

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Ковалев Артем Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ
СКВАЖИН**

25.00.14. – «Технология и техника геологоразведочных работ»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Рябчиков Сергей Яковлевич

Томск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СПОСОБОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИН	11
1.1.Классификация и анализ гидродинамических способов бурения скважин	11
1.2.Выбор и обоснование перспективных направлений исследований по повышению эффективности шароструйного бурения скважин.....	17
1.2.1.Обзор и анализ результатов исследований шароструйного способа бурения скважин.....	17
1.2.2.Выбор и обоснование конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда для эффективного разрушения твердых горных пород	25
1.2.3.Анализ факторов, определяющих эффективность шароструйного бурения	34
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	54
ГЛАВА 2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	57
2.1. Лабораторный стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения.....	57
2.2. Методика экспериментальных исследований при забурке скважины с образованием криволинейного забоя	63
2.3. Методика проведения высокоскоростной съемки.....	64
2.4. Методика проведения экспериментов при бурении с расхаживанием бурового снаряда	65
2.5. Методика определения параметров струйных аппаратов.....	67
2.6. Методика статистической обработки результатов исследований	67
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	68
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ.....	70
3.1.Экспериментальные исследования влияния технологических параметров режима на эффективность шароструйного бурения.....	71
3.2.Исследование влияния геометрических параметров бурового снаряда на эффективность шароструйного бурения.....	87

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	99
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ШАРОСТРУЙНО-ЭЖЕКТОРНЫХ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ	103
4.1.Разработка физической модели шароструйного способа бурения скважин	103
4.2. Расчет процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород.....	109
4.3. Расчет процессов шароструйного бурения в усталостном режиме разрушения горных пород.....	116
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	117
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ	119
5.1. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд	119
5.2. Технологическая схема шароструйного бурения с расхаживанием бурового снаряда	120
5.3. Технологическая схема шароструйного бурения с улавлиюще- подпитывающим устройством.....	122
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
Приложение 1. Акт внедрения в Томский филиал ООО «Аверс-1».....	142
Приложение 2. Акт передачи в ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция»	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В мировой практике бурения скважин прослеживается тенденция к возрастанию объема бурения геологоразведочных, водозаборных, сейсмических, геотермальных и др. скважин в твердых и крепких горных породах. Бурение в таких породах характеризуется низкой механической скоростью бурения и проходкой на долото. Повышение эффективности бурения в крепких горных породах может быть реализовано за счет разработки новых материалов и новых конструктивных решений для породоразрушающего инструмента (ПРИ), разрушающего горную породу механическим способом. Несмотря на постоянное совершенствование ПРИ, бурение механическими способами в крепких горных породах остается не достаточно эффективным.

Необходимо отметить, что при проведении геологической разведки как на твердые, так и на жидкие полезные ископаемые, по условиям методики разведки необходимо бурить достаточно большие объемы скважин диаметром породоразрушающего инструмента 130–150 мм и более в горных породах X–XII категории по буримости. Однако традиционно применяемый алмазный породоразрушающий инструмент серийно выпускается до диаметра 76–93 мм. ПРИ большего диаметра имеет высокую стоимость и выполняется штучно.

Поэтому актуальность приобретают разработки альтернативных способов разрушения крепких горных пород. По мнению ряда авторов одним из наиболее перспективных является гидродинамический способ разрушения горных пород, осуществляемый высокоскоростной струей жидкости. Данным способом на забой скважины можно передавать значительные мощности, при этом скорость бурения и проходка на долото могут возрасти в кратное число раз. Кроме того, этот способ легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами, при которой для очистки скважины от шлама на забой подается промывочная жидкость. Однако

гидродинамический способ в неизменном виде мало перспективен для бурения скважин в крепких горных породах.

Шароструйный способ бурения скважин, заключающийся в разрушении горных пород ударами высокоскоростных шаров, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне скважины, позволит решить ряд технических и технологических проблем, возникающих при реализации гидродинамического способа разрушения горных пород.

Исследованием шароструйного способа бурения занимались А.В. Васильев, А.Н. Давиденко, Л.С. Дербенев, О.Л. Дербенева, А.В. Дугарцыренов, С.А. Заурбеков, Т.Н. Зубкова, А.А. Игнатов, В.П. Коротков, М.М. Майлибаев, М.Н. Нурлыбаев, Н.Т. Туякбаев, А.Б. Уваков, А.В. Штрассер, J.M. Camp, F.W. Cole, F.H. Deily, I.E. Eckel, A.B. Hildebrandt, L.W. Ledgerwood, A.W. McCray, E.M. McNatt, J.E. Ortloff, G.H. Ramsey, M. Roth, P.S. Williams и др.

Несмотря на то, что первые работы по исследованию шароструйного способа бурения были выполнены в середине XX века, до настоящего времени данный способ не получил широкого внедрения из-за недостаточного уровня его теоретической и экспериментальной проработки.

Разработанные методики расчета оптимальных геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов и рациональных технологических параметров режима бурения являются разрозненными и часто противоречивыми. Также следует отметить высокую трудоемкость, низкую надежность и значительные потери времени на спуско-подъемные операции при проведении полевых работ.

Учитывая вышеизложенное, разработка новых технических средств, методик расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов и рациональных технологических параметров режима шароструйного бурения является на сегодняшний день актуальной и требующей решения задач.

Цель работы.

Основной целью работы является систематизация, расширение и углубление знаний в области повышения эффективности шароструйного бурения в твердых и крепких горных породах за счет разработки новых технических средств, методик расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов и рациональных технологических параметров режима бурения.

Идея работы состоит в научном обосновании рациональных конструкций буровых снарядов и разработке методики инженерного расчета технологических параметров шароструйного бурения, обеспечивающих высокую эффективность разрушения горных пород.

Предметом данного исследования являются призабойные процессы шароструйного бурения, определяющие эффективность сооружения скважин в крепких горных породах.

Задачи исследования.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ гидродинамических способов разрушения горных пород с целью выявления наиболее перспективного для бурения скважин в твердых и крепких горных породах;
- обзор и анализ результатов исследований шароструйного способа бурения скважин;
- обоснование принципиальной конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда, обеспечивающего высокую эффективность бурения в твердых и крепких горных породах;
- выбор и обоснование методов исследований технологических процессов шароструйного бурения;
- экспериментальные исследования влияния геометрических параметров бурового снаряда и технологических параметров режима бурения на эффективность шароструйного бурения;

- разработка методики инженерного расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов и технологических параметров режима бурения;

- разработка технических средств и технологических схем для повышения эффективности шароструйного бурения.

Методика исследований. Для решения поставленных задач приняты следующие методы исследований:

- обобщение, систематизация и анализ литературных источников;
- комплекс теоретических и экспериментальных исследований;
- статистическая обработка результатов исследований.

Статистическая обработка и анализ полученных результатов проводились в программах MS Excell, Statistika, Measure Dynamics. Основное содержание работы изложено в программе MS Word.

Личный вклад автора состоит в обзоре и анализе литературных источников по тематике шароструйного бурения; в обосновании конструкции шароструйно-эжекторных долот для бурения в крепких горных породах; в участии при разработке лабораторного стенда и проведении экспериментальных исследований; в разработке методики исследований; в планировании и обработке экспериментальных данных; в участии при разработке конструкций забойных шаропитателей.

В работе защищаются следующие научные положения:

1. В основе конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда должен лежать струйный аппарат с соплом, камерой смешения цилиндрической формы, коническим диффузором с их последовательным осевым расположением. Высокая эффективность шароструйного бурения, определяемая механической скоростью, достигается рациональной и научно обоснованной координацией технологических параметров и основных геометрических размеров бурового снаряда.

2. Поддержание требуемого диаметра скважины при бурении шароструйно-эжекторным снарядом обеспечивается при минимальных

расстоянии между долотом и забоем и периодичности расхаживания, а также сохранении следующих соотношений геометрических параметров бурового снаряда: $\alpha_{рд} = 10^\circ$, $d_{кс} = 2,2 \cdot d_{ш}$, $D_{скв} - d_{сА}^H = (1,1 \div 1,2) \cdot d_{ш}$.

3. Разработанная физическая модель шароструйного способа бурения создает научно-методическую основу для методики инженерного расчета технологических процессов в различных геолого-технических условиях, которая позволяет на этапе проектирования определять оптимальные режимные параметры, а также производить выбор необходимого технологического оборудования.

Научная новизна. В процессе исследований получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

1. впервые доказана принципиальная возможность повышения эффективности шароструйного бурения в крепких горных породах за счет точной координации оптимальных технологических процессов и рациональной конструкции элементов бурового снаряда;

2. впервые выполнена высокоскоростная съемка для исследования быстропротекающих процессов шароструйного бурения, позволившая разработать физическую модель шароструйного способа бурения скважин;

3. выявлена зависимость эффективности шароструйного бурения от высоты технологических окон, расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон, угла конусности задерживающего устройства;

4. установлена взаимосвязь геометрических параметров скважины с периодичностью расхаживания бурового снаряда;

5. выявлены и диагностированы причины заклинивания шаров в затрубном пространстве бурового снаряда под задерживающим устройством;

6. впервые установлена необходимость включения в состав компоновки низа бурильной колонны улавливающе-подпитывающего

устройства, позволяющего заменять изношенные шары новыми, доставлять шары на забой и поднимать их из скважины вместе с буровым снарядом.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена значительным объемом экспериментальных исследований, высокой степенью сходимости их результатов и воспроизводимостью полученных данных; использованием для исследования призабойных процессов шароструйного бурения современных методик и технических средств, в том числе высокоскоростной съемки, а также компьютерных программ при обработке результатов экспериментов при бурении различных образцов горных пород.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получена необходимая информация для разработки технологии и техники шароструйного бурения скважин:

1. разработан лабораторный стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения;
2. разработана и предложена для практического использования методика инженерного расчета шароструйно-эжекторных буровых снарядов;
3. разработаны технические средства для шароструйного бурения скважин в твердых и крепких горных породах.

Реализация результатов исследований:

1. результаты теоретических и экспериментальных исследований приняты к внедрению в Томский филиал ООО «Аверс-1» и ООО «Томская комплексная геологоразведочная экспедиция», что подтверждено соответствующими актами (прил. 1 и 2);
2. теоретические и практические результаты выполненных исследований реализованы в полученном патенте на полезную модель РФ [70];
3. полученные результаты используются при проведении учебных занятий в Национальном исследовательском Томском политехническом

университете по дисциплинам: «Буровые станки. Бурение скважин», «Бурение скважин», «Буровые машины и механизмы».

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры бурения скважин НИ ТПУ; в докладах на XII–XVIII Международных научных симпозиумах имени академика М.А. Усова студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоении недр» (Томск, ТПУ, 2008–2014); на Всероссийских научно-технических конференциях «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин» (Томск, ТПУ, 2009, 2014), на Международной конференции «Севергеотех-2015» (Ухта, 2015); на совместном научном семинаре кафедры бурения скважин НИ ТПУ и кафедры технологии и техники разведки СФУ (Красноярск, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 3 в журналах из списка ВАК; основные технические и технологические решения защищены 1 патентом на полезную модель.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 115 наименования; содержит 143 страницы машинописного текста, 61 рисунок, 19 таблиц и 1 приложение.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н. Рябчикову С.Я. за постоянную методическую помощь и консультации. Особую признательность автор выражает д.т.н. Крауиньш П.Я., к.т.н. Горбенко М.В., к.т.н. Вережкину А.В., доценту Самохвалову М.А., инженеру Алиеву Р.К., ведущему инженеру Нефтеюганского филиала ООО "РН-Бурение" Столярову Р.В., а также студентам Алиеву Ф.Р., Якушеву Д.А., Яцкив А.М., Горбенко В.М., Исаеву Е.Д. за постоянную помощь при выполнении работы и обсуждении ее результатов.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СПОСОБОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

1.1. Классификация и анализ гидродинамических способов бурения скважин

Разрушение горных пород (РГП) при бурении скважин осуществляется двумя основными способами [103]: механическим, который получил наибольшее распространение, и физическими способами, которые находятся в стадии изучения или применяются в ограниченных объемах. По мнению ряда авторов [50, 52, 54, 99] одним из наиболее перспективных является гидродинамический способ РГП, осуществляемый высокоскоростной струей жидкости. Данным способом на забой скважины можно передавать значительные мощности. Этот способ легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами, при которой для промывки скважины на забой подается промывочная жидкость.

Для правильной постановки теоретических и экспериментальных исследований был проведен анализ гидродинамических способов РГП. Автором предложена классификация (рис. 1) гидродинамических способов разрушения горных пород по признаку характера силового воздействия на забой [39]. По данному признаку все гидродинамические способы РГП можно разделить на 3 группы: *эрозионные, абразивно-ударные и комбинированные.*

Разрушение горных пород при реализации *эрозионных* способов осуществляется высоконапорной струей жидкости. Взаимодействуя с разрушаемым материалом, струя создает нормальные давления за счет гидравлического удара и касательные напряжения, вызываемые радиальным течением жидкости (эрозия). Данному способу присуще также разрушение горных пород путем ее растворения в промывочной жидкости. При высоких скоростях жидкости процесс разрушения может интенсифицироваться за счет кавитационной эрозии.



Рис. 1. Классификация гидродинамических способов разрушения горных пород по характеру силового воздействия на забой

Наиболее полно изученным в группе эрозионных способов является *гидромониторный* способ РГП, при котором разрушение осуществляется непрерывной высоконапорной струей жидкости, движущейся с большой скоростью. Основные исследования гидромониторного способа бурения проводились в 70–80 г.г. прошлого столетия в США, СССР, Голландии и Японии. Подробные результаты исследований приводятся в работах [18, 31, 47, 49, 53, 57, 59, 92, 96, 101, 107]. Установлено, что на забой можно передавать большую гидравлическую мощность, при этом скорость проходки возрастает в 5–8 раз по сравнению со стандартными долотами.

Основными преимуществами гидромониторного бурения являются:

- простота конструкции породоразрушающего инструмента (ПРИ), отсутствие быстроизнашивающихся элементов;
- отсутствие необходимости в создании высоких осевых нагрузок на ПРИ;
- возможность бурения с малой частотой вращения ПРИ (а также без вращения).

Однако данный способ является очень энергоемким. Так, для эффективного разрушения забоя эрозионным способом необходимы высокие скорости жидкости (200–1000 м/с), а также, соответственно, высокие

давления – не ниже 80–400 МПа. Таким образом, для его реализации необходим целый комплекс высоконапорного оборудования (насосов, вертлюгов, бурильных труб, уплотнений и др.).

При *гидроимпульсном* способе разрушение осуществляется при кратковременных импульсных нагрузках струи жидкости, которая обладает лучшей компактностью и дальнобойностью, большей разрушающей способностью по сравнению с непрерывной. Однако ее применение для бурения скважин сдерживается нерешенностью вопроса канализации энергии и рабочих компонентов на значительные расстояния.

Гидроударный способ заключается в разрушении горных пород гидравлическим ударом жидкости большой силы (реализация с помощью взрыва, электрического разряда в жидкости, создания вакуумных кавитационных полостей).

Разрушение *электрогидравлическим* способом происходит за счет электрического разряда в жидкости, сопровождающегося мощными гидравлическими и кавитационными ударами (эффект П.А. Юткина). Достоинствами данного способа являются малая энергоемкость и высокая выходная мощность. Однако данный способ малоэффективен при разрушении крепких горных пород (выше VI–VII категории по буримости).

Кавитационный способ заключается в действии гидравлических ударных волн, возникающих в жидкости в момент удара ее и взвешенных в ней герметически закрытых капсул, из которых предварительно удален воздух. Способ обладает высоким разрушающим эффектом и имеет важную особенность: при одних и тех же параметрах вакуумной полости запас энергии и импульс давления в жидкости при ее смыкании увеличивается с ростом гидростатического давления, т.е. по мере углубления скважины при бурении. Однако серьезным препятствием для широкого применения способа являются малая выходная мощность и высокая стоимость капсул.

Сущность *абразивно-ударных* способов заключается в разрушении пород высоконапорной струей жидкости, содержащей во взвешенном состоянии породоразрушающие частицы.

Первым представителем абразивно-ударного способа РГП является *гидромониторно-абразивный*, при котором разрушение осуществляется жидкостью, несущей абразивные частицы: кварцевый или корундовый песок, стальные опилки и т.п. По существующим представлениям разрушение горной породы при этом осуществляется за счет ее многократной деформации при ударе частиц, а также посредством микрорезания при воздействии частиц, движущихся по направлениям, касательным к поверхности горной породы.

Судя по результатам обширных исследований способа применительно к бурению скважин [1, 47, 48, 53, 57, 93, 95, 100, 109] установлено, что гидромониторно-абразивный способ весьма эффективен при бурении в абразивных породах, где стойкость обычного ПРИ мала. Он сохраняет преимущества, присущие гидромониторному способу. Вместе с тем для эффективного разрушения забоя скважины необходимы меньшие скорости жидкости (100–200 м/с). Существенными недостатками способа являются:

- повышенный износ насосного оборудования, циркуляционной системы и сопловых насадок ПРИ;
- необходимость в большом количестве абразивных частиц (до 200 тонн для бурения глубокой скважины);
- большая вероятность прихвата бурильной колонны при внезапной остановке циркуляции промывочной жидкости;
- невозможность бурения в пластичных несцементированных горных породах.

При *гидромониторно-ударном* способе разрушение горных пород осуществляется жидкостью, несущей металлические шары или сечку. При этом помимо воздействия жидкости, разрушение горных пород происходит

за счет многократного ударного действия частиц, что сопровождается хрупким разрушением и пластической деформацией породы.

По экспериментальным данным, полученным И.А. Остроушко, Н.Н. Павловой и Л.А. Шрейнером, И.Ф. Медведевым и А.И. Пуляевым, наилучшей формой рабочей поверхности при разрушении крепких горных пород является сферическая, т.к.:

- при этой форме сохраняется первоначальная «заостренность» породоразрушающих частиц [61];
- несмотря на незначительно большее значение энергоемкости процесса разрушения по сравнению с плоским штампом сферическая форма инструмента является наиболее износостойкой [62];
- сферическая форма обладает наибольшей прочностью [55, 56].

О целесообразности применения в качестве породоразрушающих частиц стальных или твердосплавных шаров говорят исследования А.Б. Увакова [105, 106]. В процессе бурения металлической сечкой она сминалась и приобретала форму, близкую к шаровидной. Увеличения эффективности бурения при этом не было обнаружено.

Одним из направлений реализации гидромониторно-ударного способа РГП является так называемое шароструйное бурение, предложенное в 1955 г. американской нефтяной компанией «Картер Ойл К°». Данный способ реализуется с помощью специального инжекторного аппарата, который осуществляет непрерывную циркуляцию шаров в призабойной зоне. При этом нет необходимости в большом количестве шаров, модернизации циркуляционной системы.

Каждый из рассмотренных выше способов РГП наряду с достоинствами имеет недостатки, которые снижают показатели его работы в определенных условиях. Поэтому в практике бурения намеренно прибегают к комбинации различных способов РГП, что обычно повышает их эффективность, расширяет область применения. При этом один из способов является основным (ведущим). Можно выделить группу *комбинированных*

способов РГП, в которых сочетается механический способ с эрозионным или абразивным, что обеспечивает рост эффективности разрушения горных пород без увеличения мощности бурового оборудования.

Механоэрозионный и механоабразивный способы реализуются в самом распространенном сегодня *гидромониторно-вращательном* способе РГП. При бурении *механоэрозионным* способом, который реализуется в гидромониторных долотах, разрушение струей воды носит вспомогательный характер и эффективно лишь в мягких горных породах. Примером реализации *механоабразивного* способа является бурение гидромониторными долотами с использованием жидкости с абразивом либо шламом для интенсификации процесса разрушения.

Эрозионномеханический и абразивномеханический способы РГП реализуются в конструкциях долот для гидромониторного и гидромониторно-эрозионного бурения. Существенным недостатком долот, реализующих эрозионный и абразивный способы РГП, является формирование криволинейной формы забоя, который снижает механическую скорость бурения или приводит к остановке процесса углубки скважины. Поэтому использование породоразрушающих элементов долота, реализующих механическое воздействие, повышает их эффективность.

Анализ гидродинамических способов РГП показал, что применительно к бурению скважин в крепких горных породах (выше VII–VIII категории по буримости) ни один из способов первой группы (эрозионные способы) не может быть успешно реализован на практике из-за большой энергоемкости.

Комбинированные способы РГП не представляют большого практического интереса для бурения скважин из-за значительной сложности технологии и технических средств для их реализации, а также малой стойкости породоразрушающих инструментов.

Из группы абразивно-ударных способов РГП наиболее перспективным является гидромониторно-ударный способ, реализуемый с

помощью шароструйных аппаратов, осуществляющих непрерывную циркуляцию шаров в призабойной зоне.

1.2. Выбор и обоснование перспективных направлений исследований по повышению эффективности шароструйного бурения скважин

1.2.1. Обзор и анализ результатов исследований шароструйного способа бурения скважин

Исследованием шароструйного способа бурения в США занимались L.W. Ledgerwood, I.E. Eckel, F.H. Deily, A.W. McCray, F.W. Cole, J.E. Ortloff, G.H. Ramsey, P.S. Williams, M. Roth, A.B. Hildebrandt, E.M. McNatt, J.M. Camp и др., в СССР – А.Б. Уваков, А.В. Штрассер, Н.Т. Туякбаев, М.Н. Нурлыбаев, А.В. Васильев, М.М. Майлибаев, С.А. Заурбеков, О.Л. Дербенева, Л.С. Дербенев, А.В. Дугарцыренов, В.П. Коротков, Т.Н. Зубкова и др. На Украине разработкой шароструйных снарядов занимаются А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов, С.С. Вяткин.

Способ разрушения горных пород ударами шаров был предложен в 1955 г. группой ученых американской нефтяной компании «Картер Ойл К°». Результаты этих исследований освещены в работах И.Э. Эскеля, Ф.Г. Дэйли, Л.У. Леджерворда [50, 113]. Некоторые данные приводятся в работах А.У. Маккрея и Ф.У. Коле [52]. Целью исследований была разработка более эффективного способа бурения нефтяных скважин. Убедившись в возможности разрушения горных пород ударами быстродвижущихся стальных шаров, исследователи решили проблему создания устройства, позволяющего осуществлять разгон шаров и их рециркуляцию. Устройством, наиболее полно отвечающим этим требованиям, оказался струйный насос.

На рис. 2 представлена базовая конструкция шароструйного снаряда, названная «гравитационно-инжекционной» [113], т.к. ввод шаров в камеру смешения осуществляется за счет сил тяжести и инъекции.

В данной конструкции колонна бурильных труб 1, заканчивающаяся первичным соплом 2, соединена с вторичным соплом 3 посредством ребер 4.

На забой скважины засыпается порция шаров 5, включается буровой насос. Рабочая жидкость, подводимая к аппарату, ускоряется в первичном сопле 2 и на выходе из него истекает с большой скоростью во вторичное сопло 3. При этом в пространстве между первичным 2 и вторичным 3 соплами образуется зона разряжения. Благодаря разряжению происходит всасывание рабочей жидкости со взвешенными шарами 5 и частицами шлама 6 из затрубного пространства. Двухфазная смесь проходит через камеру смешения и ударяется о горную породу 7, осуществляя разрушение.

Далее жидкость увлекает шары 5 в кольцевой зазор между долотом и стенками скважины, которые, частично рециркулируя, поднимаются выше сопла 2 и останавливаются вследствие увеличения кольцевого пространства и уменьшения количества жидкости за счет ее инъекции, образуя «облако резервных шаров» 8, откуда за счет сил гравитации последние опускаются с последующим всасыванием. Данный процесс многократно повторяется.

В результате лабораторных исследований было проведено ряд работ, имеющих важное значение:

- исследованы процессы передачи энергии от жидкости шарам, от шаров горной породе;
- проведено исследование влияния геометрических размеров на характеристики струйного насоса, как основной части гравитационно-эжекторного долота;
- исследовано влияние размера и массы порции шаров, расстояния между долотом и забоем, расхода жидкости, типа промывочной жидкости на эффективность шароструйного бурения.

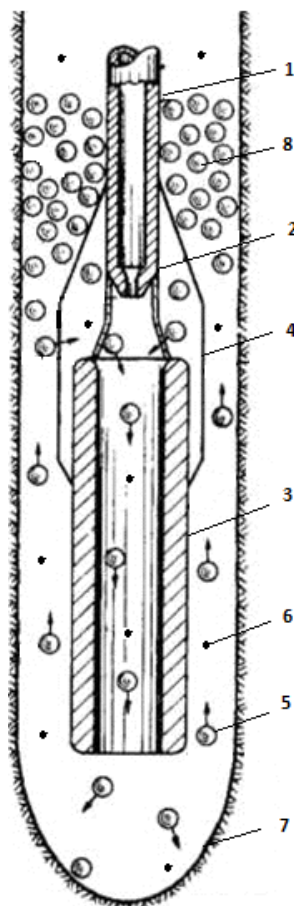


Рис. 2. Гравитационно-инжекционный шароструйный снаряд:
 1 – колонна бурильных труб; 2 – сопло; 3 – вторичное сопло; 4 – ребра;
 5 – породоразрушающие шары; 6 – шлам выбуренной породы; 7 – горная
 порода; 8 – «облако резервных шаров»

На основе результатов лабораторных исследований были сконструированы два шароструйных снаряда диаметром 228,6 мм [113]. Буры имели сменные камеры смешения диаметром 89 и 102 мм и набор сопел диаметром от 15,9 до 23,8 мм. Следует отметить, что аппараты были изготовлены из стали SAE4340 и закалены до твердости 36–40 С по Роквеллу. Сопла изготавливали из вольфрамо-кобальтового твердого сплава. Шары производились на специальном прессе из стали SAE52100 и закалялись до твердости 50–53 С по Роквеллу. Испытания калибровочных лап, применяемых для поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем, при воздействии на бур осевой нагрузки 12,2 тс и крутящего момента, равного 693 кгс·м, показали их удовлетворительную прочность.

В ходе промышленных испытаний было пробурено 16,2 м в мраморе, известняке и розовом кварците с применением в качестве промывочной жидкости воды. В табл. 1 представлены условия проведения испытаний.

Таблица 1 – Условия проведения промышленных испытаний шарикового бура

Параметр	$D_{сн}$, мм	$M_{кр}$, кгс·м	$G_{ос}$, кгс	$V_{вр}$, об/мин	d_c , мм	$d_{кс}$, мм	k_s	$P_{ст}$, МПа	Δp_c , МПа	Q , л/мин	$d_{ш}$, мм	$M_{ш}$, кг	$V_{ж}$, м/с	$V_{вп}^1$, м/с	$V_{вп}^2$, м/с	$V_{вп}^3$, м/с	$Q_{ш}$, шт/с	$V_{ш}$, м/с
Значение	228,6	46,4	736	20	22,1	89	3,6	5,05–5,33	3,9–4,18	1970	31,8	63,4–86,2	24,1	5,5	1,13	0,95	140	22,8
Примечание																		
$D_{сн}$ – диаметр снаряда, $M_{кр}$ – крутящий момент, $G_{ос}$ – осевая нагрузка, $V_{вр}$ – скорость вращения, d_c – диаметр сопла, $d_{кс}$ – диаметр камеры смешения, k_s – коэффициент эжекции, $P_{ст}$ – давление на стояке, Δp_c – перепад давления в сопле, Q – расход воды, $d_{ш}$ – диаметр шаров, $M_{ш}$ – масса шаров, $V_{ж}$ – скорость жидкости на выходе из камеры смешения, $V_{вп}^1$, $V_{вп}^2$, $V_{вп}^3$ – скорости восходящей жидкости соответственно в зазоре между аппаратом и скважиной, возле сопла и возле бурильных труб, $Q_{ш}$ – расход шаров в камере смешения, $V_{ш}$ – скорость вылета шаров из камеры смешения																		

При бурении оклахомского мрамора (мягкая порода) средний диаметр скважины равнялся 292,1 мм, а средняя скорость проходки составила 2,29 м/ч. По вирджинскому известняку (порода средней крепости) была получена средняя механическая скорость 1,22 м/ч при диаметре скважины 254 мм. Средняя механическая скорость бурения розового кварцита (твердая порода) составила 0,15 м/ч, а диаметр скважины – 251 мм. При этом наблюдался интенсивный износ калибровочных лап при бурении кварцита. При бурении мрамора и известняка стальные шары практически не изнашивались, при бурении же кварцита за 3,5 часа вес порции в 63,5 кг уменьшился на 1,13 кг. Износ поверхностей камеры смешения и других деталей аппарата был незначителен.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ было сделано заключение о возможности «производить разрушение горных пород с заметной скоростью, что показывает реальность принципов бурения ударами шаров. Дальнейшие работы могут быть выполнены для полного определения их перспективности в условиях производства» [113]. Однако уже через пять лет (в 1961 г.) один из участников этих исследований Л.У.

Леджервуд [50] отмечал: «Импульсное шариковое бурение не имеет практического применения. На достигнутом уровне с его помощью можно разрушать породы, но с экономической точки зрения этот процесс значительно менее выгоден, чем обычное вращательное бурение». В отечественной литературе некоторые исследователи [19, 102], вероятно основываясь на выводах Л.У. Леджервуда, также характеризовали называемый ими «ударно-дробовой способ бурения» как малоперспективный.

Несмотря на приведенные заключения, с 1963 г. в Южно-Казахстанском геологическом управлении начались дальнейшие исследования данного способа бурения, называемого шароструйным (при этом породоразрушающий инструмент (ПРИ) назывался «шароструйным аппаратом»). Причем в силу того, что для эффективной работы шароструйного аппарата нет необходимости в его вращении, его применяли для искусственного искривления геологоразведочных скважин. Анализируя результаты американских ученых, руководитель исследований А.Б. Уваков указывал на их не совсем объективные выводы [106]. Американцы при проведении экспериментов делали акцент на определение физической сущности работы шароструйных аппаратов, в тоже время вопросам разрушения горных пород уделялось неоправданно мало внимания. В результате они совершили явную ошибку, пытаясь бурить различные по крепости горные породы при одинаковой скорости вылета шаров из аппарата, равной 22,8 м/с.

В результате проведенных исследований [105, 106] были решены следующие вопросы, имеющие важное научное и практическое значение для совершенствования шароструйного способа бурения скважин:

- сформулирована версия механизма разрушения горных пород ударами шаров;
- выявлены основные аналитические зависимости, характеризующие процесс разрушения горных пород ударами шаров;

- выявлены основные факторы, влияющие на скорость шароструйного бурения;
- разработана методика выбора и расчета основных геометрических параметров шароструйного аппарата;
- разработана методика расчета процессов шароструйного бурения;
- разработаны и испытаны различные конструкции шароструйных снарядов;
- разработана методика направленного бурения скважин и изучены основные закономерности искусственного искривления шароструйными отклонителями.

Авторами установлено, что при разрушении той или иной горной породы существует оптимальная скорость соударения шаров с забоем (40–180 м/с), которая зависит от упругих свойств материала шаров и горной породы, диаметра и плотности шаров, динамической твердости горной породы. Скорость шароструйного бурения в режиме усталостного разрушения с увеличением твердости горных пород уменьшается, а в режиме оптимального разрушения – увеличивается. Эта зависимость является очень важной, т.к. подчеркивает целесообразность применения способа для бурения крепких горных пород. В оптимальном режиме износ шаров и шароструйного аппарата будет минимальным вследствие исключения отскока шаров от забоя. Скорость проходки при этом может достигать до 20 м/ч в породах VII–XI категорий по буримости.

Результаты исследований С.А. Заурбекова [25] сводятся к следующему:

- получена количественная оценка рациональных параметров призабойных процессов при шароструйном бурении;
- разработан шароструйный снаряд с первичным и вторичным соплами кольцевой (щелевидной) формы и опорой по центру;
- установлены рациональные параметры натурального шароструйного снаряда и уточнены условия, обеспечивающие эффективность его работы;

- разработана методика расчета и конструирования шароструйных снарядов.

Промышленные испытания показали превышение механической скорости бурения на 20% и проходки на долото на 43% по сравнению с серийными долотами. Бурение осуществлялось в интервале 500–1100 м по породам средней крепости при следующих параметрах режима бурения: расход жидкости – 30 л/с, осевая нагрузка – 10 кН, частота вращения – 90 об/мин, плотность бурового раствора – 1060 кг/м³.

В XXI веке интерес специалистов к шароструйному бурению заметно снизился. В публикуемых работах чаще рассматриваются проблемы конструирования при исследовании комбинированных способов разрушения горных пород. Так шароструйное бурение заинтересовало украинских исследователей [2, 20, 22, 23, 26], которыми были получены следующие результаты:

- исследован механизм разрушения горных пород единичным ударом шара и получены соответствующие аналитические зависимости процесса;
- сконструированы снаряды, в основе которых лежит комбинация шароструйного с дробовым и ударным способами;
- разработаны методики расчета подобных снарядов;
- изучен механизм разрушения горных пород данными снарядами;
- проведен анализ основных аналитических зависимостей, определяющих гидравлическую программу очистки скважины при бурении данным способом.

На основании вышеизложенного, можно отметить ряд преимуществ шароструйного бурения [36]:

1. возможность реализации на забое скважины большой мощности;
2. значительная продолжительность рейса, которая будет ограничиваться лишь износостойкостью шароструйного аппарата, т.к. возможна замена износившихся шаров новыми;
3. простота конструкции шароструйного аппарата;

4. отсутствие необходимости в создании высоких осевых нагрузок на ПРИ;

5. возможность бурения с малой частотой вращения ПРИ (а также без вращения), что позволяет уменьшить износ бурильных труб, использовать легкосплавные бурильные трубы, а также проводить искусственное искривление ствола скважины.

Достоинства шароструйного бурения указывают на принципиальную возможность и экономическую целесообразность его использования для проходки скважин в крепких и очень крепких горных породах. Однако при разработке данного способа РГП не решено ряд проблем, сдерживающих его внедрение на производстве:

1. малое значение КПД шароструйного бурения, в связи с чем для эффективного разрушения крепких горных пород необходимо использование мощной насосной техники;

2. отсутствие экспериментально полученной информации об энергоемкости разрушения горных пород шароструйным способом;

3. нецелесообразность бурения в сильно трещиноватых, а также пластичных горных породах;

4. сложность конструкции и малое значение высоты отбираемого керна при бурении шароструйными бурильными головками;

5. сложность поддержания необходимого расстояния между долотом и забоем, а также диаметра скважины;

6. трудность выбора конструкции шароструйного аппарата для конкретных геологических условий бурения;

7. отсутствие единой методики расчета геометрических параметров шароструйных снарядов и технологических параметров режима бурения.

Остановимся на терминологии этого способа бурения. В США данный способ бурения называли «импульсное шариковое бурение» [50, 52, 113], в СССР – «шароструйное бурение» [105, 106, 112], «ударно-дробовое бурение»

[19, 102], на Украине – «абразивно-механическое ударное бурение» [2, 20, 22, 23, 26].

