит от допускаемого обогащения объема промывочной жидкости в кольцевом пространстве скважины частицами твердого тела, что в свою очередь зависит от механической скорости бурения. Поэтому эту величину также следует определять по формуле [92]

$$V_{ч} = \frac{f_3 V_M (\rho - \rho_{жс})}{f_{кп} \lambda_{кп} (\rho_{кп} - \rho)}, \quad (3.7)$$

где f_3 и $f_{кп}$ – площади сечения забоя и кольцевого пространства между стенками скважины и бурильными трубами соответственно, m^2 ; V_M – механическая скорость бурения, m/c ; $\lambda_{кп}$ – коэффициент, учитывающий винтообразное движение частиц в восходящем потоке в процессе бурения; $\rho_{кп}$ – плотность промывочной жидкости в кольцевом пространстве, kg/m^3 .

Согласно рекомендациям [3], разность плотностей нисходящего и восходящего потока очистного агента не должна превышать $10 kg/m^3$ для воды, а для глинистого раствора она находится в пределах $20 - 30 kg/m^3$.

При проектировании режима промывки также широко используют рекомендуемые значения удельного расхода промывочной жидкости на 1 мм диаметра породоразрушающего инструмента. Необходимую подачу насоса в этом случае определяют из следующего соотношения

$$Q = q_y D_n, \quad (3.8)$$

где q_y – удельный расход жидкости на 1 мм диаметра породоразрушающего инструмента, $л/мин$; D_n – наружный диаметр породоразрушающего инструмента, $мм$.

В табл. 3.4 приведены значения рекомендуемого удельного расхода промывочной жидкости $л/мин$ на 1 мм диаметра, для твердосплавных коронок [93].

Таблица 3.4

Рекомендуемые значения удельного расхода промывочной жидкости, $л/мин$

Категория пород по буримости	Конструкции коронок		
	Ребристые	Резцовые	Самозатачивающиеся
I – II	0.8 – 1.4	–	–
III – IV	1.2 – 1.6	1.2 – 1.6	–
V	–	0.8 – 1.6	0.8 – 1.4
V – VI	–	0.8 – 1.2	0.8 – 1.2
VII – VIII	–	0.6 – 0.8	0.6 – 0.8

В табл. 3.5 – 3.6 приведены значения рекомендуемых расходов промывочной жидкости при твердосплавном бурении [94], рассчитанные на основе необходимых скоростей восходящего потока в затрубном пространстве (табл. 2.2) и по удельным расходам на 1 мм диаметра коронки (табл. 3.4).

Таблица 3.5

Значения расхода промывочной жидкости, рассчитанные из условия создания необходимой скорости в затрубном пространстве, л/мин

Диаметр коронки, мм	Тип промывочной жидкости	
	Вода	Глинистый раствор
151	265 – 635	212 – 529
132	189 – 454	151 – 378
112	144 – 346	115 – 288
93	86 – 207	69 – 173
76	47 – 112	37 – 94
59	8 – 19	6 – 16
46	5 – 12	4 – 10

Таблица 3.6

Значения расхода промывочной жидкости, рассчитанные по удельному расходу на 1 мм диаметра коронки, л/мин

Диаметр коронки	Категория пород по буримости							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Ребристые								
151	121 – 211	121 – 211	181 – 242	181 – 242	–	–	–	–
132	106 – 185	106 – 185	158 – 211	158 – 211	–	–	–	–
112	90 – 157	90 – 157	134 – 179	134 – 179	–	–	–	–
93	74 – 130	74 – 130	112 – 149	112 – 149	–	–	–	–
Резцовые								
151	–	–	181 – 242	181 – 242	121 – 242	121 – 182	121 – 182	91 – 121
132	–	–	158 – 211	158 – 211	106 – 211	106 – 158	108 – 158	79 – 106
112	–	–	134 – 179	134 – 179	90 – 179	90 – 134	90 – 134	67 – 90
93	–	–	112 – 149	112 – 149	74 – 149	74 – 112	74 – 112	56 – 74
76	–	–	91 – 132	91 – 132	61 – 122	61 – 91	61 – 91	46 – 61
59	–	–	71 – 94	71 – 94	47 – 94	47 – 71	47 – 71	35 – 47
46	–	–	55 – 74	55 – 74	37 – 74	37 – 55	37 – 55	28 – 37
Самозатачивающиеся								
112	–	–	–	–	90 – 157	90 – 134	90 – 134	67 – 90
93	–	–	–	–	74 – 130	74 – 112	74 – 112	59 – 74
76	–	–	–	–	61 – 106	61 – 91	61 – 91	46 – 61
59	–	–	–	–	47 – 83	47 – 71	47 – 71	35 – 47
46	–	–	–	–	37 – 64	37 – 55	37 – 55	28 – 37

Как видно из данных табл. 3.5 и 3.6 величины расходов жидкости, полученные из условия обеспечения необходимой скорости в затрубном пространстве в 2 – 3 раза превышают таковые, полученные по рекомендациям табл. 3.4 (удельный расход на 1 мм диаметра коронки). С уменьшением диаметра коронки наблюдается обратное – значения величин расходов полученных по рекомендациям удельного расхода на 1 мм коронки значительно выше величин расходов полученных из условия обеспечения необходимой скорости в затрубном пространстве. Существенные расхождения в величинах расходов сохраняются и при сравнении их значений, рекомендуемых для алмазного и шарошечного бурения [93].

В табл. 3.7 приведены результаты расчета $V_{\text{ч}}$ по формуле (3.7) для скважины одноколонной конструкции буримой с применением твердосплавной, алмазной коронок и шарошечного долота диаметром 76 мм. Значение ρ принято равным 2500 кг/м^3 , плотность глинистого раствора составляет 1200 кг/м^3 .

Таблица 3.7

Результаты расчета скорости выноса шлама для скважины одноколонной конструкции, буримой с применением твердосплавной, алмазной коронок и шарошечного долота диаметром 76 мм, с промывкой водой и глинистым раствором, м/с

Тип агента	Породо-разрушающий инструмент	Категория пород по буримости											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Вода	Твердосплавная коронка	1,52	0,74	0,45	0,25	0,17	0,12	0,11	–	–	–	–	–
	Алмазная коронка	–	–	–	–	–	0,33	0,32	0,26	0,16	0,1	0,065	0,033
	Шарошечное долото	1,52	0,74	0,45	0,25	0,17	0,12	0,11	0,09	0,056	0,035	0,023	0,012
Глинистый раствор	Твердосплавная коронка	0,53	0,26	0,16	0,09	0,06	0,04	0,038	–	–	–	–	–
	Шарошечное долото	0,53	0,26	0,16	0,09	0,06	0,04	0,038	0,031	0,019	0,012	0,008	0,004

Данные табл. 3.7 свидетельствуют о том, что рекомендуемые исходные данные для расчета $V_{\text{ч}}$ не соответствуют практике. Так, например, при бурении шарошечным долотом в породах VIII категории по буримости и промывке водой, скорость выноса частиц шлама на поверхность составляет 0,09 м/с. При данной скорости выноса, шлам, при глубине скважины 1000 м, начнет поступать на поверхность только по прошествии 3 часов после начала бурения. Расчетная скорость выноса частиц шлама снижается с ростом категории породы по буримости. Значения $V_{\text{ч}}$ при бурении с промывкой водой несколько выше, чем при промывке глинистым раствором.

Шлам буровых скважин представлен частицами разных размеров. Рядом исследователей установлены средние размеры частиц шлама, характерные для каждого вида породоразрушающего инструмента. Однако, следует отметить, что отдельные частицы на забое могут быть больше среднего размера в 3 – 5 раз. Последнее обстоятельство, по мнению специалистов, не оказывает заметного влияния на очистку скважины, так как эти более крупные частицы, поднимаясь над забоем, подвергаются воздействию боковых поверхностей вращающегося бурового снаряда, измельчаются и уже, затем транспортируются потоком очистного агента.

Значения средних размеров частиц шлама, характерных для каждого вида породоразрушающего инструмента приведены в табл. 3.8, кроме того в ней представлены результаты расчетов u , $V_{\text{ч}}$ и $V_{\text{ж}}$ для указанных размеров.

Таблица 3.8

Результаты расчета скоростей оседания, выноса частиц шлама и скорости восходящего потока очистного агента

Вид породоразрушающего инструмента	Средний размер частиц шлама, мм	u , м/с	$V_{\text{ч}}$, м/с	$V_{\text{ж}}$, м/с
Твердосплавная коронка	0,5	0,139	0,028 – 0,042	0,167 – 0,181
Алмазная коронка	0,075	0,054	0,011 – 0,016	0,065 – 0,07
Шарошечное долото	3,0	0,343	0,069 – 0,1	0,412 – 0,443

Как видно из данных табл. 3.8 $V_{\text{ч}}$ полученные по формуле Риттингера (2.14), для шлама твердосплавного и алмазного бурения ниже приведенных в табл. 3.7, и только значения скорости выноса частиц шлама при шарошечном бурении приближаются к данным табл. 3.7.

3.3 Влияния концентрации твердой фазы на величину расхода очистного агента

Из аналитических методов определения расхода очистного агента находит применение метод, основанный на определении объема доли твердых частиц $C_{\text{ТВ}}$, исходя из соотношения между их объемом и объемом жидкости в кольцевом пространстве [3]:

$$C_{\text{ТВ}} = \frac{D_{\text{с}}^2}{D_{\text{с}}^2 - d_{\text{БТ}}^2} \frac{V_{\text{М}}}{V_{\text{ч}}}, \quad (3.9)$$

Из (3.9) мы можем получить выражение для определения абсолютной скорости движения частицы

$$V_{\text{ч}} = \frac{D_{\text{с}}^2}{D_{\text{с}}^2 - d_{\text{БТ}}^2} \frac{V_{\text{М}}}{C_{\text{ТВ}}}. \quad (3.10)$$

В отношении выбора максимально допустимой объемной доли шлама существуют следующие рекомендации [95]. Если промывочной жидкостью служит вода или другие ньютоновские жидкости максимальная объемная доля

шлама составляет 0,02, при промывке скважины глинистым раствором или другими неньютоновскими жидкостями $C_{ТВ}=0,05$.

Согласно [81] имеем следующие значения абсолютной скорости движения V_q (табл. 3.9), полученные в соответствии с рекомендуемыми скоростями восходящего потока [80].

Таблица 3.9

Рекомендуемые абсолютные скорости движения частиц

Породоразрушающий инструмент	Абсолютная скорость движения частиц при промывке, м/с	
	водой	глинистым раствором
Твердосплавные коронки	0,05 – 0,12	0,04 – 0,1
Алмазные коронки	0,1 – 0,16	–
Шарошечные долота	0,12 – 0,16	0,08 – 0,12

В табл. 3.10 представлены значения средних размеров частиц шлама характерных для каждого вида породоразрушающего инструмента и расчетные значения u , V_q и $V_{ж}$ для указанных размеров, при условии промывки скважины водой ($\rho_{ж}=1000 \text{ кг/м}^3$) и глинистым раствором ($\rho_{ж}=1200 \text{ кг/м}^3$), значения ρ принято равным 2500 кг/м^3 .

Таблица 3.10

Расчетные значения скоростей оседания, выноса частиц шлама и скорости восходящего потока очистного агента при промывке скважины водой и глинистым раствором

Вид породоразрушающего инструмента	Средний размер частиц шлама, мм	u , м/с	V_q , м/с	$V_{ж}$, м/с
Промывка водой				
Твердосплавная коронка	0,5	0,139	0,028 – 0,042	0,167 – 0,181
Алмазная коронка	0,075	0,054	0,011 – 0,016	0,065 – 0,07
Шарошечное долото	3,0	0,343	0,069 – 0,1	0,412 – 0,443
Промывка глинистым раствором				
Твердосплавная коронка	0,5	0,119	0,024 – 0,036	0,143 – 0,155
Шарошечное долото	3,0	0,291	0,058 – 0,087	0,349 – 0,378

Обозначив в выражениях (3.9) и (3.10) соотношение $\frac{D_c^2}{D_c^2 - d_{BT}^2}$ через m ,

