

ШАДРИНА Анастасия Викторовна

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЛОННЕ ТРУБ ПРИ БУРЕНИИ
СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ
ВЫРАБОТОК**

Специальность 25.00.14. – «Технология и техника геологоразведочных работ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный консультант:

Саруев Лев Алексеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Власюк Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, ОАО «Тульское НИГП», г. Тула, консультант

Рынди́н Влади́мир Проко́пьевич, доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, профессор кафедры «Горные машины и комплекс»

Чистяков Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, профессор кафедры «Бурение скважин»

Ведущая организация:

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет (НИ ИрГТУ), г. Иркутск

Защита диссертации состоится 05 ноября 2014 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.269.07 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>.

Автореферат разослан « 05 » сентября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, профессор

Арбузов С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В современных условиях любой производственный процесс должен быть ориентирован на ресурсосбережение. При эксплуатационной разведке рудных месторождений (при проходке скважин в породах VI–XII категорий по буримости) важными направлениями ресурсосбережения могут быть:

- уменьшение диаметра скважин (до 40 – 70 мм);
- определение рациональной энергии удара при бурении;
- использование безбойкового гидравлического механизма формирования импульсов силы для разрушения горных пород (ГП), обеспечивающего существенное повышение к.п.д. в сравнении со всеми современными гидроударными машинами;
- определение и выбор рациональных параметров агрегатов для бурения скважин ударно-вращательным способом в условиях подземных рудников.

Как известно, в разведочном бурении одним из важнейших вопросов является качество извлекаемых из недр образцов горной породы. Очевидно, самым распространенным способом получения такой информации является разведочное колонковое бурение.

Однако, стоит отметить, что и бурение, дающее образцы в виде шлама, например, бурение с обратной циркуляцией воздуха, достаточно распространено, особенно в зарубежных странах (рисунок 1).

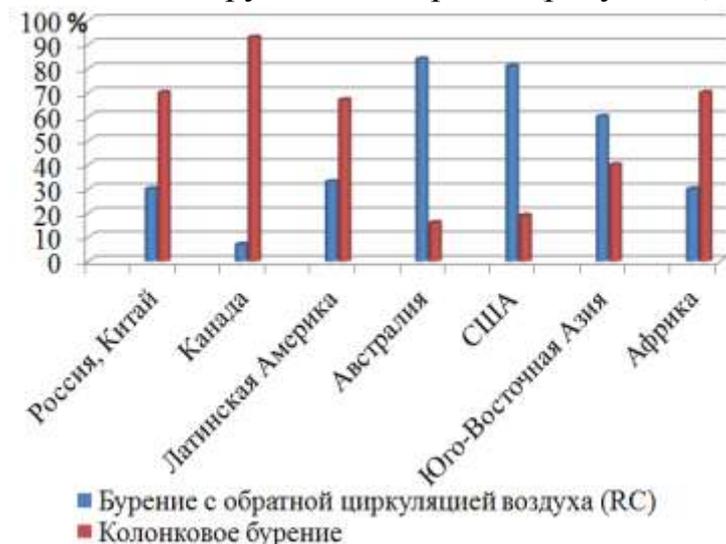


Рисунок 1 – Соотношение бурения с RC (обратной циркуляцией воздуха) и колонкового (данные национальной статистики по общим затратам на разведку с поверхности и из подземных горных выработок) (Йонссон Я. Найти оптимальный баланс // Горное дело и строительство. Механизированная разработка пород с Atlas Copco, 2005. – № 3. – С. 18–20)

Традиционно для интенсификации бурения при проходке скважин в твердых породах применяют погружные пневматические и гидравлические ударные машины.

Результаты исследований, проводимые в Томском политехническом университете И.А. Нейште-тером, В.П. Рожковым и др., показали, что воздействие на породоразрушающий инструмент (ПРИ) импульсов силы при вращательном бурении горных пород позволяет увеличить механическую скорость бурения от полутора до пяти раз.

Анализ геологоразведочного оборудования показал, что предлагаемые установки с погружными ударными механизмами в преобладающей своей части позволяют бурить скважины средних и больших диаметров.

Применение буровых установок с ударными механизмами вне

скважины и независимым вращением бурильной колонны может являться альтернативным вариантом бурения сравнительно неглубоких геологоразведочных скважин (до 50 м) малого диаметра (40–70 мм) на месторождениях с хорошо изученными геологическими разрезами (условия залегания, физико-химические свойства полезных ископаемых и горных пород, мощность отложений и т.п.) и при бурении по «пустым породам» как более экономичный и быстрый способ углубки до рудного тела; при бурении с отбором шлама для его последующего анализа при эксплуатационной разведке этажей, горизонтов, блоков с целью уточнения данных для планирования добычи, контроля за качеством отработки запасов полезного ископаемого (рисунок 2).

