

На правах рукописи



Ковалев Артем Владимирович

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

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре бурения скважин.

Научный руководитель:

Рябчиков Сергей Яковлевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Власюк Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, член исполкома президиума Российского геологического общества, ОАО «Тульское НИГП» (г. Тула), консультант

Неверов Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск), доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится 15 декабря 2015 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, дом 30 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
к.г.-м.н., доцент

Л.В. Жорняк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В мировой практике бурения скважин прослеживается тенденция к возрастанию объема бурения геологоразведочных, водозаборных, сейсмических, геотермальных и других скважин в твердых горных породах. Бурение в таких породах характеризуется низкой механической скоростью бурения и проходкой на долото. Повышение эффективности бурения в твердых 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 твердых горных породах остается недостаточно эффективным.

Поэтому актуальность приобретают разработки альтернативных способов разрушения твердых 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 возрасть 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 традиционном виде мало перспективен для бурения скважин в твердых горных породах.

Шароструйный способ бурения скважин, заключающийся в разрушении горных пород ударами шаров с высокой кинетической энергией, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне скважины, позволит решить ряд технических и технологических проблем, возникающих при реализации гидродинамического способа разрушения горных пород. Данный способ характеризуется рядом существенных достоинств: отсутствие необходимости в создании осевых нагрузок на долото и его вращении, значительная проходка на долото, высокая механическая скорость бурения.

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 другие.

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 ранее методики расчета оптимальных геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов и рациональных

технологических параметров режима бурения являются разрозненными и часто противоречивыми. Также следует отметить продолжающие оставаться 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 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 его эффективность.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ гидродинамических способов разрушения горных пород с целью выявления наиболее перспективного для бурения скважин в твердых горных породах;
- обзор и анализ ранее полученных результатов исследований шароструйного способа бурения скважин;
- обоснование принципиальной конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда, обеспечивающего высокую эффективность бурения в твердых 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 применялись 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 MS Excell, Statistika, Measure Dynamics. Основное содержание работы изложено в MS Word.

Личный вклад автора состоит в обзоре и анализе литературных источников по тематике шароструйного бурения; в обосновании конструкции бурового снаряда для бурения в твердых горных породах; в разработке лабораторного стенда и проведении экспериментальных исследований; в планировании экспериментов и обработке экспериментальных данных; в участии при разработке конструкций забойных шаропитателей.

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

1) доказана принципиальная возможность повышения эффективности шароструйного бурения в твердых 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 без дополнительных спуско-подъемных операций, 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 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;
- 2) теоретические и практические результаты выполненных исследований реализованы в полученном патенте на полезную модель РФ;
- 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 освоения 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 наименований; 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. П.Я. Крауиньш, к.т.н. М.В. Горбенко, к.т.н. А.В. Веревкину, доценту М.А. Самохвалову, инженеру Р.К. Алиеву, ведущему инженеру Нефтеюганского филиала ООО "РН-Бурение" Р.В. Столярову, а также студентам Ф.Р. Алиеву, Д.А. Якушеву, А.М. Яцкив, В.М. Горбенко, Е.Д. Исаеву за постоянную помощь при выполнении работы и обсуждении ее результатов.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ПОЛОЖЕНИЕ 1. В основе конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда должен лежать струйный аппарат с соплом, камерой смешения цилиндрической формы и 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.

Одним из перспективных направлений создания технических средств для повышения эффективности шароструйного бурения является разработка новых научно обоснованных конструкций шароструйно-эжекторных буровых снарядов (ШЭБС). В процессе исследований был выполнен значительный объем поисковых работ, а также проанализированы различные конструкции буровых снарядов данного типа, которые позволили выделить следующие проблемы:

1. Существенной 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.

Американские исследователи для проведения полевых испытаний использовали названный ими «гравитационно-инжекционный» буровой снаряд (рис. 1), т.к. ввод шаров в камеру смешения осуществлялся за счет сил тяжести и инъекции. В данной конструкции колонна бурильных труб (1), заканчивающаяся соплом (2), соединена с камерой смешения (3) посредством ребер (4). На забой скважины засыпается порция шаров (5), включается буровой насос. Рабочая жидкость, подводимая к аппарату, ускоряется в сопле (2) и на выходе из него истекает с большой скоростью в камеру смешения (3). При этом в пространстве между соплом (2) и камерой (3) 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 забой, осуществляя разрушение горной породы.