получим:

$$C_{ТВ} = m \frac{V_M}{V_q} \tag{3.11}$$

и

$$V_q = m \frac{V_M}{C_{ТВ}} \tag{3.12}$$

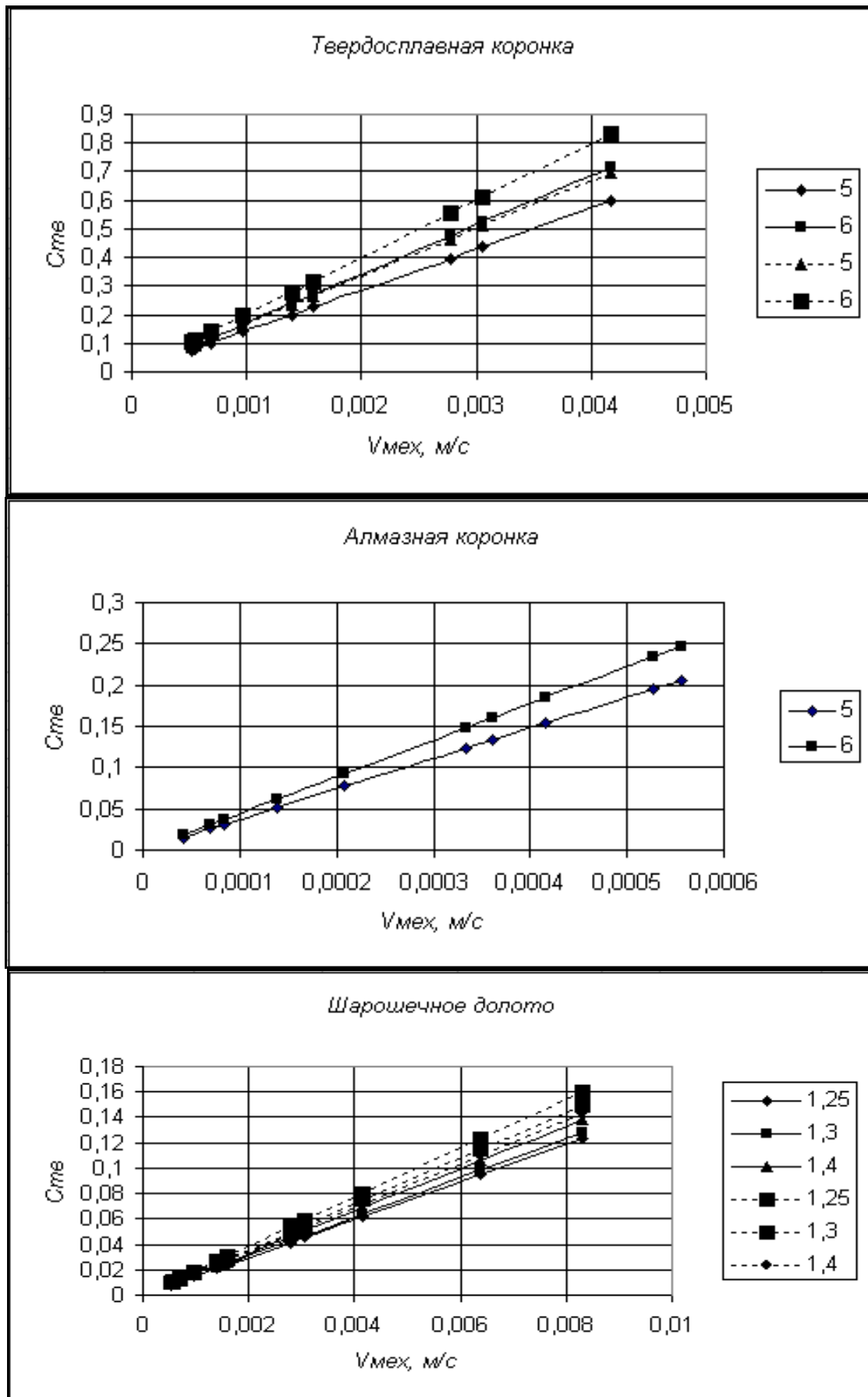


Рис. 3.3 Результаты расчета объемной доли частиц шлама в кольцевом пространстве исходя из скорости оседания

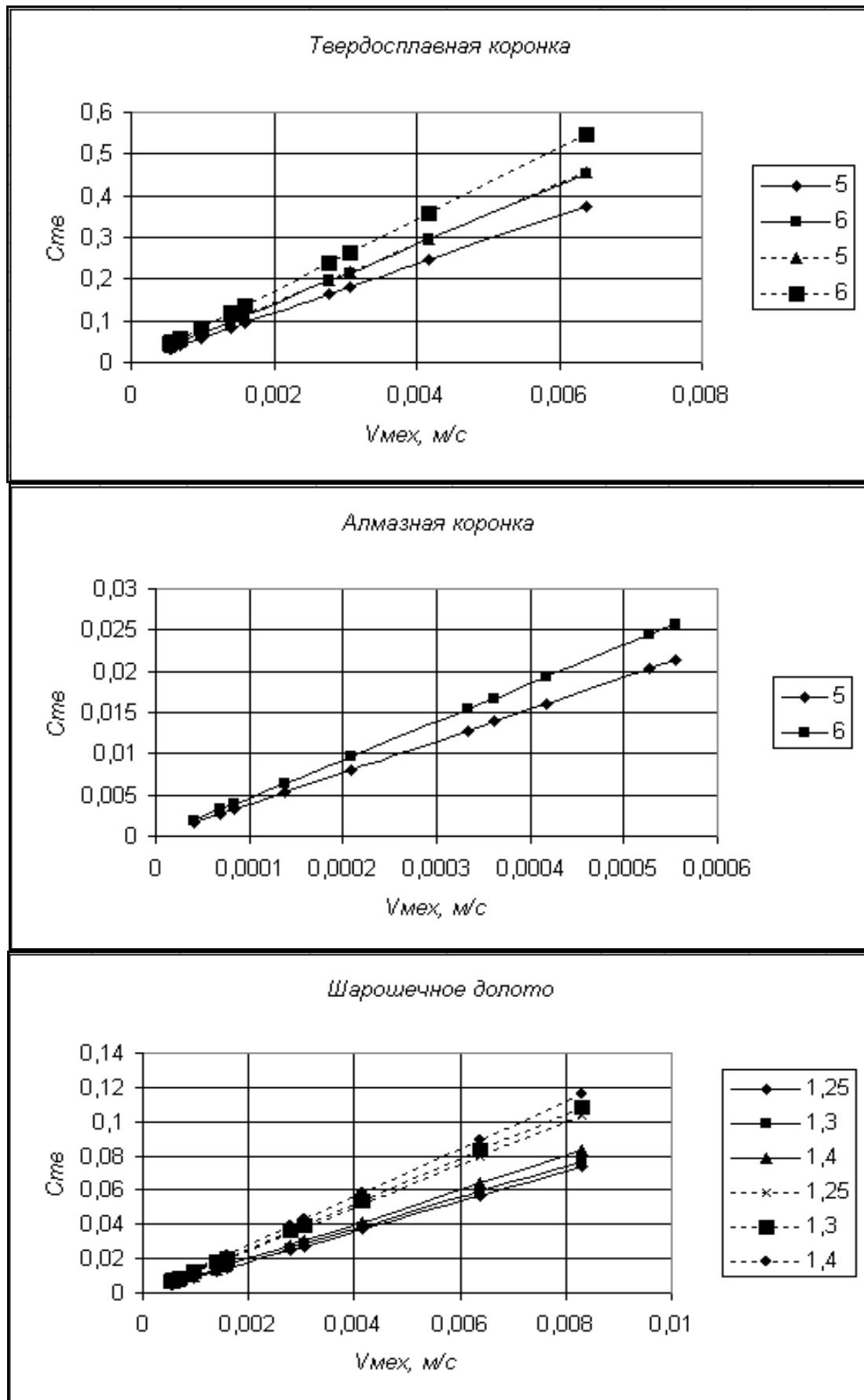


Рис. 3.4 Результаты расчета объемной доли твердых частиц шлама в кольцевом пространстве исходя из рекомендаций по скоростям восходящего потока

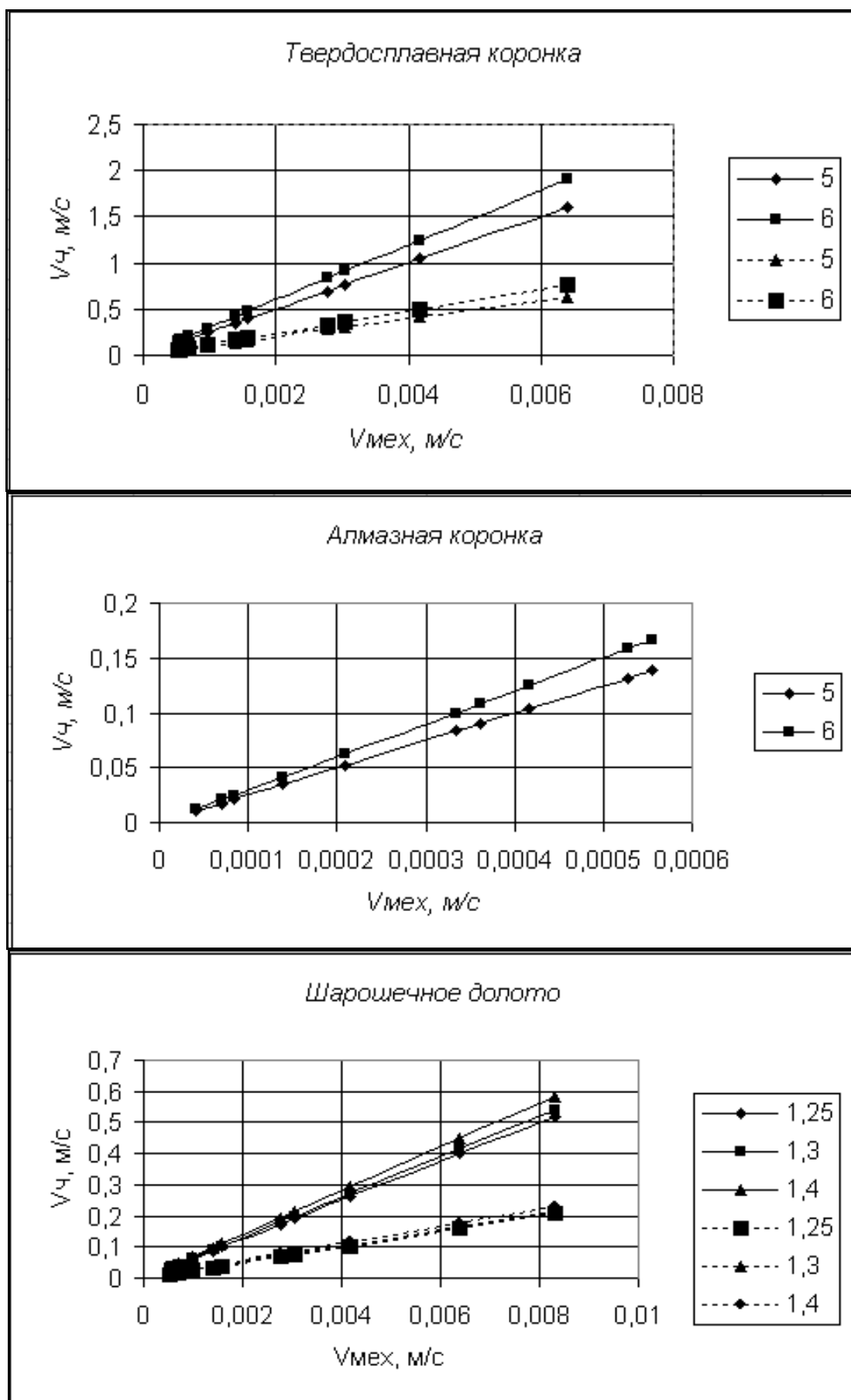


Рис. 3.5 Результаты расчета абсолютной скорости движения частиц шлама исходя из рекомендаций по предельно допустимой объемной доле шлама в кольцевом пространстве

Для скважин геологоразведочного бурения, проходимых шарошечными долотами m находится в пределах $1,25 \div 1,4$, а проходимых алмазными и твердосплавными коронками m составляет $5 \div 6$ [96 – 97].

Таким образом, объемная доля твердых частиц в жидкости, находящейся в кольцевом пространстве определяется соотношением диаметров скважины и бурильных труб, механической скоростью бурения и абсолютной скоростью движения частиц шлама, определенной либо соотношениями (2.3), (2.14) и (2.21), либо рекомендациями по необходимой скорости восходящего потока (табл. 2.2).

На рис. 3.3 и 3.4 представлены результаты расчета объемной доли твердых частиц ($C_{ТВ}$) для различных значений m , в зависимости от механической скорости бурения, характерной для каждого отдельного вида (в соответствии с категорией по буримости). Расчеты выполнены из условия, что бурение шарошечными долотами осуществляется в породах I – VII категорий по буримости, твердосплавными – в породах II – VII, алмазными – в породах VII – XII. Сплошными линиями показаны зависимости полученные при условии промывки скважины ньютоновской жидкостью, пунктирной – при промывке глинистым раствором.

Данные рис. 3.3 и 3.4 свидетельствуют о том, что с ростом механической скорости бурения доля частиц шлама в растворе значительно превосходит рекомендуемые значения. В случае определения объемной доли частиц шлама в кольцевом пространстве исходя из скорости оседания (см. рис. 3.3), только в породах XII категории, проходимых алмазными коронками и в породах IV – VII (при промывке водой), а также в породах III – VII (при промывке глинистым раствором) проходимых шарошечными долотами, наблюдается соответствие рекомендуемым значениям $C_{ТВ}$.

При определении объемной доли твердых частиц в кольцевом пространстве исходя из рекомендаций по скоростям восходящего потока (см. рис. 3.4), полное соответствие рекомендациям в отношении $C_{ТВ}$ наблюдается при алмазном бурении. Для твердосплавного бурения $C_{ТВ}$ превосходит рекомендуемые значения в случае промывки водой и только в породах VI – VII категорий по буримости, при промывке глинистым раствором, $C_{ТВ}$ лежит в рекомендуемых пределах. При шарошечном бурении $C_{ТВ}$ выходит за пределы только при бурении в породах I – III категорий по буримости, при промывке водой и в породах I – II, при промывке глинистым раствором.

На рис. 3.5 представлены результаты расчета абсолютной скорости движения частиц шлама ($V_{\text{ч}}$), в зависимости от механической скорости бурения, с учетом предельно допустимой объемной доли шлама в кольцевом пространстве, для различных значений m .

Данные расчетов (см. рис. 3.5) свидетельствуют о том, что значение абсолютной скорости движения частиц шлама полученные исходя из предельно допустимого содержания твердых частиц в кольцевом пространстве не соответствуют как значениям $V_{\text{ч}}$ полученным исходя из скорости оседания, так и полученным исходя из рекомендуемых скоростей восходящего потока [98].

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

1. Детально проанализированы исходные данные и условия формулирования основных соотношений, определяющих механизм движения твердых частиц в жидкости.

2. Рассмотрены вопросы гидравлической транспортировки частиц разрушенной горной породы с учетом их формы, размера и некоторых физико-механических характеристик.

3. Получена группа формул определяющих скорости движения частиц шлама, максимально учитывающих как форму, так и размер продуктов разрушения буровых скважин, одинаково пригодных и для условий гравитационного обогащения полезных ископаемых, гидравлического транспортирования и т.д.

4. Изучены методики определения скоростных характеристик потока очистного агента, основанные на определенных механогидравлических взаимодействиях в системе «породоразрушающий инструмент – поток жидкости – насос».