Термины «импульсное шариковое бурение», «абразивно-механическое ударное бурение» являются слишком громоздкими, термин «ударно-дробовое бурение» указывает на бурение дробью, а не на получившее распространение бурение шарами, поэтому их применение не является корректным. По нашему мнению, более удачным, к тому же наиболее распространенным термином является «шароструйное бурение».

Буровой снаряд для реализации данного способа в США назывался «шариковый импульсный бур со струйным насосом» [113], «гидромониторный шариковый импульсный бур» [50, 52], в СССР и на Украине – «шароструйный аппарат», «шароструйный снаряд» [2, 20, 22, 23, 26, 105, 106, 112].

Термины, характеризующие буровой снаряд при шароструйном бурении, используемые в США, являются громоздкими. Термины «шароструйный аппарат», «шароструйный снаряд», безусловно, являются более удачными, однако они не отражают сущность способа, в котором непрерывная циркуляция шаров в призабойной зоне осуществляется за счет процесса эжекции. В связи с вышесказанным в дальнейшем изложении будет использоваться термин «шароструйно-эжекторный буровой снаряд» (ШЭБС).

1.2.2. Выбор и обоснование конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда для эффективного разрушения твердых горных пород

Одним из перспективных направлений создания технических средств для повышения эффективности шароструйного бурения является разработка новых научно обоснованных конструкций шароструйно-эжекторных буровых снарядов (ШЭБС), т.к. именно они реализуют взаимодействие шаров с породой на забое, передавая им необходимую энергию для циркуляции шаров в призабойной зоне скважины. В процессе исследований было проведено значительное количество поисковых работ, а также

проанализированы различные конструкции буровых снарядов данного типа, которые позволили выделить следующие проблемы [45]:

1. Серьезнейшей проблемой является формирование периферийной части забоя скважины, т.к. он имеет вогнутую форму.

2. Известно, что для эффективного разрушения горных пород буровой снаряд необходимо располагать на определенном расстоянии от забоя скважины. Поэтому имеет место проблема поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем.

3. При работе снаряда существует проблема обеспечения оптимальной траектории движения шаров, которая обеспечивала бы их быстрый подъем в затрубном пространстве и прохождение через впускные окна.

В этом направлении работают отечественные и зарубежные специалисты, которыми созданы новые технические решения по совершенствованию ШЭБС.

Способы решения проблемы формирования периферийной части забоя скважины предлагались различными исследователями. Среди них можно выделить следующие:

- разрушение периферийной части забоя ударами шаров, вылетающих из струйного аппарата, расположенного параллельно оси скважины [6, 7, 9, 11, 12, 25, 73, 75, 77, 78, 80–82, 84, 85, 87, 88] и под некоторым углом [83, 89, 90, 112];

- разрушение периферийной части забоя механическим вооружением лопастного [8, 10, 13, 71, 72, 76, 86] и дробового [64–69, 74, 79] типов.

Уваков А.Б. и др. [105, 106] при проведении полевых испытаний для поддержания оптимального расстояния от долота до забоя скважины использовал следующий метод. Рассчитывалась средняя механическая скорость проходки в определенных горных породах, затем через каждый равный промежуток времени шароструйный аппарат опускался на определенную величину (например, через каждые 2 минуты на 1 см). Однако

использование данного способа поддержания расстояния сомнительно в случаях:

- малой геологической изученности буримых горных пород;
- при бурении скважин на больших глубинах.

Другие способы решения проблемы поддержания требуемого расстояния между долотом и забоем были предложены в патентных и других материалах:

- использование специального устройства для измерения расстояния от среза струйного аппарата до забоя скважины, выполненного на основе механического щупа [77] и счетчика количества шаров, проходящих через камеру смешения [12];

- жесткое закрепление струйного аппарата относительно механического вооружения, разрушающего периферийную [8, 10, 13, 64–69, 71, 72, 74, 76, 79, 86] или центральную [6, 25, 78] части забоя скважины;

- различные конструктивные особенности, основанные на изменениях гидродинамических условий в призабойной зоне при изменении расстояния между долотом и забоем [81, 84];

- использование в конструкции долота перекатывающегося по забою опорного элемента [89] или специальных опор [113].

Поиск и анализ патентных материалов дал возможность выделить ряд возможных способов решения проблемы обеспечения оптимальной траектории движения шаров:

- установка магнита в нижнюю часть корпуса струйного аппарата, что позволяет отклонять шары, отскочившие от забоя, к периферии скважины для более быстрого их подъема [71];

- резкое уменьшение площади снаряда над впускными окнами, что позволяет значительно снизить скорость восходящего потока и направить шары в камеру смешения для последующего всасывания [8, 11, 12, 81, 85, 88, 89];

- удержание поднимающихся восходящим потоком шаров при помощи задерживающего устройства [25, 82, 83, 87] и конструктивно в корпусе снаряда [6, 10, 13, 71–76, 78, 90];

- поднятие шаров паром при использовании газообразных рабочих агентов [11, 13].

При использовании механического вооружения для разрушения периферийной части забоя скважины возможны его заклинки, которые можно ликвидировать или предупредить за счет возможности отклонения камеры смещения струйного аппарата при создании определенного значения осевой нагрузки [8]. Так как на больших глубинах присутствует сложность поддержания цилиндрической формы скважины, то компоновка бурильной колонны может быть снабжена калибратором для проработки стенок скважины [6, 25].

Американские исследователи [113] для проведения полевых испытаний использовали названный ими «гравитационно-инжекционный» буровой снаряд (рис. 3). В конструкции снаряда было предусмотрено использование специальных лап 7, контактирующих с забоем скважины для поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем, не разрушая его. Важной особенностью данного снаряда является образование «облака резервных шаров» 8 на уровне сопла 2.

К недостаткам данной конструкции следует отнести:

- повышенный износ лап за счет контакта с горными породами и ударов циркулирующих шаров;

- необходимость во вращении бурового снаряда для разрушения зон забоя, перекрываемых лапами;

- перекрытие лапами значительной площади забоя, в связи с чем уменьшается эффективность шароструйного бурения;

- необходимость поддержания оптимального расхода жидкости, т.к. при его уменьшении «облако резервных шаров» будет располагаться ниже сопла, а при повышении расхода жидкости – выше, что приведет к снижению

расхода шаров в камере смешения, следовательно, уменьшению эффективности шароструйного бурения.

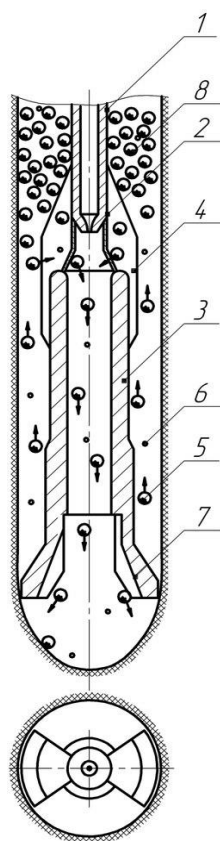


Рис. 3. «Гравитационно-инжекционный» буровой снаряд [9]:

- 1 – колонна бурильных труб; 2 – сопло;
- 3 – камера смешения; 4 – ребра;
- 5 – породоразрушающие шары; 6 – шлам выбуренной породы; 7 – лапы;
- 8 – «облако резервных шаров»

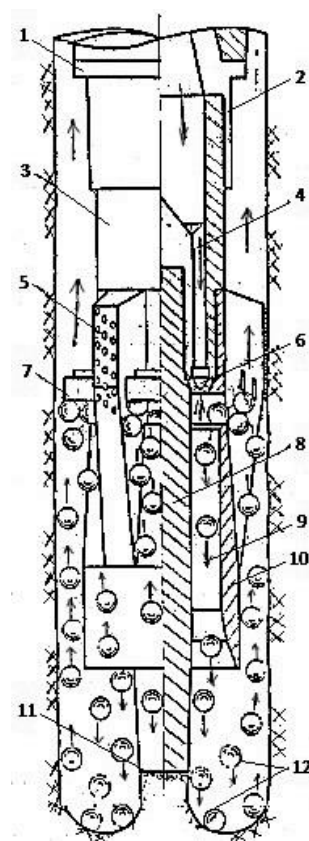


Рис. 4. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с соплом и камерой смешения кольцевой формы (по Заурбекову С.А.):

- 1 – калибратор; 2 – переводник;
- 3 – присоединительная головка;
- 4 – подводящие жидкость каналы;
- 5 – калибрующе-центрирующие ребра;
- 6 – кольцевое сопло;
- 7 – задерживающее устройство;
- 8 – опора снаряда; 9 – кольцевая камера смешения; 10 – корпус снаряда;
- 11 – твердосплавные зубки; 12 – шары

Заурбековым С.А. в работе [25] указывается на малый расход шаров в камере смешения (не более 140 ш/с), осуществляемый струйным аппаратом с соплом и камерой смешения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением. В связи с этим был предложен снаряд с соплом 6 и камерой смешения 9 кольцевой формы, при этом центральная часть забоя

скважины разрушается с помощью опоры 8, заканчивающейся твердосплавными зубками 11 (рис. 4). Такая конструкция обеспечивает поддержание оптимального расстояния между долотом и забоем в процессе бурения, использование задерживающего устройства 8 позволяет снять ограничения на максимальный расход промывочной жидкости, а также направлять шары во впускные окна.

Однако данная конструкция обладает рядом недостатков:

- наличие сопла щелевидной формы усложняет изготовление бурового снаряда;
- наличие опоры, разрушающей центральную часть забоя скважины, приводит к быстрому ее износу, особенно при бурении твердых и крепких горных пород;
- для работы снаряда необходимы вращение и осевая нагрузка на долото, что противоречит первоначальной концепции шароструйного бурения и усложняет процесс бурения;
- разрушение забоя комбинированным способом (периферийной части – шароструйным, центральной – вращательным) приводит к разной скорости разрушения, т.е. к сложности управления за процессом бурения.

Как отмечалось выше, ряд авторов считает эффективной конструкцию ШЭБС, в основе которой лежит струйный аппарат с соплом и камерой смешения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением, периферийная часть при этом разрушается механическим вооружением лопастного (рис. 5) и дробового (рис. 6) типов. Однако данные конструкции имеют недостатки, связанные с комбинированным разрушением забоя скважины: износ механического вооружения снаряда, необходимость во вращении и осевой нагрузке, сложность управления за процессом бурения.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что проанализированные конструкции ШЭБС эффективны лишь для бурения в интервалах мягких и средних по крепости горных пород. При разработке

конструкций ШЭБС для бурения в интервалах твердых и крепких горных пород необходимо учитывать следующие требования [38, 114]:

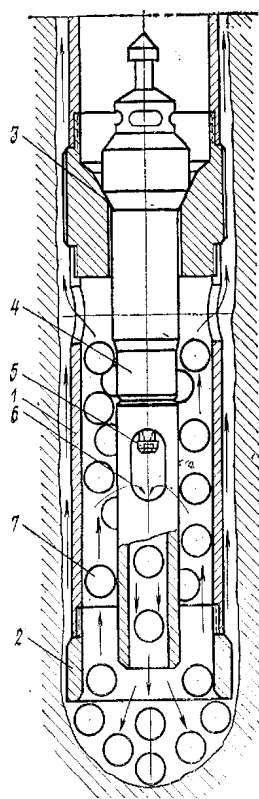


Рис. 5. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с механическим вооружением лопастного типа:
1 – корпус; 2 – породоразрушающий опорный башмак; 3 – гнездо;
4 – струйный аппарат; 5 – сопло;
6 – камера смешения с окнами;
7 – шары

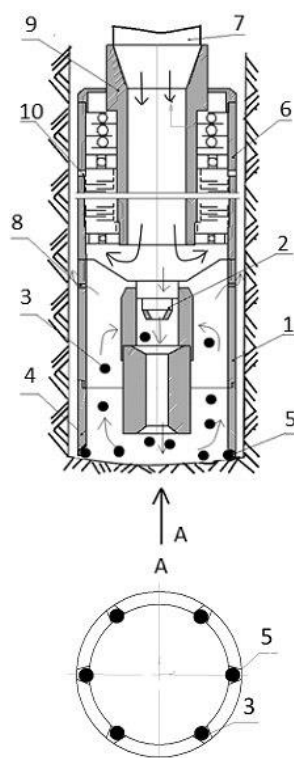


Рис. 6. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с механическим вооружением дробового типа:
1 – корпус; 2 – струйный аппарат;
3 – породоразрушающие шары;
4 – породоразрушающее кольцо;
5 – посадочные гнезда;
6 – турбинный аппарат;
7 – колонна бурильных труб;
10 – отверстия

- отсутствие постоянного контакта бурового снаряда с забоем скважины, т.е. буровые снаряды с лапами, опорой и опорным башмаком являются нерациональными;

- конструкции буровых снарядов должны обеспечивать технологию бурения без вращения бурового снаряда и создания осевой нагрузки, т.к. это противоречит первоначальной концепции шароструйного бурения;

- в основе конструкции бурового снаряда должен лежать струйный аппарат с соплом и камерой смешения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением;

- камера смешения струйного аппарата должна оканчиваться диффузором, использование которого позволит шарам более интенсивно разрушать периферийную часть забоя скважины, что позволит поддерживать минимальное значение расстояния между долотом и забоем и увеличит эффективность шароструйного бурения;

- в конструкцию бурового снаряда необходимо включать задерживающее устройство, позволяющее снять ограничения на расход промывочной жидкости;

- конструкция бурового снаряда должна обеспечивать контроль над оптимальным расстоянием между долотом и забоем и требуемым диаметром скважины;

- в конструкции бурового снаряда должна быть предусмотрена возможность замены изношенных шаров новыми в процессе рейса;

- конструкция бурового снаряда должна отличаться простотой устройства и эксплуатации. В этом случае техническое решение оказывается технологически и экономически оправданным.

На рис. 7 представлена схема базовой конструкции бурового снаряда, принятого нами для проведения экспериментальных исследований, в которой учтены все приведенные выше требования.

Эффективность шароструйного бурения определяется множеством факторов, поэтому изменение условий бурения (например, переход от бурения одной породы к другой) должно сопровождаться соответствующей корректировкой работы снаряда без проведения спускоподъемных операций. Поэтому необходима разработка средств автоматизации и контроля процесса углубки скважины.

Известно [25, 105, 106, 112], что процесс бурения шароструйным способом складывается из нескольких определенных последовательных

этапов: 1) доставка на забой скважины шаров; 2) спуск в скважину бурового снаряда; 3) процесс бурения; 4) подъем аппарата из скважины; 5) удаление изношенных шаров с забоя.

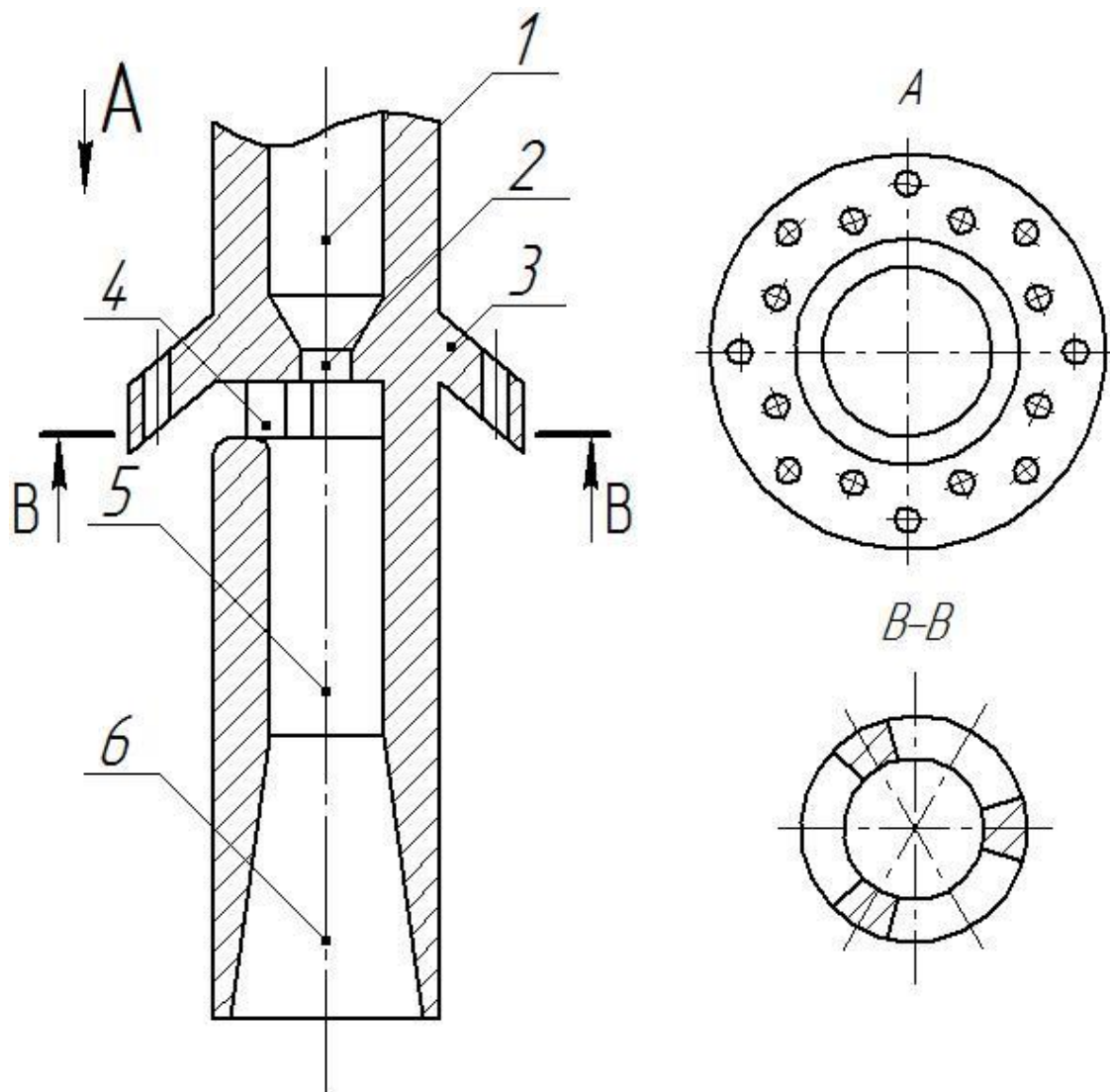


Рис. 7. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд:

1 – камера подвода рабочей жидкости; 2 – сопло; 3 – задерживающее устройство; 4 – ребра между технологическими окнами; 5 – камера смешения; 6 – диффузор

В работах [105, 106, 112] представлена информация о проведении полевых испытаний шароструйного способа бурения скважин. При этом было опробовано два способа доставки шаров на забой скважины. Первый заключается в доставке шаров в бумажных пакетах, которые сбрасывались в скважину. После включения подачи бурового раствора и начала процесса

бурения эти пакеты размягчаются, из них высыпаются шары и пакеты выносятся на поверхность. Второй способ заключается в спуске в скважину специального контейнера, представляющего из себя колонковую трубу, суженную в нижней части и забитую глиной. Данный контейнер спускается на бурильных трубах, после включения насоса, под давлением жидкости шары продавливают глину и перемещаются на забой скважины, а контейнер извлекается на поверхность. Для удаления шаров с забоя скважины используют шароуловители различных конструкций, спускаемые на забой после извлечения долота из скважины. Высокая трудоемкость, низкая надежность и значительные потери времени на спуско-подъемные операции при выполнении этих операций требуют разработки устройства, обеспечивающего спуск бурового снаряда с шарами на забой скважины и их подъем с забоя скважины вместе со снарядом после окончания рейса без дополнительного спуска шароуловителя.

1.2.3. Анализ факторов, определяющих эффективность шароструйного бурения

Следует отметить, что в дальнейшем изложении работы используются следующие основные показатели эффективности шароструйного бурения: механическая и рейсовая скорости бурения, а также проходка на долото.

Эффективность шароструйного бурения по показателю «механическая скорость бурения» определяется множеством факторов, которые можно разделить на 4 основные группы: свойства горных пород, геометрические параметры скважины, геометрические параметры бурового снаряда и технологические параметры режима бурения. Разработанная нами классификация факторов, определяющих эффективность шароструйного бурения, представлена на рис. 8.



Рис. 9. Классификация факторов, определяющих эффективность шароструйного бурения

Влияние свойств горных пород на эффективность шароструйного бурения

В работах [15–16, 25, 28, 105–107, 112], посвященных вопросу взаимодействия движущихся шаров с горной породой, был сделан вывод о схожести механизма разрушения породы от удара шаров с механизмом динамического вдавливания сферических инденторов.

Анализ исследований процесса разрушения ударами шаров [24, 25, 51, 63, 105–107, 110–112] позволил сделать следующие выводы:

1. в зависимости от величины контактных давлений p_k при шароструйном бурении возможны три режима разрушения горных пород (рис. 10): режим поверхностного истирания, усталостный и оптимальный;

2. эффективность шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения возрастает с уменьшением пластичности горных пород и увеличением их твердости;

3. расчет скорости шара для разрушения пород в оптимальном режиме необходимо производить исходя из динамической твердости горных пород.

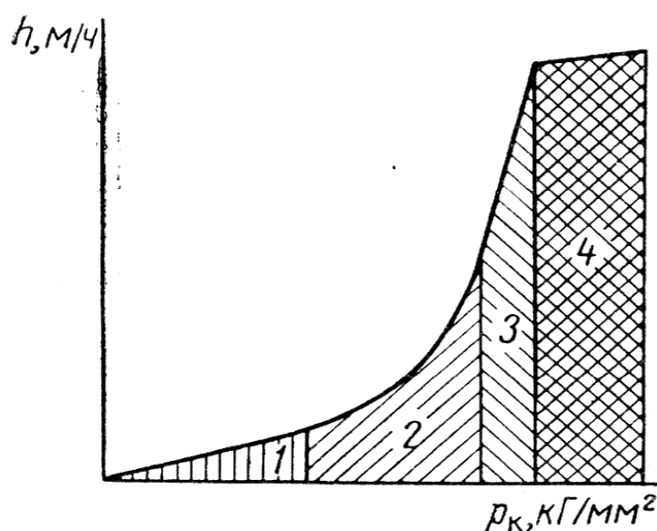


Рис. 10. График, характеризующий различные режимы разрушения горных пород ударами шаров:
1 – режим поверхностного истирания; 2,3 – режимы усталостного разрушения;
4 – оптимальный режим разрушения

При описании процессов шароструйного бурения очень важен вопрос о распределении энергии, запасенной шаром к моменту соударения с горной породой.

Если к моменту хрупкого разрушения кинетическая энергия, запасенная шаром, полностью исчерпана, т.е. перешла в потенциальную энергию упругой деформации шара и горной породы, то в результате скачкообразного разрушения сплошности породы под контактной поверхностью шар внезапно «теряет опору» и потенциальная энергия его упругой деформации затрачивается на звук и теплообразование [8, 9, 11].

Если же энергия удара не исчерпана, произойдет следующий цикл нагружения горной породы. При этом контактная площадка значительно

увеличится и потребуется намного больше энергии для второго скачка в разрушении.

В случае, когда энергия удара оказывается недостаточной для образования лунки, большая часть потенциальной энергии упругой деформации шара и горной породы восстановится в виде кинетической энергии отскока шара.

Известно [106], что при высокой скорости шаров в момент соударения горная порода теряет пластические свойства, т.е. можно предположить, что они до момента хрупкого разрушения будут деформироваться упруго. В связи с этим для вывода аналитических зависимостей, характеризующих процесс разрушения ударами шаров, важными показателями являются коэффициент Пуассона и модуль упругости горной породы.

Согласно [105–107], требуемую скорость движения шаров в момент соударения с горной породой, необходимую для ее разрушения в оптимальном режиме, можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{ш опт}}^{\text{ш}} = 2,15 \cdot \left(\frac{4 \cdot (1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{4 \cdot (1 - \mu_2^2)}{E_2} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot P_c^5}{10 \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}^3 \cdot \left(\frac{4}{d_{\text{ш}}} - \frac{4}{0,78 \cdot D_{\text{скв}}} \right)^3}}, \quad (1)$$

где P_c , E_1 , μ_1 – динамическая твердость (Па), модуль упругости (Па), коэффициент Пуассона горной породы; $\rho_{\text{ш}}$, E_2 , μ_2 – плотность (кг/м^3), модуль упругости (Па), коэффициент Пуассона породоразрушающих шаров; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шаров (м); $D_{\text{скв}}$ – диаметр скважины (м).

Влияние геометрических параметров скважины на эффективность разрушения горных пород

Известно, что забой при шароструйном бурении состоит из цилиндрической и криволинейной частей. Вопросы формирования криволинейной части забоя скважины нашли отражение в работах [25, 105, 106, 112].

На рис. 11 изображен диффузор шароструйного аппарата над плоским забоем. Шары, соударяющиеся с поверхностью забоя по нормали, воздействуют на него со скоростью v . При соударении с забоем в крайних точках шары воздействуют с меньшей скоростью, равной $v_n = v \cdot \cos \alpha_{max}$.

При рассмотрении формы забоя в плоскостной системе координат xoy установили [105, 106, 112], что правая половина кривой в первой четверти состоит из двух частей (рис. 12). Нижняя до определенного значения y описывается уравнением окружности:

$$y = r - \sqrt{(r^2 - x^2)}, \quad (2)$$

где r – радиус кривизны забоя в нижней части в плоскости xoy , м.

Верхняя же часть до определенного значения y описывается уравнением:

$$x = R_{скв} \cdot (1 - e^{-ky}), \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от диаметра используемых шаров.

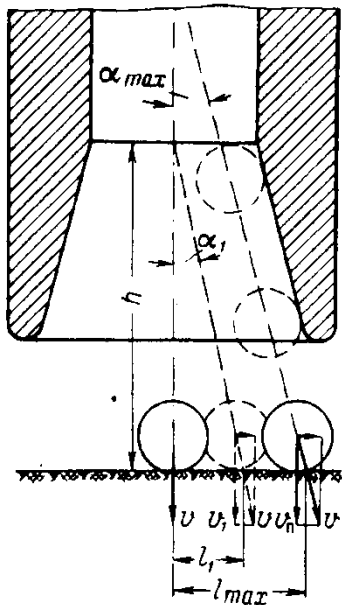


Рис. 11. Схема образования криволинейной части забоя

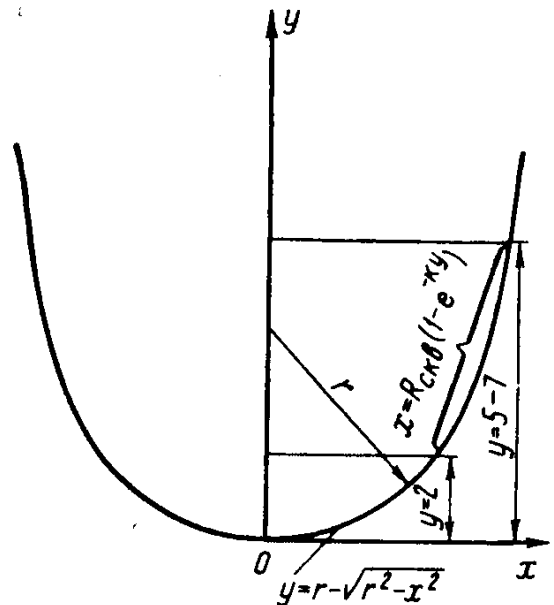


Рис. 12. Кривая главного нормального сечения поверхности забоя в системе координат xoy

На рис. 13 приведен график распределения частоты ударов и скорости соударения шара вдоль радиуса забоя, экспериментально полученный

Заурбековым С.А. при бурении шароструйным снарядом с кольцевой формой первичного и вторичного сопел [25]. Анализ кривой показывает, что в центральной части радиуса забоя наблюдается максимальная частота ударов шаров и их скорость в момент соударения с забоем. Это и объясняет образование криволинейной формы забоя скважины.

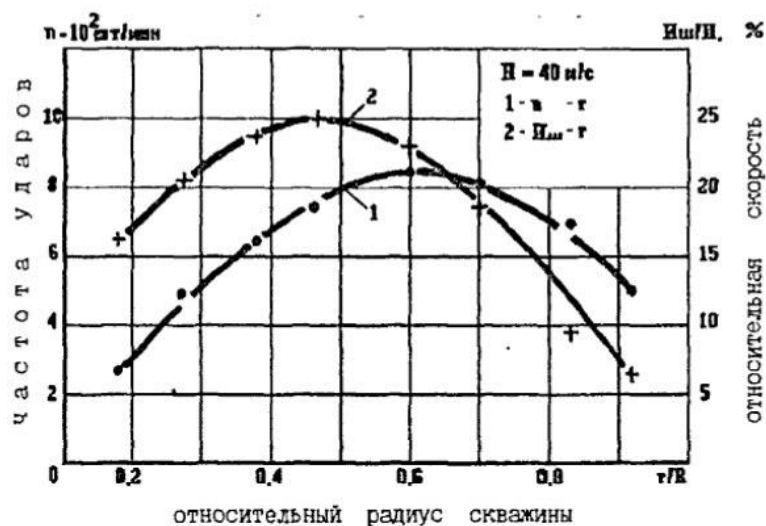


Рис. 13. Распределение частоты ударов и скорости соударения шара вдоль радиуса забоя [25]

Проведенные Уваковым А.Б. и др. исследования [105, 106, 112] показали падение объемной скорости разрушения при образовании криволинейного забоя и уменьшение линейной скорости перемещения его нижней точки при образовании криволинейной части забоя скважины (рис. 14). В дальнейшем скорость бурения стабилизируется. Авторы делают вывод о том, что наличие криволинейной части забоя скважины ведет к падению скорости шароструйного бурения. Данную зависимость удачно объяснил Заурбеков С.А. [25], указывая на постепенное увеличение расстояния между долотом и забоем, что влечет за собой уменьшение энергии шаров в момент соударения с забоем из-за роста угла соударения.

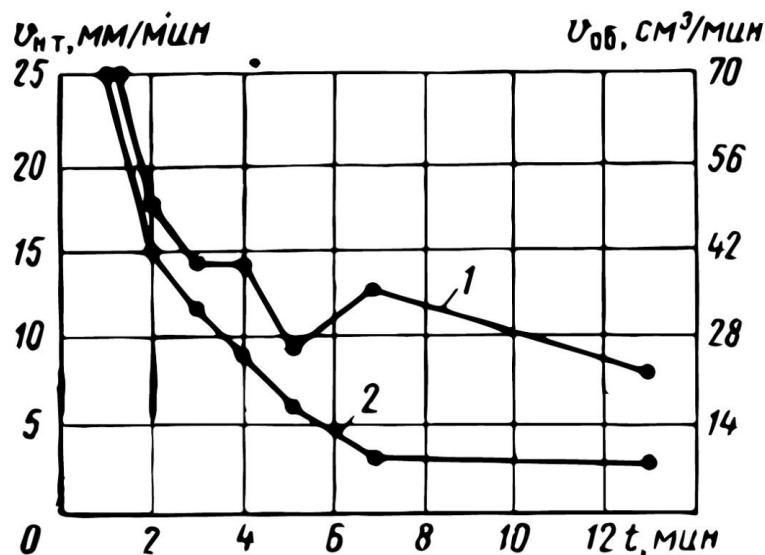


Рис. 14. График изменения скорости разрушения диорита во времени в процессе образования криволинейного забоя:
1 – объемная скорость разрушения; 2 – скорость перемещения нижней точки забоя

Независимо от конструкции ШЭБС образование криволинейной поверхности забоя скважины неизбежно, это является одной из ключевых особенностей шароструйного бурения.

Как известно [106], объем скважины $V_{скв}$ (м³) вычисляется по формуле:

$$V_{скв} = V_{1ш} \cdot Q_{кc}^{ш} \cdot t \cdot \gamma, \quad (4)$$

где $V_{1ш}$ – объем воронки разрушения при ударе одного шара, величина которого зависит от скорости движения шара, м³; $Q_{кc}^{ш}$ – расход шаров в буровом снаряде, ш/с; t – время бурения, с; γ – коэффициент, учитывающий снижение скорости разрушения в реальных условиях, 1/ш.

Снижение скорости шароструйного бурения в реальных условиях происходит за счет:

- рикошетов летящих на забой шаров и отскакивающих от него;
- соударения шаров с забоем не по нормали, в результате чего они воздействуют на забой с меньшей скоростью;
- трещин остаточных деформаций, микролунок и микроворонок, образующихся на поверхности забоя, в результате чего объем породы при

ударе одного шара по гребню между соседними лунками или же самой лунке будет различным.

Бурение скважин ШЭБС предложенной конструкции сопряжено с трудностью поддержания требуемого диаметра скважины. Уменьшение диаметра скважины приведет к остановке процесса углубки скважины вследствие невозможности спуска задерживающего устройства и прохода шаров в затрубное пространство, а его увеличение – к недостаточной центровки в стволе скважины (увеличение интенсивности искривления), к дополнительным затратам энергии на разрушение периферийной части забоя скважины. Диаметр скважины является параметром, на который влияет множество факторов: физико-механические свойства горных пород, диаметр шаров, расстояние между долотом и забоем и т.д. О влиянии различных факторов на разработку скважины по диаметру будет изложено ниже.

Влияние геометрических параметров буровых снарядов на эффективность шароструйного бурения

Как отмечалось выше, в основе конструкции ШЭБС лежит струйный аппарат (струйный насос). Эффективность бурения ШЭБС будет определяться точностью расчетов геометрических параметров струйного аппарата (рис. 15). Для удобства и простоты изложения материала указанная система обозначений будет использоваться во всей диссертационной работе.

Литературный обзор выявил значительное количество различных методик расчета струйных аппаратов [5, 14, 25, 27, 32, 34, 91, 94, 97, 104, 106], обладающих различной точностью и используемых при решении конкретных задач. Известно [113], что струйный аппарат, используемый в конструкции ШЭБС, отличается от известных следующим:

- он работает при меньших значениях отношения площади первичного сопла к площади камеры смешения;
- буровой раствор эжектируется из потока, движущегося в направлении, противоположном направлению выброса струйного аппарата;

- наряду с жидкостью циркулируют породоразрушающие шары.

Ниже приводится анализ методик расчета геометрических параметров снаряда.