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 конструкции снаряда было предусмотрено использование специальных лап (7), контактирующих с забоем скважины для поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем.

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 возрастании расхода жидкости – выше, что приведет к снижению расхода шаров в камере смешения и уменьшению эффективности бурения.

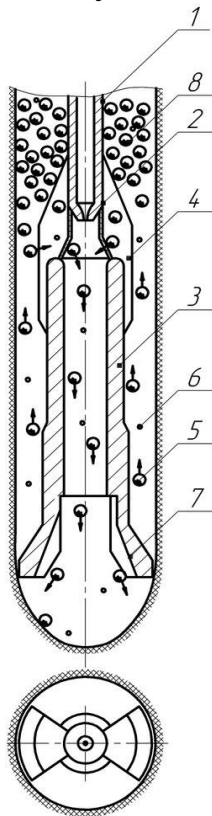


Рис. 1. «Гравитационно-инжекционный» буровой снаряд:

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

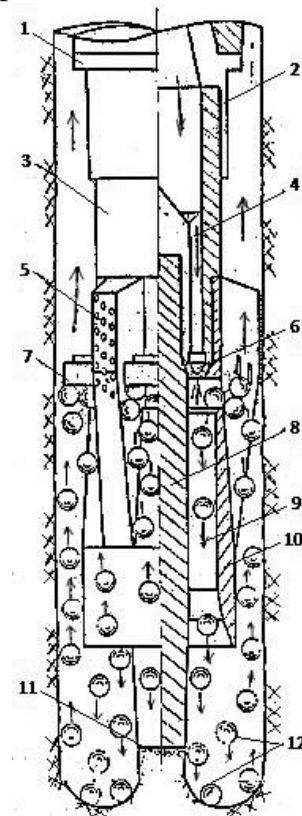


Рис. 2. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с соплом и камерой смешения кольцевой формы (по Заурбекову С.А.):

- 1 – калибратор; 2 – переводник;
3 – соединительная 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 зубья; 12 – шары

Заурбеков С.А. указывает на малый расход шаров в камере смещения (не более 140 ш/с), осуществляемый струйным аппаратом с соплом и камерой смещения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением. В связи с этим был предложен снаряд (рис. 2) с соплом (6) и камерой смещения (9) кольцевой формы, при этом центральная часть забоя скважины разрушается с помощью опоры (8), заканчивающейся твердосплавными зубьями (11). 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 горных пород;
- для работы снаряда необходимы вращение и осевая нагрузка на долото, что усложняет процесс бурения;
- разрушение забоя комбинированным способом (периферийной части – шароструйным, центральной – вращательным) приводит к разной скорости разрушения горных пород, т.е. к сложности управления процесса бурения.

Ряд авторов считает эффективной конструкцию ШЭБС, в основе которой лежит струйный аппарат с соплом и камерой смещения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением, периферийная часть при этом разрушается механическим вооружением лопастного и дробового типов. Однако данные конструкции имеют недостатки, связанные с комбинированным разрушением забоя скважины: износ механического вооружения снаряда, необходимость во вращении и осевой нагрузке, сложность управления процесса бурения.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что проанализированные конструкции ШЭБС эффективны лишь для бурения мягких и средних по крепости горных пород. При разработке конструкций ШЭБС для бурения твердых горных пород необходимо учитывать следующие требования:

- 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 усложняет процесс бурения;
- в основе конструкции бурового снаряда должен лежать струйный аппарат с соплом и камерой смещения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением;
- камера смещения струйного аппарата должна оканчиваться диффузором, использование которого позволит шарам более интенсивно разрушать периферийную часть забоя скважины, что увеличит эффективность 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 рисунке 3 представлена схема базовой конструкции бурового снаряда, принятого нами для проведения экспериментальных исследований, в которой учтены все выше приведенные требования.