5. Указан ряд несоответствий в формулах определения скорости движения частиц шлама реальным скважинным условиям, что свидетельствует об их специфичности и применимости только в соответствующих условиях, определяемых критерием рациональности.

РАЗДЕЛ 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КЕРНА ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

4.1 Характер влияния составляющих перепада давления на транспортировку керна

При бурении скважин с гидротранспортом керна в качестве очистного агента, при соответствующих характеристиках геологического разреза, используют воду. Как известно, вода относится к ньютоновским жидкостям, т.е. жидкостям, подчиняющимся закону вязкости Ньютона. Для таких жидкостей различают два режима течения: ламинарный и турбулентный. При первом режиме течения отдельные струйки жидкости движутся параллельно друг другу, не перемешиваясь. Эпюра скоростей при ламинарном режиме движения представляет собой равнобокую параболу. В центре трубы скорость максимальна, у стенок равна нулю. Второй режим движения протекает с активным смешиванием струй потока [99]. Переход от одного режима движения к другому и обратно совершается при определенной средней скорости потока – критической. При этом следует различать верхнюю и нижнюю критическую скорости. Последняя соответствует случаю, когда жидкость, двигаясь в трубах любой шероховатости, сохраняет только ламинарное движение без перемешивания частиц, т.е. когда средняя скорость потока ньютоновской жидкости меньше нижней критической. Причем устойчивой формой течения является – ламинарная. Наоборот, при скоростях выше верхней критической возможно только одно турбулентное движение, как бы спокойно не входила жидкость в трубу и какими бы гладкими ни были ее стенки.

В промежутке между этими двумя пределами возможны как ламинарный, так и турбулентный режимы движения.

В уравнение (2.35) входит слагаемое $\frac{\lambda_{кп} \cdot l_k}{d_e}$, определяющее величину гидравлических сопротивлений в кольцевом зазоре «кern – труба».

Безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda_{кп}$ при промывке ньютоновской жидкостью можно рассчитать по формуле Блазиуса [100]:

$$\lambda_{кп} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_{кп}}}, \quad (4.1)$$

где $Re_{кп}$ – безразмерный параметр Рейнольдса, определяющий режим течения ньютоновской жидкости в кольцевом пространстве:

$$Re_{кп} = \frac{V_{кк} (D_e - d_k)}{\nu} \quad (4.2)$$

где $V_{кк}$ – скорость потока относительно керна в кольцевом зазоре, м/с; D_e – внутренний диаметр наружных труб, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, м/с².

Формула (4.1) дает удовлетворительные значения $\lambda_{кп}$ для чисел Рейнольдса лежащих в диапазоне $1 < Re < 10^5$.

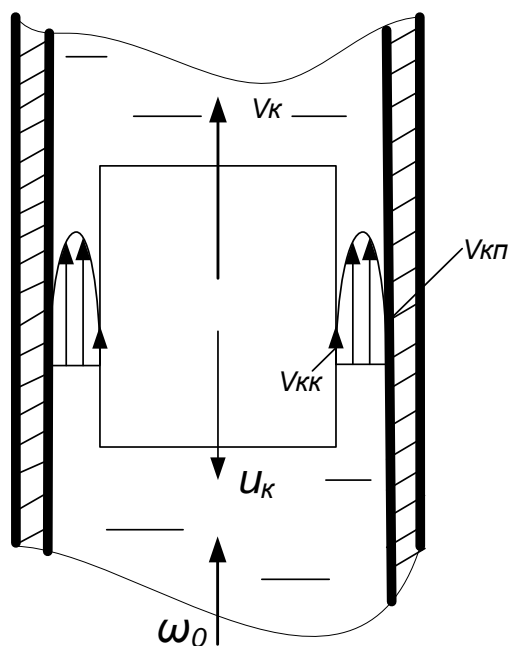


Рис. 4.1 Схема распределения скоростей при движении керна в восходящем потоке промывочной жидкости

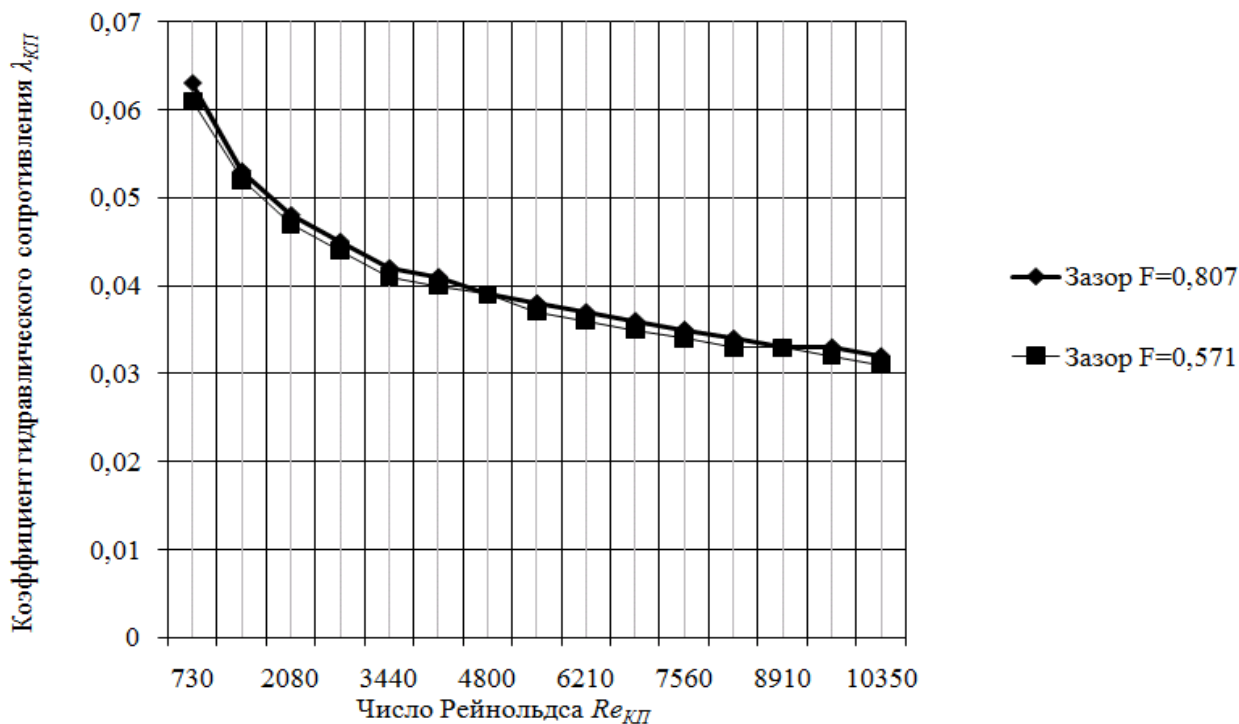


Рис. 4.2 Зависимость $\lambda_{кп} = f(Re_{кп})$ при $F = 0,807; 0,571$, очистной агент – вода (ньютоновская жидкость)

На рис. 4.1 показана полностью схема распределения скоростей в кольцевом пространстве образованном внутренней трубой двойной буровой колонны и керна при движении его в восходящем потоке промывочной жидкости, а также на рис. 4.2 представлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{кп}$ от числа Рейнольдса $Re_{кп}$ при граничных зазорах F ($F = 0,807; 0,571$).

Для большей наглядности и возможности адекватной оценки циркуляционных характеристик потока в табл. 4.1 – 4.7 приведены гидравлические параметры движения ньютоновской жидкости и образцов ядра.

Расчеты выполнены в широком диапазоне значений относительной скорости ядра u_k , скоростей потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$ и скоростей потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$.

Значительный объем табличной информации необходим для правильного и обоснованного суждения о конкретных гидравлических характеристиках потока ньютоновской жидкости.

Таблица 4.1

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,807$

Относительная скорость ядра u_k , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,31	0,16	640	0,063
2,12	2,43	0,31	1240	0,053
2,09	2,56	0,47	1880	0,048
2,06	2,68	0,62	2480	0,045
2,03	2,81	0,78	3120	0,042
2,0	2,93	0,93	3720	0,041
1,97	3,06	1,09	4360	0,039
1,94	3,18	1,24	4960	0,038
1,91	3,31	1,4	5600	0,037
1,88	3,43	1,55	6200	0,036
1,85	3,56	1,71	6840	0,035
1,82	3,69	1,87	7480	0,034
1,79	3,81	2,02	8080	0,033
1,76	3,94	2,18	8720	0,033
1,73	4,06	2,33	9320	0,032

Таблица 4.2

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,764$

Относительная скорость ядра u_k , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,28	0,13	650	0,063

Относительная скорость зерна u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно зерна $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно зерна $\lambda_{КП}$
2,12	2,37	0,25	1250	0,053
2,09	2,47	0,38	1900	0,048
2,06	2,57	0,51	2550	0,045
2,03	2,67	0,64	3200	0,042
2,0	2,76	0,76	3800	0,041
1,97	2,86	0,89	4450	0,039
1,94	2,96	1,02	5100	0,038
1,91	3,05	1,14	5700	0,037
1,88	3,15	1,27	6350	0,036
1,85	3,25	1,4	7000	0,035
1,82	3,35	1,53	7650	0,034
1,79	3,44	1,65	8250	0,033
1,76	3,54	1,78	8900	0,033
1,73	3,64	1,91	9550	0,032

Таблица 4.3

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов зерна при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади зерна $F = 0,729$

Относительная скорость зерна u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно зерна $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно зерна $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,26	0,11	660	0,062
2,12	2,34	0,22	1320	0,052
2,09	2,42	0,33	1980	0,047
2,06	2,5	0,44	2640	0,044
2,03	2,58	0,55	3300	0,042
2,0	2,66	0,66	3960	0,04
1,97	2,74	0,77	4620	0,039
1,94	2,83	0,89	5340	0,037
1,91	2,91	1,0	6000	0,036
1,88	2,99	1,11	6660	0,035
1,85	3,07	1,22	7320	0,034
1,82	3,15	1,33	7980	0,033
1,79	3,21	1,42	8520	0,033
1,76	3,31	1,55	9300	0,032
1,73	3,39	1,66	9960	0,032

Таблица 4.4

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов зерна при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади зерна $F = 0,686$

Относительная скорость зерна u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно зерна $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно зерна $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,25	0,1	700	0,062
2,12	2,31	0,19	1330	0,052
2,09	2,38	0,29	2030	0,047
2,06	2,44	0,38	2660	0,044
2,03	2,51	0,48	3360	0,042
2,0	2,57	0,57	3990	0,04
1,97	2,64	0,67	4690	0,039
1,94	2,7	0,76	5320	0,037
1,91	2,77	0,86	6020	0,036
1,88	2,84	0,96	6720	0,035
1,85	2,9	1,05	7350	0,034
1,82	2,97	1,15	8050	0,033
1,79	3,03	1,24	8680	0,033
1,76	3,1	1,34	9380	0,032
1,73	3,16	1,43	10010	0,032

Таблица 4.5

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов зерна при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади зерна $F = 0,69$

Относительная скорость зерна u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно зерна $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно зерна $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,24	0,09	710	0,061
2,12	2,29	0,17	1350	0,052
2,09	2,35	0,26	2070	0,047
2,06	2,4	0,34	2720	0,044
2,03	2,46	0,43	3420	0,041
2,0	2,51	0,51	4080	0,04
1,97	2,57	0,6	4770	0,039
1,94	2,63	0,69	5490	0,037
1,91	2,68	0,77	6160	0,036
1,88	2,74	0,86	6840	0,035
1,85	2,79	0,94	7520	0,034

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
1,82	2,85	1,03	8240	0,033
1,79	2,9	1,11	8880	0,033
1,76	2,96	1,2	9600	0,032
1,73	3,02	1,29	10320	0,031

Таблица 4.6

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,607$

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,23	0,08	720	0,061
2,12	2,27	0,15	1360	0,052
2,09	2,32	0,23	2080	0,047
2,06	2,37	0,31	2790	0,044
2,03	2,41	0,38	3440	0,041
2,0	2,46	0,46	4140	0,04
1,97	2,5	0,53	4800	0,039
1,94	2,55	0,61	5520	0,037
1,91	2,6	0,69	6210	0,036
1,88	2,64	0,76	6880	0,035
1,85	2,69	0,84	7560	0,034
1,82	2,74	0,92	8280	0,033
1,79	2,78	0,99	8910	0,033
1,76	2,83	1,07	9630	0,032
1,73	2,88	1,15	10350	0,031

Таблица 4.7

Циркуляционные характеристики движения ньютоновской жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,571$

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–

Относительная скорость зерна u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно зерна $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно зерна $\lambda_{КП}$
2,15	2,22	0,07	730	0,061
2,12	2,26	0,14	1400	0,052
2,09	2,3	0,21	2100	0,047
2,06	2,34	0,28	2800	0,044
2,03	2,38	0,35	3500	0,041
2,0	2,42	0,42	4200	0,039
1,97	2,46	0,49	4900	0,038
1,94	2,5	0,56	5600	0,037
1,91	2,54	0,63	6300	0,036
1,88	2,58	0,7	7000	0,035
1,85	2,62	0,77	7700	0,034
1,82	2,66	0,84	8400	0,033
1,79	2,7	0,91	9100	0,032
1,76	2,74	0,96	9800	0,032
1,73	2,78	1,05	10500	0,031

Как видно из графика (рис. 4.2) и расчетных данных (табл. 4.1 – 4.7) значения и изменение величины коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого пространства «кern – труба» при изменении зазора F незначительны и при больших числах Рейнольдса величина его становится практически постоянной.

В табл. 4.8 приведены результаты расчёта относительной скорости зерна u_K с учётом различных параметров. Расчёты выполнены при условии, что $\rho_K = 2500$ кг/м³ (такая плотность характерна для большинства образцов, слагающих толщи осадочных и метаморфических пород).