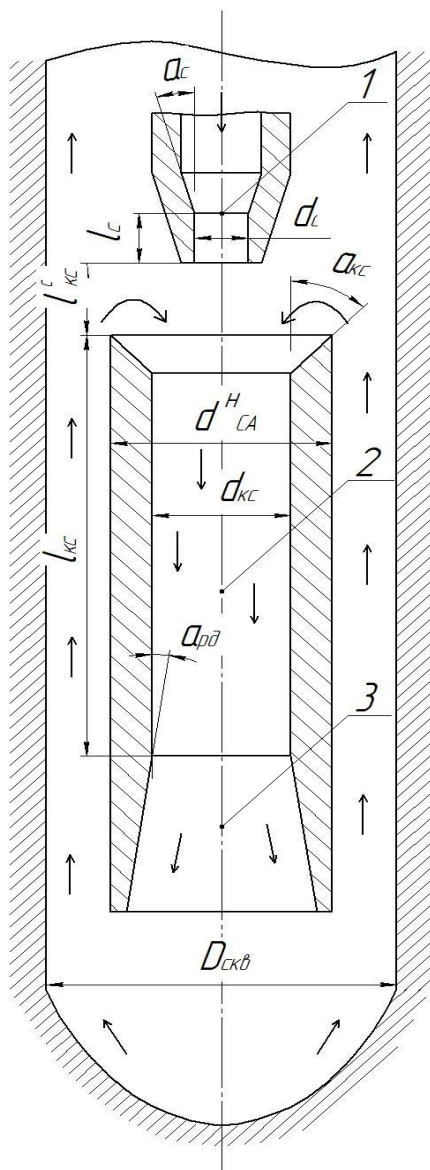


Рис. 15. Основные геометрические параметры струйного аппарата, лежащего в основе ШЭБС:

1 – сопло; 2 – камера смешения;

3 – диффузор;

α_c – угол конусности конической части сопла; d_c – диаметр

цилиндрической части сопла;

l_c – длина цилиндрической части

сопла; $l^c_{кc}$ – расстояние между

выходным сечением сопла и входным сечением камеры смешения;

$\alpha_{кc}$ – угол конусности входного участка камеры смешения;

$d_{кc}$ – диаметр камеры смешения;

$l_{кc}$ – длина камеры смешения;

$\alpha_{рδ}$ – угол раскрытия диффузора;

d^H_{CA} – наружный диаметр струйного аппарата

Форма выходного сечения рабочего сопла

От выбора геометрической формы сопла зависит изменение перепадов давлений и расхода жидкости. Наиболее распространенными являются цилиндрические, конические и коноидальные насадки. Коноидальные насадки дают наибольшие выходные скорости и расходы, однако они трудоемки в изготовлении. Цилиндрические насадки, увеличивая расход жидкости, уменьшают скорости истечения, т.к. увеличиваются потери

напора. Благодаря незначительному внутреннему сжатию потери напора в конической сходящейся насадке меньше, чем в цилиндрической, коэффициент скорости больше, а коэффициент сжатия меньше. По данным [14, 97, 104, 106] наилучшие результаты дает сопло, выполненное в виде конической насадки, заканчивающейся коротким цилиндрическим участком. Коническая насадка увеличивает выходную скорость, а цилиндрическая часть сохраняет форму струи и предотвращает ее от разбрызгивания. При этом установлено, что такая ступенчатая форма сопла увеличивает его рабочий ресурс.

Размеры рабочего сопла

По экспериментальным данным [91, 108] оптимальное значение угла конусности конической части насадки α_c составляет 12–15°, согласно [105, 112] оптимальный угол конусности составляет 13°24'.

Согласно [14] длина цилиндрической части сопла l_c (м) определяется по формуле:

$$l_c = (1 \div 2) \cdot d_c, \quad (5)$$

где d_c – диаметр цилиндрической части сопла (диаметр сопла), м.

Применительно к шароструйно-эжекторным буровым снарядам американскими исследователями [113] установлено, что при неизменных диаметре камеры смешения и расходе жидкости, истекаемой из сопла, уменьшение его диаметра d_c ведет к возрастанию коэффициента эжекции (рис. 16). При проведении лабораторных исследований они использовали «R-отношение», т.е. отношение площади сопла к площади камеры смешения, равное 0,045–0,05 (геометрический параметр равен 20–22,22).



Рис. 16. Зависимость коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения [113]

Оптимальное расстояние между выходным сечением рабочего сопла и входным сечением камеры смешения

Согласно работам, посвященным расчетам струйных аппаратов, расстояние между выходным сечением сопла и входным сечением камеры смешения подбирается из условия, что при расчетном коэффициенте эжекции конечное сечение свободной струи при входе в камеру смешения равно ее сечению.

Согласно [5] расстояние между выходным сечением рабочего сопла и входным сечением камеры смешения (в метрах) определяется по формуле:

$$l_{kc}^c = (1 \div 1,5) \cdot d_{kc}, \quad (6)$$

где d_{kc} – диаметр камеры смешения, м.

Согласно [34, 91, 108] данное расстояние определяется нижеследующим выражением:

$$l_{kc}^c = (1 \div 3) \cdot d_c. \quad (7)$$

Рассчитанное значение l_{kc}^c (в метрах) проверяется на свободное прохождение шаров:

$$l_{kc}^c \geq 1,25 \cdot d_{ш}, \quad (8)$$

где $d_{ш}$ – диаметр используемых шаров, м.

Исследование влияния этого параметра на эффективность шароструйного бурения производилось в недостаточной степени и слабо освещено в соответствующей литературе, что указывает на необходимость экспериментальных исследований по определению оптимального расстояния между выходным сечением сопла и входным сечением камеры смешения.

Форма входного участка камеры смешения

Влияние формы входного участка камеры смешения учитывается коэффициентом инжектируемого потока, представляющим собой произведение коэффициентов скорости камеры смешения, диффузора и входного участка. Изменение формы входного участка камеры смешения влияет на величину коэффициента скорости входного участка. При уменьшении коэффициента скорости уменьшается коэффициент инжектируемого потока, падает коэффициент инжекции или уменьшается степень сжатия аппарата.

Согласно данным, представленным в работе [34], наиболее рациональной является коноидальная форма, однако она сложна в изготовлении. Наиболее простой, и в тоже время обладающей незначительным сопротивлением, является коническая форма с углом конусности 45–60° [91, 94].

Диаметр камеры смешения

В струйных аппаратах камера смешения необходима для смешивания двух потоков, увеличения давления и обеспечения требуемого коэффициента эжекции. В ШЭБС камера смешения должна обеспечивать требуемый расход шаров через камеру смешения, их разгон и движение без заклинивания.

Так установлено [113], что энергия, которая передается шарам при их движении в камере смешения, увеличивается при диаметре шаров, приближающемся к половине диаметра КС. По экспериментальным данным [105, 106, 112] для избежания заклинивания шаров в камере смешения ее диаметр должен определяться по формуле:

$$d_{kc} \geq 2,2 \cdot d_{ш}. \quad (9)$$

Однако Заурбеков С.А. [25] указывает на оптимальное с точки зрения эффективного разгона шаров соотношение между диаметром шара и диаметром камеры смешения, равное 0,8. Соотношение, полученное Заурбековым С.А., справедливо лишь для снарядов с кольцевой формой сопел.

Длина камеры смешения

Этот параметр играет важную роль в рабочем процессе струйного аппарата. Для уменьшения потерь давления в диффузоре смешанный поток должен поступать из камеры смешения с выравненным профилем скоростей, что достигается при достаточно большом значении длины камеры смешения. В то же время излишняя длина приводит к увеличению потерь на трение в камере смешения. Таким образом, оптимальной является такая длина камеры смешения, при которой гидравлические потери минимальны.

Величина оптимальной длины камеры смешения исследователями определяется по-разному [5, 14, 25, 27, 32, 34, 91, 94, 97, 104, 106].

Американские исследователи установили, что камера смешения должна быть длиной, достаточной для придания шарам скорости, максимально приближенной к скорости жидкости на выходе из камеры смешения. Рекомендуемое значение равнялось 10,3 от диаметра камеры смешения.

Рекомендуемое значение длины камеры смешения, используемое Уваковым А.Б., находится в пределах:

$$l_{kc} = (6 \div 8) \cdot d_{kc}. \quad (10)$$

По экспериментальным исследованиям Заурбекова С.А. оптимальным значением длины камеры смешения является:

$$l_{kc} = (6 \div 7) \cdot d_{kc}. \quad (11)$$

Большой разброс рекомендованных значений указывает на необходимость экспериментальных исследований по определению оптимальной длины камеры смещения струйного аппарата для ШЭБС.

Размеры диффузора

Наиболее сложной задачей расчета является установление оптимальной формы диффузора, соответствующей безотрывному течению и минимуму потерь энергии при заданных режимных параметрах.

По экспериментальным данным, приведенным в большинстве известных работ [34, 94, 97, 108], значение оптимального угла раскрытия диффузора α_{pd} составляет 8° . На основании экспериментальных исследований [105, 106, 112] установлено, что наилучшая скорость проходки при шароструйном бурении наблюдается при угле раскрытия диффузора, равным 30° . Авторы объясняют это тем, что с увеличением угла раскрытия уменьшается длина диффузора, что в свою очередь ведет к увеличению скорости шара, с которой он ударяется о забой скважины.

Большой разброс рекомендованных значений оптимального угла раскрытия диффузора и отсутствие информации о влиянии угла раскрытия диффузора на разработку скважины по ее диаметру указывает на необходимость экспериментальных исследований.

Зазор между долотом и стенками скважины

Разность между диаметром скважины $d_{скв}$ и наружным диаметром долота $d_{СА}^H$ определяется из условия [25]:

$$D_{СКВ} - d_{СА}^H = 1,25 \cdot d_{ш}. \quad (12)$$

Большой зазор приведет к уменьшению скорости подъема шаров в затрубном пространстве и сложности разработки скважины по диаметру.

Данное уравнение взято за основу при расчете ШЭБС.

Влияние технологических режимов на эффективность шароструйного бурения

Расстояние между долотом и забоем скважины

Результаты исследований по изучению влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность шароструйного бурения приведены в различной литературе [25, 105, 106, 112, 113].

Результаты американских исследований [113] показывают, что приближение долота к забою скважины сопровождается увеличением скорости бурения. Однако чрезмерное уменьшение этого параметра приводит к снижению скорости бурения, что объяснялось тем, что вылетающим из вторичного сопла шарам препятствуют шары, отскакивающие от забоя скважины. К тому же, при малом значении расстояния от долота до забоя площадь сечения скважины будет уменьшаться, т.е. будет снижаться диаметр скважины, что приведет к невозможности бурения в связи с заклинками шаров в затрубном пространстве. Американские исследователи выяснили, что для обеспечения равномерного потока шаров в призабойной зоне скважины зазор между долотом и забоем должен составлять 2,8–3,4 от диаметра камеры смешения.

В результате экспериментальных исследований Увакова А.Б. и Штрассера В.В. [105, 106, 112] установлено, что оптимальное расстояние аппарата от забоя, при котором скорость бурения максимальна, находится в пределах 1,8–3,3 диаметра камеры смешения.

Если расстояние между долотом и забоем будет меньше оптимального (рис. 17), то процесс углубления скважины будет тормозиться вследствие того, что выходное сечение диффузора находится в области криволинейной части забоя и лишь незначительная часть забоя разрушается непосредственно ударами шаров, разогнавшихся в камере смешения.

При этом минимально возможное расстояние между долотом и забоем S_{min} (м) можно определить по формуле:

$$S_{min} = \frac{1}{k} \times \lg \frac{d_{CKB}}{2\left(\frac{D_{CKB}}{2} - \left(\frac{d_{CA}^H}{2} + d_{ш} + w_{min}\right)\right)}, \quad (13)$$

где k – коэффициент, зависящий от диаметра используемых шаров; w_{min} – величина зазора между буровым снарядом, стенкой скважины и шаром, м.

При расположении долота в цилиндрической части скважины на таком расстоянии от криволинейного забоя, что вылетающие шары бомбардируют его поверхность полностью (рис. 18), на отскочившие от забоя шары будет воздействовать поток жидкости, исходящий из диффузора, в результате чего ухудшаются условия их подъема для последующего всасывания. Кроме того, в рассматриваемом случае шары чаще всего будут соударяться с забоем не по нормали, а под некоторым углом.

В данном случае оптимальное расстояние между долотом и забоем S_{max} (м) определяется по следующей формуле:

$$S_{max} = L_{кз} + \frac{(D_{CKB} - D_{д}^{BH})}{2} \cdot ctg \alpha_{рд}, \quad (14)$$

где $L_{кз}$ – высота криволинейной части забоя скважины, м; $D_{д}^{BH}$ – внутренний диаметр выходного сечения диффузора, м.

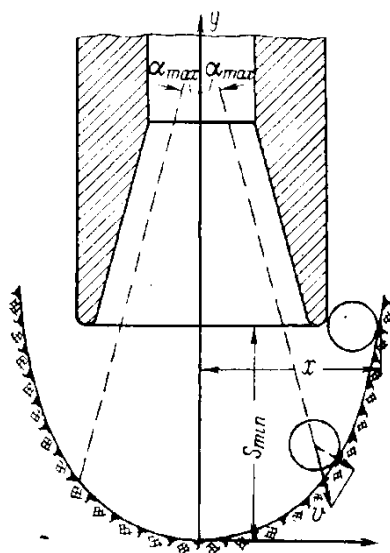


Рис. 17. Расположение аппарата на минимальном расстоянии от нижней точки забоя

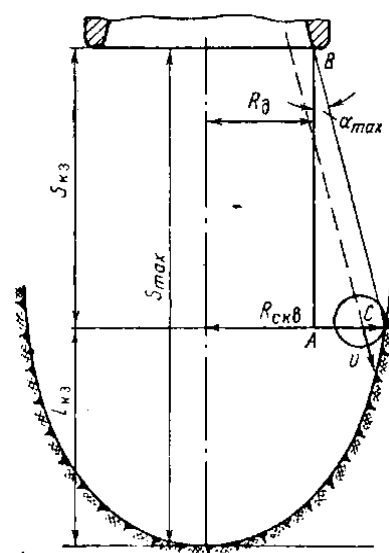


Рис. 18. Расположение аппарата в цилиндрической части скважины

Заурбековым С.А. [25] установлен оптимальный зазор от долота до забоя, равный 3,6–4,5 от диаметра камеры смешения. В качестве критерия, определяющего оптимальную величину зазора, использовался диаметр получаемой скважины (рис. 19).

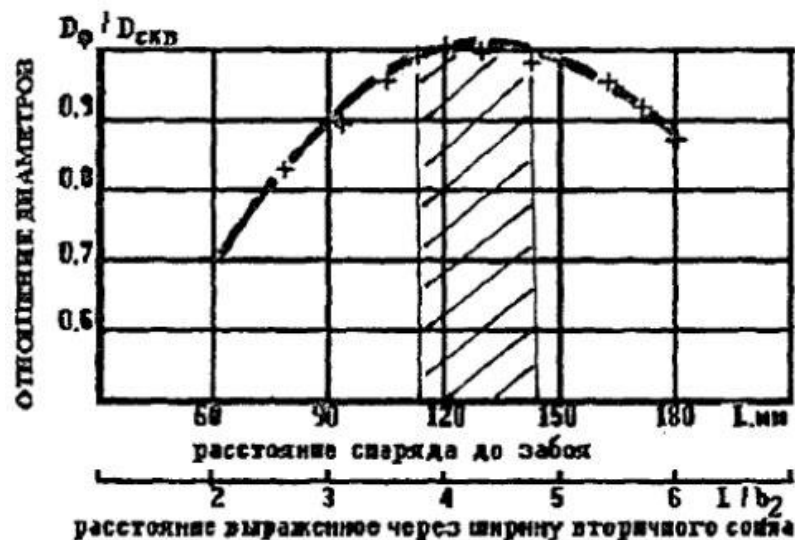


Рис. 19. Зависимость диаметра скважины от расстояния между снарядом и забоем [25]

Сопоставив описанные результаты исследований, можно наблюдать большой разброс рекомендуемых значений оптимального расстояния между долотом и забоем скважины, что указывает на необходимость более детальных экспериментальных исследований с использованием современных технических средств, в частности высокоскоростной видеосъемки. Учитывая то, что данный параметр считали ключевым для поддержания требуемого диаметра скважины, безусловно, рекомендуемые значения расстояния между долотом и забоем являются завышенными. Поэтому необходимо выявление степени влияния различных параметров на диаметр скважины с целью определения других управляемых параметров.

Масса технологической порции шаров

При шароструйном бурении существует оптимальное значение веса порции шаров, при котором скорость бурения максимальна [105, 106, 112]. Когда количество шаров меньше оптимального (рис. 20), порода разрушается

при недостаточном числе ударов по забоя. Если количество шаров в скважине больше оптимального, то на пути шаров, движущихся с оптимальной скоростью на забой, могут оказаться шары, отскочившие от забоя скважины, т.е. будет увеличиваться коэффициент γ . Кроме того, с увеличением количества шаров в скважине уменьшается КПД струйного аппарата и, как следствие, коэффициент эжекции.

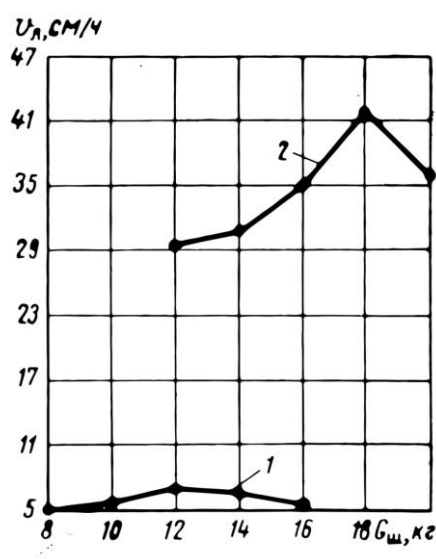


Рисунок 20. Графики зависимости скорости бурения от массы порции шаров [106]:

1 – бурение гранита IX категории аппаратом диаметром 95 мм, шарами диаметром 9,2 мм при расходе рабочей жидкости 285 л/мин и перепаде давления в сопле 1,9 МПа; 2 – бурение той же породы аппаратом диаметром 75 мм, шарами диаметром 9,2 мм при расходе рабочей жидкости 285 л/мин и перепаде давления в сопле 2,9 МПа

Из графика также видно, что при повышении перепада давления в сопле оптимальное количество шаров в призабойной зоне скважины увеличивается, причем повышение происходит в кратное число раз. Уваков А.Б. и Штрассер В.В. утверждали, что определить оптимальный вес порции шаров аналитическим путем очень сложно, поэтому для каждого конкретного случая необходимо устанавливать эту характеристику опытным путем.

Позже Заурбековым С.А. [25] была предложена эмпирическая формула для расчета необходимого числа шаров N при бурении снарядом с кольцевым расположением сопла и камеры смешения:

$$N = \frac{\varepsilon \cdot t \cdot E \cdot U_2}{d_{\text{ш}}}, \quad (15)$$

где ε – количество шаров в ряду при условии непрерывного их поступления в камеру смешения; t – время бурения, с; E – коэффициент, учитывающий свободное пространство между шарами по длине камеры смешения, по экспериментальным данным $E=0,4–0,7$; U_2 – скорость вылета шаров из бурового снаряда, м/с.

Максимальное же число шаров N_{max} рекомендуется определять по следующей формуле:

$$T = \left(\frac{(\pi \cdot (D_{\text{СКВ}} + D_{\text{д}}^{\text{нар}}) / 2)}{1,5 \cdot d_{\text{ш}}} \right) \times \left(\frac{l_{\text{КС}}}{1,5 \cdot d_{\text{ш}}} \right), \quad (16)$$

$D_{\text{д}}^{\text{нар}}$ – наружный диаметр выходного сечения диффузора, м; $l_{\text{КС}}$ – длина камеры смешения, м.

Отсутствие инженерной методики расчета оптимальной массы порции шаров для буровых снарядов с цилиндрически расположенными соплом и камерой смешения указывает на необходимость ее разработки.

Диаметр породоразрушающих шаров

Диаметр шаров является важнейшим параметром при расчете шароструйных снарядов. Для конструкций снарядов без задерживающего устройства величина диаметра шаров определяется расходом жидкости, от которой будет зависеть скорость и высота их подъема в затрубном пространстве. В целом, диаметр шара влияет на величину:

- кинетической энергии, передаваемой от шаров к разрушаемой горной породе;
- коэффициента передачи энергии от жидкости к шарам;
- диаметра камеры смешения и зазора между буровым снарядом и стенками скважины.

Основываясь на результатах экспериментальных исследований [25, 105, 106, 112, 113], можно сделать вывод о том, что при соблюдении условий,

отраженных в формулах (9) и (12), чем больше диаметр шара, тем выше эффективность бурения.

Свойства материала шаров

При проведении экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях [25, 105, 106, 112, 113] применялись стальные шары из отработанных подшипников, которые являются недефицитными и дешевыми.

Однако в работах [105, 106, 112] указывается о целесообразности использования твердосплавных шаров. По сравнению со стальными шарами они обладают большей в 1,8–1,9 раз плотностью и большим в 2–3 раза модулем упругости, большим на 8–15 % коэффициентом передачи энергии, в связи с чем требуется меньшая оптимальная скорость шаров в момент соударения с породой. Также твердосплавные шары обладают большими значениями прочности на сжатие, поэтому они способны выдерживать более высокие значения контактных нагрузок.

Расход промывочной жидкости

Расход промывочной жидкости, подводимый к соплу, определяет оптимальную скорость движения шаров, необходимую для разрушения определенной горной породы. Для конструкций снарядов без задерживающего устройства расход промывочной жидкости определяет скорость и высоту подъема шаров в затрубном пространстве.

Тип и свойства промывочной жидкости

Исследованиями влияния типа и свойств промывочной жидкости занимались лишь американские исследователи, которые установили, что использование глинистого раствора приводит к падению скорости бурения на 25%, а воздуха – на 75 % по сравнению с использованием воды [113]. Авторы поясняют полученные результаты меньшими значениями энергии, передающейся шарам от промывочной жидкости.

При бурении шароструйным способом к промывочным жидкостям предъявляют целый ряд дополнительных требований, которым не отвечает вода. Известно, что при ударах шаров забой покрывается сетью трещин, в связи с чем возможно эффективное использование понизителей твердости [105, 106, 112]. Поэтому актуальны исследование и разработка различных рецептур промывочных жидкостей для шароструйного бурения.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Резюмируя проведенный выше анализ современного состояния гидродинамических способов бурения скважин, выполненный для формулирования и постановки исследовательских задач, можно сделать следующие выводы:

1. При бурении скважин в твердых и крепких горных породах наиболее перспективным для дальнейшей разработки является гидромониторно-ударный способ, реализуемый с помощью шароструйно-эжекторных буровых снарядов.

2. Анализ литературных источников, патентных материалов и т.д. позволил выявить значительное количество конструкций шароструйно-эжекторных буровых снарядов для бурения в различных геолого-технических условиях. Выполненный анализ позволил сформировать основные требования к конструкции ШЭБС для бурения в твердых и крепких горных породах и разработать базовую конструкцию для дальнейших исследований.

3. Анализ технологии шароструйного бурения указывает на высокую трудоемкость и значительные потери времени на спуско-подъемные операции, что определяет необходимость разработки технических средств, обеспечивающих высокую эффективность шароструйного бурения.

4. Существующие методики расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов (в том числе струйных насосов) не отражают всю сложность процессов шароструйного бурения. Известные методики для

их расчета являются достаточно разрозненными и разработаны для конкретных конструкций буровых снарядов. Поэтому необходима разработка инженерной методики расчета оптимальных геометрических параметров для выбранной конструкции бурового снаряда.

5. Существующие методики расчета параметров режима шароструйного бурения позволяют получать их значения с большим разбросом, и являются достаточно противоречивыми, что затрудняет создавать конструкции снарядов для конкретных условий. Необходима разработка инженерной методики расчета рациональных параметров режима бурения для конкретных геолого-технических условий.

6. Разработка скважины по диаметру регулируется поддержанием оптимального расстояния между долотом и забоем. Чем ближе буровой снаряд к забою скважины (до определенного предела), тем выше эффективность шароструйного бурения. Рекомендованные значения оптимального расстояния, как правило, являются завышенными. Этим продиктована необходимость проведения исследований по выявлению степени влияния различных параметров на диаметр скважины.

Целью работы является повышение эффективности шароструйного бурения в твердых и крепких горных породах за счет разработки новых технических средств, методик расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов и рациональных технологических параметров режима бурения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбор и обоснование методов исследования процессов шароструйного бурения;
- экспериментальные исследования влияния геометрических параметров бурового снаряда и технологических параметров режима бурения на эффективность шароструйного бурения;

- разработка методики расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов и технологических параметров режима бурения;

- разработка технических средств и технологических схем для реализации шароструйного бурения скважин в крепких горных породах.

ГЛАВА 2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Значительная часть настоящей работы посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям влияния геометрических и технологических параметров на эффективность разрушения горных пород при шароструйном бурении скважин. Все исследования, выполненные по теме, можно разделить на две группы:

- экспериментальные исследования с целью получения необходимой информации для разработки методики расчета и технических средств шароструйного бурения;
- анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований.

Многообразие факторов, влияющих на эффективность шароструйного бурения, а также сложность процессов, протекающих при работе шароструйно-эжекторных буровых снарядов, определили необходимость привлечения достаточно большого количества методов исследований. Одни из них являются традиционными, хорошо описанными в известной литературе (бурение с расхаживанием бурового снаряда, определение параметров струйных аппаратов), другие используются впервые применительно к изучению шароструйного бурения (забурка скважины, высокоскоростная съемка).

Ниже приведено описание лабораторного стенда, а также используемые методики экспериментальных исследований.

2.1. Лабораторный стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения

При проектировании лабораторного стенда к нему предъявлялись следующие требования:

- обеспечение замкнутой циркуляции рабочей жидкости;
- реализация системы очистки рабочей жидкости от частиц разрушенного материала;

- возможность крепления образца разрушаемого материала;
- возможность визуального наблюдения и видеосъемки процессов всасывания и перемещения шаров;
- возможность регулирования расхода подаваемой к снаряду рабочей жидкости;
- возможность задания необходимого расстояния от долота до образца разрушаемого материала и плавного спуска инструмента в модель скважины по мере ее углубления;
- обеспечение центровки долота в стволе скважины.

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован и изготовлен лабораторный стенд [35, 43, 44, 70] для работы с буровым снарядом, выполненным в масштабированном варианте, схема которого представлена на рис. 21.

Разработанный стенд имеет замкнутую систему циркуляции промывочной жидкости. Насос 1 подаёт рабочую жидкость по напорной магистрали 4 к гидромониторно-эжекторному долоту 5, которое удерживается и перемещается с помощью механизма подачи 7. Отраженная от забоя жидкость с продуктами разрушения поднимается по стакану 6, который имитирует скважину и позволяет наблюдать за процессом всасывания породоразрушающих частиц. После выхода из стакана жидкость со шламом сливается в поддон 8, затем по сливной магистрали 9 – в отстойник 10, где происходит осаждение шлама. Далее жидкость самотеком переливается по сливной магистрали 11 в сливную емкость 2, откуда через всасывающую магистраль 3 вновь закачивается насосом. Для регулирования расхода жидкости, измеряемого расходомером 13, в напорной магистрали 4 установлен трехходовой кран 12, через который жидкость сливается по обратной магистрали 11 в сливную емкость 2. Для измерения перепада давления в напорной магистрали после насоса и перед долотом установлены манометры 14, 15. Для видеорегистрации процесса бурения напротив стакана размещена видеокамера 16.

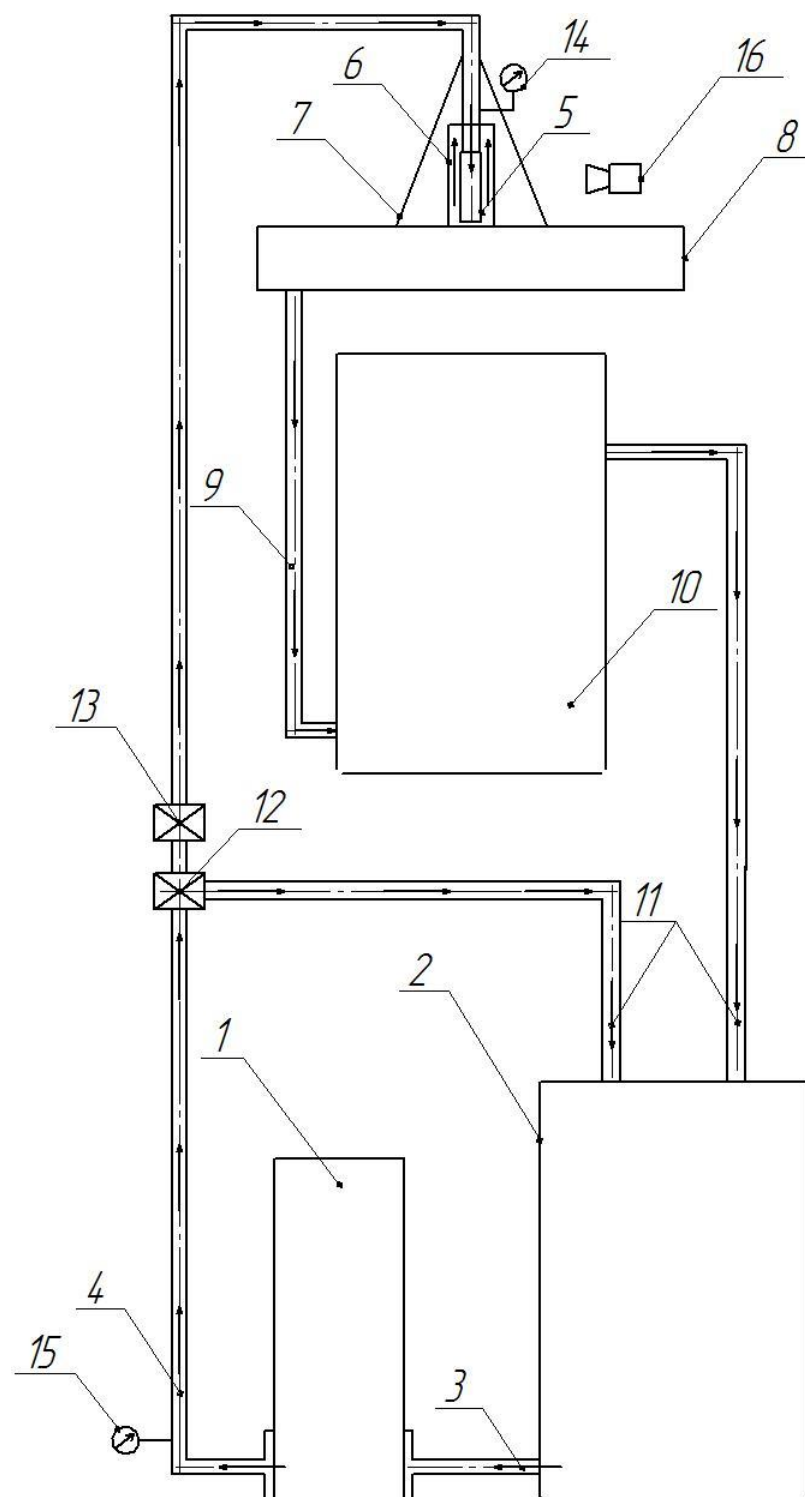


Рис. 21. Схема стенда для исследования технологических процессов шароструйного бурения:

- 1 – насос; 2 – сливная емкость; 3 – всасывающая магистраль;
 4 – нагнетательная магистраль; 5 – гидромониторно-эжекторное долото;
 6 – стакан; 7 – механизм подачи долота; 8 – поддон; 9 – сливная магистраль;
 10 – отстойник; 11 – сливная магистраль; 12 – трехходовой кран;
 13 – расходомер; 14, 15 – манометры; 16 – видеокамера

Для проведения экспериментов использовался центробежный насос CR1-27 (номинальная подача 30 л/мин; номинальный напор 1,28 МПа).

Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 22, а его фотография – на рис. 23. На поддон 1 устанавливается стакан 10, фиксируемый специальным зажимом 3. Стакан предназначен для размещения образца разрушаемого материала и визуального наблюдения за процессом всасывания и перемещения частиц. На поддон крепится стойка 5, в верхней части закрепляемая кронштейном 4. С целью задания необходимого расстояния от долота до образца разрушаемого материала и обеспечения возможности плавного спуска инструмента в модель скважины по мере ее углубления на стойке установлен механизм подачи долота 6 на основе фрикционной ременной передачи с маховиком 12. Жидкость подводится через напорную магистраль 7 и переводник 8 к долоту 9, производит полезную работу и с продуктами разрушения истекает из стакана в поддон и далее направляется в сливную магистраль 2. Для измерения давления в напорной магистрали перед долотом установлен манометр 11. Для принудительной подачи шаров в технологические окна в конструкцию эжекторного долота включено задерживающее устройство 13 конусной формы, которое вместе с центратором 14 центрирует долото в стакане 10.

На рис. 24 представлен стакан для размещения образца разрушаемого материала и визуального наблюдения за движением шаров. В средний цилиндр 4 стакана устанавливается образец горной породы 7, который поджимается с помощью нижнего цилиндра 6. Для наблюдения процесса циркуляции шаров в среднем цилиндре стакана имеется смотровое окно, а во внутреннюю часть устанавливается прозрачная труба 5, поджимаемая верхним цилиндром 2 стакана. В верхнем цилиндре выполнен отвод жидкости 3, а также имеется посадочное место под манжету 8, которая удерживается нажимной гайкой 1.