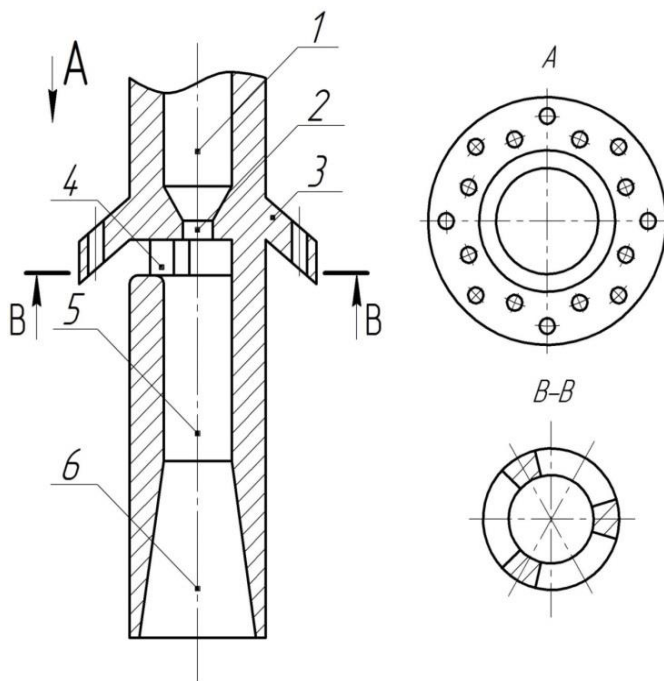


Рис. 3. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд:
1 – камера подвода рабочей жидкости; 2 – сопло;
3 – задерживающее устройство; 4 – ребра между технологическими окнами; 5 – камера смещения;
6 – диффузор

Достоинствами шароструйного бурения ШЭБС данной конструкции являются:

1) простота конструкции бурового снаряда;

2) отсутствие необходимости в создании осевых нагрузок на долото;

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

4) значительная продолжительность рейса, которая будет ограничиваться лишь износостойкостью ШЭБС, т.к. возможна замена износившихся шаров новыми.

Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован и изготовлен стенд (рис. 4) для работы с буровым снарядом, выполненным в масштабированном варианте. Особенностью стенда является наличие стакана (10) для размещения образца разрушаемого материала и визуального наблюдения за процессом всасывания и перемещения рабочих шаров, а также механизма подачи (6) для задания требуемого расстояния между долотом и забоем.

Конструкция шароструйно-эжекторного долота, в котором предусмотрена возможность смены его основных частей, представлена на рисунке 5.

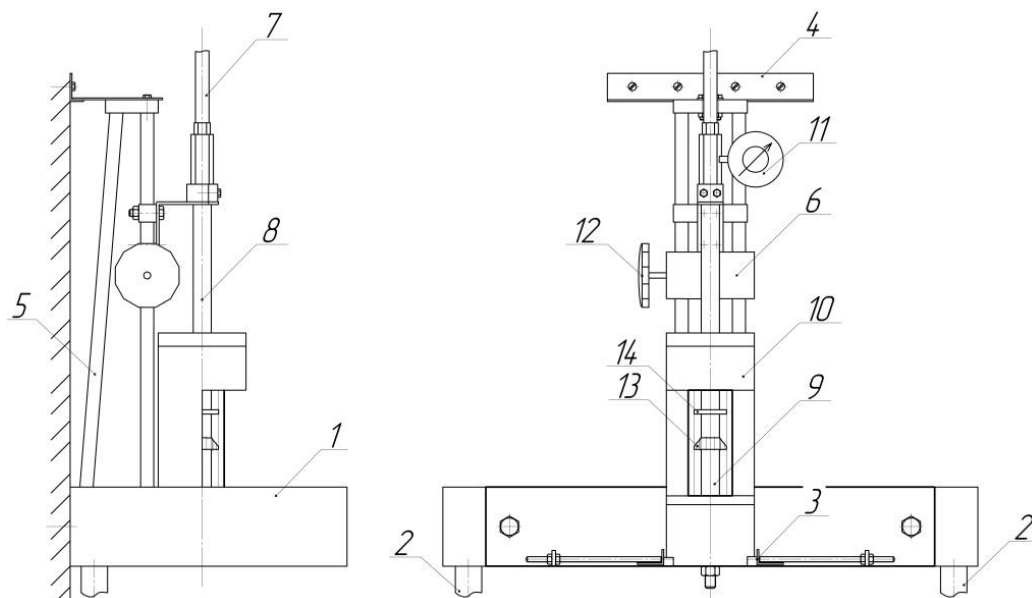


Рис. 4. Общий вид лабораторного стенда:

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

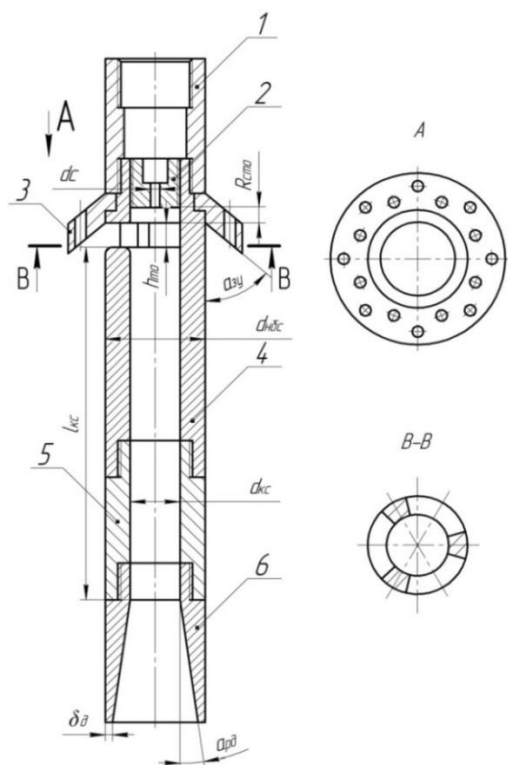


Рис. 5. Основные геометрические параметры ШЭБС исследуемой конструкции:

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

d_c – диаметр сопла;
 $d_{бс}^H$ – наружный диаметр бурового снаряда;
 $R_{сто}$ – расстояние между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон;
 $h_{то}$ – высота технологических окон;
 $\alpha_{зу}$ – угол конусности задерживающего устройства;
 $d_{кс}$ – диаметр камеры смешения;
 $l_{кс}$ – длина камеры смешения;
 $\alpha_{р\delta}$ – угол раскрытия диффузора;
 h_{δ} – толщина стенки диффузора в выходном сечении

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике:

1. Забурка скважины. Бурение проводилось на образцах модельного материала, в качестве которого использовались керамическая плитка. При этом бурение в течение определенного времени производилось без опускания бурового снаряда. Далее замерялись геометрические параметры скважины.

2. Бурение с расхождением бурового снаряда. Бурение проводилось на образцах мрамора. После проходки определенного интервала буровой снаряд

кратковременно опускался на забой скважины и поднимался до запланированного расстояния между долотом и забоем. Далее замерялись геометрические параметры скважины.

3. По общеизвестным методикам определялись расход рабочего и смешанного потоков струйного аппарата бурового снаряда.

4. Высокоскоростная съемка с частотой записи 3600 кадров в секунду для визуализации быстротекущих процессов шароструйного бурения. При этом рассчитывались расход и скорость шаров в камере смешения при варьировании исследуемых параметров.

5. Анализ результатов статистической обработки показал соответствие нормальному закону распределения при хорошей воспроизводимости результатов экспериментальных исследований.

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.

Объем разрушенной горной породы в скважине $V_{скв}$ при шароструйном бурении можно вычислить по формуле:

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

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

В процессе исследований выявлены зависимости влияния следующих технологических и геометрических параметров на эффективность разрушения горных пород: расстояния от долота до забоя, массы порции шаров, их диаметра, периодичности расхаживания бурового снаряда, а также угла конусности задерживающего устройства, диаметра сопла, длины камеры смешения, высоты технологических окон и угла раскрытия диффузора.

Проведенные экспериментальные исследования 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 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 смещения должен иметь угол конусности в пределах $45 \div 60^\circ$;
- масса порции шаров должна быть оптимальной;
- коэффициент эжекции снаряда должен быть достаточным для обеспечения прохождения шаров в технологические окна.

3. Для обеспечения высокой скорости движения шаров в камере смещения необходимо:

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

4. 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.

ПОЛОЖЕНИЕ 2. Поддержание требуемого диаметра скважины при бурении шароструйно-эжекторным снарядом обеспечивается при минимальных расстоянии между долотом и забоем и периодичности расхаживания, а также при сохранении следующих соотношений геометрических параметров бурового снаряда: $\alpha_{рд} = 10^\circ, d_{кс} = 2,2 \cdot d_{ш}, D_{скв} - d_{сч}^H = (1,1 \div 1,2) \cdot d_{ш}$.

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.

В связи с этим было необходимо:

- определить степень влияния геометрических и технологических параметров на разработку скважины по диаметру;
- разработать рекомендации по обеспечению требуемого диаметра скважины;
- выявить основные параметры режима шароструйного бурения, посредством изменения которых можно корректировать диаметр скважины.