Таблица 4.8

Относительные скорости зерна u_K с учётом разных параметров, определяющих перепад давления на транспортировку образцов породы

Величина зазора F	Учитываемый параметр в уравнении определения относительной скорости зерна			
	P_l	$P_l + P_v$	$P_l + P_v + P_k$	$P_l + P_v + P_k + P_{ex}$
0,807	0,22	0,20	0,20	0,19
0,764	0,31	0,28	0,28	0,27
0,729	0,38	0,35	0,34	0,33
0,686	0,47	0,44	0,43	0,41
0,65	0,55	0,54	0,49	0,47
0,607	0,64	0,59	0,57	0,56
0,571	0,71	0,66	0,64	0,62

Анализируя данные табл. 4.8, можно сделать вывод, что существенное влияние на относительную скорость зерна оказывают только силы лобового

сопротивления и гидравлического сопротивления на выходе потока из кольцевого зазора «кern – труба».

Следовательно, уравнение (2.35) можно представить в виде:

$$u_{\kappa} = \sqrt{\frac{\rho_{\kappa} - \rho}{\rho} - 2gl_{\kappa} \frac{(1-F)^2}{C_x K_I^2 \left(\frac{1-F}{1-\tau F}\right)^2 + F^2}}. \quad (4.3)$$

Указанная формула справедлива, когда длина керна не превышает 0,2 м, которая обеспечивается конструкцией кернолома.

4.2 Изучение влияния геометрических размеров керновой магистрали, плотности и длины образцов породы на скорость движения керна

При бурении скважин с двойной колонной бурильных труб, по центральному каналу транспортируется kern различной плотности и длины. Как указывается в ряде работ [46 – 48, 101], на практике линейный выход керна, при бурении по глинам и алевролитам, увеличивается в 5 – 6 раз. Исследование влияния указанных факторов на относительную скорость керна позволит правильно подбирать режим промывки скважины.

Известно, что в формулу определения относительной скорости керна при циркуляции ньютоновской жидкости (2.35, 4.3) входит составляющая ρ_{κ} – плотность керна. Характер влияния плотности керна на его относительную скорость показан в табл. 4.9.

Анализируя данные табл. 4.9 можно сделать вывод, что что относительная скорость керна u_{κ} возрастает как с увеличением плотности керна при постоянном F (отношении площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна F_m), так и при постоянной плотности с увеличением зазора «кern – труба», причем интенсивность нарастания u_{κ} в большей мере определяется именно увеличением зазора между кернам и внутренней трубой.

Таблица 4.9

Относительные скорости керна u_{κ} в зависимости от его плотности при циркуляции ньютоновской жидкости

Зазор F	Плотность керна ρ_{κ} , кг/м ³								
	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
0,807	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25
0,764	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,35
0,729	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,37	0,40	0,42	0,43
0,686	0,30	0,34	0,37	0,41	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54
0,65	0,39	0,39	0,43	0,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63
0,607	0,41	0,46	0,51	0,55	0,59	0,63	0,67	0,70	0,73
0,571	0,45	0,51	0,57	0,62	0,66	0,71	0,75	0,79	0,82

Графическое выражение влияния плотности зерна на его относительную скорость представлено на рис. 4.4.

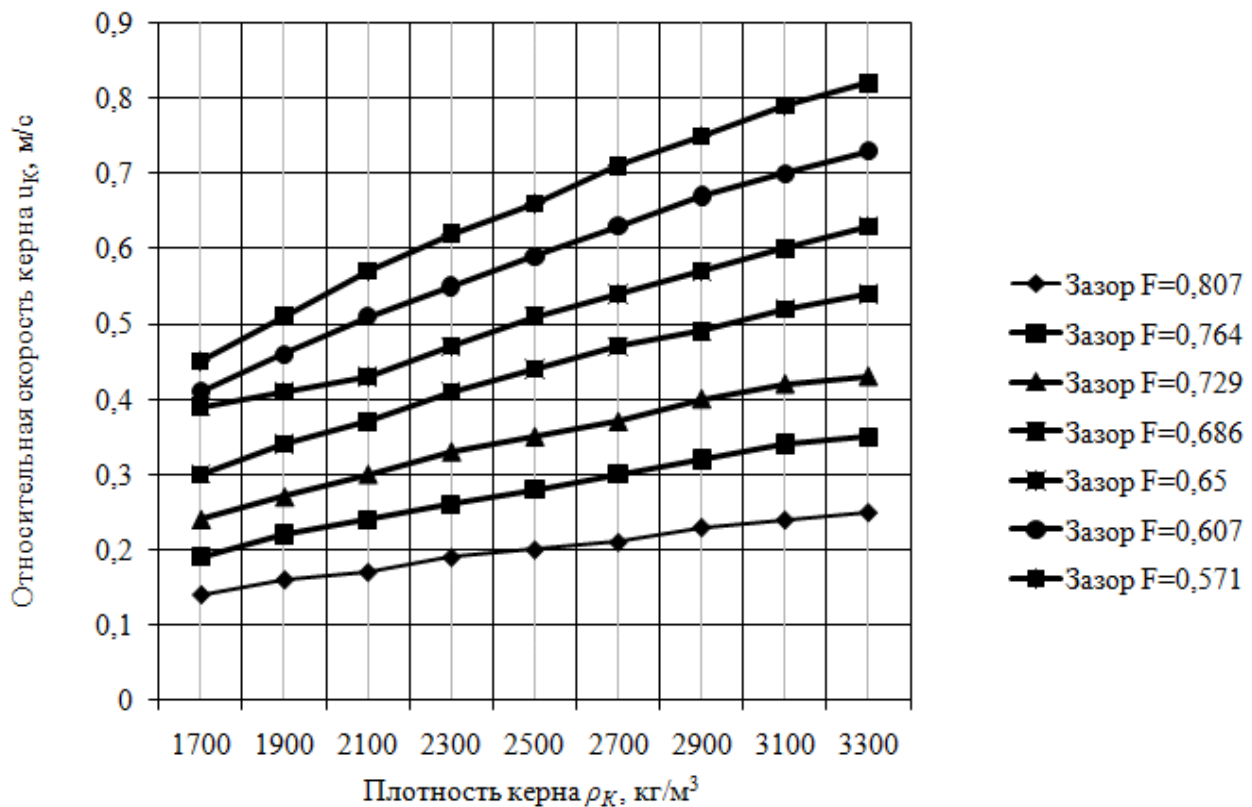


Рис. 4.3 Зависимость $u_K = f(\rho_K)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, очистной агент – вода

Таблица 4.10

Относительная скорость зерна u_K при промывке скважины водой

F	Длина зерна l_K , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0,20	0,25	0,28	0,32	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,47	0,49
	0,20	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,41	0,43	0,45
0,764	0,28	0,35	0,40	0,45	0,49	0,53	0,57	0,60	0,64	0,67	0,70
	0,28	0,34	0,38	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61
0,729	0,35	0,43	0,50	0,55	0,61	0,66	0,70	0,74	0,78	0,82	0,86
	0,34	0,41	0,47	0,52	0,56	0,60	0,64	0,67	0,70	0,72	0,75
0,686	0,44	0,54	0,62	0,69	0,76	0,82	0,88	0,93	0,98	1,03	1,07
	0,43	0,51	0,59	0,65	0,70	0,75	0,80	0,83	0,86	0,89	0,92
0,65	0,51	0,62	0,71	0,80	0,88	0,95	1,01	1,07	1,13	1,19	1,24
	0,49	0,59	0,68	0,74	0,81	0,86	0,91	0,95	0,99	1,03	1,06
0,607	0,59	0,73	0,84	0,94	1,03	1,11	1,18	1,26	1,32	1,39	1,45
	0,57	0,69	0,79	0,87	0,94	1,0	1,06	1,11	1,15	1,19	1,23
0,571	0,66	0,81	0,94	1,05	1,15	1,24	1,33	1,41	1,48	1,56	1,62
	0,64	0,78	0,88	0,97	1,05	1,12	1,18	1,24	1,29	1,33	1,38

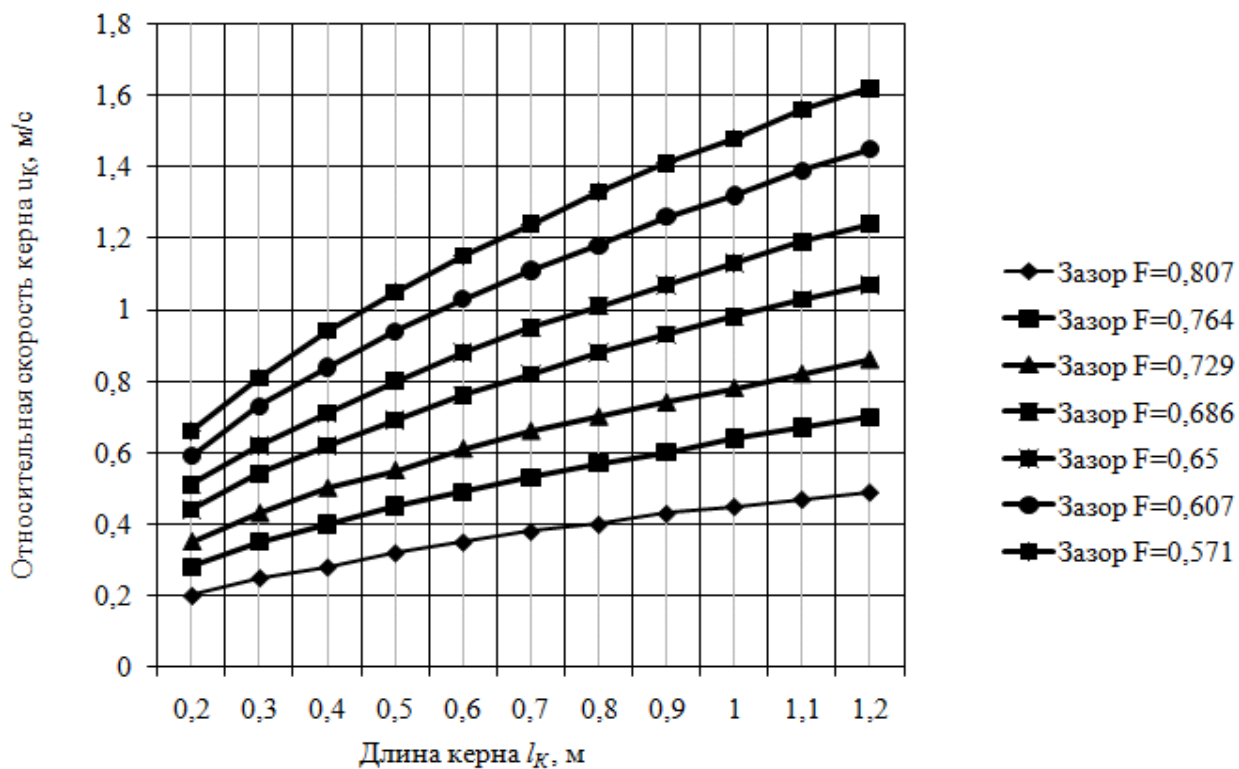


Рис. 4.4 Зависимость $u_K = f(l_K)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, с учетом P_L и P_B , очистной агент – вода

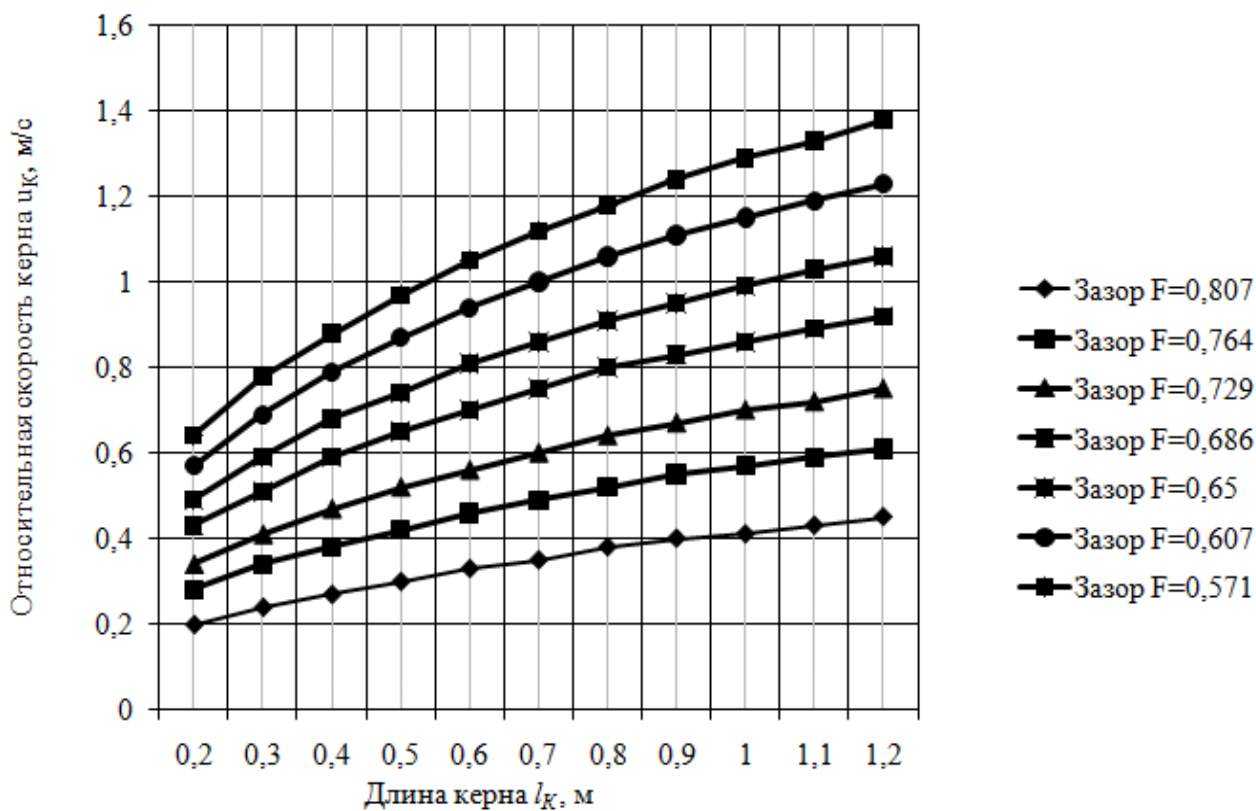


Рис. 4.5 Зависимость $u_K = f(l_K)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, с учетом P_L , P_B и P_K , очистной агент – вода

В табл. 4.10 и на рис. 4.4 – 4.5 приведены результаты расчетов относительной скорости керна при его переменной длине от 0,2 до 1,2 м, расчеты произведены с учетом промывки скважин ньютоновской жидкостью. Следует заметить, что аналитические расчеты были проведены с учетом влияния различных составляющих перепада давления на транспортировку керна.