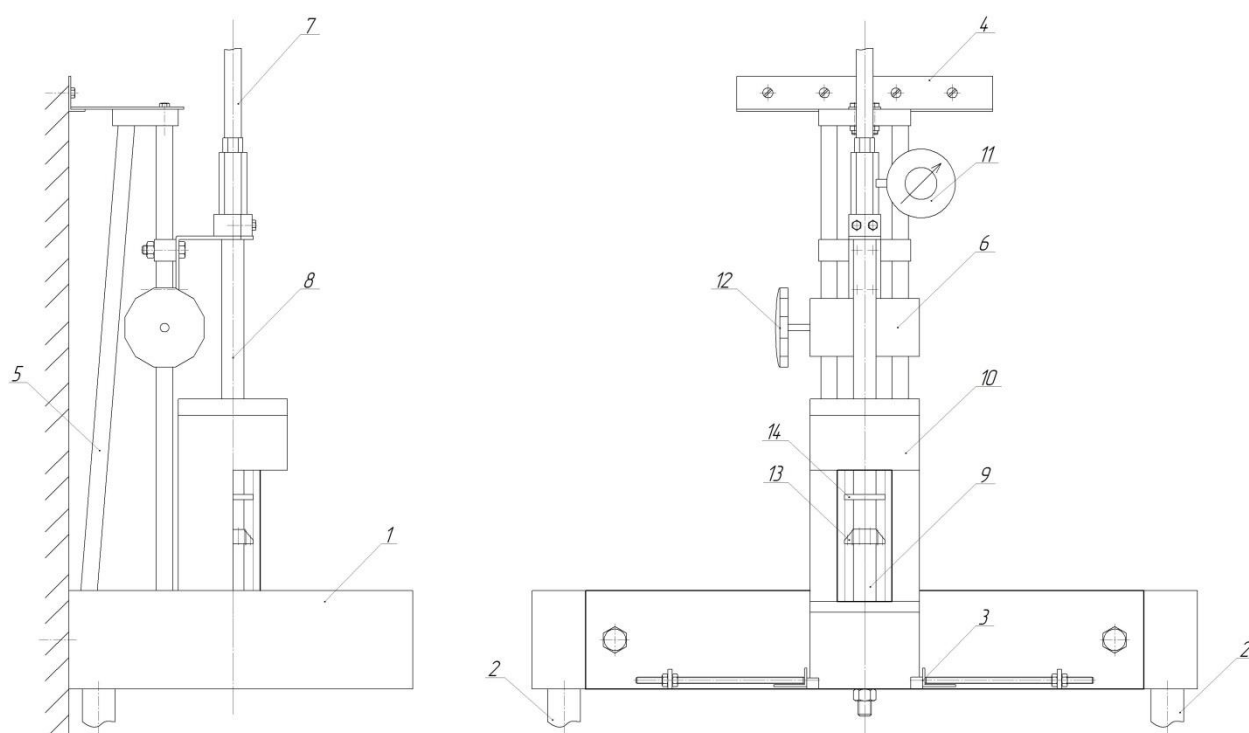


Рис. 22. Общий вид лабораторного стенда:

- 1 – поддон; 2 – сливная магистраль; 3 – зажим стакана; 4 – кронштейн;
 5 – стойка; 6 – механизм подачи долота; 7 – напорная магистраль;
 8 – переводник; 9 – гидромониторно-эжекторное долото; 10 – стакан;
 11 – манометр; 12 – маховик для управления механизмом подачи;
 13 – задерживающее устройство; 14 – центратор



Рис. 23. Лабораторный стенд

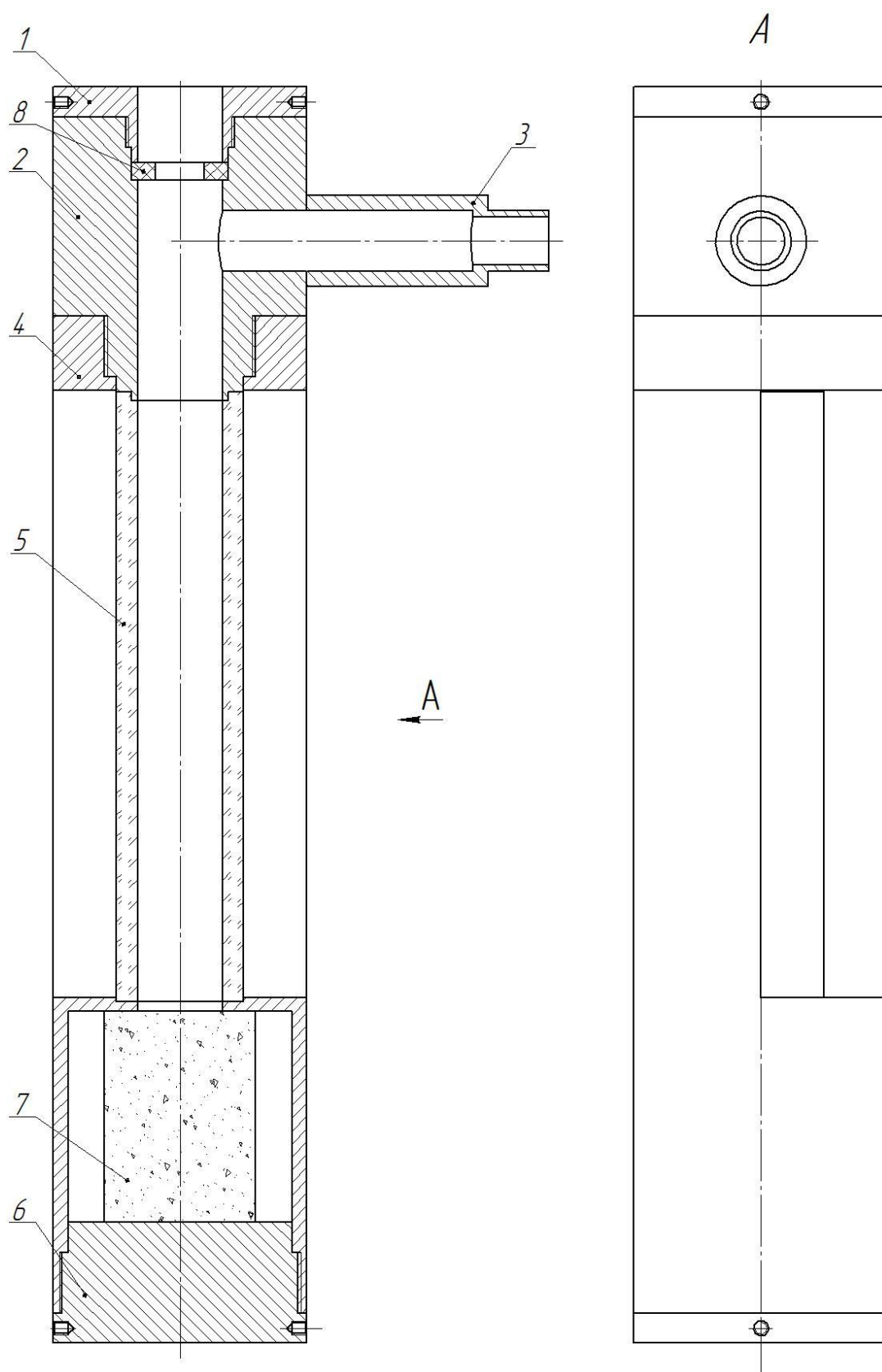


Рис. 24. Стакан для размещения образца горной породы:
 1 – нажимная гайка; 2 – верхний цилиндр стакана; 3 – отвод; 4 – средний цилиндр стакана; 5 – прозрачная труба; 6 – нижний цилиндр стакана;
 7 – образец горной породы; 8 – манжета

Для исследования влияния геометрических параметров бурового снаряда на эффективность шароструйного бурения он выполнен с возможностью смены основных его узлов (рис. 25).

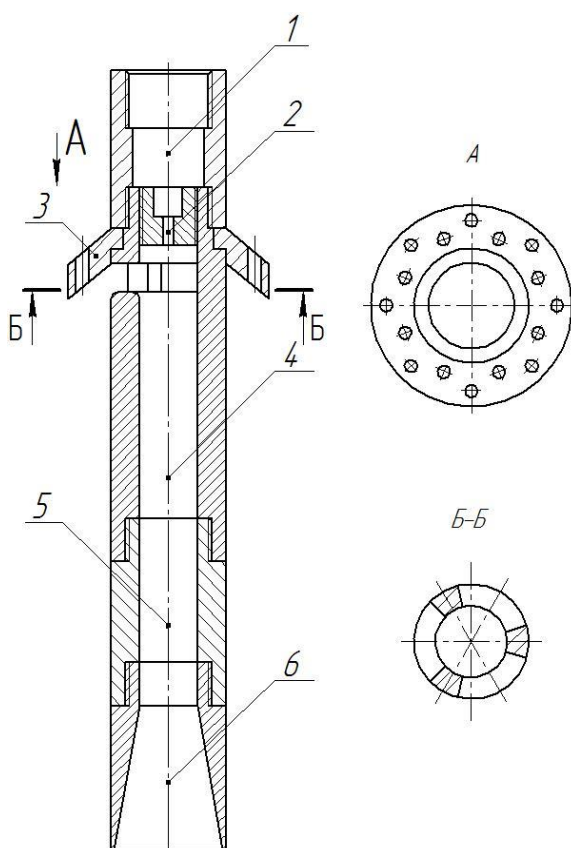


Рис. 25. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд:

1 – переходник на нагнетательную магистраль; 2 – сопло; 3 – задерживающее устройство; 4 – камера всасывания; 5 – камера смешения; 6 – диффузор

2.2. Методика экспериментальных исследований при забурке скважины с образованием криволинейного забоя

Бурение проводилось на образцах керамической плитки. При этом в течение запланированного времени t производилось бурение без опускания бурового снаряда [37]. Геометрические параметры скважины (рис. 26) определялись методом слепка с помощью пластического материала. Для этого в воронку разрушения задавливался пластилин, который принимал ее форму. Излишек материала срезался лезвием бритвы. Далее пластилин извлекался, измерялась максимальная высота слепка, которая равна глубине скважины $h_{скв}$. Также замерялся верхний диаметр слепка, который равен диаметру скважины $D_{скв}$. После извлечения слепка он взвешивался на

аналитических весах с точностью до 1 мг. По весу и плотности вычислялся объем слепка $V_{скв}$. При необходимости рассчитывались линейная и объемная скорости разрушения, а также исследовалась форма слепка пластилина, которая отображает форму криволинейного забоя.

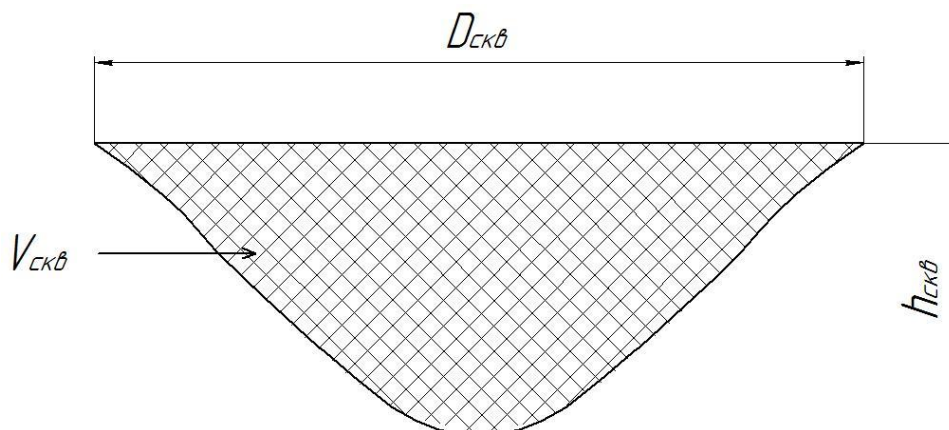


Рис. 26. Измеряемые геометрические параметры криволинейного забоя

Линейная скорость перемещения нижней точки забоя $V_{лин}$ (м/с) и объемная скорость разрушения $V_{об}$ (м³/с) определялась по формулам:

$$V_{лин} = h_{скв}/t, \quad (18)$$

$$V_{об} = V_{скв}/t, \quad (19)$$

где t – время бурения, с.

2.3. Методика проведения высокоскоростной съемки

Для высокоскоростной съемки использовалась видеокамера модели Miro m310. Видеокамера способна производить видеосъемку со скоростью до 3600 кадров в секунду при разрешении 1024x720 точек на дюйм. После включения насоса и завершения переходных процессов при подсветке прожекторами 1 мощностью 1000 Вт производилась кратковременная запись (1–2 с) с помощью высокоскоростной видеокамеры 2 (рис. 27). Записанное на высокоскоростную камеру видеоизображение при помощи специальных компьютерных программ передавалось на обработку в компьютер 3.

С использованием метода визуализации быстропротекающего процесса исследовалась траектория движения шаров, а также рассчитывался расход шаров в камере смешения при варьировании исследуемых

параметров. С помощью компьютерной программы «Measure Dynamics» проводились замеры координат шаров в двух осях декартовой системы, что позволяло рассчитывать проекцию их скорости на ось ОУ при движении в камере смешения и затрубном пространстве. При необходимости из видеофайла извлекались необходимые стоп-кадры и строились стробоскопические изображения.

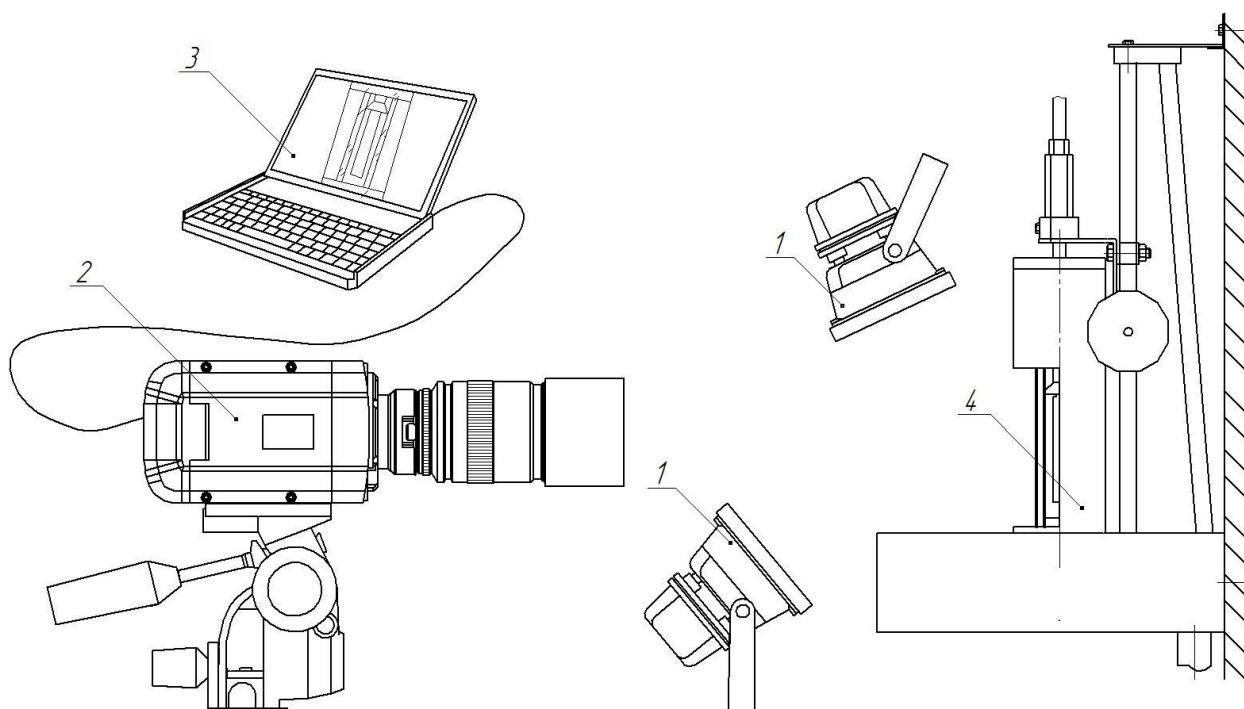


Рис. 27. Расстановка техники для проведения видеосъемки:
1 – осветительные прожекторы; 2 – высокоскоростная камера;
3 – персональный компьютер; 4 – лабораторный стенд

2.4. Методика проведения экспериментов при бурении с расхаживанием бурового снаряда

Бурение скважин в образцах мрамора проводилось по методике, обеспечивающей поддержание необходимого расстояния между долотом и забоем при расхаживании бурового снаряда. После проходки определенного интервала (рис. 28, б) буровой снаряд кратковременно опускается на забой скважины (рис. 28, в) и поднимается до запланированного расстояния между долотом и забоем (рис. 28, г). Расхаживание производится с периодичностью $t_{рас}$. После поднятия снаряда с помощью специальной шкалы на стойке измерялась проходка.

По истечении времени бурения t замерялись геометрические параметры скважины. Для этого из мерного цилиндра удалялась вода в скважину. Объем воды, заполнившей скважину, являлся объемом скважины. Далее с помощью камнерезного станка от пробуренного образца отрезалась половина образца в продольном сечении. Далее замерялись диаметр скважины $D_{скв}$, глубина скважины h , глубина цилиндрической части $h_{цч}$ и глубина в точке соприкосновения долота с забоем h_d (рис. 29). Также сканировалась форма скважины.

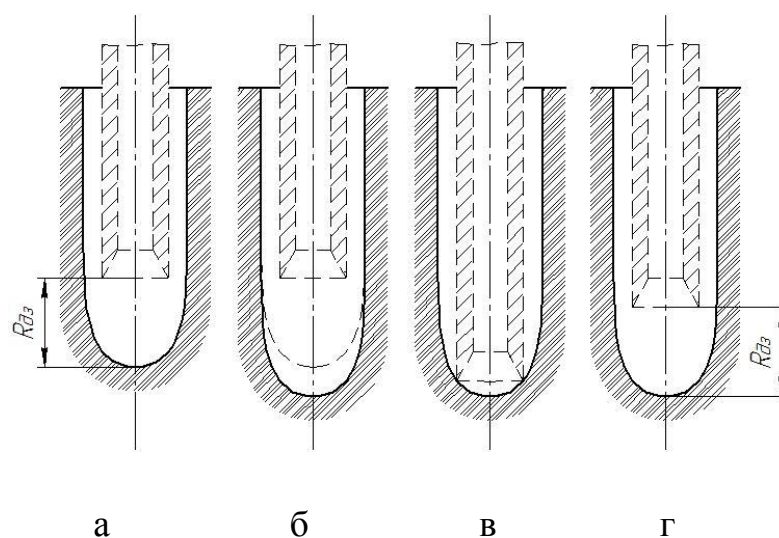


Рис. 28. Схема поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем путем расхаживания бурового снаряда

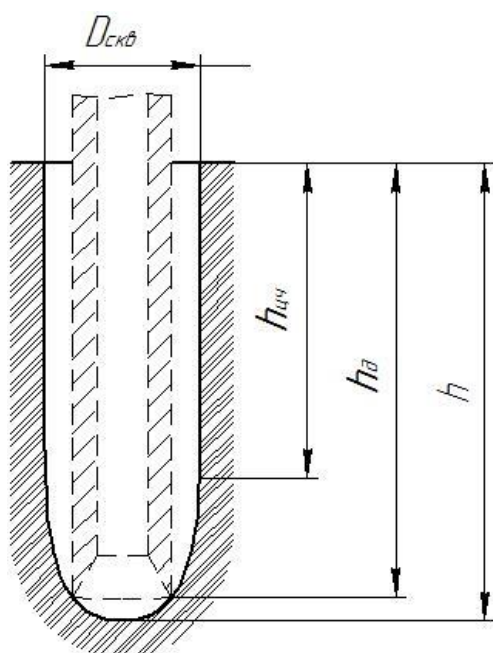


Рис. 29. Геометрические параметры скважины:
 $D_{скв}$ – диаметр скважины;
 h – глубина скважины;
 $h_{цч}$ – длина цилиндрической части скважины; h_d – глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем

2.5. Методика определения параметров струйных аппаратов

При истечении жидкости из сопла без присоединенных камеры всасывания, камеры смешения и диффузора замерялся расход рабочего потока Q_p и давление перед соплом P_c . Для измерения расхода смешанного потока между камерой всасывания и камерой смешения устанавливалась емкость, заполненная водой. Отношение объема истеченной из аппарата жидкости к времени его работы является расходом смешанного потока струйного аппарата Q_c .

Геометрический параметр m струйного аппарата определялся по формуле:

$$m = d_{kc}/d_c, \quad (20)$$

где d_{kc} – диаметр камеры смешения, d_c – диаметр сопла.

Коэффициент эжекции определялся по формуле:

$$n_{эж} = \frac{Q_c}{Q_p} - 1. \quad (21)$$

2.6. Методика статистической обработки результатов исследований

В ходе экспериментальных исследований все значения наблюдений заносились в специальные журналы. По методу С.В. Башинского производилось исключение резко выделяющихся замеров.

На следующем этапе математической обработки очищенные от промахов исследуемые выборки проверялись на соответствие нормальному закону распределения случайных величин с помощью нормальной сетки [3, 17, 33]. Анализ расчетов показал, что все эмпирические распределения с большой точностью согласуются с нормальным законом распределения случайных величин.

Среднее арифметическое измеряемого параметра определялось по известной формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (22)$$

где A_i – значение измеряемого параметра в i -ой серии, n – число опытов.

Дисперсия рассчитывалась по формуле:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [A_i - \bar{A}]^2. \quad (23)$$

Среднее квадратичное отклонение определялось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (24)$$

Далее рассчитывался коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{A}} \cdot 100\%. \quad (25)$$

Необходимое число опытов рассчитывалось по найденному коэффициенту вариации v и допустимой для данного вида экспериментов погрешности k_{don} в процентах от среднего арифметического. По отношению k_{don} / v и табличным данным [17] с 95 % надежностью определялось необходимое число экспериментов до расчетного количества. Допустимая ошибка k_{don} была принята в пределах 15–20 %. Существенность различий средних величин исследуемых параметров и показателей определялась с помощью t -критерия Стьюдента.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Для исследования технологических процессов шароструйного бурения применялся разработанный автором лабораторный стенд в масштабированном варианте.

2. Для проведения количественных сопоставлений показателей эффективности шароструйного бурения при варьировании различных параметров использовались однородные материалы (керамическая плитка при забурке скважины, мрамор при бурении с расхаживанием бурового снаряда).

3. При проведении экспериментальных исследований использовались методики бурения с расхаживанием бурового снаряда,

определения параметров струйных аппаратов, впервые использовалась методика забурки скважины, а также высокоскоростная съемка процессов шароструйного бурения.

4. Достоверность результатов, и, следовательно, выводов и рекомендаций, обеспечивалась применением методов математической статистики с использованием специальных компьютерных программ.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ

Проведение экспериментальных исследований являлось очень сложным этапом работ в связи с многообразием исследуемых факторов. На первом этапе было необходимо выявить оптимальные значения технологических параметров режима бурения: расстояния между долотом и забоем, массы технологической порции шаров, диаметра породоразрушающих шаров, периодичности расхаживания бурового снаряда. На втором этапе экспериментальных исследований при оптимальных значениях технологических параметров определялись зависимости влияния различных геометрических параметров ШЭБС (рис. 30) на эффективность шароструйного бурения.

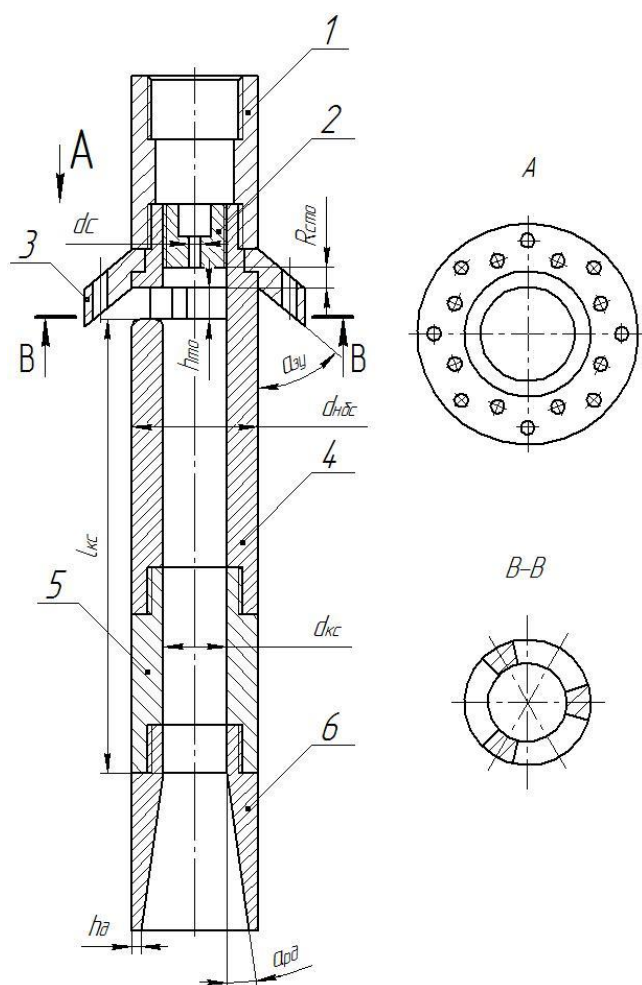


Рис. 30. Основные геометрические параметры ШЭБС исследуемой конструкции:

- 1 – переходник на нагнетательную магистраль; 2 – сопло;
- 3 – задерживающее устройство;
- 4 – камера всасывания; 5 – камера смешения; 6 – диффузор;

d_c – диаметр сопла;
 d_{bc}^H – наружный диаметр бурового снаряда;
 R_{cto} – расстояние между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон;
 h_{to} – высота технологических окон;
 α_{zu} – угол конусности задерживающего устройства;
 d_{kc} – диаметр камеры смешения;
 l_{kc} – длина камеры смешения;
 α_{pd} – угол раскрытия диффузора;
 δ_o – толщина стенки диффузора в выходном сечении

3.1. Экспериментальные исследования влияния технологических параметров режима на эффективность шароструйного бурения

Исследование влияния расстояния от долота до забоя на эффективность шароструйного бурения

Было проведено исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения при забурке скважин. Исходные геометрические и технологические параметры: $d_{\text{бс}}^{\text{н}}=16$ мм, $d_{\text{кс}}=8$ мм, $d_{\text{с}}=2$ мм, $\alpha_{\text{зв}}=40^\circ$, $h_{\text{то}}=4,2$ мм, $l_{\text{кс}}=100$ мм, $\alpha_{\text{р\delta}}=10^\circ$, $\delta_{\text{д}}=1$ мм, $D_{\text{ш}}=3$ мм, $m_{\text{ш}}=25$ г, $Q_{\text{р}}=6,7$ л/мин, $t=2$ мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода.

Результаты исследования влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность шароструйного бурения представлены на рис. 31, изменение формы забоя – на рис. 32. Установлено, что при увеличении расстояния между долотом и забоем возрастает диаметр скважины и уменьшается ее объем [30, 46, 115].

Характер изменения диаметра скважины при этом можно отразить формулой:

$$R_{\text{скв}} = R_{\text{кс}} + R_{\text{дз}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\text{р\delta}}, \quad (26)$$

где $R_{\text{скв}}$ – радиус скважины, мм; $R_{\text{кс}}$ – радиус камеры смещения, мм; $R_{\text{дз}}$ – расстояние между долотом и забоем, мм; $\alpha_{\text{р\delta}}$ – угол раскрытия диффузора.

Как показано в гл. 1.2.3, объем скважины $V_{\text{скв}}$ при шароструйном бурении вычисляется по формуле 4:

$$V_{\text{скв}} = V_{1\text{ш}} \cdot Q_{\text{кс}}^{\text{ш}} \cdot t \cdot \gamma,$$

где $V_{1\text{ш}}$ – объем воронки разрушения при ударе одного шара, величина которого зависит от скорости движения шара, м^3 ; $Q_{\text{кс}}^{\text{ш}}$ – расход шаров в камере смещения, ш/с; t – время бурения, с; γ – коэффициент, учитывающий снижение скорости разрушения в реальных условиях, 1/ш.

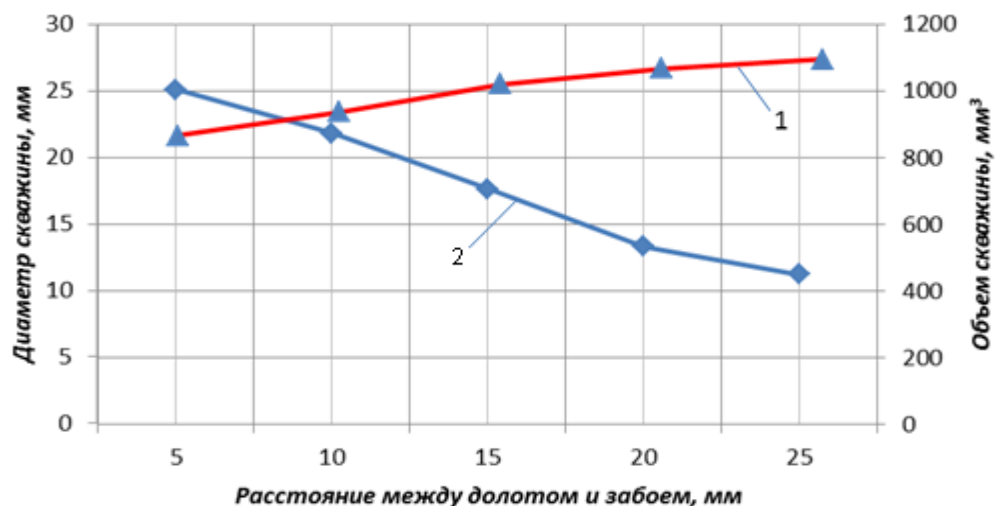


Рис. 31. Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от расстояния между долотом и забоем

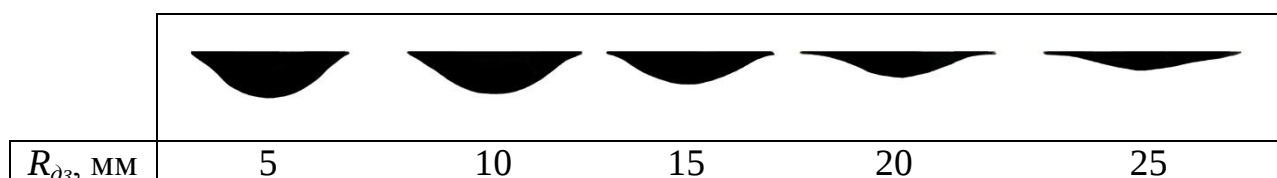


Рис. 32. Изменение формы криволинейной части забоя при варьировании расстояния между долотом и забоем

Благодаря применению высокоскоростной съемки удалось определить величину $Q_{\text{кс}}^{\text{ш}}$ при варьировании расстояния между долотом и забоем в ряду 5–10–15 мм (табл. 2). Как видно из табл. 2, при увеличении расстояния между долотом и забоем расход шаров в камере смешения снижается. При увеличении расстояния с 5 мм до 10 мм, значение $Q_{\text{ш}}$ снижается на 10,3%, при увеличении расстояния с 5 до 15 мм – на 29,9%. В связи с уменьшением расхода шаров согласно формуле (4) должен уменьшаться объем скважины, что подтверждается результатами, представленными на рис. 31.

Таблица 2 – Количество шаров, проходящих в камере смешения за единицу времени, при разных значениях расстояния между долотом и забоем

Расстояние между долотом и забоем, мм	5	10	15
Расход шаров, ш/с	583	529	497

Скоростная съемка процессов движения шаров показала, что в области под буровым снарядом наблюдаются скопления шаров, которые не могут быстро покинуть эту область [29]. Причем при увеличении расстояния между долотом и забоем скоплений больше (рис. 33), что в свою очередь приводит к уменьшению расхода шаров в камере смешения. Взаимодействие нисходящего и отраженного потоков при малом расстоянии ведет к тому, что шары, отскочившие от горной породы, быстрее направляются в затрубное пространство, а при большом расстоянии – падающие шары бомбардируют шары, отскочившие от горной породы, что ведет к их скоплениям под долотом.

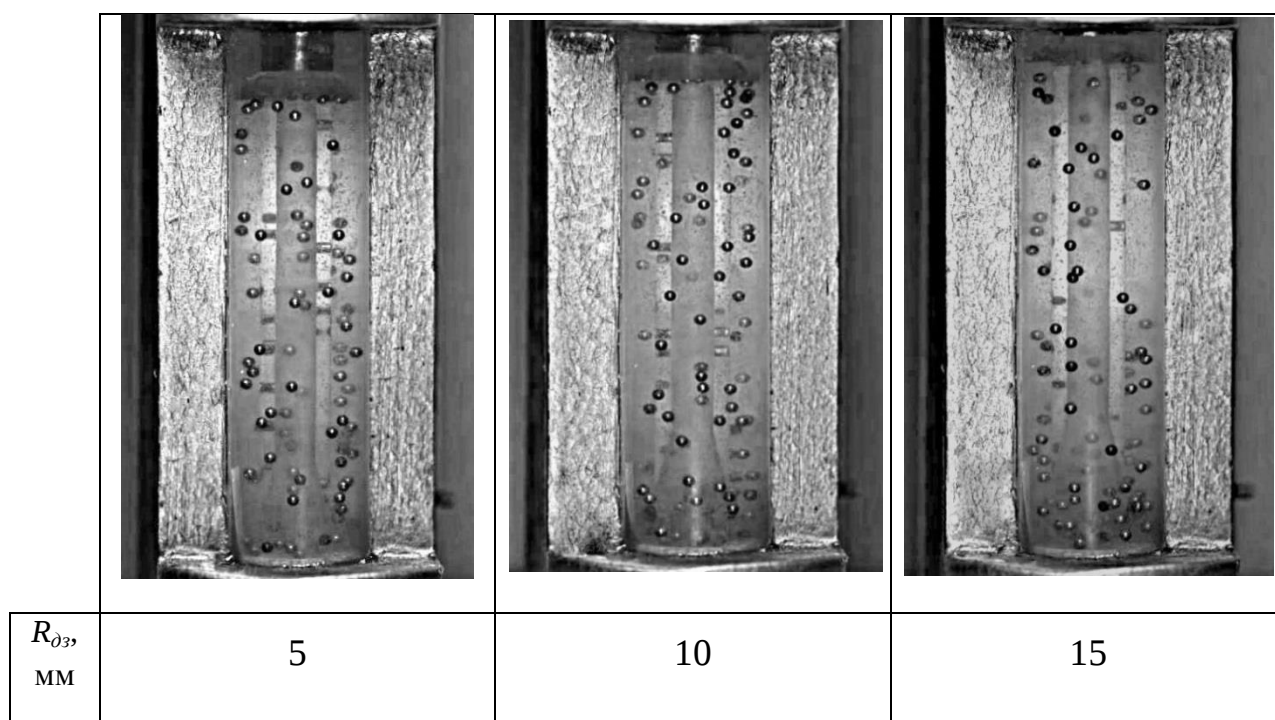


Рис. 33. Кадры, иллюстрирующие концентрацию шаров в затрубном пространстве при варьировании расстояния между долотом и забоем

Исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения горных пород при бурении с расхаживанием бурового снаряда проводилось на образцах мрамора. Расстояние между долотом и забоем составляло 5, 10, 15 мм.

По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 3) и сканировалась их форма (рис. 34). По полученным

результатам можно сделать вывод, что при увеличении расстояния между долотом и забоем увеличивается диаметр скважины, уменьшаются ее объем и глубина. Таким образом, подтверждаются зависимости, полученные при забурке скважин с образованием криволинейного забоя, представленные выше.

Таблица 3 – Влияние расстояния между долотом и забоем на геометрические параметры скважины

Расстояние между долотом и забоем R_{dz} , мм	Геометрические параметры скважин				
	Объем скважины, мм ³	Диаметр скважины, мм	Длина цилиндрической части скважины, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем, мм	Общая глубина скважины, мм
5	31800	25,5	52	65,2	69,9
10	29800	26,5	44	57	61
15	27000	27	36	52,1	56,7
Исходные данные: $d_{bc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=100$ мм, $\alpha_{po}=10^\circ$, $\delta_o=1$ мм, $d_{ui}=3$ мм, $m_{ui}=30$ г, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{pac}=4$ мин, $t=40$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость – вода.					