Результаты экспериментальных исследований показали, что параметрами, оказывающими наибольшее влияние на разработку скважины по диаметру,

являются расстояние между долотом и забоем, периодичность расхаживания бурового снаряда и угол раскрытия диффузора.

Исследование влияния расстояния от долота до забоя на эффективность шароструйного бурения проводилось при бурении скважин в керамической плитке. Результаты исследования представлены на рисунке 6. Установлено, что при увеличении расстояния между долотом и забоем возрастает диаметр скважины, снижается глубина и уменьшается ее объем.

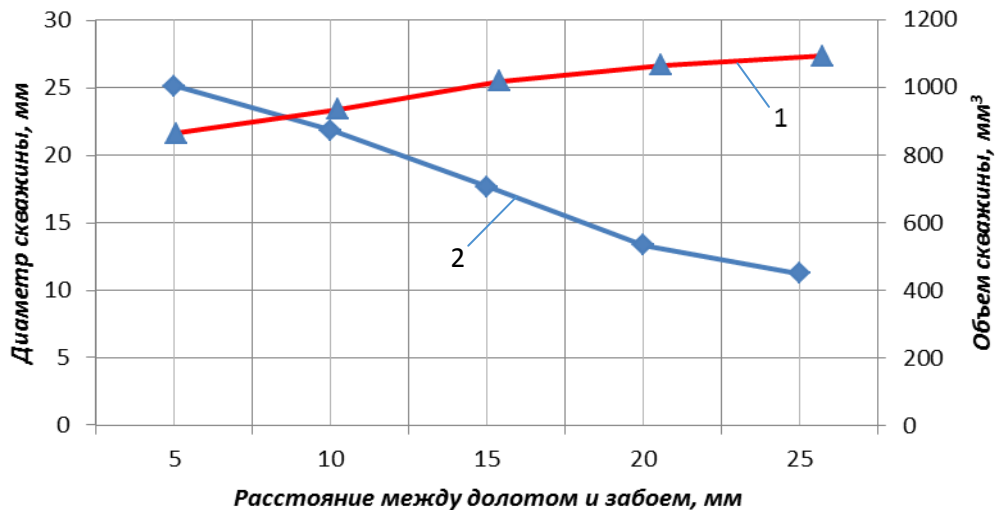


Рис. 6. Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от расстояния между долотом и забоем

Характер изменения диаметра скважины при этом можно отразить формулой:

$$R_{\text{скв}} = R_{\text{кс}} + R_{\text{дз}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\text{рд}}, \quad (2)$$

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

Исследование влияния периодичности расхаживания бурового снаряда на эффективность разрушения горных пород проведено при бурении скважин в мраморе. По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин и сканировалась их форма (рис. 7). Установлено, что при увеличении периодичности расхаживания $t_{\text{рас}}$ 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.

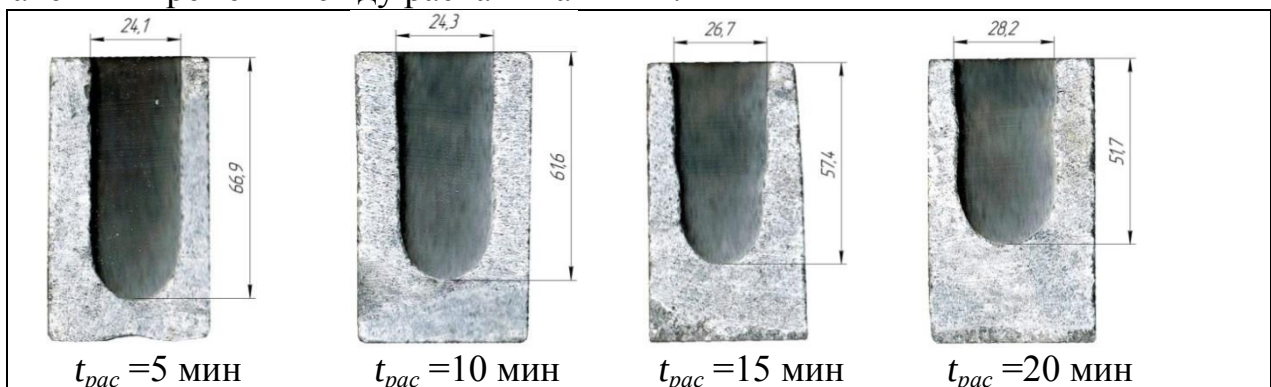


Рис. 7. Геометрические параметры скважин при варьировании периодичности расхаживания

Исследования влияния угла раскрытия диффузора на эффективность разрушения мрамора проводились при бурении скважин с расхаживанием снаряда. Геометрические параметры скважины представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние угла раскрытия диффузора на эффективность шароструйного бурения

Угол раскрытия диффузора, град	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	21010	23,7	41,2	50	54,1
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

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, что связано с усложнением условий нанесения ударов шаров по периферийной части забоя скважины.