По результатам приведенных данных можно сделать вывод, что по мере роста зазора F и собственно длины керна относительная скорость последнего увеличивается; в тоже время наибольшее влияние на рост u_k оказывает именно параметр F .

Как указывалось выше, формула расчета относительной скорости керна (4.3) справедлива, когда длина транспортируемого образца не превышает 0,2 м. В результате расчетов были получены формулы для определения относительной скорости керна u_k , при длине образцов породы превышающей 0,2 м.

$$u_k = m \cdot \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \frac{(1 - F)^2}{C_x K_I^2 \left(\frac{1 - F}{1 - \tau F}\right)^2 + F^2}}, \quad (4.4)$$

где m – поправочный коэффициент, зависящий от длины транспортируемого керна, значения которого приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12

Поправочный коэффициент m

Тип очистного агента	Длина керна l_k , м					
	0,2 – 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 0,9	0,9 – 1,0	1,0 – 1,1	1,1 – 1,2
Вода	0,96	0,92	0,9	0,88	0,87	0,86

Коэффициент m физически характеризует вклад силы P_K в относительную скорость керна u_k (табл. 4.13).

Таблица 4.13

Процентный вклад силы P_K в относительную скорость керна u_k

F	Длина керна l_k , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0	4	4	6	6	8	5	7	9	9	8
0,764	0	3	5	7	6	8	9	8	11	12	13
0,729	3	5	6	6	8	9	9	10	10	12	13
0,686	2	6	5	6	8	9	9	11	12	14	14
0,65	4	5	4	8	8	10	10	11	12	13	15
0,607	3	6	6	7	9	10	10	12	13	14	15
0,571	3	4	6	8	9	10	11	12	13	15	15

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4

1. Изучен характер влияния составляющих перепада давления (P_L, P_K, P_B, P_{BX}) на скорость транспортировки керна при промывке скважин вязкой жидкостью.

2. Показана зависимость безразмерного коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{кп}$ (относительно керна) от величины числа Рейнольдса ($Re_{кп}$), определяющего режим движения жидкости, в данном случае, в кольцевом зазоре.

3. Расчетами показано, что $\lambda_{кп}$ является функцией нескольких переменных, определяющими из которых являются F (отношение площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна F_m) и $Re_{кп}$. Причем, $Re_{кп}$ здесь выступает как результат скоростных соотношений в паре «кern – поток жидкости». Кроме того, значительных изменений $\lambda_{кп}$ претерпевает только при изменении скорости течения жидкости в кольцевом зазоре между керном и трубой, увеличение же самого кольцевого зазора влияние на значение $\lambda_{кп}$ практически не оказывает.

4. Сравнительным анализом доказано, что определяющими параметрами в величине относительной скорости керна u_k являются силы: P_L – сила лобового сопротивления и P_B – сила гидравлического сопротивления на выходе потока из кольцевого зазора «кern – труба». Это обстоятельство позволило получить уточненную формулу определения u_k , которая отличается простотой и возможностью получения скоростных характеристик образцов породы без принятия определенных значительных допущений.

5. Изучено влияние геометрических размеров керновой магистрали, плотности и длины образцов породы на скорость движения керна u_k . Расчетами показано, что относительная скорость керна возрастает как с увеличением плотности керна при постоянном F , так и при постоянной плотности с увеличением зазора «кern – труба», причем интенсивнее скорость керна растет с увеличением зазора между керном и внутренней трубой. Следовательно, для обеспечения бесперебойной транспортировки образцов породы значительной плотности необходимо стремиться к минимальной величине кольцевого зазора между керном и трубой. Оценено влияние на относительную скорость керна u_k длины образцов породы. Доказано, что рост зазора F и длины керна l_k вызывает увеличение относительной скорости образцов породы, однако наибольшее влияние на величину амплитуды u_k оказывает именно параметр F . Данное обстоятельство свидетельствует о том, что эффективная транспортировка кернового материала возможна только при его определенной длине ($l_{max} = \text{const}$), для некоторой величины поперечного размера образцов, и как следствие зазора F .

6. В результате расчетов получена формула, определяющая относительную скорость керна u_k для образцов породы, длина которых лежит в интервале $0,2 \div 1,2$ м.

РАЗДЕЛ 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КЕРНА ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ

5.1 Вклад в относительную скорость керна составляющих перепада давления на транспортировку образцов породы

Промывочные жидкости для бурения с гидротранспортом керна в осложненных условиях должны обладать высокой несущей способностью при сравнительно небольшой вязкости, низким фильтрационным расходом и хорошими кольматирующими свойствами; кроме того, по мере усложнения геологических условий, появления в разрезе неустойчивых пород и увеличения глубин, возникает необходимость применения специальных жидкостей к которым, прежде всего, относятся глинистые растворы (неньютоновские жидкости).

Характер движения неньютоновских (вязкопластичных) жидкостей имеет ряд специфических особенностей. Благодаря наличию структуры, движение таких жидкостей начинается только тогда, когда величина приложенного внешнего давления становится больше некоторого определенного значения [102].

При малых скоростях движения очистного агента в пространстве под торцом коронки может установиться ламинарный режим.

При критическом значении параметра $Re_{кп}^*$ ламинарный режим переходит в турбулентный, при котором профиль скоростей характеризуется более быстрым нарастанием скоростей у поверхности забоя, а затем и более равномерным их распределением.

Режим движения вязкопластичных жидкостей в кольцевом пространстве «кern – труба» характеризуется приближенно с помощью обобщенного параметра Рейнольдса:

$$Re_{кп}^* = \frac{V_{кк} \cdot (D_K - d_K)}{\eta + \tau_0 \cdot \frac{D_B - d_K}{6V_{кк}}}, \quad (5.1)$$

где η – структурная или пластическая вязкость, Па·с; τ_0 – предельное динамическое напряжение сдвига, Па.

Безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda_{кп}^*$ при промывке глинистым раствором рассчитывают по формуле Е.М. Соловьева [103]:

$$\lambda_{кп}^* = \frac{14,6}{(Re_{кп}^*)^{0,9}}, \quad (5.2)$$

На рис. 5.1 показана зависимость коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{кп}^*$ от числа Рейнольдса $Re_{кп}^*$ при предельных зазорах F .

Характер влияния режима движения жидкости, иными словами $Re_{кп}^*$ на величину коэффициента $\lambda_{кп}^*$ аналогичен таковому при промывке скважин ньютоновской жидкостью; из графика видно, что значение $\lambda_{кп}^*$ увеличивается с ростом зазора «кern – труба», а при больших числах Рейнольдса становится прак-

тически незначительным. Важно также следующее – величина $\lambda_{кп}^*$ значительна только при малых числах Рейнольдса.

Более наглядно о приведенных выше фактах свидетельствуют данные табл. 5.1 – 5.7, в которых приведены циркуляционные характеристики движения ядра в вязкопластичной жидкости.

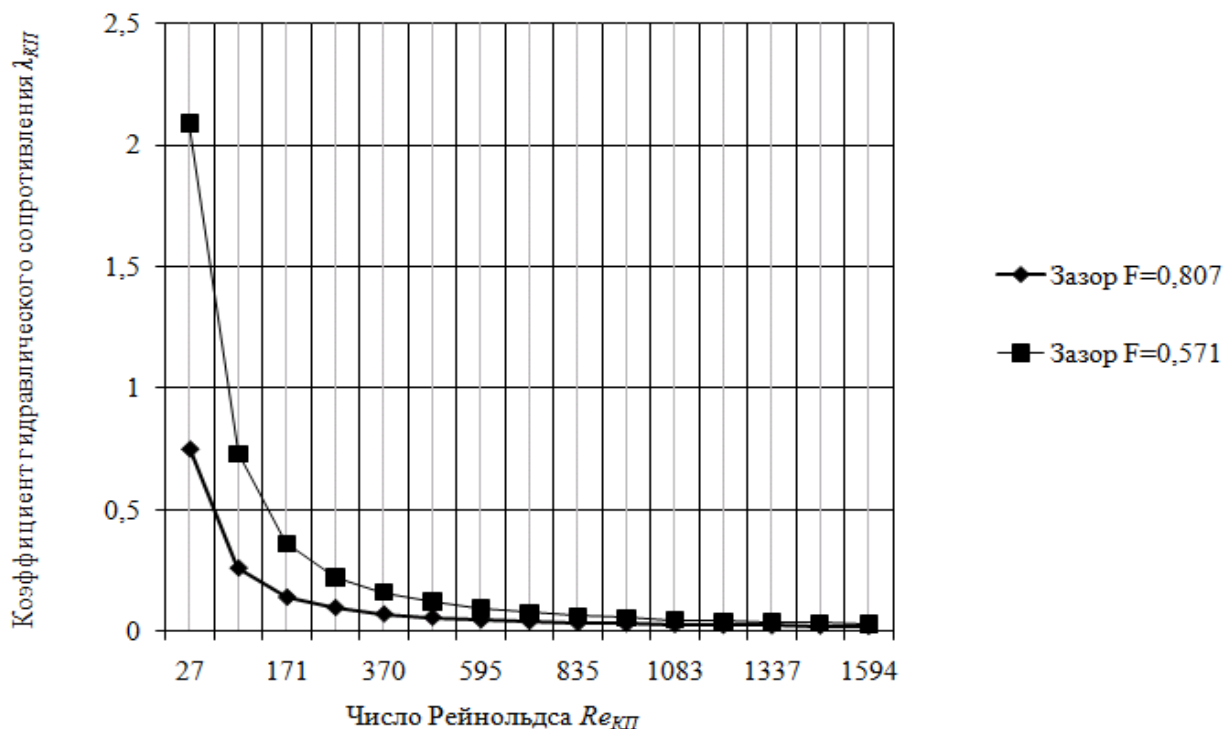


Рис. 5.1 Зависимость $\lambda_{кп} = f(Re_{кп})$ при $F = 0,807; 0,571$, очистной агент – глинистый раствор (вязкопластичная жидкость)

Таблица 5.1

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,807$

Относительная скорость ядра $u_{к}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{кп}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,31	0,16	27	0,75
2,12	2,43	0,31	87	0,26
2,09	2,56	0,47	171	0,14
2,06	2,68	0,62	263	0,097
2,03	2,81	0,78	370	0,071
2,0	2,93	0,93	477	0,057
1,97	3,06	1,09	595	0,046
1,94	3,18	1,24	710	0,04
1,91	3,31	1,4	835	0,034
1,88	3,43	1,55	954	0,03
1,85	3,56	1,71	1083	0,027

Относительная скорость ядра u_k , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{кп}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{кп}$
1,82	3,69	1,87	1213	0,024
1,79	3,81	2,02	1337	0,022
1,76	3,94	2,18	1469	0,021
1,73	4,06	2,33	1594	0,019

Таблица 5.2

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,764$

Относительная скорость ядра u_k , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{кп}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,28	0,13	19	1,03
2,12	2,37	0,25	63	0,35
2,09	2,47	0,38	131	0,18
2,06	2,57	0,51	213	0,12
2,03	2,67	0,64	306	0,084
2,0	2,76	0,76	336	0,078
1,97	2,86	0,89	506	0,054
1,94	2,96	1,02	618	0,045
1,91	3,05	1,14	724	0,039
1,88	3,15	1,27	844	0,034
1,85	3,25	1,4	965	0,03
1,82	3,35	1,53	1090	0,027
1,79	3,44	1,65	1170	0,025
1,76	3,54	1,78	1334	0,022
1,73	3,64	1,91	1463	0,021

Таблица 5.3

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,729$

Относительная скорость ядра u_k , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{кп}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–

2,15	2,26	0,11	14	1,33
2,12	2,34	0,22	52	0,42
2,09	2,42	0,33	108	0,21
2,06	2,5	0,44	177	0,14
2,03	2,58	0,55	258	0,1
2,0	2,66	0,66	346	0,076
1,97	2,74	0,77	442	0,061
1,94	2,83	0,89	511	0,053
1,91	2,91	1,0	691	0,041
1,88	2,99	1,11	771	0,0037
1,85	3,07	1,22	885	0,033
1,82	3,15	1,33	1002	0,029
1,79	3,21	1,42	1100	0,027
1,76	3,31	1,55	1244	0,024
1,73	3,39	1,66	1367	0,022

Таблица 5.4

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,686$

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,25	0,1	12	1,46
2,12	2,31	0,19	41	0,5
2,09	2,38	0,29	89	0,26
2,06	2,44	0,38	144	0,17
2,03	2,51	0,48	215	0,12
2,0	2,57	0,57	288	0,089
1,97	2,64	0,67	376	0,07
1,94	2,7	0,76	462	0,058
1,91	2,77	0,86	562	0,049
1,88	2,84	0,96	667	0,042
1,85	2,9	1,05	766	0,037
1,82	2,97	1,15	879	0,033
1,79	3,03	1,24	984	0,03
1,76	3,1	1,34	1103	0,027
1,73	3,16	1,43	1213	0,024

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, значительный объем табличной информации необходим для правильного и обоснованного суждения о конкретных гидравлических характеристиках потока вязко-пластичной жидкости.