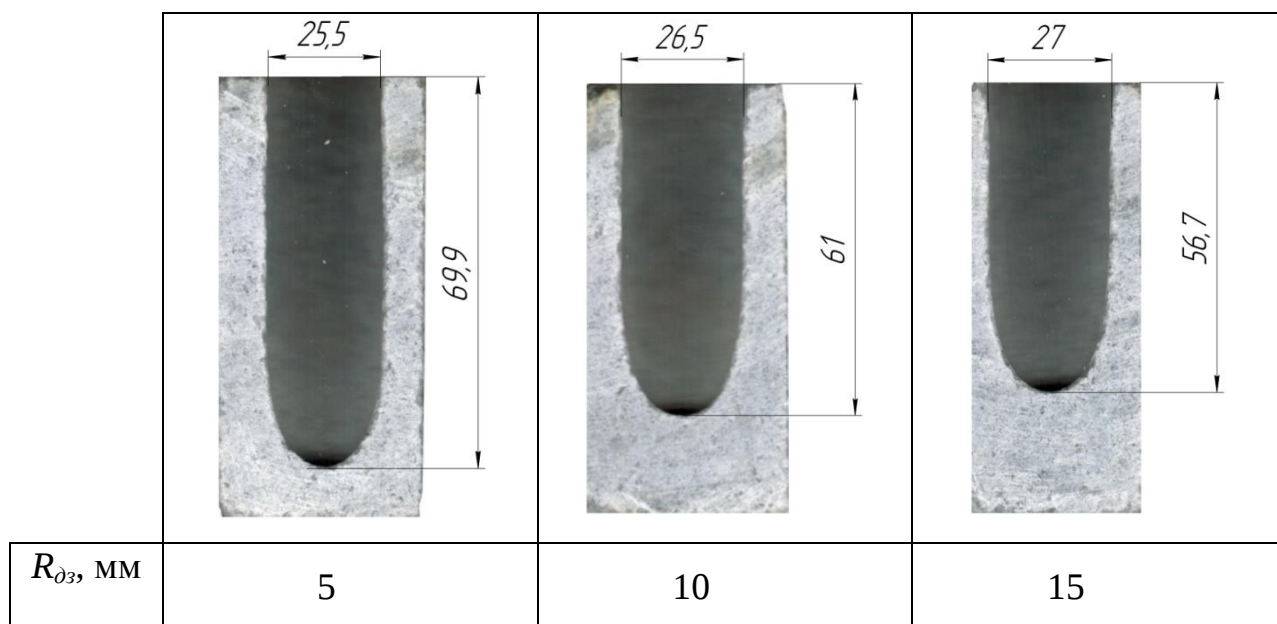


Рис. 34. Профиль скважин, пробуренных при варьировании расстояния между долотом и забоем

Исследование влияния массы порции шаров на эффективность шароструйного бурения

На следующем этапе было проведено исследование влияния массы порции шаров на эффективность разрушения керамической плитки при забурке скважины. Исходными параметрами являлись: $d_{bc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=100$ мм, $\alpha_{pd}=10^\circ$, $\delta_o=1$ мм, $d_{ш}=3$ мм, $R_{dz}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t=2$ мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода.

Установлено, что при увеличении массы порции шаров диаметр скважины слабо зависит от массы порции шаров. При этом объем скважины вначале увеличивается, а потом уменьшается, что говорит о наличии оптимального значения массы порции шаров для конкретных условий бурения (рис. 35). Из-за снижения количества ударов шаров в начале эксперимента наблюдается меньший объем скважины. При увеличении массы порции шаров до оптимального значения наблюдается увеличение объема скважины до определенного предела. Дальнейшее повышение массы порции шаров приводит к снижению объема скважины, а при достижении критической массы порции шаров бурение вовсе прекращается в связи с заклиниванием шаров в затрубном пространстве под задерживающим устройством.

В дальнейшем была проведена видеорегистрация процесса бурения при варьировании массы порции шаров в ряду 5–15–25 г. Обработка результатов видеосъемки позволила определить количество шаров, проходящих через камеру смешения в единицу времени, а также скорость шаров в камере смешения и затрубном пространстве (табл. 4). По полученным данным видно, что с увеличением массы порции шаров в указанном диапазоне их расход в камере смешения увеличивается, что, несмотря на уменьшение скорости движения шаров, приводит к большей эффективности бурения.

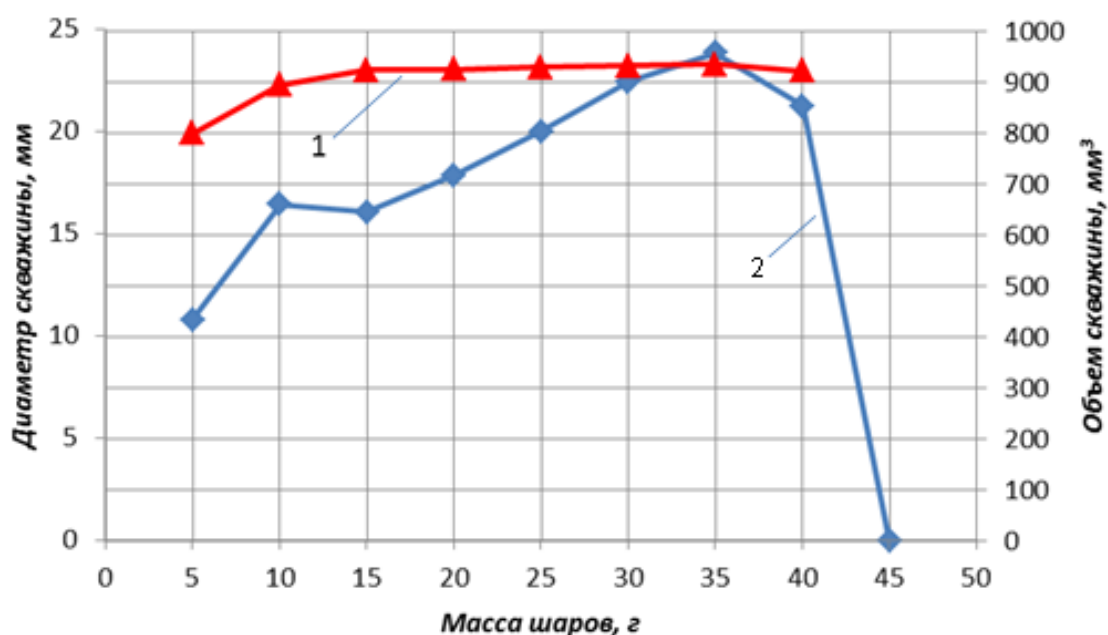


Рис. 35. Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от массы порции шаров

Таблица 4 – Влияние массы порции шаров на расход и скорость шаров в камере смешения и затрубном пространстве

Масса порции шаров, г	5	15	25
Расход шаров, ш/с	176	525	824
Скорость шаров в камере смешения, м/с	9,344	7,765	7,352
Скорость шаров в затрубном пространстве, м/с	1,201	0,842	0,792

Анализ полученных результатов позволил выявить причину уменьшения эффективности разрушения при большой массе порции шаров. Дело в том, что при увеличении общего количества шаров в призабойной зоне наблюдаются скопления шаров под буровым снарядом. В результате шары, движущиеся в сторону забоя, не долетая до него, сталкиваются с шарами, отскочившими от забоя скважины. Также при большом значении порции шаров наблюдаются их скопления в затрубном пространстве напротив технологических окон, что приводит к уменьшению их расхода в камере смешения.

С помощью высокоскоростной съемки проведено исследование причин заклинивания шаров в затрубном пространстве при их критическом количестве. Под заклиниванием шаров подразумевается скопление шаров перед впускными окнами, приводящее к прекращению их циркуляции, следовательно, остановке процесса бурения. Заклинка происходит в начальный момент бурения при критической массе порции шаров, реже – в процессе бурения. Стоит отметить, что причина заклинки связана с применением задерживающего устройства. На рис. 36 представлены кадры, характеризующие этапы, предшествующие заклиниванию шаров.

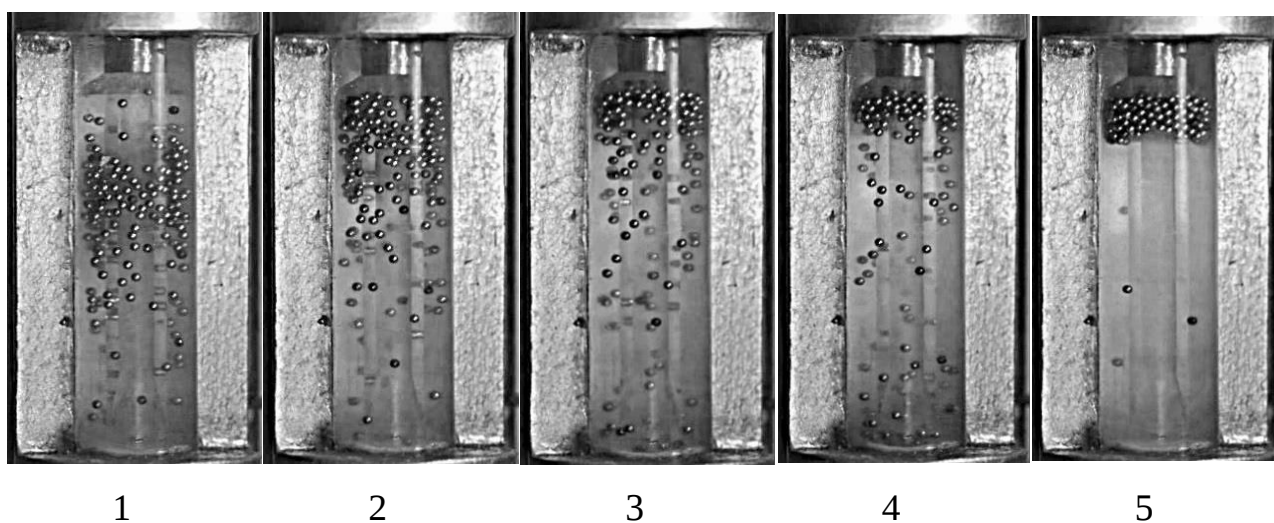


Рис. 36. Кадры, характеризующие этапы, предшествующие заклиниванию шаров в начале бурения

Ниже приводится описание этапов, предшествующих заклиниванию шаров:

1. В начальный момент времени шары поднимаются в затрубном пространстве за счет взаимодействия с восходящим потоком жидкости.

2. Шары поднимаются к задерживающему устройству, взаимодействуя с которым, направляются к технологическим окнам.

3. Пришедшие первыми к задерживающему устройству шары подсасываются через впускные окна в камеру смешения.

4. Количество шаров, проходящих через впускные окна, меньше количества шаров, подходящих к задерживающему устройству. В результате у впускных окон наблюдается скопление шаров.

5. В определенный момент времени перед задерживающим устройством скапливается критическое количество шаров, когда нижерасположенные ряды шаров оказывают давление на вышележащие с силой, направленной вертикально вверх. В результате этого процесса шары, находящиеся перед впускными окнами, располагаются таким образом, что не имеют возможности проходить через впускные окна. Происходит их заклинивание.

Вышеописанные наблюдения позволили сделать следующие важные выводы:

1. Заклинка шаров происходит в результате переизбытка шаров в призабойной зоне, когда их количество превышает оптимальную величину, соответствующую наибольшей эффективности бурения. Следовательно, при правильном определении оптимального количества шаров данная проблема легко решается.

2. Заклинка шаров безусловно связана с использованием задерживающего устройства, поэтому избежать ее возможно путем совершенствования его конструкции и расположения относительно технологических окон.

В ходе проведения экспериментальных работ были выявлены следующие способы ликвидации заклинивания:

1. Кратковременный подъем долота с последующим опусканием. В результате подъема долота давление, оказываемое потоком жидкости на скопление шаров в затрубном пространстве, уменьшится. Это в свою очередь приведет к перераспределению шаров перед впускными окнами, что позволит устранить заклинку.

2. Придание шароструйному аппарату небольшой угловой скорости (вращения). В результате будет происходить перераспределение шаров перед

впускными окнами, что облегчит режим прохождения шаров и устранит возникающие заклинки.

Исследование влияния массы порции шаров на эффективность разрушения проводились при бурении скважин в образцах мрамора с расхаживанием снаряда. По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 5) и сканировалась их форма (рис. 37). Установлено, что при увеличении массы порции шаров увеличивается диаметр скважины, ее глубина и объем. То есть подтверждаются зависимости, полученные при забурке скважин с образованием криволинейного забоя.

Таблица 5 – Влияние массы порции шаров на эффективность шароструйного бурения

Масса порции шаров $m_{ш}$, г	Геометрические параметры скважин				
	Объем скважины $V_{скв}$, мм ³	Диаметр скважины $D_{скв}$, мм	Длина цилиндрической части скважины $h_{цч}$, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем h_0 , мм	Общая глубина скважины h , мм
10	11900	25	20	28	36
20	18000	25,5	30,5	42	49
30	24000	26,5	42	52	57
40	28500	26,5	48,5	59	62
Исходные данные: $d_{бс}''=16$ мм, $d_{кс}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{то}=4,2$ мм, $l_{кс}=100$ мм, $\alpha_{pд}=10^\circ$, $\delta_d=1$ мм, $d_{ш}=3$ мм, $R_{дз}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{pac}=4$ мин, $t=40$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость – вода.					

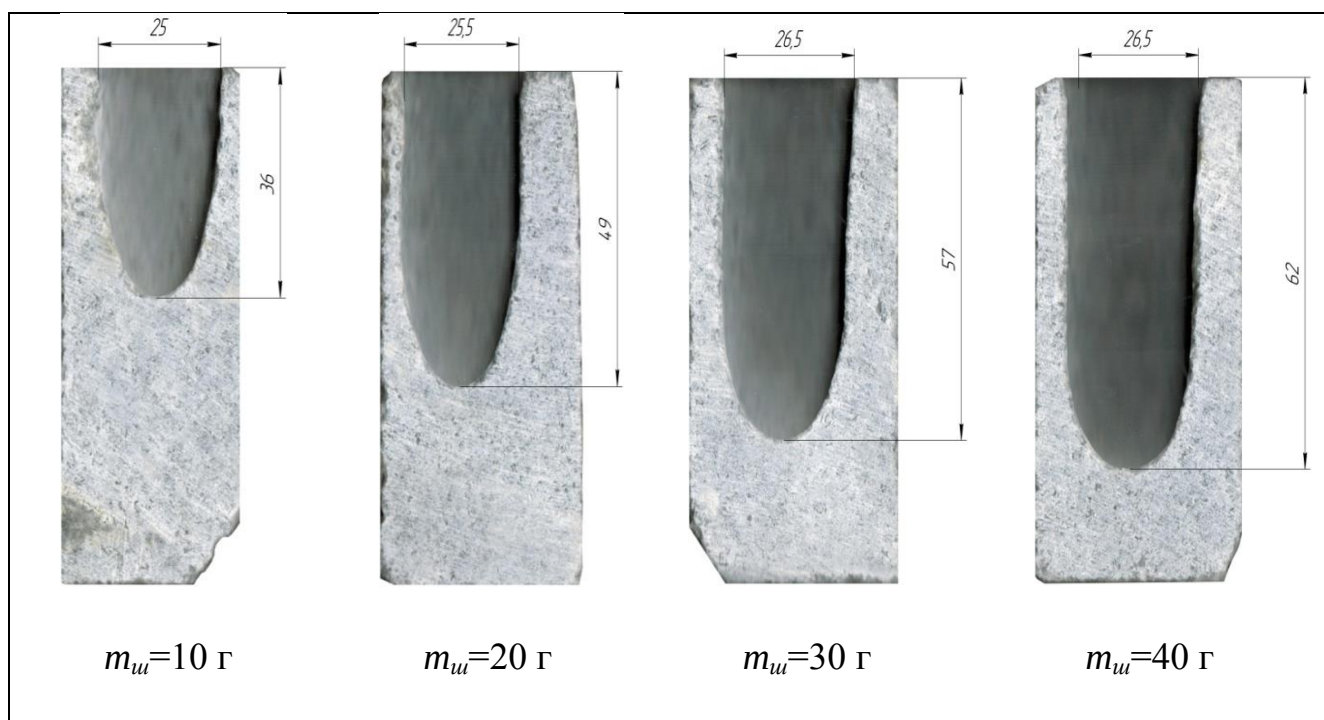


Рис. 37. Геометрические параметры скважин при варьировании массы порции шаров

Исследование влияния диаметра используемых шаров на эффективность шароструйного бурения

Исследование влияния диаметра шаров на эффективность шароструйного бурения проводилось при забурке скважины с образованием криволинейного забоя. В связи с тем, что при использовании шаров различных диаметров оптимальная масса порции шаров неизвестна, исследования проводились при варьировании массы порции шаров. Исходными параметрами являлись: $d_{oc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=100$ мм, $\alpha_{p\delta}=10^\circ$, $\delta_\delta=1$ мм, $R_{\delta z}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t=2$ мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода.

На рис. 38 представлен график зависимости объема скважины от массы порции шаров диаметрами 2; 3 и 3,5 мм. При бурении шарами диаметром 2,5 мм наблюдались значительные их скопления в затрубном пространстве под задерживающим устройством, что связано с равенством их диаметра с диаметром отверстий в задерживающем устройстве. На

основании этого было принято решение о нецелесообразности их дальнейшего использования в процессе исследования. Установлено, что в ряду диаметров используемых шаров 2–3–3,5 мм значение оптимальной массы порции шаров имеет одинаковое значение – 30 г. Диаметр скважины и ее объем при оптимальной массе шаров в ряду диаметров 2–3–3,5 мм имеют почти одинаковую величину. Также следует отметить то, что в пределах измерений заклинивание шаров диаметром 2 мм не было выявлено.

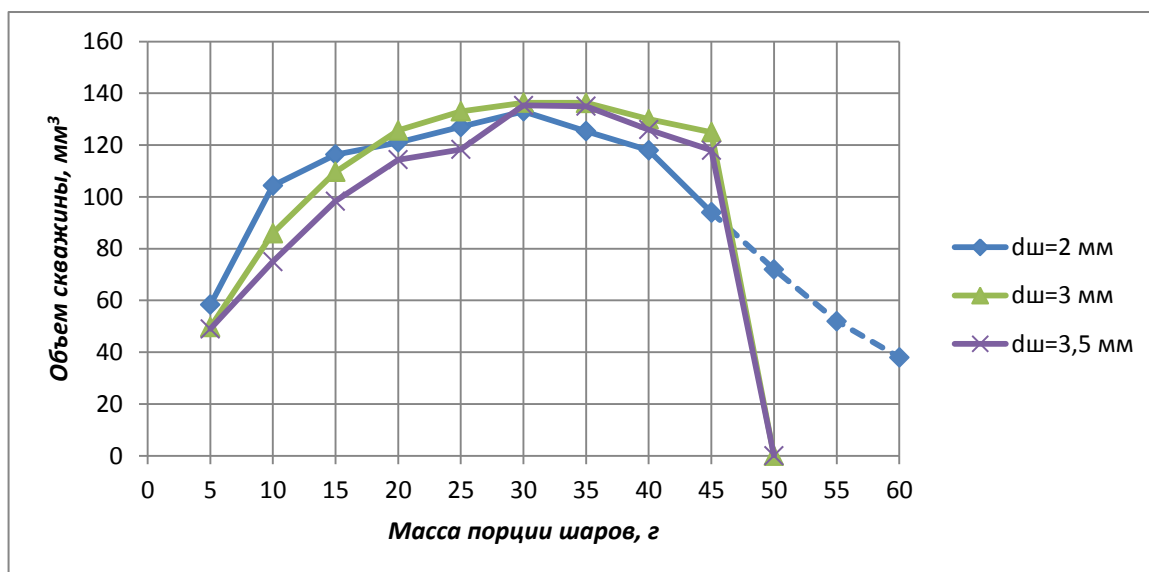


Рис. 38. Зависимость объема скважины от массы порции шаров при их различных диаметрах

Было проведено исследование влияния диаметра шаров на эффективность разрушения мрамора при бурении скважин с расхаживанием бурового снаряда с периодичностью $t_{рас}$. По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 6) и сканировалась их форма (рис. 39). Установлено, что при увеличении диаметра шаров увеличивается диаметр скважины, ее глубина и объем.

Для интерпретации полученных результатов была проведена высокоскоростная съемка. Обработка полученных видеофрагментов позволила определить расход и скорость движения шаров в камере смешения и в затрубном пространстве при бурении шарами различных диаметров (табл. 7).

Таблица 6 – Влияние диаметра шаров на эффективность шароструйного бурения

Диаметр шаров $d_{ш}$, мм	Геометрические параметры скважин				
	Объем скважины $V_{скв}$, мм ³	Диаметр скважины $D_{скв}$, мм	Длина цилиндрической части скважины $h_{цч}$, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем $h_{д}$, мм	Общая глубина скважины h , мм
2	19000	23	31,2	45	49,9
3	26600	23,9	41,6	55	58,7
3,5	29800	25,8	45,8	58,7	63,3

Исходные данные: $d_{ос}^H=16$ мм, $d_{кс}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{3y}=40^\circ$, $h_{то}=4,2$ мм, $l_{кс}=100$ мм, $\alpha_{р\delta}=10^\circ$, $\delta_\delta=1$ мм, $m_{ш}=30$ г, $R_{\delta 3}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{рас}=4$ мин, $t=40$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость – вода.

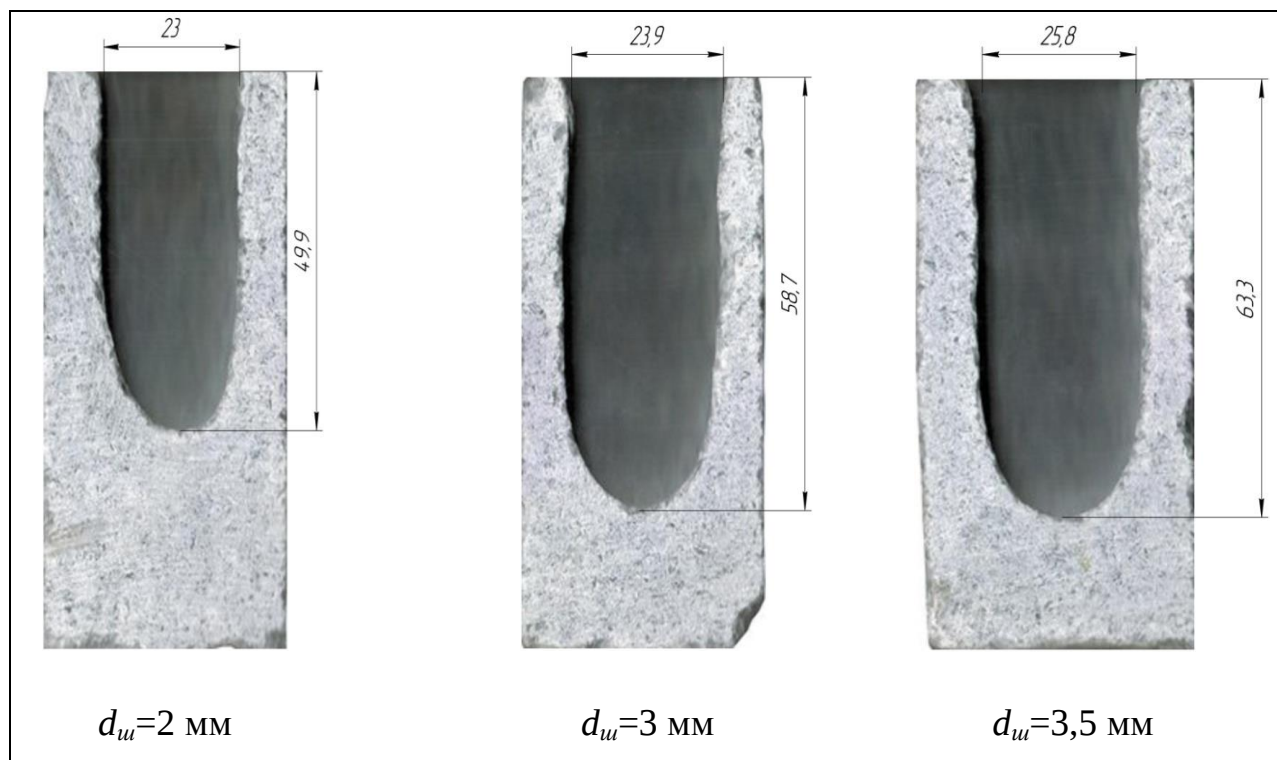


Рис. 39. Изменение геометрических параметров скважин при варьировании диаметра шаров

Из табл. 7 видно, что в ряду 2–3–3,5 мм расход шаров и скорость их вылета из камеры смещения уменьшаются. Снижение расхода шаров объясняется уменьшением суммарного количества шаров при увеличении их диаметра. Также установлено, что средняя скорость движения шаров от верхнего до нижнего участка камеры смещения увеличивается, что связано с меньшим количеством их соударений со стенками камеры.

Кроме того, анализ представленных данных, показал, что увеличение объема скважины при увеличении диаметра шаров достигается за счет большей кинетической энергии шаров, что приводит к увеличению объема горной породы, разрушенной при ударе одним шаром. Также при уменьшении диаметра шаров в пространстве под буровым снарядом наблюдается большое количество рикошетов, что приводит к увеличению значения коэффициента γ (формула 4), следовательно, меньшей эффективности бурения.

Таблица 7 – Связь расхода шаров и средней скорости движения шаров различного диаметра на разных участках камеры смещения

Диаметр шаров $D_{ш}$, мм	Масса одного шара, г	Расход шаров $Q_{ш}$, ш/с	Общее количество шаров, участвующих в разрушении N , ш	Участок движения в камере смещения	Средняя скорость шаров в камере смещения $V_{кс}^{ш}$, м/с	Средняя скорость шаров в затрубном пространстве $V_{зн}^{ш}$, м/с	Средняя кинетическая энергия одного шара $E_{кин}$ при вылете из бурового снаряда, мДж
2	0,033	1461	304	верхний	7,545	0,949	2,682
				нижний	9,288	0,929	
3	0,111	529	90	верхний	7,397	0,727	7,023
				нижний	8,599	0,602	
3,5	0,175	252	57	верхний	7,091	0,778	9,816
				нижний	7,981	0,743	

Исследование влияния продолжительности рейса (времени бурения) и периодичности расхаживания бурового снаряда на эффективность шароструйного бурения

Исследование влияния времени бурения на эффективность разрушения горных пород при забурке скважины проводилось при следующих исходных данных: $d_{bc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=100$ мм, $\alpha_{pd}=10^\circ$, $\delta_d=1$ мм, $d_{ui}=3$ мм, $m_{ui}=25$ г, $R_{dz}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода.

По полученным результатам исследований были построены графики зависимости диаметра, глубины, объема скважины от времени бурения. График зависимости диаметра скважины от времени бурения (рис. 40) показывает, что с увеличением времени бурения диаметр скважины вначале увеличивается, что связано с увеличением количества ударов шаров по периферийной части забоя, а потом выполаживается, что объясняется началом формирования цилиндрической части скважины.

Установлено увеличение глубины скважины и ее объема с увеличением времени бурения (рис. 41, 42), что можно объяснить увеличением суммарного количества ударов шаров по забою модели скважины. Причем зависимость глубины и объема скважины от времени имеет довольно устойчивый линейный характер.

График зависимости объемной скорости разрушения от времени бурения представлен на рис. 43. Из графика видно, что объемная скорость разрушения падает с течением времени. Это объясняется постепенным увеличением расстояния между долотом и забоем и свидетельствует о необходимости опускания снаряда во время бурения.

На рис. 44 показано изменение формы криволинейной части забоя при разрушении плоского образца с увеличением времени бурения.

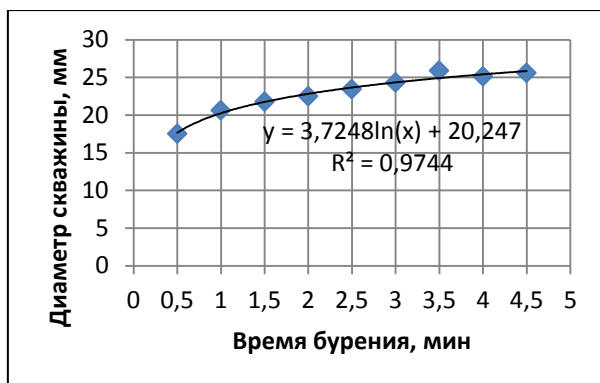


Рис. 40. Зависимость диаметра скважины от времени бурения



Рис. 41. Зависимость глубины скважины от времени бурения

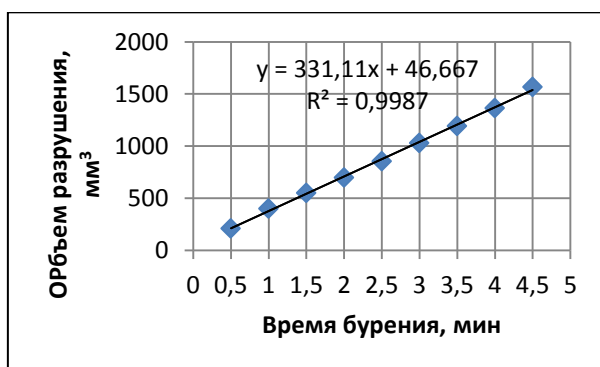


Рис. 42. Зависимость объема скважины от времени бурения

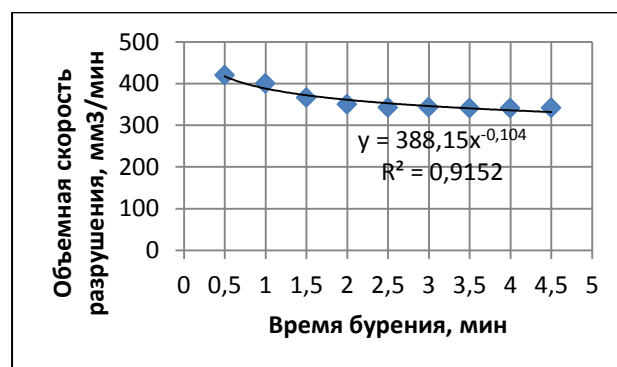


Рис. 43. Зависимость объемной скорости разрушения от времени бурения



Рис. 44. Изменение формы криволинейной части забоя при увеличении времени бурения

Исследования влияния периодичности расхаживания бурового снаряда на эффективность разрушения горных пород проводились при бурении скважин в мраморе. По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 8) и сканировалась их форма (рис. 45). Установлено, что при увеличении периодичности расхаживания при относительно постоянном объеме скважины увеличивается диаметр скважины и уменьшается глубина скважины. Кроме того, можно отметить значительные неровности стенок скважины при больших значениях времени между расхаживаниями.

Таблица 8 – Влияние периодичности расхаживания на геометрические параметры скважин

Периодичность расхаживания бурового снаряда $t_{рас}$, мин	Геометрические параметры скважины				
	Объем скважины $V_{скв}$, мм ³	Диаметр скважины $D_{скв}$, мм	Длина цилиндрической части скважины $h_{цч}$, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем h_{δ} , мм	Общая глубина скважины h , мм
5	28460	24,1	54	62,3	66,9
10	28480	24,3	49	57,9	61,6
15	29000	26,7	44,9	52,7	57,4
20	28160	28,2	39,5	48,8	51,7

Исходные данные: $d_{\delta c}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{3y}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=60$ мм, $\alpha_{pd}=10^\circ$, $\delta_{\delta}=1$ мм, $d_{и}=3,5$ мм, $m_{и}=25$ г, $R_{\delta 3}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t=40$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость – вода.

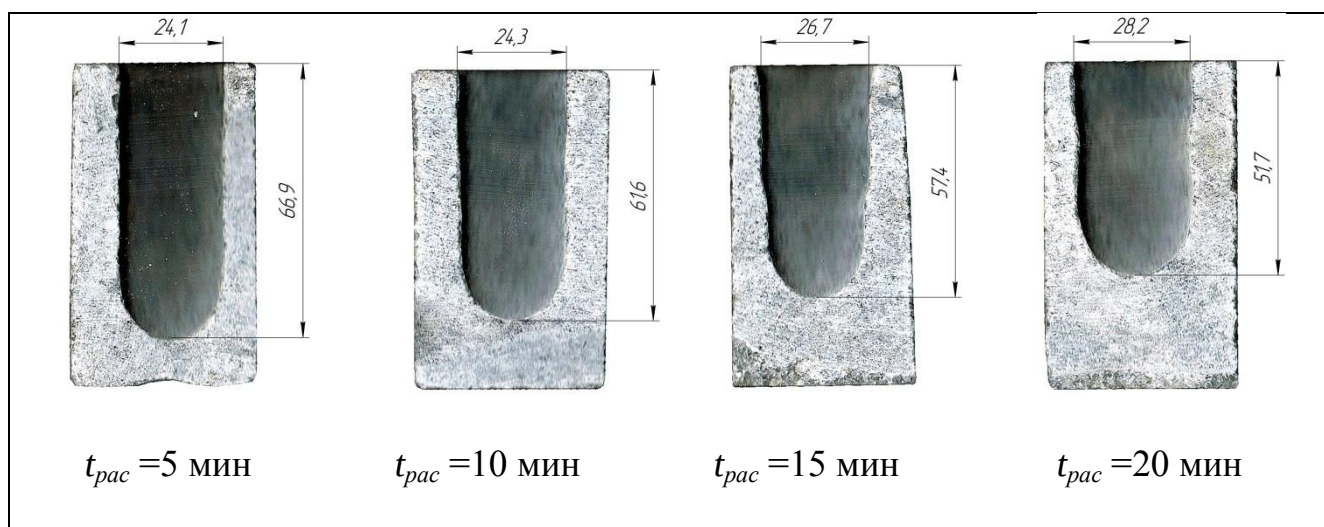


Рис. 45. Геометрические параметры скважин при варьировании периодичности расхаживания

3.2. Исследование влияния геометрических параметров бурового снаряда на эффективность шароструйного бурения

Исследование влияния угла конусности и пропускной способности задерживающего устройства на эффективность шароструйного бурения

При прочих равных условиях было проведено бурение снарядом без задерживающего устройства (ЗУ), с ЗУ цилиндрической и конической формы. Причем выбирался минимально возможный угол конусности для прохождения шаров в технологические окна, равный 40° . В табл. 9 приведены результаты исследования, анализ которых показывает, что наибольшая эффективность разрушения наблюдается при использовании ЗУ конусной формы (в частности, прирост объема скважины по сравнению с компоновкой бурового снаряда без ЗУ составляет 16,4 %).

Наблюдения за процессом бурения показывают, что при увеличении угла конусности задерживающего устройства образуются скопления шаров под задерживающим устройством, что затрудняет их поступление в камеру смешения.

Таблица 9 – Результаты исследований при бурении скважин снарядами без ЗУ, с ЗУ цилиндрической и конической формы

Наличие и тип ЗУ	D , мм	ΔD , %	h , мм	Δh , %	$V_{\text{шл}}^{\text{шл}}$, мм/мин	$V_{\text{скв}}$, мм ³	$\Delta V_{\text{скв}}$, %	$V_{\text{шл}}^{\text{шл}}$, мм ³ /мин
без ЗУ	16,3	–	4,6	–	2,3	453,3	–	226, 7
цилиндрическое ЗУ	17,1	5,3*	4,7	2,9	2,4	481,1	6,1	240, 6
конусное ЗУ	18	10,5	5	9,4	2,5	527, 8	16,4	263, 9
Исходные данные: $d_{\text{бс}}^{\text{шл}}=16$ мм, $d_{\text{кв}}=8$ мм, $d_{\text{с}}=2$ мм, $h_{\text{мо}}=4,2$ мм, $l_{\text{кв}}=100$ мм, $\alpha_{\text{рв}}=10^\circ$, $\delta_{\text{д}}=1$ мм, $d_{\text{шл}}=3$ мм, $m_{\text{шл}}=25$ г, $R_{\text{дз}}=10$ мм, $Q_{\text{р}}=6,7$ л/мин, $t=2$ мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода								

* Примечание: при определении прироста величин (в %) за базу сравнения принимаются данные, полученные при бурении снарядом без задерживающего устройства

Также были проведены исследования влияния пропускной способности задерживающего устройства (отношения площади отверстий в ЗУ к площади его поверхности) на эффективность шароструйного бурения.