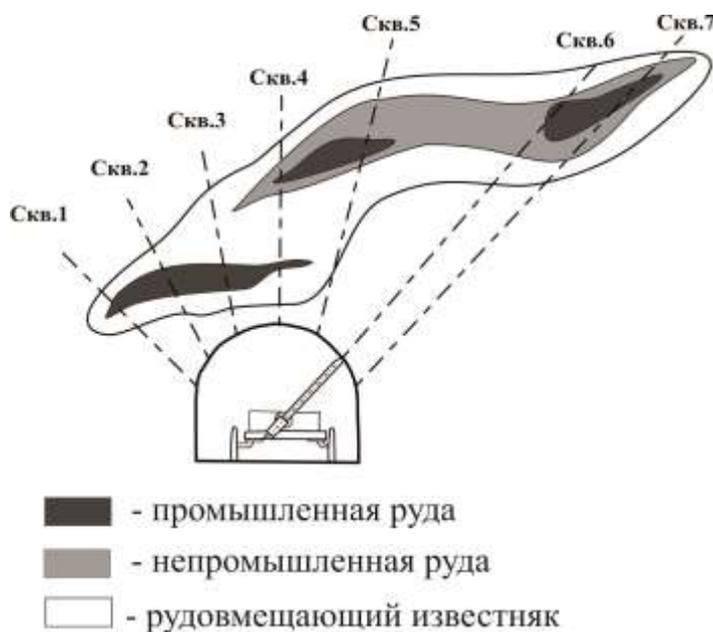


Рисунок 2 – Структура запасов рудного месторождения. Схема бурения веера геологоразведочных скважин

В данном случае реализуется ударно-вращательный способ бурения, основанный на волновом механизме передачи энергии удара на забой скважины.

Большой вклад в исследование ударных процессов применительно к бурению скважин внесли работы отечественных и зарубежных ученых: Авакяна О.А., Алабужева П.М., Александрова Е.В., Алимова О.Д., Андреева В.Д., Арндта Ф.К., Барона Л.И., Бессонова Ю.Д., Бойкова В.В., Веселова Г.М., Горбунова В.Ф., Дата П.К., Дворникова Л.Т., Еремьянца В.Э., Жлобинского Б.А., Жукова И.А., Иванова К.И., Кашаева В.А., Кашкарова Г.М., Киселева А.Т., Климова Б.Г., Коняшина Ю.Г., Крусира И.Н., Крюкова Т.М., Кутузова Б.Н., Лазаре-

вича Н.Д., Лисовского А.Ф., Лундберга Б., Мавлютова М.Р., Манжосова В.К., Медведева И.Ф., Михайлова А.В., Мясникова А.А., Нейштетера И.А., Никоновой И.П., Осипова Н.М., Павловой Н.Н., Покровского Г.Н., Пуляева А.И., Рейхмуса Д.Р., Рожкова В.П., Рындина В.П., Саруева Л.А., Сердечного А.С., Серова Я.А., Серпенинова Б.Н., Сирса А.Е., Сластина А.П., Смоляницкого Б.Н., Соколинского В.Б., Сулакшина С.С., Тагаева Б.Т., Торгунакова Ю.Н., Тюнина А.А., Федорова В.Р., Ферхарста Е., Филиппова Г.С., Фишера Г., Хуструлида В., Цуканова А.Г., Чирьева В.И., Шапошникова И.Д., Шелковникова И.Г., Шрейнера Л.А., Эпштейна Е.Ф. и др.

Известно, что формируемый при ударе импульс силы представляет собой величину, характеризующую действие, оказываемое на бурильную колонну за некоторый промежуток времени Δt . В свою очередь импульс силы не характеризуется энергией удара, поэтому в дальнейших рассуждениях, говоря о передаче и потерях энергии удара в буровом инструменте, мы будем обращаться к термину «волна деформации», «силовой импульс».

Таким образом, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложены новые технические решения, позволяющие решить проблему научно-обоснованного проектирования техники и ресурсосберегающей технологии бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок, что имеет важное значение для развития технологии эксплуатационной разведки полезных ископаемых при подземной разработке рудных месторождений (рисунок 3).

Работа выполнена в соответствии с планом НИР в рамках государственных научных и научно-технических программ, в которых автор являлся руководителем или ответственным исполнителем: Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (мероприятие № 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук» (ГК № П1328 от 11 июня 2010 г.)); программы «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект № 5208р/7638 от 25.06.2007 г., проект № 7340р/№10201 от 28.12.2009 г.). Кроме того, тема была поддержана грантом Томского политехнического университета молодым ученым для проведения научных исследований, 2005 г.