Таблица 5.5

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,686$

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,24	0,09	10	1,83
2,12	2,29	0,17	34	0,61
2,09	2,35	0,26	75	0,3
2,06	2,4	0,34	122	0,19
2,03	2,46	0,43	185	0,13
2,0	2,51	0,51	248	0,1
1,97	2,57	0,6	328	0,079
1,94	2,63	0,69	414	0,064
1,91	2,68	0,77	496	0,055
1,88	2,74	0,86	593	0,047
1,85	2,79	0,94	684	0,041
1,82	2,85	1,03	790	0,036
1,79	2,9	1,11	888	0,032
1,76	2,96	1,2	1000	0,029
1,73	3,02	1,29	1116	0,026

Таблица 5.6

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,607$

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,23	0,08	8	2,09
2,12	2,27	0,15	27	0,73
2,09	2,32	0,23	61	0,36
2,06	2,37	0,31	105	0,22
2,03	2,41	0,38	152	0,16
2,0	2,46	0,46	214	0,12
1,97	2,5	0,53	274	0,093
1,94	2,55	0,61	349	0,075
1,91	2,6	0,69	430	0,062
1,88	2,64	0,76	506	0,054
1,85	2,69	0,84	597	0,046
1,82	2,74	0,92	693	0,04

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
1,79	2,78	0,99	779	0,036
1,76	2,83	1,07	888	0,033
1,73	2,88	1,15	988	0,029

Таблица 5.7

Циркуляционные характеристики движения вязкопластичной жидкости и образцов ядра при отношении площади сечения потока в трубе к миделевой площади ядра $F = 0,571$

Относительная скорость ядра u_K , м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно трубы $V_{КП}$, м/с	Скорость потока в кольцевом канале относительно ядра $V_{КК}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{КП}$	Коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом канале относительно ядра $\lambda_{КП}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,22	0,07	6	0,061
2,12	2,26	0,14	24	0,052
2,09	2,3	0,21	52	0,047
2,06	2,34	0,28	89	0,044
2,03	2,38	0,35	134	0,041
2,0	2,42	0,42	186	0,039
1,97	2,46	0,49	245	0,038
1,94	2,5	0,56	310	0,037
1,91	2,54	0,63	380	0,036
1,88	2,58	0,7	456	0,035
1,85	2,62	0,77	535	0,034
1,82	2,66	0,84	619	0,033
1,79	2,7	0,91	707	0,032
1,76	2,74	0,96	798	0,032
1,73	2,78	1,05	893	0,031

Результаты расчета относительной скорости ядра с учетом различных параметров входящих в формулу (2.35) приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8

Относительные скорости ядра u_K с учётом разных параметров, определяющих перепад давления на транспортировку образцов породы вязкопластичной жидкостью

Величина зазора F	Учитываемый параметр в уравнении определения относительной скорости ядра			
	P_l	$P_l + P_v$	$P_l + P_v + P_k$	$P_l + P_v + P_k + P_{ex}$
0,807	0,13	0,13	0,13	0,12
0,764	0,19	0,18	0,18	0,17
0,729	0,23	0,22	0,22	0,21

Величина зазора F	Учитываемый параметр в уравнении определения относительной скорости керна			
	P_l	$P_l + P_e$	$P_l + P_e + P_k$	$P_l + P_e + P_k + P_{ex}$
0,686	0,28	0,27	0,27	0,26
0,65	0,33	0,32	0,31	0,31
0,607	0,38	0,37	0,36	0,36
0,571	0,42	0,41	0,40	0,40

Данные, приведенные в табл. 5.8 свидетельствуют о том, что определяющим фактором величины относительной скорости керна является сила лобового сопротивления.

В связи со сказанным уравнение (2.35) можно записать в следующем виде:

$$u_k = \sqrt{\frac{2 \lg(\rho_k - \rho)(1 - \tau F)^2}{\rho C_x K_l^2}} \cdot \tag{5.3}$$

Приведенная формула применима, когда длина керна ℓ не превышает 0,2 м.

5.2 Изучение влияния геометрических параметров внутренней колонны, линейных и плотностных характеристик керна на скорость его движения

Известно, что в формулу определения относительной скорости керна при циркуляции ньютоновской жидкости (2.35, 5.3) входит составляющая ρ_k – плотность керна. Характер влияния плотности керна на его относительную скорость показан в табл. 5.9. Диапазон рассматриваемых плотностей образцов горных пород включает все практически возможные варианты ρ_k для геологических условий применения комплексов КГК.

Рассматривая данные табл. 5.9 можно сделать вывод, что относительная скорость керна возрастает как с увеличением плотности керна при постоянном F , так и при постоянной плотности с увеличением зазора «кern – труба», причем интенсивнее скорость керна растет с увеличением зазора между керна и внутренней трубой (что характерно и для вязкой жидкости).

Таблица 5.9

Относительные скорости керна u_k в зависимости от его плотности при циркуляции вязкопластичной жидкости

Зазор F	Плотность керна ρ_k , кг/м ³								
	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
0.807	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16
0.764	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23
0.729	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,26	0,27	0,29
0.686	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
0.65	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41
0.607	0,25	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,43	0,45	0,48
0.571	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53

Графическое выражение влияния плотности керна на его относительную скорость представлено на рис. 5.2.

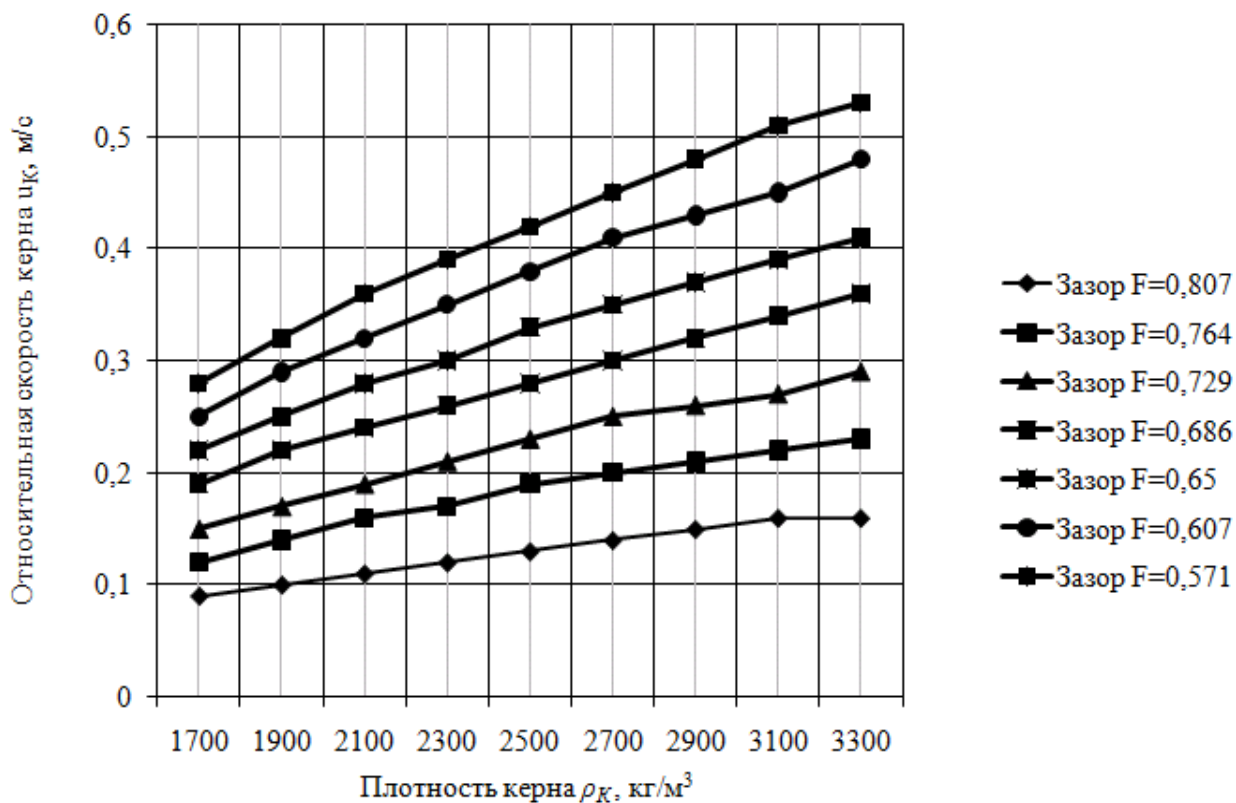


Рис.5.2 Зависимость $u_K = f(\rho_K)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, очистной агент – глинистый раствор

Таблица 5.10

Относительная скорость керна u_K при промывке скважины глинистым раствором

F	Длина керна l_K , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0,13	0,16	0,18	0,21	0,23	0,24	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32
	0,13	0,16	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
0,764	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46
	0,18	0,22	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,39	0,40
0,729	0,23	0,28	0,33	0,36	0,40	0,43	0,46	0,49	0,51	0,54	0,56
	0,22	0,27	0,31	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,47	0,49	0,50
0,686	0,28	0,35	0,40	0,45	0,49	0,53	0,57	0,60	0,64	0,67	0,70
	0,27	0,34	0,39	0,43	0,46	0,50	0,52	0,55	0,58	0,60	0,62
0,65	0,33	0,40	0,46	0,52	0,57	0,61	0,66	0,70	0,73	0,77	0,81
	0,32	0,39	0,44	0,49	0,53	0,57	0,60	0,63	0,66	0,69	0,71
0,607	0,38	0,47	0,54	0,60	0,66	0,71	0,76	0,81	0,85	0,89	0,93
	0,37	0,45	0,51	0,57	0,62	0,66	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82

F	Длина керна l_K , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,571	0,42	0,52	0,60	0,67	0,73	0,79	0,85	0,90	0,95	0,99	1,04
	0,41	0,50	0,57	0,63	0,69	0,74	0,78	0,82	0,85	0,88	0,92

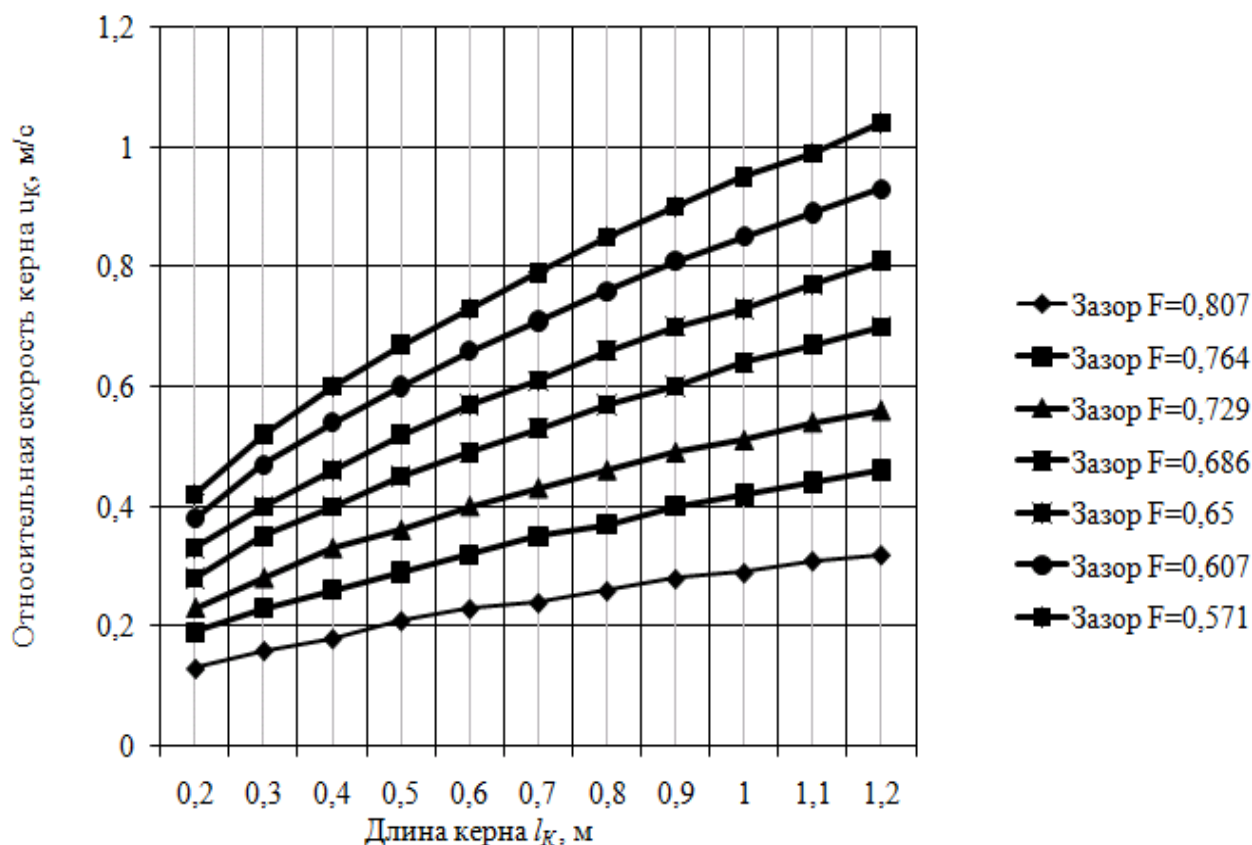


Рис.5.3 Зависимость $u_K = f(l_K)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, с учетом P_L , очистной агент – глинистый раствор

В табл. 5.10 и на рис. 5.3 – 5.4 приведены результаты расчетов относительной скорости керна при его переменной длине от 0,2 до 1,2 м, расчеты произведены с учетом промывки скважин вязкопластичной жидкостью. Следует заметить, что аналитические расчеты были проведены с учетом влияния различных составляющих перепада давления на транспортировку керна.