Полученные результаты указывают на слабую зависимость эффективности бурения от этого параметра. Однако для улучшения условий выноса шлама и уменьшения гидравлических сопротивлений при течении восходящего потока промывочной жидкости площадь отверстий в задерживающем устройстве должна быть максимальной, но достаточной для удержания шаров в призабойной зоне скважины.

Исследование влияния расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон на эффективность шароструйного бурения

Данные исследования проводились при забурке скважины при варьировании расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон R_{cto} при следующих исходных параметрах: $d_{bc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=92$ мм, $\alpha_{pd}=10^\circ$, $\delta_o=1$ мм, $d_{ш}=3$ мм, $m_{ш}=20$ г, $R_{o3}=10$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t=2$ мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода.

По полученным результатам построен график зависимости диаметра и объема скважины от расстояния R_{cto} , приведенный на рис. 46. Изменение формы забоя скважины при этом показано на рис. 47.

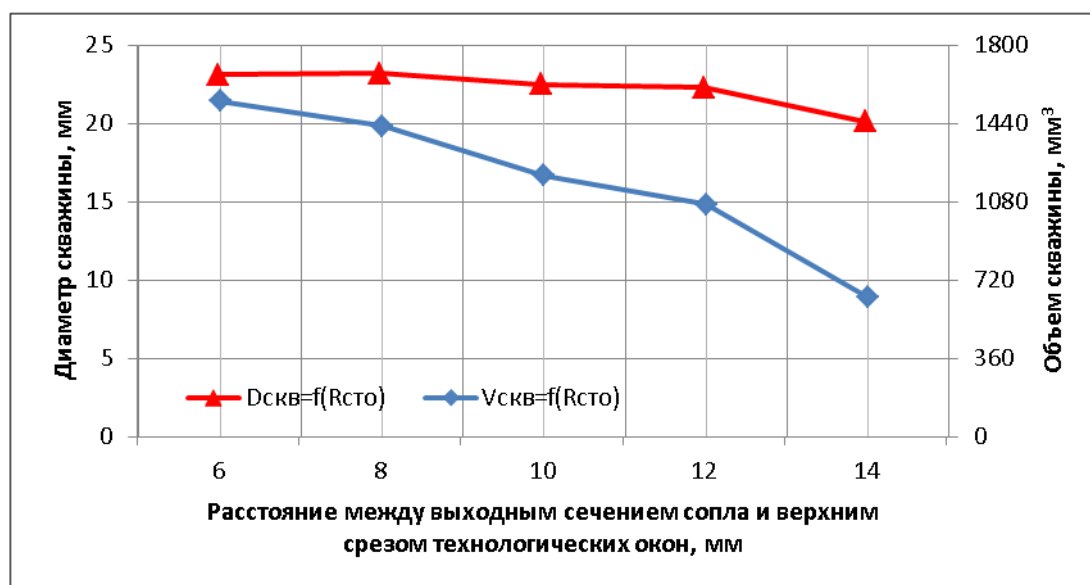


Рис. 46. Зависимость диаметра и объема скважины от расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон

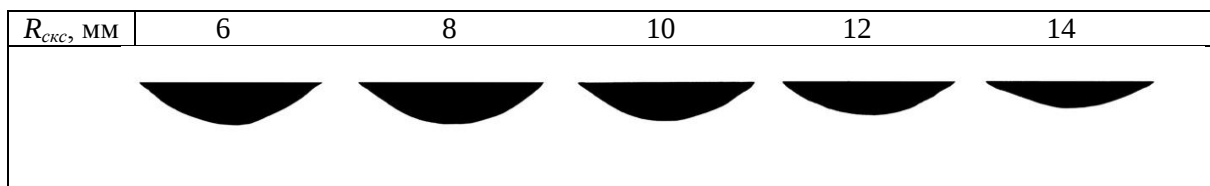


Рис. 47. Изменение формы криволинейного забоя при варьировании расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон

При оптимальных значениях расстояния между долотом и забоем, диаметра и массы порции шаров было проведено исследование влияния величины R_{cto} на эффективность разрушения мрамора при бурении скважин с расхаживанием бурового снаряда. По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 10). Из табл. 10 видно, что увеличение расстояния R_{cto} в исследуемом диапазоне незначительно влияет на диаметр скважины. Однако объем и глубина скважины при увеличении R_{cto} заметно уменьшаются.

Таблица 10 – Влияние расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон на эффективность шароструйного бурения

Расстояние между соплом и верхним срезом окон, мм	Объем скважины, мм ³	Диаметр скважины, мм	Длина цилиндрической части скважины, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем, мм	Общая глубина скважины, мм
0	30800	25	57,2	65,8	70,8
3	24100	24,9	46	54,5	58
6	21370	24,8	39,1	48,1	51,2
Исходные данные: $d_{bc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=60$ мм, $\alpha_{po}=10^\circ$, $\delta_\delta=1$ мм, $d_w=3,5$ мм, $m_w=20$ г, $R_{\partial z}=5$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{pac}=5$ мин, $t=40$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость: вода					

Для выявления причин уменьшения эффективности шароструйного бурения с увеличением расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон при заданных условиях проведена

высокоскоростная съемка. Результаты обработки видеофайлов представлены в табл. 11.

Таблица 11 – Расход и скорость шаров в камере смешения при разных значениях расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон

Расстояние между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон, мм	0	3	6
Расход шаров, шт/с	1084	1055	1050
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	7,778	6,457

Полученные результаты показывают, что при увеличении расстояния при относительно постоянном значении расхода шаров их скорость в камере смешения уменьшается. Это связано с уменьшением коэффициента эжекции снаряда. Уменьшение скорости шаров ведет к уменьшению объема и глубины скважины, что подтверждается результатами, полученными при забурке скважины (рис. 46) и бурении с расхаживанием бурового снаряда (табл. 10).

Исследование влияния высоты технологических окон на эффективность шароструйного бурения

Данные исследования проводились при разрушении мрамора при бурении скважин в мраморе с расхаживанием бурового снаряда с шагом $1,25 \cdot d_{ш}$; $1,75 \cdot d_{ш}$; $2,25 \cdot d_{ш}$. Полученные результаты сведены в табл. 12. Из таблицы видно, что увеличение высоты окон в исследуемом диапазоне мало влияет на диаметр скважины, а объем и глубина скважины при увеличении высоты окон незначительно уменьшается.

Для интерпретации полученных результатов была проведена высокоскоростная съемка процесса бурения. Обработка полученных видеофрагментов позволила определить расход и скорость шаров в камере смешения при бурении снарядами с различной высотой технологических окон (табл. 13).

Таблица 12 – Влияние высоты технологических окон на эффективность шароструйного бурения

Высота технологических окон, мм	Объем скважины, мм ³	Диаметр скважины, мм	Длина цилиндрической части скважины, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем, мм	Общая глубина скважины, мм
4,2	34180	25,4	62,9	70,1	74,1
6,1	30800	25	57,2	65,8	70,8
7,8	28900	25,2	53,3	60,6	65,2
Исходные данные: $d_{bc}''=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $l_{kc}=40$ мм, $\alpha_{pd}=10^\circ$, $\delta_d=1$ мм, $d_{ш}=3,5$ мм, $m_{ш}=20$ г, $R_{d3}=5$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{pac}=5$ мин, $t=40$ мин, горная порода: мрамор, промывочная жидкость: вода					

Таблица 13 – Расход и скорость шаров в камере смешения при разных значениях высоты технологических окон

Высота технологических окон, мм	4,2	6,1	7,8
Расход шаров в камере смешения, ш/с	1188	1154	1166
Скорость шаров в камере смешения, м/с	9,445	9,226	8,939

Из табл. 13 видно, что при увеличении высоты технологических окон при относительно постоянном значении расхода шаров их скорость в камере смешения снижается. Анализ видеофрагментов показал, что с увеличением высоты технологических окон в области под задерживающим устройством увеличивается количество скопившихся для последующего всасывания шаров. Последнее приводит к уменьшению коэффициента эжекции снаряда, следовательно, уменьшению скорости шаров в камере смешения. Снижением скорости шаров объясняется уменьшение объема и глубины скважины, наблюдаемое в табл. 12.

Исследование влияния длины камеры смешения на эффективность шароструйного бурения

Для определения оптимальной длины камеры смешения в ряду длин $5 \cdot d_{kc}$; $7,5 \cdot d_{kc}$; $10 \cdot d_{kc}$; $12,5 \cdot d_{kc}$; $15 \cdot d_{kc}$; $17,5 \cdot d_{kc}$ предварительно были выявлены

значения оптимальных масс порции шаров при забурке скважины. Стоит отметить, что оптимальная масса порции шаров при увеличении длины камеры смешения увеличивается, что связано с повышением объема бурового снаряда и затрубного пространства [42].

Экспериментальные исследования влияния длины камеры смешения на эффективность разрушения проводились при бурении скважин в образцах мрамора с расхаживанием снаряда. Полученные результаты исследований, представленные в табл. 14, позволили построить графики зависимости диаметра, объема (рис. 48) и глубины (рис. 49) скважины от длины камеры смешения. Анализ графиков показывает, что с увеличением длины камеры смешения уменьшается диаметр скважины и ее объем. Максимальная глубина скважины зафиксирована при бурении буровыми снарядами с длиной камеры смешения, равной 40 и 60 мм.

Таблица 14 – Влияние длины камеры смешения на эффективность шароструйного бурения

Длина камеры смешения, мм	Оптимальная масса порции шаров, г	Объем скважины, мм ³	Диаметр скважины, мм	Длина цилиндрической части скважины, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем, мм	Общая глубина скважины, мм
40	20	32000	25,6	57	65,7	70,3
60	25	30800	25	57,2	65,8	70,8
80	30	29200	24,6	53,3	62,2	66,8
100	30	28600	24,2	52,7	62,4	66
120	35	27600	24,2	51,9	62,6	65,5
140	35	24500	23,8	47	56,7	61,2
Исходные данные: $d''_{oc}=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=6,1$ мм, $\alpha_{po}=10^\circ$, $\delta_o=1$ мм, $d_{ш}=3,5$ мм, $R_{oz}=5$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{pac}=5$ мин, $t=40$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость – вода						

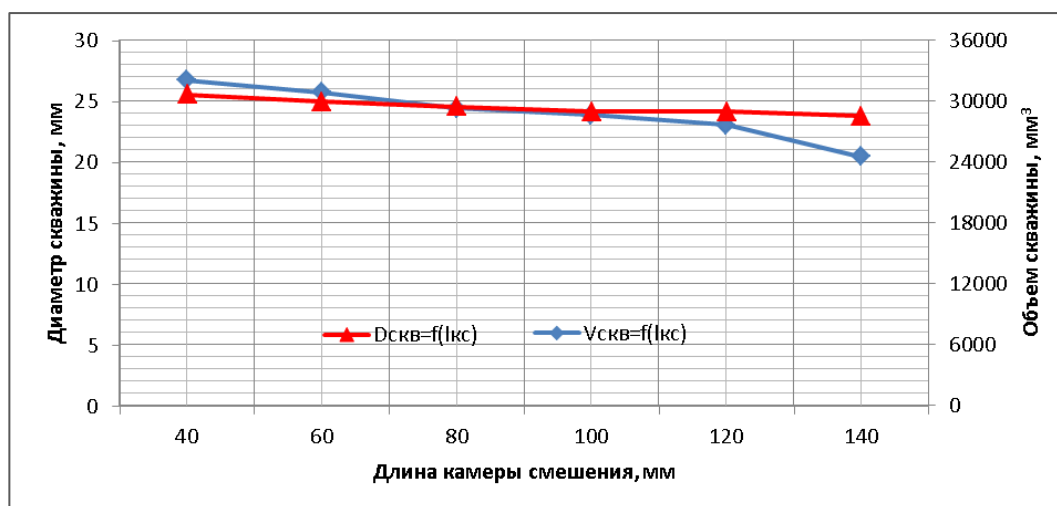


Рис. 48. Зависимость диаметра и объема скважины от длины камеры смешения

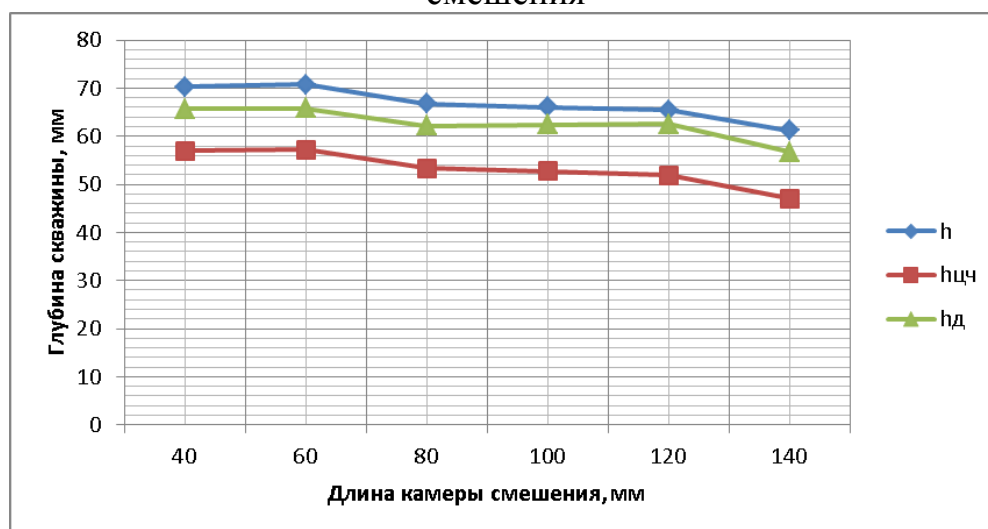


Рис. 49. Зависимость глубины скважины от длины камеры смешения

Для анализа вышеописанных результатов была проведена высокоскоростная съемка процесса бурения, результаты которой представлены в табл. 15.

Таблица 15 – Расход и скорость шаров в камере смешения при разных значениях ее длины

Длина камеры смешения, мм	40	60	80
Расход шаров в камере смешения, ш/с	1084	1020	967
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	7,597	7,361

Анализ результатов, представленных в табл. 15, указывает на уменьшение скорости шаров в камере смешения при увеличении ее длины,

что объясняется большим количеством соударений шаров о ее стенки. Данный вывод хорошо согласуется с результатами американских исследователей [113], которые показали, что увеличение длины камеры смешения ведет к снижению коэффициента эжекции. Снижение скорости шаров в камере смешения приводит к уменьшению скорости их подъема в затрубном пространстве, следовательно, снижению расхода шаров.

Исследование влияния угла раскрытия диффузора на эффективность шароструйного бурения

Исследования влияния угла раскрытия диффузора на эффективность разрушения мрамора проводились при бурении скважин с расхождением снаряда с периодичностью $t_{рас}$. Геометрические параметры скважины представлены в табл. 16, а форма забоя – на рис. 50.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при угле раскрытия диффузора 10° диаметр, глубина и объем скважины имеют максимальные значения. Диаметр скважины в ряду углов раскрытия 10° – 20° – 30° – 0° уменьшается.

Таблица 16 – Влияние угла раскрытия диффузора на эффективность шароструйного бурения

Угол раскрытия диффузора, °	Объем скважины, мм ³	Диаметр скважины, мм	Длина цилиндрической части скважины, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем, мм	Общая глубина скважины, мм
10	28600	25,3	50,4	59,7	62,5
20	21370	24,9	38,4	48,2	52
30	21516	24	40,9	49,8	53,6
0	21010	23,7	41,2	50	54,1
Исходные данные: $d''_{\delta c}=16$ мм, $d_{\kappa c}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{3y}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{\delta c}=60$ мм, $\delta_o=1$ мм, $d_{ui}=3,5$ мм, $m_{ui}=20$ г, $R_{o3}=5$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{рас}=5$ мин, $t=30$ мин, горная порода – мрамор, промывочная жидкость – вода					

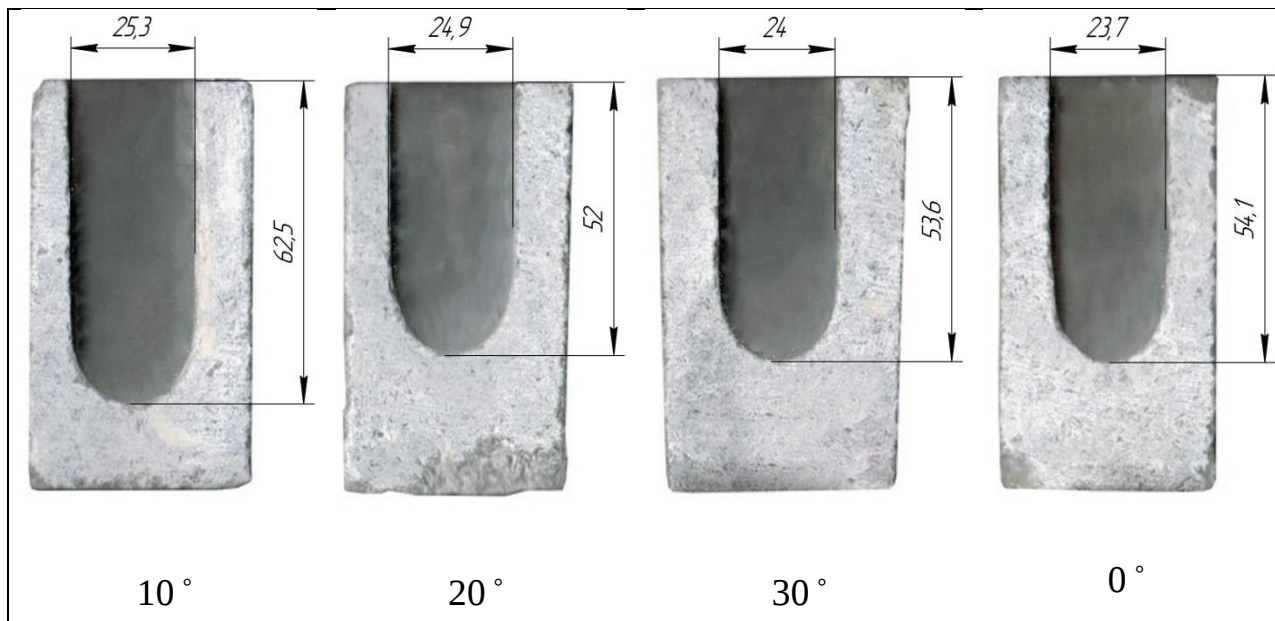


Рис. 50. Изменение геометрических параметров скважин при варьировании угла раскрытия диффузора

На следующем этапе была проведена видеорегистрация процесса движения шаров в призабойной зоне скважины при варьировании углов раскрытия диффузора. Результаты высокоскоростной съемки представлены в табл. 17.

Таблица 17 – Расход и скорость шаров в камере смешения при разных значениях углов раскрытия диффузора

Угол раскрытия диффузора, град	10	20	30	0
Расход шаров в камере смешения, ш/с	1084	1041	1011	890
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	7,668	6,884	6,728

Полученные данные показывают, что в ряду углов раскрытия диффузора 10° – 20° – 30° – 0° уменьшается расход шаров в камере смешения, что связано с образованием скоплений шаров между буровым снарядом и забоем скважины (рис. 51). Уменьшение скорости шаров в камере смешения связано с возрастанием количества рикошетов о стенки бурового снаряда в нижней области.

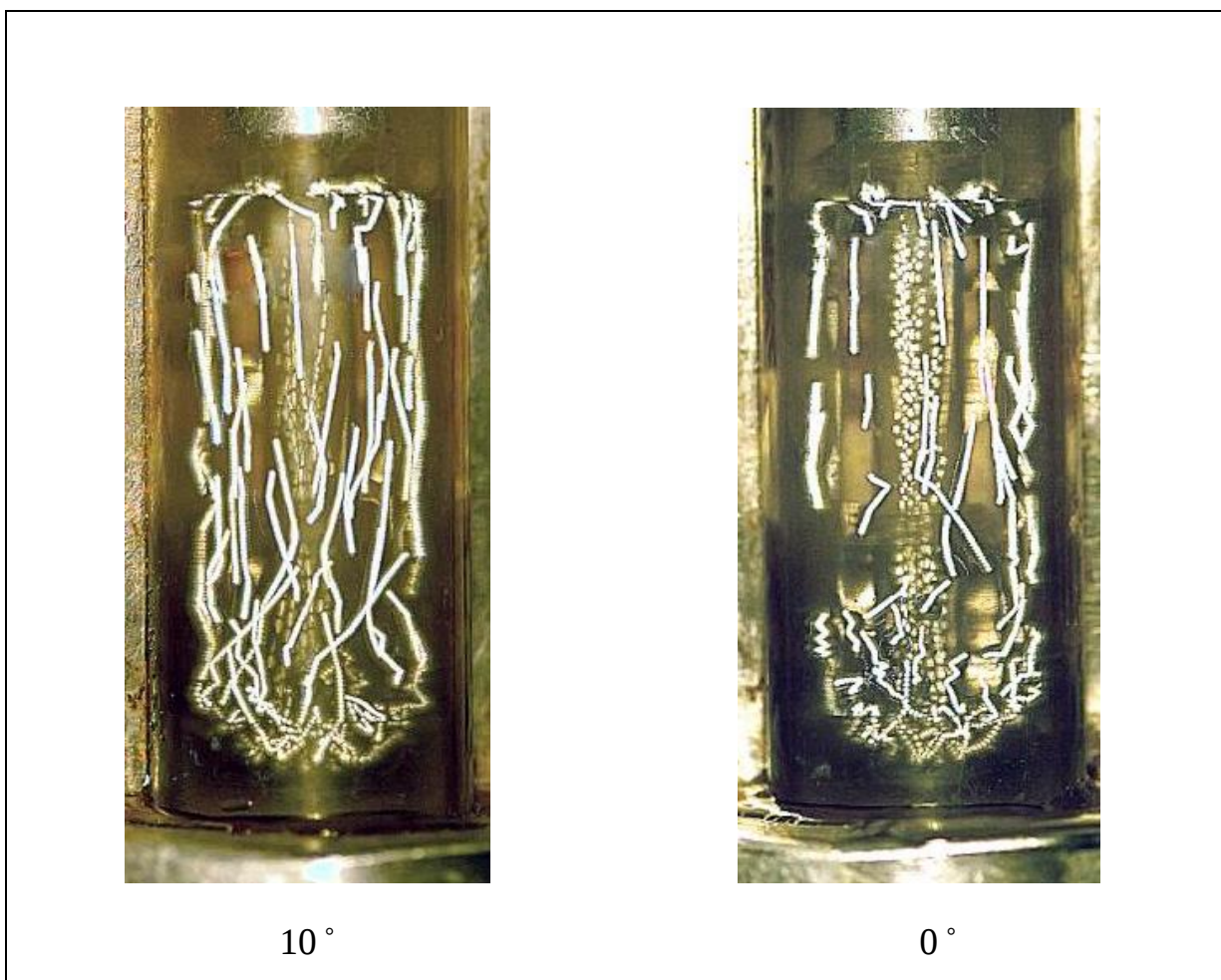


Рис. 51. Стробоскопические изображения, иллюстрирующие движение шаров в затрубном пространстве с углами раскрытия диффузора, равными 10° и 0°

Анализируя результаты скоростных съемок, можно заметить, что уменьшение диаметра скважины связано с траекторией движения шаров в буровом снаряде. В ряду углов раскрытия диффузора 10° – 20° – 30° – 0° условия соударения шаров с периферийной частью забоя скважины усложняются [41]. Кроме того, сопоставление реальных геометрических размеров долота, шаров и расстояния между долотом и забоем скважины, а также наблюдения за траекторией шаров показало, что разрушение периферийной части забоя скважины обуславливается рикошетами отскочивших от породы шаров с поступающими на забой шарами. Это еще раз подтверждает необходимость бурения с минимальным расстоянием между долотом и забоем.

Исследование влияния диаметра сопла на эффективность шароструйного бурения

В табл. 18 представлены определенные нами основные рабочие параметры струйного аппарата с первичными соплами разных диаметров при неизменном диаметре камеры смешения. Анализ данных показал, что при увеличении значения геометрического параметра струйного аппарата, т.е. при уменьшении диаметра сопла, увеличивается его коэффициент эжекции. С уменьшением диаметра сопла увеличивается давление перед соплом, следовательно, уменьшается расход рабочего потока.

Таблица 18 – Основные параметры струйного аппарата при варьировании диаметра сопла

Диаметр сопла d_c , мм	Давление перед соплом P_c , МПа	Расход рабочего потока Q_p , л/мин	Расход смешанного потока Q_c , л/мин	Основной геометрический параметр m	Коэффициент эжекции $n_{эж}$
2	1,1	6,7	30,6	16	3,563
2,5	0,95	9,8	32,824	10,24	2,349
3	0,8	12,8	35,5	7,111	1,773
3,5	0,75	15,8	42,12	5,224	1,659
4	0,65	16,9	30,3	4	0,791

На следующем этапе проводилось сравнение эффективности разрушения долотами с различными диаметрами сопел. В связи с необходимостью определения оптимальной массы порции шаров эксперименты проводились при ее варьировании. При этом производилась забурка скважины при следующих условиях: $d_{bc}''=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $\alpha_{zy}=40^\circ$, $h_{mo}=4,2$ мм, $l_{kc}=40$ мм, $\alpha_{p\partial}=10^\circ$, $\delta_\partial=1$ мм, $d_{ui}=3,5$ мм, $R_{\partial z}=5$ мм, $t=1$ мин, разрушаемый материал – керамическая плитка, промывочная жидкость – вода. По полученным экспериментальным результатам построен график зависимости объема скважины от массы порции шаров при различных значениях диаметра сопел, представленный на рис. 52.

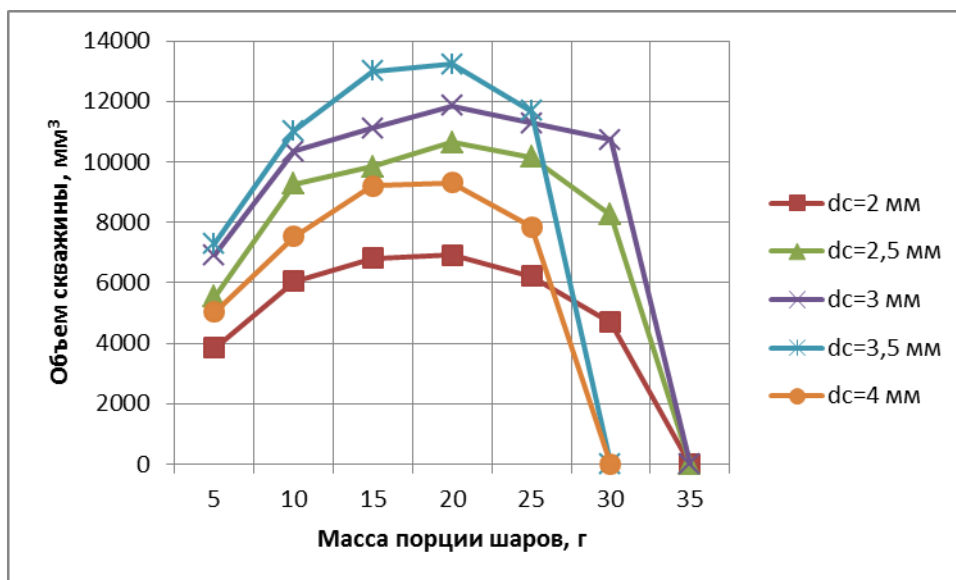


Рис. 52. Зависимость объема скважины от массы порции шаров при различных значениях диаметра сопел

Приведенный график показывает, что в ряду диаметров сопел 2–2,5–3–3,5 мм объем скважины возрастает, а при диаметре сопла 4 мм – снижается. Вместе с тем, критическая масса порции шаров при диаметрах сопел, равных 3,5 и 4 мм, падает, что связано с малыми значениями коэффициента эжекции при этом. Важным является тот факт, что оптимальная масса порции шаров в исследуемом диапазоне изменения диаметра сопел является постоянной.

На следующем этапе исследований была проведена высокоскоростная съемка процесса циркуляции шаров в призабойной зоне. Обработка полученных видеофрагментов позволила определить расход и скорости шаров в камере смешения при бурении снарядами с различным диаметром сопел (табл. 19).

Анализируя результаты скоростных съемок, можно заметить, что в ряду диаметров сопел 2–2,5–3–3,5 мм увеличивается скорость движения шаров в камере смешения, что объясняется увеличением скорости смешанного потока жидкости в камере смешения.

Таблица 19 – Влияние диаметра сопла на расход и скорость шаров в камере смешения

Диаметр сопла, мм	2	2,5	3	3,5	4
Расход шаров в камере смешения, шт/с	1084	1118	1224	1368	1120
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	9,445	9,616	10,015	8,046
Рассчитанная скорость жидкости без шаров, м/с	10,151	10,889	11,777	13,973	10,05
Отношение скорости шаров к скорости жидкости	0,826	0,867	0,816	0,716	0,8

Увеличение скорости шаров в камере смешения приводит к увеличению их расхода. Таким образом, экспериментально подтвердились предположения Увакова А.Б. и Заурбекова С.А.. Это связано с тем, что в момент подсасывания шаров в технологические окна при больших скоростях смешанного потока шары быстрее покидают верхнюю область бурового снаряда, не препятствуя поступлению других шаров.

На основе результатов исследований, представленных в табл. 18, удалось определить отношение скорости движения шаров к скорости промывочной жидкости в камере смешения (табл. 19). Следует отметить, что при диаметре сопла, равном 3,5 мм, наблюдается уменьшение данного отношения, что объясняется значительным увеличением расхода шаров при этом.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Приведенные выше результаты исследований позволяют сделать следующие выводы и рекомендации для дальнейших исследований и опытно-конструкторских работ при создании технических средств для шароструйного бурения:

1. Бурение снарядом выбранной конструкции необходимо производить при минимально возможном расстоянии между долотом и забоем шарами максимально возможного диаметра.

2. Для разработки скважины до требуемого диаметра при минимальном расстоянии между долотом и забоем необходимо проектировать шароструйно-эжекторные буровые снаряды со следующими соотношениями геометрических параметров:

- отношение диаметра камеры смешения к диаметру породоразрушающих шаров ($d_{kc}/d_{ш}$) должно составлять не менее 2,2. Данное соотношение определяет характер движения шаров в камере смешения. Наличие соударений о стенки камеры смешения (зигзагообразная траектория движения) приводит к большему числу ударов шаров по периферийной части скважины;

- зазор между стенками скважины и буровым снарядом должен быть минимальным и составлять $1,1 \div 1,2$ от диаметра шаров. При увеличении значения данного зазора на разрушение периферийной части забоя скважины будет затрачиваться больше времени, что сократит скорость бурения. Кроме того, увеличение зазора приведет к усложнению контроля над разработкой скважины до требуемого диаметра;

- толщина стенки диффузора в выходном сечении должна быть минимальной, а угол раскрытия диффузора составлять не более 10° . Это обеспечит более интенсивное разрушение периферийной части забоя скважины.

3. Для улучшения условий прохождения шаров в камеру смешения, т.е. приближения расхода шаров в камере смешения к максимальному значению, необходимо:

- располагать задерживающее устройство (ЗУ) на уровне верхнего среза технологических окон. Угол конусности ЗУ принимать равным не

более 40° , что обеспечит поступление поднимаемых шаров непосредственно в технологические окна без образования их скоплений;

- предусматривать высоту технологических окон, равную 1,25 от диаметра шаров для свободного прохождения последних;
- конический входной участок в камеру смешения должен иметь угол конусности в пределах $45\text{--}60^\circ$;
- масса порции шаров должна быть оптимальной;
- коэффициент эжекции снаряда должен быть достаточным для обеспечения прохождения шаров в технологические окна.

4. Для обеспечения высокой скорости движения шаров в камере смешения необходимо:

- располагать выходное сечение сопла на уровне верхнего среза технологических окон;
- длина камеры смешения должна быть равна $5\div 8$ ее диаметров;
- иметь расход бурового раствора, обеспечивающий требуемую скорость потока в камере смешения;
- диаметр сопла должен обеспечивать необходимый коэффициент эжекции.

5. Получена количественная оценка влияния:

- отношения диаметра шаров к диаметру камеры смешения и расхода шаров в камере смешения на величину отношения скорости шаров к скорости жидкости в буровом снаряде;
- длины камеры смешения на величину оптимальной массы технологической порции шаров;
- скорости движения шаров в камере смешения на расход шаров.

6. Для увеличения жесткости и износостойкости бурового снаряда необходимо рекомендовать геометрические параметры со следующими соотношениями:

- толщина стенки камеры смещения бурового снаряда (рис. 29) должна равняться половине диаметра камеры смещения;
- количество ребер между технологическими окнами должно быть не менее трех, а их ширина составлять не менее одного диаметра шара;
- толщина стенки диффузора в выходном сечении должна быть не менее 0,5 от диаметра шара для предупреждения преждевременного его износа.

7. Бурение скважин необходимо проводить при расхаживании бурового снаряда. При этом корректировать диаметр скважины можно за счет изменения следующих технологических параметров режима бурения:

- расстояния между долотом и забоем. При увеличении этого расстояния возрастает диаметр скважины выше требуемого. Таким образом, при заданных геометрических параметрах бурового снаряда следует поддерживать минимальное расстояние между долотом и забоем;
- расхода бурового раствора, увеличение которого будет приводить к повышению скорости и расхода шаров в камере смещения, следовательно, интенсивному разрушению периферийной части забоя скважины;
- периодичности расхаживания, при увеличении которого возрастает диаметр скважины. Поэтому бурение необходимо проводить при минимальной периодичности расхаживания, достаточной для разработки скважины до требуемого диаметра.

8. Для исключения заклинивания шаров под задерживающим устройством бурение необходимо производить при оптимальной массе порции шаров. При забурке скважины буровой снаряд необходимо располагать при повышенном значении расстояния между долотом и забоем, что позволит исключить заклинку шаров под задерживающим устройством. При истечении некоторого времени снаряд необходимо плавно опускать до минимального расстояния между долотом и забоем.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ШАРОСТРУЙНО-ЭЖЕКТОРНЫХ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ

4.1. Разработка физической модели шароструйного способа бурения скважин

Разработка указанной физической модели осуществлялась с использованием результатов высокоскоростной съемки. Гидродинамическая схема работы бурового снаряда представлена на рис. 53. При работе бурового снаряда шары участвуют в следующих процессах: 1) подъем шаров в затрубном пространстве 1 до зоны всасывания 2; 2) поступление шаров из зоны 2 в камеру смешения 3; 3) движение шаров в камере смешения 3 и диффузоре 4; 4) движение шаров в области между долотом и забоем скважины 5.