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 смещения к диаметру породоразрушающих шаров должно составлять не менее 2,2. Данное соотношение определяет характер движения шаров в камере смещения. Наличие соударений о стенки камеры смещения (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÷1,2 от диаметра шаров. При увеличении значения данного зазора на разрушение периферийной части забоя скважины будет затрачиваться больше времени, что снизит скорость бурения;

- толщина стенки диффузора на выходе должна быть минимальна, а угол раскрытия диффузора составлять не более 10°. Это обеспечит более интенсивное разрушение периферийной части забоя скважины.

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 параметра возрастает диаметр скважины. Т.е. 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 бурового снаряда, при увеличении которой возрастает диаметр скважины. Поэтому бурение необходимо проводить при минимальной периодичности расхаживания, достаточной для разработки скважины до требуемого диаметра.

ПОЛОЖЕНИЕ 3. Предложенная физическая модель шароструйного способа бурения скважин позволяет создать научно-методическую основу для инженерного расчета технологических процессов в различных геолого-технических условиях, которая позволяет на этапе проектирования определять оптимальные геометрические параметры буровых снарядов и режимные параметры бурения, а также производить выбор необходимого технологического оборудования.

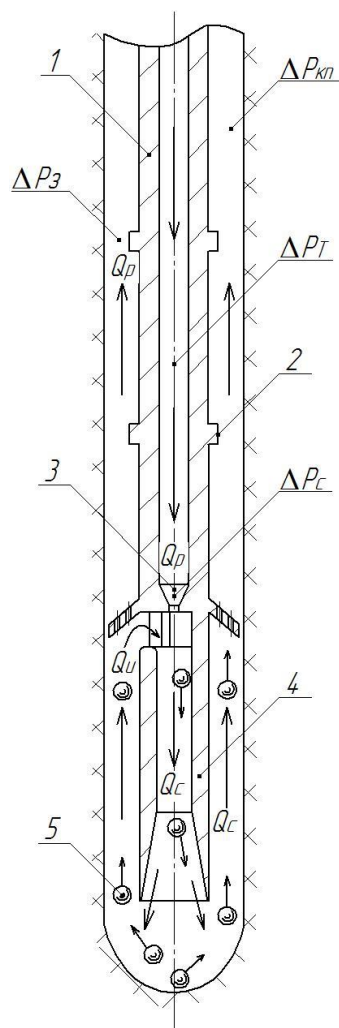


Рис. 8. Принципиальная схема шароструйного бурения:

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

Предлагаемая модель шароструйного бурения основана на результатах экспериментальных исследований с использованием некоторых положений Заурбекова С.А., Увакова А.Б. и Штрассера В.В.

Физическая модель шароструйного бурения объединяет следующие технологические стадии работы бурового снаряда: 1) подъем шаров в затрубном пространстве до зоны всасывания; 2) поступление шаров из зоны в камеру смешения; 3) движение шаров в камере смешения и диффузоре; 4) движение шаров в области между долотом и забоем скважины. Математическое описание всех стадий осуществлялось с использованием результатов высокоскоростной съемки быстропротекающих процессов в призабойной зоне скважины.

Принципиальная схема шароструйного бурения представлена на рисунке 8.

Исходными данными для расчета 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 буровых труб (м): наружный d_n и внутренний d_v диаметры буровых труб, наружный диаметр замкового соединения d_z , средняя длина буровых труб l_{IT} ;

5) свойства породоразрушающих шаров: плотность $\rho_{ш}$ (кг/м³), модуль упругости E_2 (Па), коэффициент Пуансона μ_2 .

Ниже представлена разработанная нами последовательность расчета.