По результатам приведенных данных можно сделать вывод, что относительная скорость керна менее интенсивно возрастает с увеличением зазора «кern – труба», а более – с увеличением длины при постоянном зазоре F .

Как указывалось выше, формула расчета относительной скорости керна (5.3) справедлива, когда длина транспортируемого керна не превышает 0,2 м. В результате расчетов была получена формула (5.4) для определения относительной скорости керна u_K , при длине образцов породы превышающей 0,2 м.

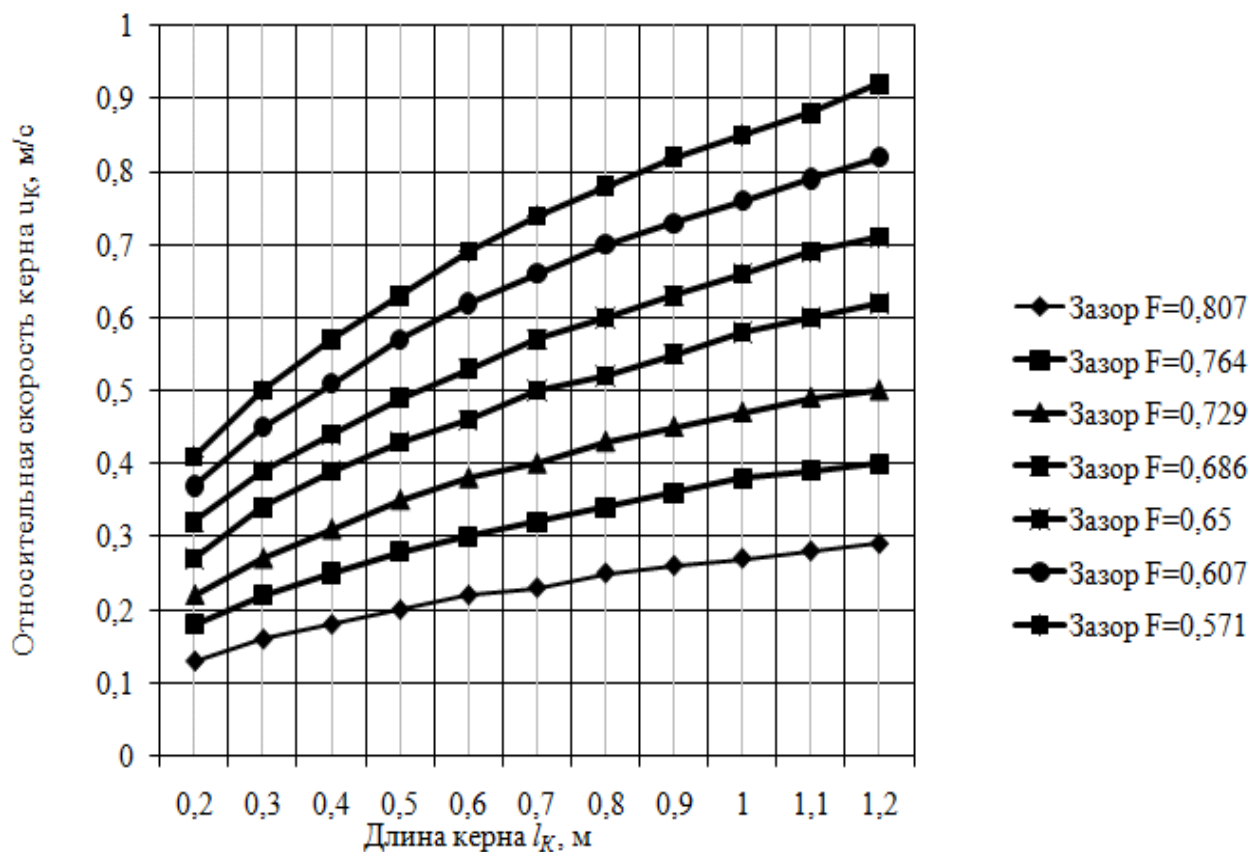


Рис.5.4 Зависимость $u_K = f(l_K)$ при $F = 0.807 \div 0.571$, с учетом P_L и P_B , очистной агент – глинистый раствор

$$u_K = m \cdot \sqrt{\frac{2lg(\rho_K - \rho)(1 - \tau_0 F)^2}{\rho C_x K_l^2}}, \tag{5.4}$$

где m – поправочный коэффициент, зависящий от длины транспортируемого ядра, значения которого приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Поправочный коэффициент m

Тип очистного агента	Длина ядра l_K , м					
	0,2 – 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 0,9	0,9 – 1,0	1,0 – 1,1	1,1 – 1,2
Глинистый раствор	0,95	0,91	0,89	0,88	0,86	0,86

Коэффициент m физически характеризует вклад силы P_B в относительную скорость ядра u_K (табл. 5.12).

Таблица 5.12

Процентный вклад силы P_B в относительную скорость ядра u_K

F	Длина ядра l_K , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0	0	0	5	4	4	4	7	7	10	9

F	Длина керна l_K , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,764	5	4	4	3	6	9	8	10	10	11	13
0,729	4	4	6	3	5	7	7	8	8	9	11
0,686	4	3	3	4	6	6	9	8	9	10	11
0,65	3	3	4	6	7	7	9	10	10	10	12
0,607	3	4	6	5	6	7	8	10	11	11	12
0,571	2	4	5	6	5	6	8	9	11	11	12

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5

1. Изучен характер влияния составляющих перепада давления (P_L , P_K , P_B , P_{BX}) на скорость транспортировки керна при промывке скважин вязкопластичной жидкостью.

2. Показана зависимость безразмерного коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{кп}^*$ (относительно керна) от величины обобщенного параметра Рейнольдса ($Re_{кп}^*$), определяющего режим движения жидкости, в данном случае, в кольцевом зазоре.

3. Детальными расчетами показано, что $\lambda_{кп}^*$ является функцией нескольких переменных, определяющими из которых являются F (отношение площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна) и $Re_{кп}^*$. Причем, $Re_{кп}^*$ здесь выступает как результат скоростных соотношений в паре «кern – поток жидкости». Кроме того, значительных изменений $\lambda_{кп}^*$ претерпевает только при изменении скорости течения жидкости в кольцевом зазоре между керном и трубой (а именно в случае $1 < Re_{кп}^* < 100$), увеличение же самого кольцевого зазора достаточно заметного влияния на значение $\lambda_{кп}^*$ практически не оказывает.

5. Сравнительным анализом доказано, что определяющим параметром в величине относительной скорости керна u_K (при его стандартной длине), является сила P_L – сила лобового сопротивления. Это обстоятельство дало возможность получить уточненную формулу определения u_K , которая отличается простотой и возможностью получения скоростных характеристик образцов породы без принятия определенных допущений об их движении в вязкопластичной жидкости.

5. Рассмотрено влияние геометрических размеров керна магистральной, плотности и длины образцов породы на скорость движения керна u_K . Расчетами показано, что относительная скорость керна возрастает как с увеличением плотности керна при постоянном F (отношении площади сечения потока в трубе F_0 к миделевой площади керна F_m), так и при постоянной плотности с увеличением зазора «кern – труба», причем интенсивнее скорость керна растет с увеличением зазора между керном и внутренней трубой. Следовательно, для обеспечения бесперебойной транспортировки образцов породы значительной плотности необходимо стремиться к минимальной величине кольцевого зазора между керном и трубой. Оценено влияние на относительную скорость керна u_K

длины образцов породы. Доказано, что относительная скорость керна менее интенсивно возрастает с увеличением зазора «кern – труба», а более – с увеличением длины при постоянном зазоре F . Данное обстоятельство свидетельствует о том, что эффективная транспортировка керна возможна только при его определенной длине ($l_{max} = \text{const}$), для некоторой величины поперечного размера образцов. Необходимо отметить, что во всех описанных случаях u_K значительно ниже для аналогичных условий при промывке скважины вязкой жидкостью.

6. В результате расчетов получена уточненная формула, определяющая относительную скорость керна u_K для образцов породы, длина которых лежит в интервале $0,2 \div 1,2$ м и движущихся в потоке вязкопластичной жидкости.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате проведенных аналитических исследований движения керношламовой смеси в восходящем потоке промывочной жидкости решены следующие задачи.

1. Получены аналитические выражения для определения относительной скорости керна с учетом всех параметров (P_L – силы лобового сопротивления; P_K – силы гидравлического сопротивления в кольцевом зазоре между керном и трубой; P_B – силы гидравлического сопротивления на выходе потока из кольцевого зазора «кern – труба»; P_{BX} – силы гидравлического сопротивления на входе потока в кольцевой зазор «кern – труба»), определяющих u_K образцов породы при движении их в стесненных условиях.

2. Уточнены зависимости, определяющие скорость движения продуктов разрушения (шлама), в которых максимально учтены размер, форма, а также схема возможного движения в потоке жидкости.

3. Получены удобные для практических расчетов формулы, определяющие скорость движения столбиков керна и позволяющие корректировать гидравлическую программу промывки скважин в соответствии с геометрическими характеристиками кернопроводящей магистрали, а также физико-механическими и геометрическими параметрами керна материала.

Относительно изложенного, можно дать следующий ряд практических рекомендаций.

1. При перебурке пластов несвязных пород и таковых, дающих kern в виде отдельных элементов неправильной формы, величину расхода промывочной жидкости необходимо определять и корректировать в соответствии с размерами и формой продуктов разрушения по формулам, приведенным в разделе 3, табл. 3.3.

2. Необходимый расход промывочной жидкости, обеспечивающий транспортировку образцов керна стандартной длины (0,2 м), определяется по формуле 4.3 для вязкой жидкости и по формуле 5.3 для вязкопластичной жидкости.

3. Для обеспечения бесперебойной транспортировки образцов керна повышенной плотности (свыше 2500 кг/м^3) необходимо стремиться к минимальной величине кольцевого зазора между керном и трубой (табл. 4.9, 5.9).

4. При необходимости транспортировки керна значительной длины (что характерно для группы глинистых пород), расход очистного агента определяется по формуле 4.4 для вязкой жидкости и по формуле 5.4 для вязкопластичной жидкости.

Соблюдение приведенных рекомендаций позволит с одной стороны максимально эффективно и с высокими технико-экономическими показателями проходить скважины, а с другой обеспечить достаточно высокую степень привязки образцов к конкретным интервалам глубин скважин. Последнее обстоятельство является важнейшим при использовании комплексов с гидротранспортом керна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Акопов Э.А. Очистка забоев глубоких скважин. – М.: Недра, 1970. – 120 с.
2. Козодой А.К., Зубарев А.В., Федоров В.С. Промывка скважин при бурении. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 172 с.
3. Маковой Н. Гидравлика бурения. Пер. с рум. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
4. Промывка при бурении, креплении и цементировании скважин / В.Г. Беликов, А.И. Булатов, Р.Ф. Уханов и др. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
5. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: В 2 т. Т. 2 / Под ред. Е.А. Козловского. – М.: Недра, 1984. – 437 с.
6. Технология и техника разведочного бурения / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов и др. – М.: Недра, 1983. – 565 с.
7. Габуня Г.В., Карасик Г.Е. Графическое определение скорости погружения и подъема выбуренных частиц породы в зависимости от качества и количества промывочного раствора // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1963. – № 6. С. 18 – 20.
8. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения М.: Гостоптехиздат, 1958. – 172 с.
9. Булатов А.И. Технология промывки скважин. – М.: Недра, 1981. – 240 с.
10. Булатов А.И., Пеньков А.И., Проселков Ю.М. Справочник по промывке скважин. – М.: Недра, 1984. – 317 с.
11. Мовсумов А.А., Джалил-заде Г.Н. Технология бурения глубоких скважин. – М.: Недра, 1966. – 188 с.
12. Горшков Л.К. Удельная забойная мощность как теплоэнергетическая характеристика алмазного породоразрушающего инструмента // Известия ВУЗов Геология и разведка. – 1984. – № 5. С. 152 – 159.
13. Единые технические правила ведения работ при строительстве скважин на нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождениях. – М.: ВНИИБТ, 1983. – 66 с.
14. Сихалиев Ф.А., Акилов Ж., Зельманович Г.М. К промывке наклонных скважин // Известия ВУЗов Нефть и газ. – 1964. – № 5. С. 27 – 30.
15. Мирзаджанзаде А.Х., Сидоров Н.А., Ширинзаде С.А. Анализ и проектирование параметров бурения. – М.: Недра, 1976. – 235 с.
16. Мирзаджанзаде А.Х., Ентов В.М. Гидродинамика в бурении. – М.: Недра, 1985. – 268 с.
17. Шищенко Р.И., Есьман Б.И. Практическая гидравлика в бурении. – М.: Недра, 1966. – 320 с.
18. Пестров А.П., Гусман А.М. Исследование процесса очистки призабойной зоны при различных режимах и схемах промывки скважин // Сб. научн. тр. Сибирского ин-та нефтяной промышленности. – Новосибирск: 1984. С. 18 – 21.
19. Справочное руководство мастера геологоразведочного бурения / Г.А. Блинов, В.И. Васильев, Ю.В. Бакланов и др. – Л.: Недра, 1983. – 400 с.
20. Сулакшин С.С. Практическое руководство по геологоразведочному бурению. – М.: Недра, 1978. – 333 с.
21. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидроаэромеханика в бурении. – М.: Недра, 1987. – 304 с.
22. Грей Дж. Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов. Пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
23. Шумилов Л.П. Некоторые результаты экспериментального исследования транспорта шлама по стволу скважины // Гидравлика в бурении. – М.: ВНИИБТ, 1965. – С. 82 – 105.
24. Гарунов Г.А., Мустафаев Н.Б., Матаев Г.А., Семенякин В.С. Об эффективности очистки скважины при бурении // Известия ВУЗов Нефть и газ. – 1988. – № 9. С. 17 – 21.
25. Технология отбора шлама при бурении скважин / А.А. Волокитенков, А.С. Волков, И.И. Толокнов и др. – М.: Недра, 1973. – 200 с.