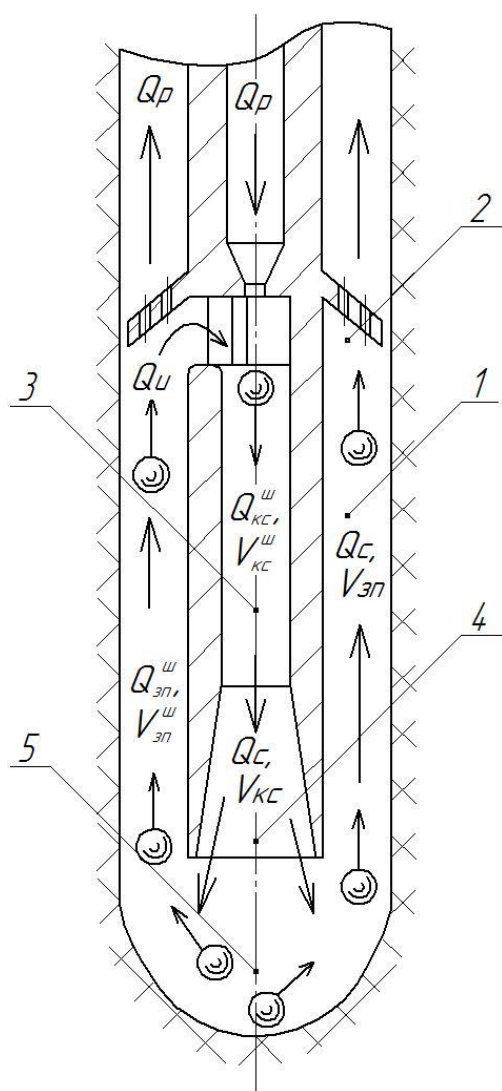


Рис. 53. Гидродинамическая схема работы бурового снаряда:
1 — затрубное пространство; 2 — зона всасывания шаров; 3 — камера смешения; 4 — диффузор; 5 — область между долотом и забоем скважины;
 Q_p — расход промывочной жидкости, подводимой к буровому снаряду;
 Q_u — расход инжектируемой жидкости;
 Q_c — расход смешанного потока;
 $V_{зп}$, $V_{кс}$ — скорости жидкости при течении в затрубном пространстве и буровом снаряде;
 $Q_{кс}^{ш}$, $V_{кс}^{ш}$ — расход и скорость движения шаров в буровом снаряде;
 $Q_{зп}^{ш}$, $V_{зп}^{ш}$ — расход и скорость движения шаров в затрубном пространстве

Как указывалось в гл. 1.2.3, отличительной чертой струйных аппаратов, лежащих в основе ШЭБС, является циркуляция, наряду с жидкостью, породоразрушающих шаров. Таким образом, в процессе бурения исследуемым снарядом происходит циркуляция потока промывочной жидкости (Q_c) и шаров ($Q_{\text{бс}}^{\text{ш}}$, $Q_{\text{зн}}^{\text{ш}}$). Важным является тот факт, что включение в промывочную жидкость шаров меняет режим работы струйного аппарата. Поэтому для разработки методики расчета шароструйного бурения необходим предварительный вывод формул для расчета расхода и скорости шаров на различных участках.

Подъем шаров в затрубном пространстве

Анализ траектории движения шаров в затрубном пространстве (рис. 54) позволяет сделать вывод о непрямолинейности их движения.



Рис. 54. Стробоскопическое изображение, иллюстрирующее траекторию движения шаров в затрубном пространстве

Среднюю скорость подъема шаров (в м/с) при условии их равномерного движения можно определить по формуле [98]:

$$V_{\text{зн}}^{\text{ш}} = V_{\text{зн}} - U, \quad (27)$$

где $V_{зп}$ – скорость движения бурового раствора в затрубном пространстве, вычисляемая исходя из равенства расхода смешенного потока в камере смешения и затрубном пространстве по формуле:

$$V_{зп} = \frac{V_{кс} \cdot d_{кс}^2}{(D_{скв}^2 - d_{бс}^2)}; \quad (28)$$

где U – скорость свободного падения шаров в буровом растворе для переходного и турбулентного режима обтекания, м/с, определяемая по формуле Риттенгера [19]:

$$U = \omega \cdot \sqrt{\frac{d_{ш} \cdot (\rho_{ш} - \rho_{бр})}{\rho_{бр}}}, \quad (29)$$

где ω – постоянная Риттенгера, для шара в среднем $5,11 \sqrt{(м/с^2)}$.

Максимальное количество шаров, движущихся в затрубном пространстве, определяется по выведенной нами формуле, исходя из условия непрерывного движения шаров. Предполагается, что шары при этом выстраиваются в несколько рядов.

$$N_{зпmax}^{ш} = \left(\frac{l_{бс}}{d_{ш}} \right) \times \left(\frac{\pi \cdot (d_{бс} + D_{скв})}{2 \cdot d_{ш}} \right), \quad (30)$$

Анализ результатов высокоскоростной съемки показал, что при оптимальном количестве шаров в технологической порции при их движении между ними в пределах ряда и между рядами существуют зазоры, следовательно, количество шаров будет определяться по формуле:

$$N_{зп}^{ш} = \left(\frac{l_{бс}}{d_{ш} \cdot C_1} \right) \times \left(\frac{\pi \cdot (d_{бс} + D_{скв})}{2 \cdot d_{ш} \cdot C_2} \right), \quad (31)$$

где $l_{бс}$ – длина бурового снаряда; C_1 – коэффициент, учитывающий зазор между рядами; C_2 – коэффициент, учитывающий зазор между шарами в ряду.

Формулу (31) необходимо применять для расчета оптимальной массы порции шаров [40]. О справедливости данной формулы свидетельствуют результаты, полученные при экспериментальном исследовании влияния длины камеры смешения на эффективность шароструйного бурения (гл. 3.2). При увеличении длины камеры смешения оптимальное количество шаров увеличивается, что отражается в выше представленной формуле.

Необходимо отметить, что эффективный вынос шлама из призабойной зоны скважины может быть обеспечен за счет:

- увеличения пропускной способности задерживающего устройства;
- выбора оптимального невышленного значения коэффициента эжекции, обеспечивающего необходимую скорость движения шаров в камере смешения.

Поступление шаров в буровой снаряд

В верхней части бурового снаряда шары, поднимаемые восходящим потоком, взаимодействуют с задерживающим устройством с последующим прохождением их через технологические окна в камеру смешения.

Для предупреждения заклинивания шаров под задерживающим устройством необходимо соблюдать условие:

$$Q_{\text{зп}}^{\text{ш}} \leq Q_{\text{кс}}^{\text{ш}}, \quad (32)$$

где $Q_{\text{кс}}$ – расход шаров в камере смешения; $Q_{\text{зп}}$ – расход шаров в затрубном пространстве.

Экспериментальные исследования показали, что формула (32) справедлива при коэффициентах эжекции, равных более 2.

Движение шаров в камере смешения и диффузоре

С помощью высокоскоростной съемки была исследована траектория движения шаров от входа в камеру смешения до выхода из диффузора (рис. 55). Было выявлено, что шары в камере смешения движутся не параллельно ее оси в связи с тем, что в момент входа шаров в камеру смешения вектор скорости направлен под углом к оси скважины. С учетом сказанного, при движении шаров в камере смешения наблюдается их рикошетирующее от ее стенок. Отклонение траектории шаров при прохождении через диффузор не обнаружено.

Кроме того, анализ видеофрагментов показал, что в момент входа в камеру смешения шары ускоряются за счет воздействия на них струи

бурового раствора, выходящей из сопла. При удалении от входного участка камеры смешения профиль скоростей струйного аппарата выравнивается, скорость шаров уменьшается до скорости $V_{\text{бс}}^{\text{ш}}$ и остается постоянной.

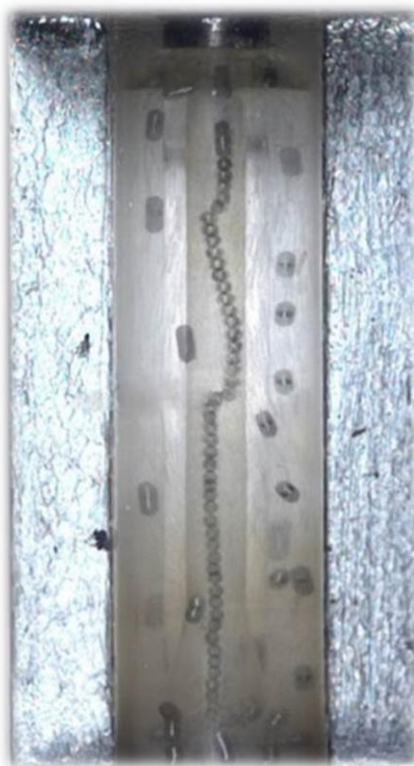


Рис. 55. Стробоскопическое изображение, иллюстрирующее траекторию движения шаров в буровом снаряде

Скорость шаров в камере смешения рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{кс}}^{\text{ш}} = \theta \cdot V_{\text{кс}}, \quad (33)$$

где θ – коэффициент, зависящий от отношения диаметра камеры смешения к диаметру шаров, расхода шаров в камере смешения и свойств промывочной жидкости;

$V_{\text{кс}}$ – скорость промывочной жидкости в камере смешения, вычисляемая по формуле [97]:

$$V_{\text{кс}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{р}} \cdot (1 + n_{\text{эж}})}{\pi \cdot d_{\text{кс}}^2}. \quad (34)$$

Максимальное количество шаров, движущихся в буровом снаряде, определяется по формуле:

$$N_{\text{бсmax}}^{\text{ш}} = 2 \cdot \left(\frac{l_{\text{бс}}}{d_{\text{ш}}} \right), \quad (35)$$

где $l_{\text{бс}}$ – длина бурового снаряда, м.

Расход шаров при этом составит:

$$Q_{\text{кc}}^{\text{ш}} = N_{\text{бсmax}}^{\text{ш}} / t. \quad (36)$$

Подставив (35) в (36) при условии равномерного движения шаров получим:

$$Q_{\text{бс}}^{\text{ш}} = \frac{2 \cdot l_{\text{бс}}}{t \cdot d_{\text{ш}}} = \frac{2 \cdot V_{\text{кc}}^{\text{ш}}}{d_{\text{ш}}}. \quad (37)$$

В действительности, при движении шаров в буровом снаряде не все шары движутся в один ряд, и между рядами существует определенное расстояние. В связи с этим в формулу (37) необходимо ввести коэффициент C_3 , учитывающий зазор между рядами шаров и между шарами в одном ряду.

$$Q_{\text{бс}}^{\text{ш}} = C_3 \frac{2 \cdot V_{\text{кc}}^{\text{ш}}}{d_{\text{ш}}}. \quad (38)$$

Следует отметить, что полученная эмпирическая зависимость расхода шаров в камере смещения от скорости их движения подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований (гл. 3.2).

Движение шаров в призабойной зоне скважины

При выходе шаров из диффузора они ударяются о горную породу, разрушая ее.

На рис. 53 видно, что в области между буровым снарядом и забоем скважины образуются скопления шаров, вызванные значительной турбулизацией потока бурового раствора после его удара о забой, а также взаимодействием движущихся вниз шаров и отскочивших от горной породы. Кроме того, сопоставление реальных геометрических размеров долота, шаров и расстояния между долотом и забоем скважины, а также наблюдения за траекторией шаров при скоростной съемке показали, что разрушение периферийной части забоя скважины главным образом обуславливается рикошетами отскочивших от породы шаров с движущимися на забой. Это еще раз подтверждает необходимость бурения скважин при минимальном расстоянии между долотом и забоем.

4.2. Расчет процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород

Предлагаемая методика расчета шароструйно-эжекторных буровых снарядов в оптимальном режиме разрушения горных пород основана на результатах экспериментальных исследований, приведенных в гл. 3.2, с использованием некоторых положений Увакова А.Б. [105, 106] и Штрассера В.В. [112].

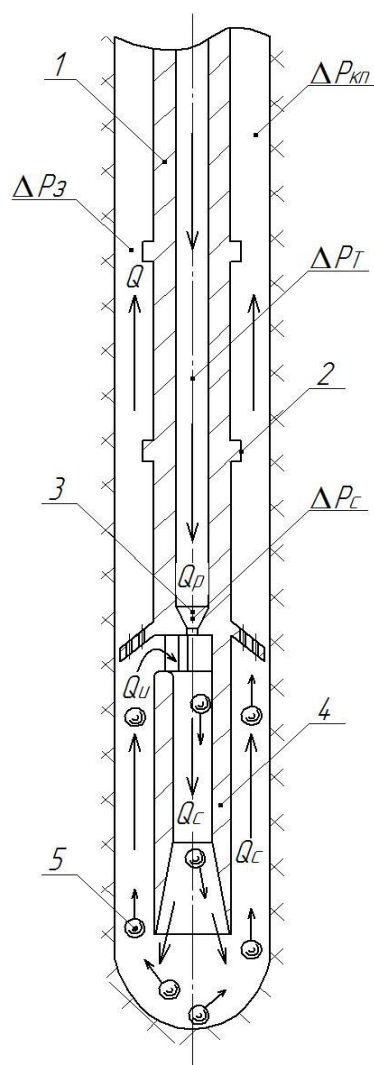


Рис. 56. Принципиальная схема технологических процессов шароструйного бурения:

- 1 – колонна бурительных труб;
- 2 – замки бурительных труб;
- 3 – сопло; 4 – буровой снаряд;
- 5 – шары

Принципиальная схема основных технологических процессов шароструйного бурения представлена на рис. 56.

При расчете шароструйно-эжекторных буровых снарядов в оптимальном режиме бурения необходимо:

- 1) определить оптимальные геометрические параметры буровых снарядов, а также диаметр и массу порции шаров;
- 2) определить скорость движения шаров, достаточную для разрушения определенной горной породы в оптимальном режиме;
- 3) определить расход бурового раствора, при котором обеспечен подъем шаров в зазоре между буровым снарядом и стенками скважины;
- 4) определить требуемый коэффициент эжекции и диаметр сопла;
- 5) рассчитать потери давления в циркуляционной системе;
- 6) выбрать параметры бурового насоса.

Исходными данными при этом являются:

1. свойства горных пород: динамическая твердость P_c (Па), модуль упругости E_1 (Па), коэффициент Пуассона μ_1 ;
2. параметры скважины: диаметр $D_{скв}$ (м), максимальная глубина бурения $L_{скв}^{max}$ (м);
3. свойства бурового раствора: плотность $\rho_{бр}$ (кг/м³), динамическое напряжение сдвига τ_0 (Па), динамическая вязкость η (Па·с);
4. геометрические параметры колонны бурильных труб: наружный d_n (м) и внутренний d_s (м) диаметры бурильных труб, наружный диаметр замкового соединения d_z (м), средняя длина бурильных труб l_{IT} (м);
5. свойства породоразрушающих шаров: плотность $\rho_{ш}$ (кг/м³), модуль упругости E_2 (Па), коэффициент Пуансона μ_2 .

Ниже представлена разработанная нами последовательность расчета (расшифровка некоторых обозначений приводится ранее).

1. Определяется максимальный размер породоразрушающих шаров:

$$d_{ш} = \frac{D_{скв}}{6,6}. \quad (39)$$

2. Рассчитывается диаметр и площадь сечения камеры смешения:

$$d_{кс} = 2,2 \cdot d_{ш}, \quad (40)$$

$$S_{кс} = \frac{\pi \cdot d_{кс}^2}{4}. \quad (41)$$

3. Вычисляется наружный диаметр бурового снаряда:

$$d_{бс}^H = D_{скв} - 2 \cdot 1,1 \cdot d_{ш}. \quad (42)$$

4. Определяется длина камеры смешения:

$$l_{кс} = 8 \cdot d_{кс}. \quad (43)$$

5. Вычисляется высота технологических окон:

$$h_{то} = 1,25 \cdot d_{ш}. \quad (44)$$

6. Рассчитывается оптимальная масса порции шаров по формуле:

$$m_{ш} = m_{1ш} \cdot N^ш = \frac{\rho_{ш} \cdot \pi \cdot d_{ш}^3 \cdot N^ш}{6}, \quad (45)$$

где $N_{ш}$ – количество поднимающихся в затрубном пространстве шаров, вычисляемое по формуле:

$$N_{ш\text{ЗП}} = \left(\frac{l_{6с}}{d_{ш} \cdot C_1} \right) \times \left(\frac{\pi \cdot (d_{6с} + D_{СКВ})}{2 \cdot d_{ш} \cdot C_2} \right), \quad (46)$$

где C_1 – коэффициент, учитывающий зазор между рядами шаров, по экспериментальным данным, приведенным в гл. 3.2, $C_1=1,5$; C_2 – коэффициент, учитывающий зазор между шарами в ряду, по экспериментальным данным (гл. 3.2) $C_2=1,5$.

7. Определяется скорость движения шаров (в м/с), необходимая для разрушения горной породы в оптимальном режиме [105, 106, 112]:

$$V_{\text{опт}} = 2,15 \cdot \left(\frac{4 \cdot (1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{4 \cdot (1 - \mu_2^2)}{E_2} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot P_c^5}{10 \cdot \rho_{ш} \cdot d_{ш}^3 \cdot \left(\frac{4}{d_{ш}} - \frac{4}{0,78 \cdot D_{СКВ}} \right)^3}}. \quad (47)$$

8. Находится максимально возможный расход бурового раствора $Q_{p\text{max}}$ (м³/с), который будет ограничиваться величиной, при которой не происходит размыва стенок скважины:

$$Q_{p\text{max}} = S_{\text{от СКВ}} \cdot V_{\text{кпmax}}, \quad (48)$$

где $S_{\text{от СКВ}}$ – площадь сечения затрубного пространства между бурильными трубами и стенками скважины;

$V_{\text{кпmax}}$ – максимально допустимая скорость течения жидкости в кольцевом пространстве для предупреждения смыывания глинистой корки, по рекомендациям [21, 58, 60, 98] принимается равной 1,5 м/с.

В случае бурения скважины в устойчивых горных породах с отсутствием интервалов, склонных к осыпям, обвалам и поглощениям промывочной жидкости необходимо использовать методику расчета процессов шароструйного бурения в усталостном режиме разрушения горных пород (гл. 4.3).

9. По техническим характеристикам бурового насоса или группы буровых насосов (при условии их параллельной установки) выбирается расход Q_p , величина которого должна быть меньше величины максимально возможного расхода $Q_{p\text{max}}$.

10. Величина необходимой средней скорости бурового раствора в камере смешения определяется по формуле:

$$V_{\text{КС}} = V_{\text{ОПТ}}/\varepsilon, \quad (49)$$

где ε – отношение скорости шаров к скорости жидкости в камере смешения, принимается равным 0,7.

11. Определяется требуемый коэффициент эжекции:

$$n = \frac{S_{\text{КС}} \cdot V_{\text{БС}}}{Q_{\text{Р}}} - 1. \quad (50)$$

12. Проверяется возможность подъема шаров в зазоре между долотом и стенками скважины, т.е. сравнивается скорость жидкости при ее течении между буровым снарядом и стенками скважины со скоростью падения шаров при переходном и турбулентном режимах обтекания шаров, рассчитанной по формуле Риттенгера [19]:

$$V_{\text{КП}} = \frac{Q_{\text{С}}}{S_{\text{СКВ БС}}} = \frac{4 \cdot (1+n) \cdot Q_{\text{Р}}}{\pi \cdot (D_{\text{СКВ}}^2 - d_{\text{БС}}^2)} \geq 5,11 \cdot \sqrt{\frac{d_{\text{Ш}} \cdot (\rho_{\text{Ш}} - \rho_{\text{БР}})}{\rho_{\text{БР}}}}. \quad (51)$$

13. По графику зависимости коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения (рис. 57), полученного американскими специалистами [113] при неизменном диаметре камеры смешения, определяется требуемое отношение $S_{\text{С}}/S_{\text{КС}}$.

Следует отметить, что значения коэффициента эжекции, равные $2 \div 4$, являются наиболее приемлемыми. В случае превышения коэффициента эжекции ухудшаются условия выноса шлама, в результате чего уменьшается КПД струйного аппарата и затрачивается дополнительная энергия на его измельчение.



Рис. 57. Зависимость коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения [113]

14. Определяется площадь выходного сечения сопла и диаметр:

$$S_c = \left[\frac{S_c}{S_{kc}} \right] \cdot S_{kc}. \quad (52)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kc} \cdot \left[\frac{S_c}{S_{kc}} \right]}{\pi}}. \quad (53)$$

15. Перепад давлений в сопле (в Па) вычисляется по формуле:

$$\Delta P_c = \frac{Q_p^2 \cdot \rho_{бр}}{\mu^2 \cdot 2 \cdot S_c^2}, \quad (54)$$

где μ – коэффициент расхода сопла, для коноидальных сопел равный 0,985, для конических сходящихся – 0,946 [60].

Согласно [21, 58, 60, 98] рассчитанный перепад давления в сопле должен быть не более 13 МПа для предупреждения интенсивного износа сопла при течении через него бурового раствора.

16. Рассчитываются потери давления в циркуляционной системе $\Sigma(\Delta P_i)$:

$$\Sigma(\Delta P_i) = \Delta P_T + \Delta P_{кп} + \Delta P_з, \quad (55)$$

где ΔP_T – потери давления в бурильной колонне, $\Delta P_{кп}$ – потери давления в затрубном пространстве, $\Delta P_з$ – потери давления в зазоре между замками и стенками скважины.

Следует отметить, что при определении потерь давлений не учитывались потери давления в следующих элементах циркуляционной системы: стояке, буровом рукаве, вертлюге, ведущей трубе и задерживающем устройстве.

Для определения ΔP_T и $\Delta P_{КП}$ необходимо вычислить критические числа Рейнольдса $Re_{кр}$, действительные числа Рейнольдса Re в трубах и кольцевом пространстве [21, 58, 60, 98].

Критические числа Рейнольдса определяются по формуле:

$$Re_{кр} = 2100 + 7,3 \cdot He^{0,58}, \quad (56)$$

где He – число Хедстрема, определяемое для труб и затрубного пространства соответственно по формулам:

$$He_T = \frac{\rho_{бр} \cdot d_B^2 \cdot \tau_0}{\eta^2}, \quad (57)$$

$$He_{КП} = \frac{\rho_{бр} \cdot (D_{СКВ} - d_H)^2 \cdot \tau_0}{\eta^2}. \quad (58)$$

Вычисляются действительные значения чисел Рейнольдса в трубах и затрубном пространстве по формулам:

$$Re_T = \frac{4 \cdot \rho_{бр} \cdot Q}{\pi \cdot d_B \cdot \eta}, \quad (59)$$

$$Re_{КП} = \frac{4 \cdot \rho_{бр} \cdot Q}{\pi \cdot (D_{СКВ} + d_H) \cdot \eta}. \quad (60)$$

Если $Re < Re_{кр}$, то движение жидкости происходит при ламинарном режиме, если $Re > Re_{кр}$ – при турбулентном.

Потери давления в трубах и кольцевом пространстве при ламинарном движении бурового раствора рассчитываются по формулам [21, 58, 60, 98]:

$$\Delta P_T = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot L_{СКВ}^{max}}{\beta \cdot d_B}, \quad (61)$$

$$\Delta P_{КП} = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot L_{СКВ}^{max}}{\beta \cdot (D_{СКВ} - d_H)}, \quad (62)$$

где β – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\beta = 1 - \frac{4}{Se} \cdot \sqrt{1,2 + 0,5 \cdot Se - 1}, \quad (63)$$

где Se – число Сен-Венана, рассчитываемое для труб и затрубного пространства соответственно по формулам:

$$S_{\text{кп}} = \frac{\pi \cdot \tau_0 \cdot d_{\text{в}}^3}{4 \cdot \eta \cdot Q}. \quad (64)$$

$$S_{\text{кп}} = \frac{\pi \cdot \tau_0 \cdot (D_{\text{скв}} - d_{\text{н}})^2 \cdot (D_{\text{скв}} + d_{\text{н}})}{4 \cdot \eta \cdot Q}. \quad (65)$$

Потери давления в трубах и кольцевом пространстве (в Па) при турбулентном движении бурового раствора рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха [21, 58, 60, 98]:

$$\Delta P_{\text{т}} = \lambda_{\text{т}} \cdot \frac{8 \cdot \rho_{\text{бр}} \cdot Q^2 \cdot L_{\text{скв}}^{\text{max}}}{\pi^2 \cdot d_{\text{в}}^5}, \quad (66)$$

$$\Delta P_{\text{кп}} = \lambda_{\text{кп}} \cdot \frac{8 \cdot \rho_{\text{бр}} \cdot Q^2 \cdot L_{\text{скв}}^{\text{max}}}{\pi^2 \cdot (D_{\text{скв}} - d_{\text{н}})^3 \cdot (D_{\text{скв}} + d_{\text{н}})^2}, \quad (67)$$

где $\lambda_{\text{т}}$, $\lambda_{\text{кп}}$ – коэффициенты гидравлического сопротивления в трубах и кольцевом пространстве, принимаются равными 0,02 и 0,035 соответственно.

Потери давления в зазоре между замками и стенками скважины (в Па) вычисляются по формуле [21, 60, 98]:

$$\Delta P_{\text{з}} = \frac{L_{\text{скв}}^{\text{max}}}{l_{1\text{т}}} \cdot \left(\frac{D_{\text{скв}}^2 - d_{\text{н}}^2}{D_{\text{скв}}^2 - d_{\text{з}}^2} - 1 \right)^2 \cdot \rho_{\text{бр}} \cdot V_{\text{кп}}, \quad (68)$$

где $V_{\text{кп}}$ – скорость движения бурового раствора в затрубном пространстве в области бурильных труб, рассчитываемая по формуле:

$$V_{\text{кп}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{р}}}{\pi \cdot (D_{\text{скв}}^2 - d_{\text{н}}^2)}. \quad (69)$$

17. Исходя из величин $Q_{\text{р}}$, $\Delta P_{\text{с}}$, $\Sigma(\Delta P_i)$, выбирается буровой насос или группа насосов (при условии их параллельной установки). При этом необходимо руководствоваться следующими условиями:

$$Q_{\text{н}} \geq Q_{\text{р}}, \quad (70)$$

$$k \cdot P_{\text{н}} > \Sigma(\Delta P_i) + \Delta P_{\text{с}}, \quad (71)$$

где $Q_{\text{н}}$ и $P_{\text{н}}$ – расход и развиваемое давление одного или нескольких буровых насосов; k – коэффициент, учитывающий то, что рабочее давление нагнетания бурового насоса должно быть, согласно правилам ведения буровых работ, меньше паспортного на 20–30 %, $k=0,7-0,8$.

4.3. Расчет процессов шароструйного бурения в усталостном режиме разрушения горных пород

Методику расчета в усталостном режиме разрушения горных пород необходимо использовать в следующих случаях:

- при невозможности бурения твердых горных пород в оптимальном режиме в связи с высокими требованиями к характеристикам бурового насоса;
- в случае бурения скважины в устойчивых горных породах с отсутствием интервалов, склонных к осыпям, обвалам и поглощениям промывочной жидкости;
- в случае отсутствия геологической изученности района ведения буровых работ.

Расчет при этом необходимо производить исходя из условия обеспечения максимально возможной скорости вылета шаров из бурового снаряда с оптимальными геометрическими параметрами.

Исходные данные:

1. параметры скважины: диаметр $D_{скв}$ (м), максимальная глубина бурения $L_{скв}^{max}$ (м);
2. свойства бурового раствора: плотность $\rho_{бр}$ (кг/м³), динамическое напряжение сдвига τ_0 (Па), динамическая вязкость η (Па·с);
3. геометрические параметры колонны бурильных труб: наружный d_n (м) и внутренний d_s (м) диаметры бурильных труб, наружный диаметр замкового соединения d_z (м), средняя длина бурильных труб l_{IT} (м);
4. плотность породоразрушающих шаров $\rho_{ш}$ (кг/м³);
5. характеристики бурового насоса: производительность Q_n (м³/с), максимальное давление P_n (Па) при разных значениях диаметра и частоты ходов втулок.

Расчет необходимо производить в следующей последовательности:

1. По формулам (39–46) вычисляются геометрические параметры шароструйно-эжекторных буровых снарядов, а также диаметр и оптимальная масса порции шаров.

2. По формуле (48) находится максимально возможный расход бурового раствора.

3. По известной производительности насоса или группы насосов (при условии их параллельной установки) корректируется расход бурового раствора.

4. По формулам (55–69) рассчитываются потери давления в циркуляционной системе.

5. По формуле (54) вычисляется перепад давления в сопле. Полученное значение сравнивается с критическим.

6. По формулам (52), (53) рассчитываются площадь сопла и его диаметр.

7. По данным, представленным на рис. 56, по значению отношений площади сопла к площади камеры смешения выбирается коэффициент эжекции.

8. По формулам (49) и (50) вычисляется скорость жидкости в камере смешения и скорость движения шаров.

9. Расчеты повторяются для других значений диаметра и частоты ходов поршня. Выбираются оптимальные режимы работы бурового насоса (насоса), обеспечивающие наибольшую скорость движения шаров.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Разработанная физическая модель гидродинамических процессов шароструйного бурения позволила:

- вывести формулы для определения расхода и скорости движения шаров в затрубном пространстве и буровом снаряде;
- выявить условия для предупреждения заклинивания шаров под задерживающим устройством бурового снаряда;

- для буровых снарядов исследуемой конструкции вывести формулу для расчета оптимальной массы технологической порции шаров.

2. Предложенная методика инженерного расчета шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород позволяет выбирать необходимое насосное оборудование и режимы его работы.

3. Разработанная методика инженерного расчета шароструйного бурения в усталостном режиме разрушения горных пород позволяет исходя из имеющейся на буровой установке насосной техники выбирать наиболее эффективные режимы ее работы.

4. В предложенных методиках расчета шароструйного бурения необходимо учитывать следующие ограничения:

- при бурении скважин, верхний разрез которых представлен интервалами, склонными к осыпям, обвалам и поглощениям промывочной жидкости, расход промывочной жидкости определяется максимальной скоростью ее течения в затрубном пространстве, равной 1,5 м/с;

- для улучшения условий выноса шлама следует проектировать буровые снаряды с коэффициентом эжекции, равным $2 \div 4$;

- рассчитанный перепад давления в сопле должен быть не более 13 МПа для предупреждения интенсивного износа сопла при течении через него бурового раствора.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ

5.1. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд

Разработка шароструйно-эжекторного бурового снаряда для бурения в производственных условиях проводилась на основе результатов экспериментальных исследований, представленных в гл. 3 настоящей работы. При этом необходимо было обеспечить его достаточную прочность и жесткость, а также надежность резьбовых соединений.

Процесс бурения сопровождается постоянным износом деталей шароструйного снаряда, которые взаимодействуют с породоразрушающими шарами, шламом и промывочной жидкостью. При этом интенсивный износ первичного сопла возможен вследствие абразивного воздействия бурового раствора; износ технологических окон и камеры смещения – за счет взаимодействия с шарами и шламом, кавитационной эрозии; выходного торца диффузора – вследствие ударов отскочивших от забоя скважины шаров. В связи с этим необходимо было разработать мероприятия по уменьшению износа, а также предусмотреть возможность оперативной смены основных элементов снаряда при его подъеме из скважины.

Разработанная конструкция представлена на рис. 58. Он состоит из пяти сменных частей: переводник 1, сопло 2, задерживающее устройство 3, камера всасывания 4 и диффузор 5.

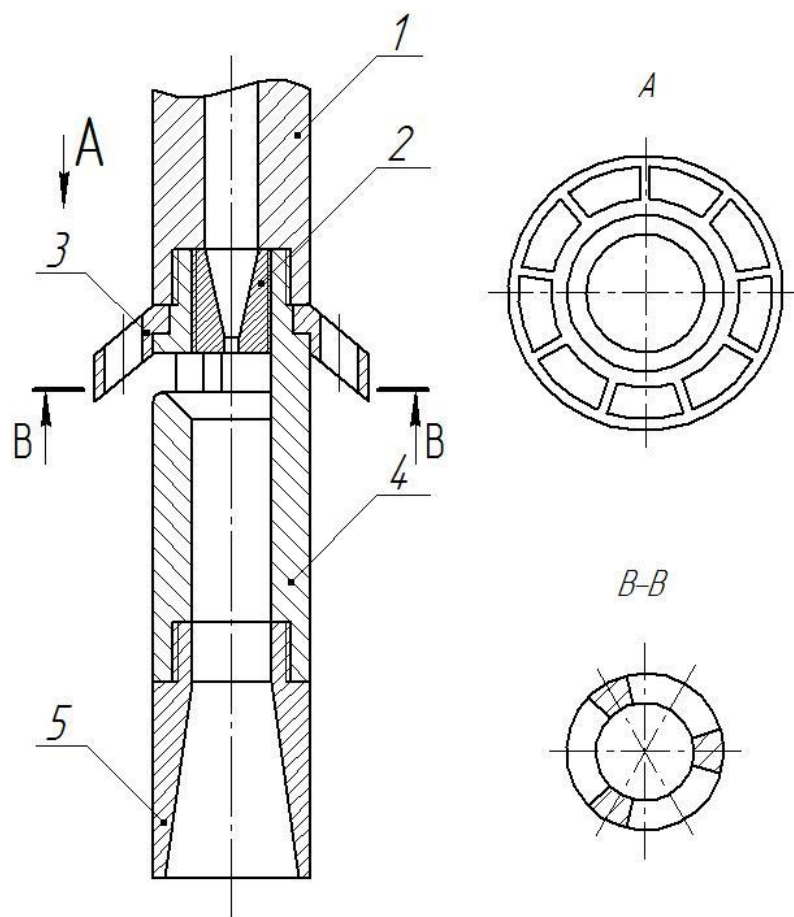


Рис. 58. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд для бурения в производственных условиях:
1 – переводник, 2 – сопло, 3 – задерживающее устройство, 4 – камера всасывания, 5 – диффузор

5.2. Технологическая схема шароструйного бурения с расхаживанием бурового снаряда

Для бурения скважин шароструйно-эжекторными буровыми снарядами исследуемой конструкции углубку скважины необходимо осуществлять с использованием метода расхаживания. Данный метод при бурении снарядами с рекомендованными соотношениями геометрических параметров позволяет поддерживать диаметр и требуемое расстояние между долотом и забоем. При этом важнейшим параметром режима бурения является периодичность расхаживания, значение которой не следует завышать.

Компоновка низа бурильной колонны для шароструйного бурения с расхаживанием бурового снаряда представлена на рис. 59.