Идея работы состоит в научном обосновании ресурсосберегающей технологии бурения геологоразведочных скважин малого диаметра из подземных горных выработок, основанной на передаче импульсов силы (волн деформаций) от ударного механизма по бурильной колонне к ПРИ. Эффект достигается за счет новой конструкции бурильной колонны с ниппелями закрытого типа, а также безбойкового гидравлического механизма формирования импульсов силы, позволяющих получить импульсы по своим параметрам близким к оптимальным и передавать их на забой скважины с минимальными потерями.

Цель работы – теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в бурильной колонне, направленные на обоснование возможности использования энергии волн деформаций для интенсификации процесса разрушения горных пород.

Задачи исследований:

– исследовать процессы формирования импульсов силы при ударе, передачи их по буровому снаряду и внедрения в горную породу. При этом должна решаться двуединая задача: обеспечение рационального силового воздействия на горную породу со стороны бурового инструмента, а также выявление основных факторов, влияющих на эффективность разрушения горной породы;

– теоретически и экспериментально обосновать принципиально новую конструкцию бурильной колонны, обеспечивающей передачу волны деформации от ударно-вращательного механизма к ПРИ с минимальными потерями ее энергии и условия для повышения прочности элементов соединений бурильной колонны;

– научно обосновать и разработать рекомендации по увеличению коэффициента передачи энергии волны деформации по бурильной колонне;

– разработать стенд и методику экспериментальных исследований для определения рациональных параметров ударного взаимодействия ПРИ различного типа с горной породой;

Характеристика технологии бурения геологоразведочных скважин ударно-вращательным способом из подземных горных выработок и факторы, определяющие её ресурсоэффективность



Рисунок 3 – Факторы, определяющие ресурсоэффективность технологии бурения геологоразведочных скважин ударно-вращательным способом

- провести экспериментальные исследования разрушения гранита ПРИ различного типа, анализ полученных результатов, оценку энергоемкости процесса разрушения и сопоставить их с экспериментальными данными других авторов;
- теоретически обосновать принципиально новый безбойковый гидравлический механизм формирования импульсов силы вместо ударных механизмов машин для бурения скважин малого диаметра, экспериментально исследовать его работу;
- разработать метод расчета рациональных параметров буровых агрегатов с ударно-вращательными механизмами для бурения скважин в подземных условиях.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые разработаны научные основы ресурсосберегающей технологии бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок, позволяющей интенсифицировать в несколько раз процесс разрушения горных пород за счет импульсов силы, передаваемых по бурильной колонны с ниппельными соединениями закрытого типа на забой скважин при эксплуатационной разведке твердых полезных ископаемых, что является существенным вкладом в решение проблемы повышения энерго- и ресурсоэффективности технологии и техники геологоразведочных работ.

2. Экспериментально выявлены закономерности распространения импульсов силы по бурильной колонне с закрытыми ниппельными соединениями, подтверждающие эффективность передачи энергии волны деформации на забой с потерями, не превышающими 25 – 30 % (при 28 – 30 соединениях бурильных труб в колонне).

3. Установлена аналитическая зависимость эффективности передачи энергии продольных волн деформации по бурильной колонне от соотношения наружного и внутреннего радиусов поперечного сечения бурильных труб.

4. На основе экспериментальных исследований резьбовых соединений установлен характер влияния жесткостей резьбовых участков бурильных труб, контактного взаимодействия витков резьбы трубы и ниппеля на передачу импульсов силы по бурильной колонне к ПРИ.

5. Установлена зависимость фракционного состава гранита при его разрушении от энергии волны деформации. Экспериментально уточнены закономерности изменения энергоемкости разрушения горной породы импульсами силы с большей длительностью переднего фронта при условии равной энергии удара.

6. Предложен новый способ генерирования импульсов силы в буровом инструменте на основе безбойковой гидромеханической системы, включающей упругий элемент с нелинейной зависимостью давления от объема жидкости, вытесняемой плунжером в замкнутую полость упругого элемента.