26. Шищенко Р.И. Гидравлика глинистых растворов. – Баку: Азнефтеиздат, 1951. – 134 с.
27. Михайлова Н.Д. Влияние свойств промывочных агентов на процесс очистки забоя скважин // Записки ЛГИ. – 1985. – Т. 105. С. 38 – 42.
28. Кудряшов Б.Б., Климов В.Я. Анализ и основы расчета движения пены в скважине // Методика и техника разведки. – 1980. Вып. 133. С. 56 – 61.
29. Евецкий В.А., Костышев А.Н. Структурно-реологические свойства полимерной промывочной жидкости, обработанной окислительно-восстановительными реагентами // Известия ВУЗов Геология и разведка. – 1989. – № 6. С. 124 – 128.
30. Завьялов С.Ф. Определение количества промывочной жидкости в зависимости от числа оборотов шарошечного долота и его конструктивных особенностей // Нефтяное хозяйство. – 1965. – № 3. С. 15 – 17.
31. Кокарев В.Д. Исследование режимов бурения при проводке опорно-технологических скважин в Ставропольском Крае // ВНИИОЭНГ. – 1972. – 51 с.
32. Ребиндер П. А., Шрейнер Л. А., Жигач К. Ф. Понижители твердости в бурении. – М.: Изд-во АН СССР, 1944. – 200 с.
33. Рожков В.П., Сулакшин С.С., Храпников Р.Г., Марьин М.Д. Исследование гранулометрического состава продуктов разрушения при бурении геологоразведочных скважин // Известия ВУЗов Геология и разведка. – 1972. – № 4. С. 135 – 142.
34. Рожков В.П., Куприенко В.И. Влияние технических и технологических факторов на величину шламовых частиц и их распределение по размерам при алмазном бурении геологоразведочных скважин // Межвузовский тематический сборник «Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые». Вып. 12. – Свердловск, 1989. – С. 29 – 38.
35. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наукова думка, 1978. – 232 с.
36. Шашилов В.П., Кузнецов В.Н. Оценка гранулометрического состава бурового шлама // Методика и техника разведки. – 1980. Вып. 134. С. 72 – 73
37. Лопатин Ю.С., Филатов Б.С. Некоторые основные характеристики бурового шлама // Нефтяное хозяйство. – 1970. – № 10. С. 14 – 18.
38. Шиманский А.А., Рязанов А.А. Гранулометрия буровых шламов // Труды Иркутского политехнического института. Вып. 42. –Иркутск, 1968. – С. 297 – 301.
39. Кучерявый Ф.И. О механизме разрушения горных пород резцом по данным скоростной киносъемки // Известия ДГИ, т. XXX, кн. 2. – Днепропетровск. – 1957. С 31 – 37.
40. Сологуб С.Я. Исследования вращательного бурения крепких горных пород породоразрушающим инструментом новой формы: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.05.06 / Днепроп. горн. ин-т. – Днепропетровск, 1966. – 18 с.
41. Кожевников А.А. Исследования процессов разрушения горных пород при колонковом бурении твердосплавными коронками: Автореф. дис... к-та техн. наук: 04.00.19 / Днепроп. горн. ин-т. – Днепропетровск, 1975. – 32 с.
42. Ивачев Л.М. Промывка и тампонирувание геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1989. – 247 с.
43. Булина И.Г., Савин В.Г. Образование передней застойной зоны при обтекании затопленных тел вязко-пластичной жидкостью // Доклады АН СССР. – 1962. – Т. 145, № 1. – С.
44. Воздвиженский Б.И., Васильев М.Г. Буровая механика. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 492 с.
45. Денисов А.С. Некоторые новые экспериментальные данные по вопросу промывки буровых скважин // Разведка недр. – 1938. – № 6. С. 38 – 45.
46. Осипов Ю.П. Бурение геологоразведочных скважин с обратной промывкой // Разведка и охрана недр. – 1975. – № 5 – С. 8 – 9.

47. Волков А.С., Волокитенков А.А. Бурение скважин с обратной циркуляцией промывочной жидкости. – М.: Недра, 1970. – 184 с.
48. Дерусов В.П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 184 с.
49. Буровой инструмент для геологоразведочных скважин. Справочник / Под ред. Н.И. Корнилова. – М.:Недра, 1990. – 395 с.
50. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В. Технология бурения с гидротранспортом керна // Разведка и охрана недр. – 1982. – № 11 – С. 26 – 29.
51. Игнатов А. А. О движении керна в потоке жидкости при его гидротранспорте // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины – Вып. 15. 2012. – С. 159 – 163.
52. Кузнецов А.В., Смирнов Ю.Т. Очистка забоя при бурении скважин с гидротранспортом керна // Технические средства для прогрессивных способов бурения. – Л.: ВИТР, 1987. – С. 53 – 56.
53. Кузнецов А.В. Обеспечение внутренней циркуляции при бурении с транспортированием породы по двойной колонне // Совершенствование и разработка бурового инструмента для прогрессивных способов бурения: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1986. – С. 105 – 111.
54. Бердяев Д.Н. Перспективы бурения скважин комплексами КГК в объединении «Полярноуралгеология» // Техника и технология бурения с гидротранспортом керна и шлама: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1985. – С. 48 – 53.
55. Лобанов Ю.П., Новожилов В.К., Иванов С.А. Модификация комплекса КГК для работы в труднодоступных районах с суровыми климатическими условиями // Разведка и охрана недр. – 1988. – № 8 – С. 28 – 31.
56. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Усков Ю.Б. Оценка потенциальных возможностей прогрессивных методов бурения // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1985. – 28 с.
57. Кардыш В.Г., Кузьмин И.В., Смирнов О.В. Основные направления со-вершенствования технических средств для бурения с гидротранспортом керна и шлама // Техника и технология бурения с гидротранспортом керна и шлама. – Л.: ВИТР, 1985. – С. 63 – 64.
58. Дроздовский А.Б., Райкин В.Л., Мурзаков Б.В. Исследование процесса бурения скважин с гидротранспортом керна // Технология бурения геологоразведочных скважин с использованием прогрессивных методов: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1983. – С. 36 – 50.
59. Хворостовский С.С., Хворостовский И.С., Ключников А.Ю., Малинин Е.В. Методика выбора производительности насоса при бурении с гидротранс-портом керна // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2001. – № 6 – С. 130 – 136.
60. Смолдырев А.Е. Гидро – и пневмотранспорт керна по буровым трубам // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2002. – № 4. – С. 97 – 103.
61. Глухов В.И., Кукес А.И., Петров А.А. Движение керна в восходящем потоке промывочной жидкости // Совершенствование и внедрение технологии промывки и тампонирования скважин в условиях Восточной Сибири и Крайнего Севера: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1987. – С. 57 – 65.
62. Кардыш В.Г., Мельник Э.Д., Пешков А.Н. Двойные бурильные трубы для бурения с транспортированием керна и шлама очистным агентом // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1982. – 36 с.
63. Кукес А.И., Петров А.А. Исследования по определению основных параметров двойной бурильной колонны // Высокопрочные бурильные трубы для прогрессивных способов бурения: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1988, – С. 45 – 47.

64. Пешков А.Н. Совершенствование техники и технологии промывки скважин при бурении с гидротранспортом керна // Технология бурения геологоразведочных скважин с использованием прогрессивных методов: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1983. – С. 51 – 60.
65. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Техника и технология бурения геологоразведочных скважин за рубежом. – М.: Недра, 1989. – 256 с.
66. Яковлев Ю.А., Крылов Г.А. Технические средства для бурения с двойной колонной бурильных труб и выносом керна обратным потоком промывочной жидкости: Обзор зарубежной литературы // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1975. – 34 с.
67. Новиков Г.П., Пешков А.Н., Шведенко В.П. Современное оборудование фирмы «Congrad Stork» для бурения с непрерывным выносом керна и осколков разрушенной породы: Обзор зарубежной литературы // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1984. – С. 5 – 16.
68. <http://www.worldoil.com>.
69. Новиков Г.П., Пешков А.Н., Шведенко В.П. Новые технические средства, применяемые для бурения разведочных скважин в Канаде: Обзор зарубежной литературы // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1986. – 41 с.
70. Braithwaite Richard, Exploration drilling 2000, MINING Magazine, July 2000, pp. 6 – 10.
71. Пешков А.Н., Моргалин А.С. Отбор проб фундамента при бурении комплексами КГК // Технические средства для реализации базовых технологий геологоразведочного бурения: Сб. научных трудов СКБ ВПО «Союзгетехника». – Л.: ВИТР, 1988. – С. 9 – 20.
72. Ягудин Р.У., Бронштейн М.Е., Ярославцев В.А. Опыт и перспективы использования комплекса КГК – 100 при гидрогеологических работах в объединении Казгидрогеология // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1987. – С. 10 – 15.
73. Зайонц О.Л., Абрамчук А.Б., Мартыненко И.И., Лепесин В.И. Бурение скважин с помощью КГК – 100 // Разведка и охрана недр. – 1983. – № 12 – С. 25 – 29.
74. Андреев С.Е., Зверев В.В., Петров В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 395 с.
75. Липатов В.И., Шумилов Л.П. О движении твердых частиц в восходящем потоке раствора // Труды ВНИИБТ, т. XXIV. – М. Недра. – 1970. С 74 – 79.
76. Кулиев А.Э., Ахундов У.Х. К вопросу дробления пород на забое при бурении скважин малого диаметра // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1964. – № 10. – С. 19 – 20.
77. Проселков Ю.М., Кушнарченко Н.А., Габузов Г.Г. Зависимость фракционного состава бурового шлама от параметров режима бурения // Промывка скважин – Сб. научн. тр. ВНИИКРнефть. – Краснодар: 1980. – № 18. С. 12 – 17.
78. Гусейнов Ф.М. Влияние размера долота и параметров режима бурения на фракционный состав разбуриваемых пород // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1966. – № 7. – С. 21 – 23.
79. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
80. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях. – М.: Недра, 1987. – 269 с.
81. Кожевников А. О., Ігнатов А. О. Аналітичні дослідження швидкості осідання частинок шламу при бурінні свердловин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины – Вып. 8. 2005. – С. 52 – 57.

82. Бородацкий И.Г. О транспортировании восходящим вертикальным потоком жидкости дробленого керна трещиноватых и слоистых пород // Труды Сев. Кавказского гос. НИИ нефтяной промышленности. Вып. 31. – Грозный, 1974. – С.18 – 24.
83. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
84. Воронов А.И., Есентаев У.Е., Новоженев А.И. Освоение комплекса КГК – 100 в Центральном Казахстане // Разведка и охрана недр. – 1981. – № 1 – С. 52 – 54.
85. Воронов А.И. Применение комплексов КГК – 100 в Центральном Казахстане // Техника и технология бурения с гидротранспортом керна и шлама. – Л.: ВИТР, 1985. – С. 37 – 42.
86. Зайонц О.Л., Лепесин В.И. Опыт бурения комплексом КГК – 100 в сложных геологических условиях // Передовой научно-производственный опыт геологоразведочных организаций. – М.: ВИЭМС, 1984. – С. 18 – 26.
87. Лещиков В.И., Лефтон О.Л., Ионов А.Е. Геолого-экономическая результативность внедрения бурения с гидротранспортом керна // Разведка и охрана недр. – 1989. – № 4 – С. 37 – 40.
88. Мартыненко И.И., Музыка В.Н. Технология бурения КГК – 100 бурогольных месторождений // Разведка и охрана недр. – 1985. – № 7 – С. 55 – 56.
89. Борисов А.И. Движение пульпы в вертикальных трубах // Научные труды ВНИИГидроуголь. Вып. 2. – Новокузнецк, 1963. – С. 75 – 95.
90. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
91. Кожевников А.А., Игнатов А.А. Аналитические исследования скорости оседания твердых тел в неподвижной жидкости // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2005». – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2005. – С. 257-263.
92. Ивачев Л.М., Юшков А.С. Об определении расхода промывочной жидкости при разведочном бурении // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1986. – № 9 – С. 86 – 91.
93. Винниченко В.М., Максименко Н.Н. Технология бурения геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1988. – 149 с.
94. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. О критериях определения рационального расхода очистного агента // Збірник наукових праць НГУ № 23. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2005. – С. 267-273.
95. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling // API Dril. Prod. Prac. – 1941. – p. 91.
96. Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Никитин Б.А. Инженерные расчеты при бурении глубоких скважин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 490 с.
97. Разведочное бурение / А. Г. Калинин, О. В. Ошкордин, В. М. Питерский и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
98. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. К вопросу о методике определения расхода очистного агента // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2006». – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2006. – С. 212 – 216.
99. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
100. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. - М.:Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
101. Кардыш В.Г., Мельник Э.Д. Оборудование для бурения с гидротранспортом керна // Разведка и охрана недр. – 1983. – № 5 – С. 24 – 29.
102. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. – М. Л.:Госэнергоиздат, 1957. – 352 с.
103. Ганджумян Р.А. Практические расчеты в разведочном бурении. – М.: Недра, 1986. – 253 с.

Наукове видання

Давиденко Олександр Миколайович
Ігнатов Андрій Олександрович

**ПРЯМА Й ЗВОРОТНА СХЕМИ ОЧИЩЕННЯ ПРИ БУРІННІ
СВЕРДЛОВИН**

Монографія

(Російською мовою)

Друкується в авторській редакції.

Підп. до друку 25.12.2012. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 5,8.
Обл.-вид. арк. 6,9. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
в Державному вищому навчальному закладі
«Національний гірничий університет»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004 р.

45005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.