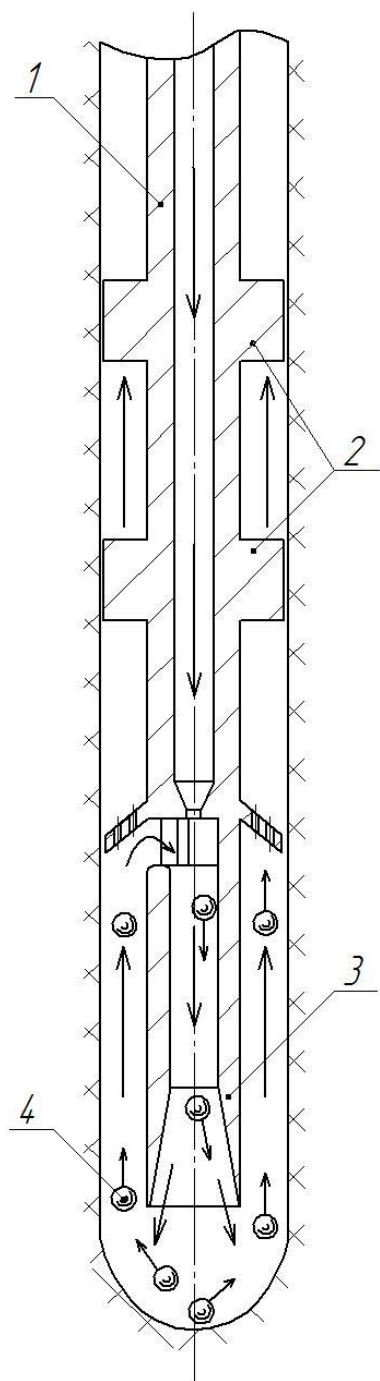


Рис. 59. Компоновка низа бурильной колонны для шароструйного бурения с расхаживанием бурового снаряда:

- 1 – колонна бурильных труб; 2 – центраторы;
- 3 – буровой снаряд;
- 4 – породоразрушающие шары

Недостатками данной технологической схемы является сложность управления за процессом шароструйного бурения на больших глубинах.

Основываясь на результатах экспериментальных исследований, приведенных в гл. 3, можно сделать вывод, что контроль процесса углубки скважины при шароструйном бурении можно осуществить с помощью датчика расхода шаров в камере смешения, установленного в корпусе бурового снаряда.

С помощью датчика расхода шаров возможно:

- поддерживать минимально допустимое расстояние между долотом и забоем. При бурении без опускания в течение определенного времени увеличивается расстояние между долотом и забоем, в результате чего, как показали результаты высокоскоростной съемки, уменьшается расход шаров в буровом снаряде. Последнее является сигналом для опускания бурового снаряда. Чрезмерное опускание приведет к тому, что шары не смогут выйти из области между буровым снарядом и забоем скважины. В этом случае необходимо приподнять буровой снаряд до восстановления циркуляции шаров;

- регулировать диаметр скважины. При зазоре между стенками скважины и буровым снарядом, равном $1,1 \div 1,2$ от диаметра шаров,

наличие циркуляции шаров позволяет гарантированно обеспечивать разработку скважины до требуемого диаметра;

- фиксировать заклинку шаров и аварийные ситуации. Датчик расхода шаров покажет момент заклинивания шаров под задерживающим устройством. В свою очередь это позволит устранить заклинивание (приподнять буровой снаряд, придать ему вращение). Также по датчику расхода шаров можно отследить аварийные ситуации, например, разрушение ребер между технологическими окнами, повреждения задерживающего устройства или чрезмерный износ диффузора;

- оценивать износ шаров. При постоянстве прочих условий уменьшение расхода шаров свидетельствует об их подъеме выше задерживающего устройства, что говорит о необходимости замены изношенных шаров новыми;

- производить мониторинг качества очистки забоя скважины от породоразрушающих шаров в конце рейса.

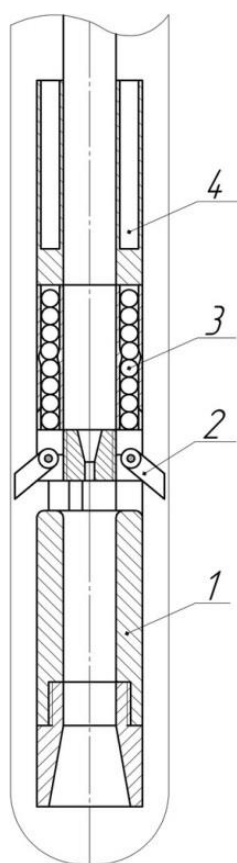
На наш взгляд, современный уровень развития датчиков и каналов связи позволяет это реализовать.

5.3. Технологическая схема шароструйного бурения с улавливающе-подпитывающим устройством

Проблему износа шаров можно решить использованием шаров из твердосплавных материалов, обладающих высокой износостойкостью. Однако высокая стоимость и дефицитность твердосплавных шаров ограничивает возможность их применения. Важным моментом в уменьшении износа породоразрушающих элементов является оптимизация движения шаров в призабойной части скважины [4]. Однако процесс износа шаров во время бурения неизбежен, поэтому их периодическая замена (или подпитка) является необходимой.

Как указывалось в гл. 1.2.2, высокая трудоемкость, низкая надежность и значительные потери времени на спуско-подъемные операции при выполнении операций по замене изношенных шаров новыми требуют разработки технических средств, обеспечивающих повышение рейсовой скорости бурения. Так, представляется возможной разработка устройства, способного наряду с заменой изношенных шаров новыми спускать шары на забой и поднимать их с забоя скважины вместе с буровым снарядом. Исходя

из целевого назначения предлагаемого устройства, назовем его улавливающе-подпитывающим.



Разработанная нами схема компоновки низа бурильной колонны с улавливающе-подпитывающим устройством (УПУ) представлена на рис. 60. При этом УПУ состоит из складывающегося задерживающего устройства 2 лепесткового типа, забойных шаропитателя 3 и шароуловителя 4.

Принцип работы УПУ заключается в выполнении следующей последовательности технологических операций:

1. спуск представленной компоновки низа бурильной колонны до забоя скважины (при этом задерживающее устройство находится в транспортном положении);

2. воздействие на забойный шаропитатель с целью подачи на забой первой порции шаров;

3. воздействие на задерживающее устройство (ЗУ), перевод его в рабочее положение;

4. процесс бурения до появления признаков чрезмерного износа шаров;

5. воздействие на ЗУ, перевод его в транспортное положение (при этом лепестки ЗУ

Рис. 60. Схема компоновки низа бурильной колонны с улавливающе-подпитывающим устройством:
1 – буровой снаряд;
2 – задерживающее устройство;
3 – забойный шаропитатель;
4 – забойный шароуловитель

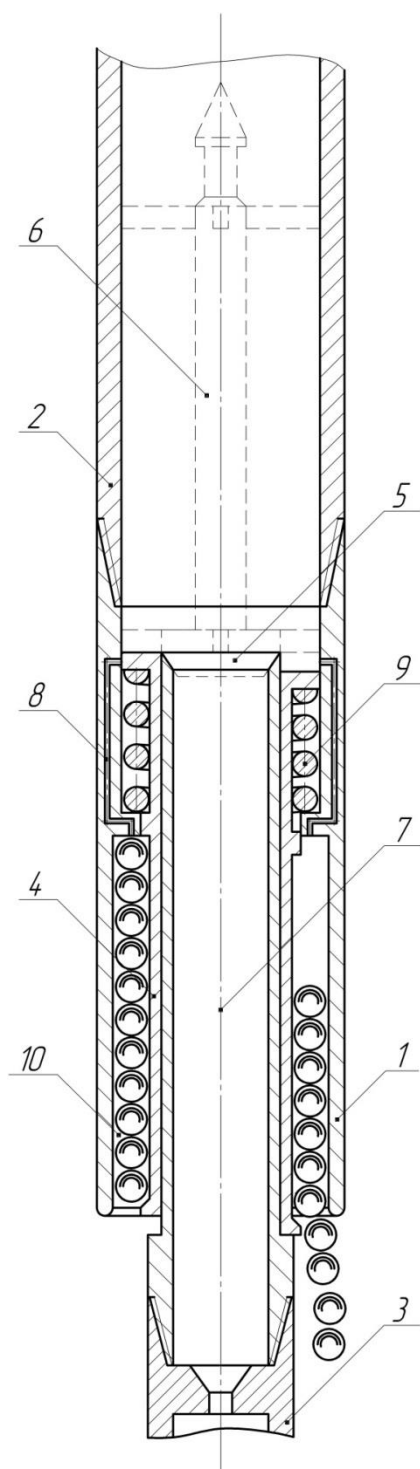


Рис. 61. Забойный шаропитатель:

- 1 – корпус; 2 – колонна бурильных труб; 3 – ШЭБС; 4 – подвижный элемент; 5 – седло; 6 – запорный клапан; 7 – центральный канал; 8 – перепускной канал; 9 – пружина; 10 – отсек для размещения шаров

перекрывают технологические окна бурового снаряда);

6. включение бурового насоса, подъем шаров до забойного шароуловителя, их улавливание;

7. воздействие на забойный шаропитатель, приводящее к высыпанию второй порции шаров на забой;

8. воздействие на ЗУ, перевод его в рабочее положение;

9. включение насоса, возобновление процесса бурения.

На первом этапе конструкторских работ разрабатывалась конструкция забойного шаропитателя. Нами разработан забойный шаропитатель, представленный на рис. 61.

Предложенный забойный шаропитатель состоит из корпуса 1, соединенного в верхней части с колонной бурильных труб 2 и в нижней части с буровым снарядом 3, и подвижного элемента 4, имеющего на верхнем торце седло 5 для герметизированной посадки запорного клапана 6. В корпусе 1 имеется центральный 7 и перепускной канал 8. Между корпусом 1 и подвижным элементом 4 располагается пружина 9 и отсек для размещения шаров 10.

Принцип работы шаропитателя заключается в следующем. Перед спуском шаропитателя в скважину в отсек для

размещения шаров 10 засыпаются шары. В процессе бурения через центральный канал 7 корпуса прокачивают буровой раствор. Подвижный элемент 4 удерживается в крайнем верхнем положении пружиной 9. Для осуществления подпитки шаров без остановки циркуляции бурового раствора с устья скважины в колонну бурильных труб 2 сбрасывают запорный клапан 6, который садится в седло 5 и перекрывает центральный канал 7. За счет роста давления бурового раствора на седло 5 пружина 9 будет сжиматься и подвижный элемент 4 переместится в крайнее нижнее положение, открыв перепускной канал 8. Благодаря воздействию сил гравитации и давления бурового раствора, подводимого через перепускной канал 8, шары высыпаются из отсека для их размещения 10 в затрубное пространство. После высыпания шаров останавливается циркуляция бурового раствора, при этом подвижный элемент 4 возвращается в исходное положение. Запорный клапан 6 извлекается из колонны бурильных труб 2 при помощи овершота, спускаемого на талевом канате. Далее включается буровой насос, процесс бурения возобновляется.

К числу дальнейших конструкторских работ следует отнести:

- разработка устройства и способа приведения задерживающего устройства в рабочее и транспортное положение;
- разработка конструкций забойных шаропитателей, обеспечивающих порционную подачу шаров на забой скважины;
- создание эффективных конструкций забойных шароуловителей;
- поиск альтернативных способов воздействия на элементы УПУ.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Разработана конструкция шароструйно-эжекторного бурового снаряда для бурения в полевых условиях с возможностью оперативной смены наиболее изнашиваемых элементов.

2. Разработана компоновка низа бурильной колонны для шароструйного бурения с расхаживанием бурового снаряда.

3. Показана перспективность разработки датчика расхода шаров, установленного в корпусе камеры смещения бурового снаряда, для контроля процессов шароструйного бурения.

4. Доказана необходимость включения в состав бурового снаряда улавливающе-подпитывающего устройства для повышения рейсовой скорости бурения.

5. Разработана конструкция забойного шаропитателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов шароструйного бурения с использованием современных методических средств и программного компьютерного сопровождения. На основании большого объема выполненных экспериментальных исследований разработаны технические средства, методика инженерного расчета процессов шароструйного бурения, что является существенным вкладом в решение задачи повышения его эффективности. Основные выводы, научные и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

- при бурении скважин в твердых и крепких горных породах наиболее перспективным является гидромониторно-ударный способ, реализуемый с помощью шароструйно-эжекторных буровых снарядов;
- обоснована конструкция ШЭБС для эффективного бурения в твердых и крепких горных породах;
- разработан оригинальный лабораторный стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения;
- на основании проведенных экспериментальных исследований разработаны рекомендации к проектированию оптимальных геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов, обеспечивающие разработку скважины до требуемого диаметра при минимальном расстоянии между долотом и забоем, высокие значения расхода и скорости движения шаров в буровом снаряде;
- впервые проведенная для исследований шароструйного способа бурения скважин высокоскоростная съемка позволила разработать физическую модель шароструйного способа бурения скважин;
- разработаны мероприятия для обеспечения эффективного выноса шлама из призабойной зоны скважины;

- исследована причина заклинивания шаров под задерживающим устройством, предложены способы для его предупреждения и ликвидации;
- разработана формула расчета оптимальной массы технологической порции шаров для бурения снарядами исследуемой конструкции;
- предложены для практического применения методики инженерного расчета шароструйного бурения в оптимальном и усталостном режимах разрушения горных пород, которые позволяют выбирать необходимое насосное оборудование и оптимальные режимы его работы;
- разработана конструкция шароструйно-эжекторного бурового снаряда для бурения в производственных условиях с возможностью оперативной смены наиболее изнашиваемых элементов;
- разработана технологическая схема шароструйного бурения с расхаживанием бурового снаряда;
- показана перспективность разработки датчика расхода шаров, установленного в корпусе камеры смещения бурового снаряда, для контроля процесса шароструйного бурения;
- доказана необходимость включения улавливающе-подпитывающего устройства для повышения рейсовой скорости бурения;
- разработана конструкция забойного шаропитателя.

Данная работа, как и всякая из числа подобных исследований, не лишена недостатков и упущений, и безусловно не претендует на исчерпывающее освещение вопросов, связанных с шароструйным способом бурения скважин. В целях дальнейшего повышения эффективности шароструйного бурения и внедрения его в практику буровых работ необходимо продолжить исследовательские и опытно-конструкторские работы в следующих направлениях:

1. продолжить исследования механизма и энергоемкости разрушения горных пород ударами шаров, максимально приближая условия проведения экспериментов к реальным;
2. детально изучить энергетический вопрос с целью установления коэффициента полезного действия шароструйного бурения;
3. исследовать влияние различных типов промывочных жидкостей, в том числе добавок понизителей твердости, на эффективность шароструйного бурения;
4. разработать математическую модель процессов шароструйного бурения скважин, позволяющую рассчитывать ожидаемую механическую скорость бурения в различных геолого-технических условиях;
5. разработать мероприятия по повышению износостойкости ШЭБС;
6. разработать и испытать способы контроля над процессами шароструйного бурения скважин (в частности, счетчика расхода шаров);
7. разработать конструкцию улавливающе-подпитывающего устройства для снижения затрат времени на спуско-подъемные операции по замене изношенных шаров новыми;
8. выполнить исследования и опытно-конструкторские работы по решению проблемы наклонно-направленного бурения скважин с помощью ШЭБС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивное гидромониторное бурение // Экспресс-информ., Сер. Нефтяная и газодобывающая промышленность. – М.: ВИНТИ, 1972. – №13. – С. 10–24.
2. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография / А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2013. – 110 с.
3. Агапов Е.Г. Обработка экспериментальных данных в MS Excel: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов дневной формы обучения / Под ред. Е.Г. Агапова, Е.А. Битехтина. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. – 32 с.
4. Алиев Ф. Р. Исследование износа шароструйно-эжекторного долота, разработка способов его предупреждений // Творчество юных – шаг в успешное будущее: Материалы VII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина. – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 316–320.
5. Арбит В. С. Исследование и разработка методики расчета эжекторных буровых устройств с целью создания эффективных технических средств для бурения и освоения скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1974. – 204 с.
6. А.с. № 1002498, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд / М.М. Майлибаев – № 3278854/22-03; Заявлено 24.04.1981; Опубл. 07.03.1983.
7. А.с. № 1032837, Е 21 В 7/18, Е 21 В 7/14. Устройство для термомеханического бурения скважин / О.Л. Дербенева, А.В. Дугарцыренов, О.Р. Ларин, И.В. Чугунов – № 3373919/22-03; Заявлено 29.12.1981; Опубл. 15.08.1986.
8. А.с. № 1120733, Е 21 В 7/18. Устройство для шароструйного бурения скважин / А.В. Дугарцыренов, О.Р. Ларин, Е.А. Потехин, Л.С.

Дербенев, А.А. Боголюбов, Г.Г. Каркашадзе, И.В. Чугунов – № 3597561; Заявлено 31.05.1983; Оpubл. 15.08.1986.

9. А.с. № 188407, Е 21 С 21/00. Способ термодинамического разрушения горных пород / В.Е. Горяев – № 1021728/22-3; Заявлено 30.07.1965; Оpubл. 28.11.1966.

10. А.с. № 417599, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин / А.Б. Уваков, В.В. Штрассер – № 1451266; Заявлено 15.06.1970; Оpubл. 28.02.1974.

11. А.с. № 685825, Е 21 С 37/16, Е21 С 21/00, Е 21 В 7/18. Способ термомеханического бурения скважин / Г.А. Янченко, И.В. Чугунов, Я.И. Шнапир, Г.Г. Каркашадзе, А.А. Капустин, О.Л. Дербенева, В.Е. Горяев, Г.К. Герасимов, А.А. Боголюбов, Л.С. Дербенев – № 2623146/22-03; Заявлено 02.06.1978; Оpubл. 15.09.1979.

12. А.с. № 870705, Е 21 С 37/16, Е 21 С 21/00, Е 21 В 7/18. Способ эрозионного бурения скважин и устройство для его осуществления / Л.С. Дербенев, А.А. Боголюбов, А.А. Капустин, Г.Г. Каркашадзе, Г.А. Янченко – № 2798122/22-03; Заявлено 18.07.1979; Оpubл. 07.10.1981.

13. А.с. № 939710, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин / Коротков В.П. – № 3009898; Заявлено 02.12.80; Оpubл. 30.06.82.

14. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.

15. Бинхгем М.Г. Новое в буримости горных пород. – М.: Недра, 1965. – 56 с.

16. Бинхгем М.Г. Проблема буримости горных пород. // Сер. Бурение. – М.: ВНИИОЭНГ, 1968. – 67 с.

17. Бояршинова А.К. Теория инженерного эксперимента: текст лекций / А.К. Бояршинова, А.С. Фишер. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 85 с.

18. Влияние типа породы на эффективность гидромониторного бурения // Экспресс-информ., Сер. Бурение. – М.: ВНИИОЭНГ, 1977. – №6. – С. 3–6.
19. Воздвиженский Б.И. Буровая механика / Б.И. Воздвиженский, М.Г. Васильев. – издание 3-е испр. и доп. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 493 с.
20. Вяткин С.С. Современное состояние и проблемы развития физических способов бурения. // Материалы XI Всеукраинской научно-технической конференции студентов. Серия: «Бурение». – 2011. – С. 20–22.
21. Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Никитин Б.А. Инженерные расчеты при бурении глубоких скважин. – М.: Недра, 2000. – 429 с.
22. Давиденко А.Н. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография / А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов; М-во образования и науки Украины, Нац. Горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2013. – 110 с.
23. Давиденко А.Н., Игнатов А.А., Вяткин С.С. Некоторые вопросы гидромеханического способа бурения // Наук. праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. – 2011. – № 14(181) – С. 75–78.
24. Динник А.Н. Избранные труды. – К.: Изд-во АН УССР, 1956. – Т. 3. – 308 с.
25. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.
26. Игнатов А.А., Вяткин С.С. Особенности конструкции и механики работы нового гидродинамического снаряда // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2011. – Вып. 14. – С. 58–61.
27. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

28. Иоанесян Ю.Р. Новое в проблеме буримости породы. – М.: Недра, 1967. – 54 с.

29. Исаев Е.Д. Исследование процессов шароструйного бурения с помощью высокоскоростной видеосъемки // Труды XVIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 401–405.

30. Исаев Е.Д., Ковалев А.В., Алиев Ф.Р. Экспериментальные исследования технологических параметров режима шароструйного бурения // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин», посвященной 60-летию кафедры бурения скважин. – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 68–83.

31. Исследование струйного бурения в твердых породах // Экспресс-информ., Сер. Техника и технология буровых и горноразведочных работ. – М.: ВИНТИ, 1977. – №29. – С. 1–15.

32. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. – М.: Стройиздат, 1970. – 415 с.

33. Квеско Н.Г. Методы и средства исследований: учебное пособие / Н.Г. Квеско, П.С. Чубик; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 112 с.

34. Кирилловский Ю.Л., Подвидз Л.Г. Рабочий процесс и основы расчета струйных насосов // Исследования гидромашин. – М.: ВНИИГидромаш, 1960. – Вып. 26. – С. 96–135.

35. Ковалев А.В., Алиев Ф.Р., Горбенко В.М., Якушев Д.А. Лабораторный стенд для исследования процессов абразивного разрушения горных пород // Труды XVII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2013. – С. 263–266.

36. Ковалев А.В., Алиев Ф.Р., Якушев Д.А. История развития шароструйного бурения // Труды XVII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2013 – С. 266–268.

37. Ковалев А.В., Исаев Е.Д., Алиев Ф.Р., Яцкив А.А., Якушев Д.А. Методика проведения экспериментов на лабораторном стенде при исследовании технологических процессов шароструйного бурения // Труды XVIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 398–401.

38. Ковалев А.В., Исаев Е.Д. Обоснование требований к конструкции шароструйно-эжекторного снаряда для бурения скважин в интервалах твердых и крепких горных пород // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин», посвященной 60-летию кафедры бурения скважин. – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 60–68.

39. Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Алиев Ф.Р., Якушев Д.А., Горбенко В.М. Проблемы гидродинамических способов бурения скважин и основные направления для их решения. // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд. ТПУ, 2015. – Т. 326, №3. – С. 6–12.

40. Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Веревкин А.В., Исаев Е.Д., Алиев Ф.Р. Определение оптимальной массы технологической порции шаров при шароструйном бурении. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Изд-во «Горная книга», 2015. – №6. – С. 339–345.

41. Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Горбенко В.М., Исаев Е.Д., Алиев Ф.Р. Экспериментальные исследования влияния технологических параметров шароструйного бурения на диаметр скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Изд-во «Горная книга», 2015. – №6. – С. 346–352.

42. Ковалев А.В., Симон А.А., Яцкив А.А., Исаев Е.Д. Исследование влияния геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов на эффективность их работы // Труды XVIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 408–411.

43. Ковалев А.В. Установка гидромониторно-эрозионного бурения // Материалы XVI международной научно - практической конференции студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии». – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 334–336.

44. Ковалев А.В. Установка для абразивного бурения с применением долота гидромониторно-эжекторного типа // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин», посвященной 55-летию кафедры «Бурения скважин». – Томск: Изд. ТПУ, 2009. – С. 137–143.

45. Ковалев А.В., Якушев Д.А. Анализ технических средств для шароструйного бурения с целью выбора перспективных направлений для проведения опытно-конструкторских работ // Труды XVIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 412–414.

46. Ковалев А.В., Яцкив А.А., Исаев Е.Д. Исследование влияния технологических режимов на эффективность шароструйного бурения // Труды XVIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 405–408.

47. Кожевников А.А., Давиденко А.Н. Гидромеханический и эрозионный способы разрушения горных пород при бурении скважин: Обзорн. информ. // Техн. и технол. геол.-разв. работ, орг. пр-ва. – М.: ВИЭМС, 1987. – 45 с.

48. Козодой А.К., Босенко А.А. Влияние эрозионных свойств жидкости на разрушающую способность затопленных струй // Нефть и газ. – Баку, 1970. – №11. – С. 21–24.
49. Козодой А.К., Варламова Е.П. Количественная оценка силового воздействия гидромониторной струи на забой скважины // Совершенствование технологии проводки глубоких скважин в Нижнем Поволжье. – Волгоград, 1975. – Вып. 23. – С. 18–26.
50. Леджервуд Л.У. Обзор работ по созданию усовершенствованных способов бурения нефтяных скважин (перевод с англ.). – М.: ГОСИНТИ, 1961. – 258 с.
51. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
52. Маккрей А.У., Коле Ф.У. Технология бурения нефтяных скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 417 с.
53. Маковей Н. Гидравлика бурения. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
54. Максимов В.И. Новые способы бурения скважин – М.: ВИЭМС, 1971. – 55 с.
55. Медведев И.Ф., Пуляев А.И. Вращательно-ударное бурение шпуров и скважин. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 208 с.
56. Медведев И.Ф., Пуляев А.И. Результаты экспериментального исследования вращательно-ударного бурения скважин малого диаметра в крепких породах. // «Новое оборудование для бурения шпуров и скважин». – М.: Углетехиздат, 1961. – С. 35–45.
57. Мительман Б.И., Гусман А.М. Гидромеханическое и эрозионное бурение // Обзор зарубежной литературы, Сер. Бурение. – М.: ВНИИОЭНГ, 1971. – С. 3–75.
58. Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения. – М.: Недра, 1985. – 200 с.

59. Назаров В.И., Сидорова Т.К. Использование воздействия высоконапорных струй при строительстве скважин: Обзорн. информ. // Бурение. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – 56 с.
60. Осипов П.Ф. Гидроаэромеханика бурения и крепления скважин: Учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2003. – 204 с.
61. Остроушко И.А. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Госгеолиздат, 1952. – 254 с.
62. Павлова Н.П., Шрейнер Л.А. Механизм разрушения горных пород и некоторые вопросы проектирования долот для твердых, хрупких и пластично хрупких пород // Труды института нефти. – М.: изд-во АН СССР, 1958. – Т. 11. – С. 52–56.
63. Павлова Н.Н., Шрейнер Л.А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. – М.: Недра, 1964. – 159 с.
64. Патент 102707 № а201107407 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулеструминний пристрій для буріння свердловин / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.
65. Патент 102708 № а201107452 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулеструминний пристрій для буріння свердловин / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.
66. Патент 67845 № u201108906 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулькоструминний прилад / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 15.07.2011; Опубл. 12.03.2012; Бюл. № 5.
67. Патент 68322 № u201109643 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулькоструминний прилад / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 02.08.2011; Опубл. 26.03.2012; Бюл. № 6.
68. Патент 81067 № u201212574 Україна, МПК Е 21 В 7/00. Пристрій для буріння / А.О. Ігнатов. – Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.
69. Патент 81068 № u201212576 Україна, МПК Е 21 В 7/00. Пристрій для буріння / А.О. Ігнатов. – Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.

70. Патент РФ № 143090, Е 21 В 7/18. Стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения / А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков и др. – № 2014106459/03; Заявлено 20.02.2014; Оpubл. 10.07.2014.

71. Патент РФ № 2114274, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин / Т.Н. Зубкова – № 96123178/03; Заявлено 05.12.1996; Оpubл. 27.06.1998.

72. Патент РФ №2124620, Е 21 В 7/18. Устройство для шароструйного бурения скважин / Т.Н. Зубкова – № 97100372/03; Заявлено 14.01.1997; Оpubл. 10.01.1999.

73. Патент США № 2692116, кл. 255-61. Retractable pellet impact drill bit / Camp J.M. et al – Заявлено 23.04.1954; Оpubл. 19.10.1954.

74. Патент США № 2698736, кл. 255-61. Combination pellet impact drill and annulus cutting drill / Ledgerwood L.W. et al – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 04.01.1955.

75. Патент США № 2706104, кл. 255-61. Gravity-momentum recirculation pellet impact drilling bit / Ortloff J.E. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 12.04.1955.

76. Патент США № 2717761, кл. 255-18. Reverse circulation pellet impact drilling and coring apparatus / Ledgerwood L.W. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 13.09.1955.

77. Патент США № 2724574, кл. 175-28. Hydraulic standoff control for pellet impact drilling / Ledgerwood L.W. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 22.11.1955.

78. Патент США № 2724575, кл. 255-72. Pellet impact core drill / Deily F.H. – Заявлено 10.12.1952; Оpubл. 22.11.1955.

79. Патент США № 2727726, кл. 255-61. Shot drilling-pellet impact drill bit / Ramsey G.H. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 20.12.1955.

80. Патент США № 2727727, кл. 255-61. Combination of pellet impact drilling and rotary shot drilling / Williams P.S. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 20.12.1955.

81. Патент США № 2728557, кл. 255-61. Controlling off-bottom position of pellet impact drill / McNatt E.M. – Заявлено 15.07.1953; Оpubл. 27.12.1955.
82. Патент США № 2735654, кл. 255-61. Expanding type momentum pellet impact drilling apparatus / Hildbrandt A.B. – Заявлено 28.10.1952; Оpubл. 21.02.1956.
83. Патент США № 2743086, кл. 255-73. Pellet impact reaming apparatus / Roth M. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 24.04.1956.
84. Патент США № 2761651, кл. 255-61. Apparatus for cyclic pellet impact drilling / Ledgerwood L.W. – Заявлено 06.03.1952; Оpubл. 04.09.1956.
85. Патент США № 2771274, кл. 255-61. Recycle fluid control in pellet impact drilling / Hildebrandt A.B. – Заявлено 28.10.1953; Оpubл. 20.11.1956.
86. Патент США № 2779571, кл. 255-61. Pellet impact drill bit with controlled pellet return / Ortloff J.E. – Заявлено 09.04.1954; Оpubл. 29.01.1957.
87. Патент США № 2807442, кл. 255-61. Momentum pellet impact drilling apparatus / Ledgerwood L.W. – Заявлено 29.01.1952; Оpubл. 24.09.1957.
88. Патент США № 2841365, кл. 255-1.8. Pellet recycle control in pellet impact drilling / Ramsey G.H. et al – Заявлено 27.10.1953; Оpubл. 01.07.1958.
89. Патент США № 2868509, кл. 255-61. Pellet impact drilling apparatus / Williams P.S. – Заявлено 07.06.1956; Оpubл. 13.01.1959.
90. Патент США № 2885184, кл. 255-61. Retrievable reverse circulation pellet impact drill / Ortloff J.E. et al – Заявлено 29.12.1953; Оpubл. 05.05.1959.
91. Помазкова З.С. Расчет струйных насосов к установкам для нефтяных скважин. – М.: ГОСИНТИ, 1961. – 66 с.
92. Разрушение породы струями жидкости // Экспресс-информ., Сер. Техника и технология бурения. – М.: ВИНТИ, 1971. – №6. – С. 6–13.
93. Результаты лабораторных и промысловых исследований гидроабразивного способа бурения // Экспресс-информ., Сер. Техника и технология буровых и горноразведочных работ. – М.: ВИНТИ. – 1972. – №5. – С. 14–22.

94. Сазонов Р. П. Экспериментальное исследование водоструйных насосов с цилиндрической камерой смешения // Изв. ВТИ. – М.: Изд-во ВТИ, 1949. – № 11. – С. 13–17.
95. Сегель В.А. Эрозионное гидромониторное бурение // Бурение. – 1968. – №5. – С. 28–30.
96. Соболевский В.В. Исследование эффективности разрушения горной породы струями жидкости при проводке глубоких разведочных скважин в Западной Сибири: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: ВНИИБТ, 1987. – 157 с.
97. Соколов Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 350 с.
98. Спивак А.И. Технология бурения нефтяных и газовых скважин: учебник для вузов / А.Н. Попов [и др.]; под ред. А.И. Спивака. – М.: Недра, 2003. – 509 с.
99. Столяров Р.В., Ковалев А.В. Разработка гидромониторного долота эжекторного типа // Труды XII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – С. 518–520.
100. Струговец Е.Т., Бишиев А.Г., Коренько А.В. Влияние добавок твердой фазы в промывочную жидкость на эффективность разрушения пород высоконапорными струями // Тр. Гипротюменнефтегаз. – Тюмень, 1973. – Вып. 37. – С. 3–8.
101. Струговец Е.Т., Бишиев А.Г. Теоретические исследования эффективности гидромониторного разрушения от скорости течения струи // Тр. Гипротюменнефтегаз. – Тюмень, 1973. – Вып. 33. – С. 3–9.
102. Сулакшин С.С. Современные способы разрушения горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1964. – 106 с.
103. Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 367 с.

104. Темнев В.К. Основы теории жидкостных эжекторов. – Челябинск: изд-во Челяб. полит. ин-та, 1971. – 89 с.
105. Уваков А.Б. Исследование и разработка шароструйного способа бурения направленных геологоразведочных скважин: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Москва, 1965. – 120 с.
106. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
107. Уилли Д. Эрозионное бурение. – М.: ВНИИОЭНГ, 1971. – 24 с.
108. Фридман Б. Э. Гидроэлеваторы. – М.: Машгиз, 1960. – 323 с.
109. Цехмистренко А.М., Розин М.М. Гидроэрозионное бурение скважин // Обзор «Техника и технология геологоразведочных работ, организация производства». – М.: ВИЭМС, 1976. – С. 24–35.
110. Шрейнер Л.А., Павлова Н.Н. Экспериментальные данные по усталостному разрушению горных пород // Тр. института нефти. – М.: изд-во АН СССР, 1958. – Т. 11. – С. 46–52.
111. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.
112. Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.
113. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. – Dallas, 1956. – Vol. 207. – p. 15.
114. Kovalyov A.V. Designing the ejector pellet impact drill bit for hard and tough rock drilling [Электронный ресурс] / A.V. Kovalyov, S.Ya. Ryabchikov, Ye.D. Isaev, F.R. Aliev, M.V. Gorbenko, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Vol. 24. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012016>.
115. Kovalyov A.V. Pellet impact drilling operational parameters: experimental research [Электронный ресурс] / A.V. Kovalyov, S.Ya. Ryabchikov, Ye.D. Isaev, F.R. Aliev, M.V. Gorbenko, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Vol. 24. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012015>.

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор Томского филиала

ООО «Аверс-1»

К.А. Костарев

АКТ

внедрения методики расчета гидродинамических процессов при сооружении скважин в крепких горных породах шароструйным способом

Комиссия в составе директора Томского филиала ООО «Аверс-1» Костарева К.А. и инженера по бурению Подворчана С.А. рассмотрела НИР старшего преподавателя кафедры бурения скважин Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета Ковалева А.В. «Теоретические и экспериментальные исследования технологических процессов шароструйного бурения скважин», выполненную под руководством д.т.н. Рябчикова С.Я.

Разработанная методика расчета процессов шароструйного бурения, передана в Томский филиал ООО «Аверс-1» с целью изучения возможности её использования в условиях производства на стадии проектирования скважин проходимых в крепких горных породах при расчете оптимальных режимных параметров и выборе необходимого технологического оборудования.

Инженер по бурению ТФ ООО «Аверс-1»  / Подворчан С.А.

Приложение 2

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Томская
комплексная геологоразведочная экспедиция»

А.И. Суворов



АКТ

передачи технической документации на шароструйно-эжекторный буровой снаряд и методики его расчета с целью проведения дальнейших испытаний и опытно-конструкторских работ

Комиссия в составе:

1. директора Суворова А.И.
 2. главный инженер Юдин Е.Н.
- составили настоящий акт о нижеследующем.

Ковалевым А.В., старшим преподавателем кафедры бурения скважин Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета выполнена НИР на тему «Теоретические и экспериментальные исследования технологических процессов шароструйного бурения скважин» под руководством д.т.н. Рябчикова С.Я.

В рамках указанной НИР Ковалевым А.В. разработана конструкция шароструйно-эжекторного бурового снаряда для бурения скважин сплошным забоем в твердых горных породах, которая передана в ООО «ТКГЭ» для проведения дальнейших испытаний и опытно-конструкторских работ.

Главный инженер ООО «ТКГЭ»  / Юдин Е.Н.