1. Определяется максимальный размер породоразрушающих шаров:

$$d_{\text{ш}} = \frac{D_{\text{СКВ}}}{6,6}. \quad (3)$$

2. Рассчитывается диаметр и площадь сечения камеры смешения:

$$d_{\text{КС}} = 2,2 \cdot d_{\text{ш}}, \quad (4)$$

$$S_{\text{КС}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{КС}}^2}{4}. \quad (5)$$

3. Вычисляется наружный диаметр бурового снаряда:

$$d_{\text{бс}}^{\text{н}} = D_{\text{СКВ}} - 2 \cdot 1,1 \cdot d_{\text{ш}}. \quad (6)$$

4. Определяется длина камеры смешения:

$$l_{\text{КС}} = 8 \cdot d_{\text{КС}}. \quad (7)$$

5. Вычисляется высота технологических окон:

$$h_{\text{ТО}} = 1,25 \cdot d_{\text{ш}}. \quad (8)$$

6. Рассчитывается оптимальная масса порции шаров по формуле:

$$m_{\text{ш}} = m_{1\text{ш}} \cdot N_{\text{ш}} = \frac{\rho_{\text{ш}} \cdot \pi \cdot d_{\text{ш}}^3 \cdot N_{\text{ш}}}{6}, \quad (9)$$

где $m_{1\text{ш}}$ – масса одного шара; $N_{\text{ш}}$ – количество поднимающихся в затрубном пространстве шаров, вычисляемое по формуле:

$$N_{\text{ш}}^{\text{зп}} = \left(\frac{l_{\text{бс}}}{d_{\text{ш}} \cdot C_1} \right) \times \left(\frac{\pi \cdot (d_{\text{бс}} + D_{\text{СКВ}})}{2 \cdot d_{\text{ш}} \cdot C_2} \right), \quad (10)$$

где $l_{\text{бс}}$ – длина бурового снаряда; C_1 – коэффициент, учитывающий зазор между рядами, по экспериментальным данным $C_1=1,5$; C_2 – коэффициент, учитывающий зазор между шарами в ряду, по экспериментальным данным $C_2=1,5$.

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

$$V_{\text{опт}} = 2,15 \cdot \left(\frac{4 \cdot (1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{4 \cdot (1 - \mu_2^2)}{E_2} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot P_c^5}{10 \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}^3 \cdot \left(\frac{4}{d_{\text{ш}}} - \frac{4}{0,78 \cdot D_{\text{СКВ}}} \right)^3}}. \quad (11)$$

8. При проходке скважин с интервалами, склонными к размыву ее стенок, находится максимально возможный расход бурового раствора $Q_{\text{рmax}}$ (м³/с):

$$Q_{\text{рmax}} = S_{\text{бт скв}} \cdot V_{\text{кпmax}}, \quad (12)$$

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

$V_{\text{кпmax}}$ – максимально допустимая скорость течения жидкости в кольцевом пространстве для предупреждения смывания глинистой корки, по рекомендациям принимается равной 1,5 м/с.

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

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

$$V_{\text{КС}} = V_{\text{опт}} / \varepsilon, \quad (13)$$

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

11. Определяется требуемый коэффициент эжекции:

$$n = \frac{S_{\text{КС}} \cdot V_{\text{КС}}}{Q_p} - 1. \quad (14)$$

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:

$$V_{\text{КП}} = \frac{Q_c}{S_{\text{СКВ}} - S_{\text{БС}}} = \frac{4 \cdot (1+n) \cdot Q_p}{\pi \cdot (D_{\text{СКВ}}^2 - d_{\text{БС}}^2)} \geq \omega \cdot \sqrt{\frac{d_{\text{ш}} \cdot (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{БР}})}{\rho_{\text{БР}}}}, \quad (15)$$

где Q_c – расход смешанного потока струйного аппарата; ω – постоянная Риттенгера, для шара в среднем $5,11 \sqrt{(\text{м/с}^2)}$.

13. По графику зависимости коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения (рис. 9), полученного американскими специалистами при неизменном диаметре камеры смешения, определяется требуемое отношение $S_c/S_{\text{КС}}$.

Следует отметить, что значения коэффициента эжекции, равные 2÷4, являются наиболее приемлемыми. В случае превышения коэффициента эжекции ухудшаются условия выноса шлама, в результате чего увеличиваются затраты энергии на его переизмельчение и уменьшается КПД струйного аппарата.

14. Определяется площадь выходного сечения сопла S_c и его диаметр d_c :

$$S_c = \left[\frac{S_c}{S_{\text{КС}}} \right] \cdot S_{\text{КС}}. \quad (16)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{КС}} \cdot \left[\frac{S_c}{S_{\text{КС}}} \right]}{\pi}}. \quad (17)$$



Рис. 9. Зависимость коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения

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

$$\Delta P_c = \frac{Q_p^2 \cdot \rho_{бр}}{\mu^2 \cdot 2 \cdot S_c^2}, \quad (18)$$

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

16. По общеизвестным методикам рассчитываются потери давления в циркуляционной системе $\Sigma(\Delta P_i)$:

$$\Sigma(\Delta P_i) = \Delta P_T + \Delta P_{кп} + \Delta P_з, \quad (19)$$

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.

17. Исходя из величин Q_p , ΔP_c , $\Sigma(\Delta P_i)$, выбирается буровой насос или группа насосов (при условии их параллельной установки). При этом необходимо руководствоваться следующими условиями:

$$Q_n \geq Q_p, \quad (20)$$

$$k \cdot P_n > \Sigma(\Delta P_i) + \Delta P_c, \quad (21)$$

где Q_n и P_n – расход и развиваемое давление одного или нескольких буровых насосов; k – коэффициент, учитывающий снижение рабочего давления нагнетания бурового насоса. Согласно правилам ведения буровых работ оно должно быть меньше паспортного на 20÷30 %, $k=0,7÷0,8$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании большого объема выполненных экспериментальных исследований разработаны технические средства и 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 горных породах наиболее перспективным является гидромониторно-ударный способ, реализуемый с помощью шароструйно-эжекторных буровых снарядов;
- обоснована конструкция ШЭБС для эффективного бурения в твердых 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, обеспечивающих 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;

- исследованы причины 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 смешения бурового снаряда, для контроля процесса шароструйного бурения;

- доказана необходимость включения улавливающе-подпитывающего устройства для повышения рейсовой скорости бурения;

- разработана конструкция забойного шаропитателя.

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 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 конструкцию улавливающе-подпитывающего устройства для снижения затрат времени на спуско-подъемные операции;

- 7) выполнить исследования и опытно-конструкторские работы по решению проблемы наклонно-направленного бурения скважин с помощью ШЭБС.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

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

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

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

Патенты:

4. Стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения: Патент № 143090, Е 21 В 7/18. / **А.В. Ковалев**, С.Я. Рябчиков, М.В. Горбенко, Е.Д. Исаев, Ф.Р. Алиев, Д.А. Якушев. Заявитель и патентообладатель Томский политех. ун-т – № 2014106459/03; заявлено 20.02.2014; опубл. 10.07.2014.

Статьи в зарубежных научных журналах и изданиях, включенных в библиографические базы Web of Science и Scopus:

5. **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>.

6. **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>.

Статьи в прочих изданиях:

7. **Ковалев А.В.** История развития шароструйного бурения / **А.В. Ковалев**, Ф.Р. Алиев, Д.А. Якушев // 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.

8. **Ковалев А.В.** Лабораторный стенд для исследования процессов абразивного разрушения горных пород / **А.В. Ковалев**, Ф.Р. Алиев, В.М. Горбенко, Д.А. Якушев // 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.

9. **Ковалев А.В.** Методика проведения экспериментов на лабораторном стенде при исследовании технологических процессов шароструйного бурения / **А.В. Ковалев**, Е.Д. Исаев, Ф.Р. Алиев, А.А. Яцкив, Д.А. Якушев // 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.

10. **Ковалев А.В.** Исследование влияния геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов на эффективность их работы / **А.В. Ковалев**, А.А. Симон, А.А. Яцкив, Е.Д. Исаев // 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.

11. **Ковалев А.В.** Анализ технических средств для шароструйного бурения с целью выбора перспективных направлений для проведения опытно-конструкторских работ / **А.В. Ковалев**, Д.А. Якушев // 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.

12. **Ковалев А.В.** Обоснование требований к конструкции шароструйно-эжекторного снаряда для бурения скважин в интервалах твердых и крепких горных пород / **А.В. Ковалев**, Е.Д. Исаев // 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.

13. Исаев Е.Д. Экспериментальные исследования технологических параметров режима шароструйного бурения / Е.Д. Исаев, **А.В. Ковалев**, Ф.Р. Алиев // 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.

Подписано в печать 12.10.2015 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ № 10-10/15
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а