Практическая значимость работы заключается:

- в использовании методики проведения экспериментальных исследований, позволяющей оценить эффективность передачи импульсов силы по колонне бурильных труб;

- в научном обосновании влияния соотношения наружного и внутреннего диаметров бурильных труб на эффективность передачи энергии волны деформации;

– в разработке принципиально нового безбойкового гидравлического механизма генерирования импульсов силы, имеющего существенно больший к.п.д., по сравнению с применяющимися в настоящее время механизмами ударного действия. Безбойковый гидравлический механизм представляет интерес для компаний и предприятий, занимающихся разработкой, созданием и производством техники бурения;

– в разработке модели работы бурового агрегата и методики расчета его рациональных параметров для бурения скважин из подземных горных выработок, который уже на этапе проектирования позволяет оценить их ресурсоэффективность на основе таких технико-экономических показателей, как производительность, удельные приведенные затраты, себестоимость метра пробуренной скважины, материалоемкость агрегата и бурового инструмента и т.д.

Методы исследования

Теоретические методы исследования включают:

– научное обобщение и анализ результатов исследований по проблеме применения ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок ;

– численные методы решения дифференциальных уравнений применительно к волновой теории Сен-Венана;

– гармонический анализ функции, описывающей передачу волн деформаций по волноводам.

Экспериментальные методы включают:

– тензометрирование процессов передачи упругих волн деформаций на стенде, имитирующем скважину диаметром 42 мм и глубиной 39 м с применением современных измерительных средств и обработкой полученных результатов (УИПУ-4М); тензометрирование динамических процессов в элементах резьбового соединения;

– математическое моделирование процесса бурения скважин малого диаметра агрегатами ударно-вращательного действия;

– методы обработки и анализа данных включают математико-статистические методы, в том числе корреляционно-регрессионный анализ, используемый для исследования влияния различных факторов (типа ПРИ, предударной скорости бойка, типа бойка, угла поворота инструмента) на энергоемкость разрушения горной породы, углубление скважины и гранулометрический состав разрушенной породы.

Математические расчеты выполнялись в программном продукте MathCAD 13.0. Визуализация и статистический анализ экспериментальных данных осуществлялся с использованием программного пакета Statistica 7.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Конструкция бурильной колонны с ниппельными соединениями закрытого типа позволяет передавать к ПРИ порядка 70 % энергии волны деформации на глубину 40 м. Теоретически и экспериментально определены условия эффективной передачи импульсов силы в буровом инструменте. Установлено, что передача амплитуды и энергии волн деформаций по колонне с ниппельными соединениями закрытого типа осуществляется с меньшими потерями энергии за счет:

– применения бурильных труб с большей относительной толщиной стенки;

– повышения жесткости резьбовых участков бурильных труб, жесткости контактного взаимодействия рабочих поверхностей витков резьбы бурильных труб и ниппеля, а также снижения жесткости ниппеля;

– уменьшения в элементах ниппельных соединений закрытого типа тангенциальных напряжений.

2. Безбойковая гидромеханическая система, включающая упругий элемент с нелинейной зависимостью давления от объема жидкости, вытесняемой плунжером в замкнутую полость упругого элемента, может быть использована вместо ударных механизмов буровых установок ударно-вращательного действия, а также как дополнительный компоновочный элемент, приводящий к интенсификации вращательного бурения, путем формирования направленных, высокоэнергетических силовых импульсов.

3. Закономерности изменения энергоемкости разрушения горной породы от параметров ударной системы определяются особенностями взаимодействия импульсов силы в бурильной колонне с горной породой:

– при равной энергии удара для штыревой коронки импульс силы с более продолжительным передним фронтом обеспечивает меньшую энергоемкость разрушения за счет выкола крупных фракций; для долотчатой и крестовой коронок отмечается обратная зависимость;

– при энергии удара более 60 Дж и скорости приложения ударной нагрузки 5 м/с штыревая коронка формирует частицы шлама бóльшей крупности по сравнению с долотчатой и крестовой коронками. При скорости удара 7 м/с показатели фракционного состава шлама приближаются к значениям для долотчатой и крестовой коронок.

4. Разработанная модель работы бурового агрегата, методика расчета и обоснования его рациональных параметров для бурения скважин из подземных горных выработок позволяет на этапе проектирования оценить их ресурсоэффективность на основе таких технико-экономических показателей, как производительность, удельные приведенные затраты, себестоимость метра пробуренной скважины, материалоемкость станка и бурового инструмента и т.д.

Достоверность результатов и научных положений обеспечена значительным объемом теоретических и экспериментальных исследований, выполненных на натуральных образцах бурового оборудования с использованием современного метрологического оборудования, программного обеспечения, методов статистической обработки экспериментальных материалов, сходимостью результатов исследований с данными других авторов.

Реализация выводов и рекомендаций.

Разработанный метод расчета и обоснования рациональных параметров агрегатов для бурения геологоразведочных скважин в условиях подземных рудников принят к внедрению в ООО «Юргинский машиностроительный завод» (г. Юрга), ЗАО «Институт промышленного проектирования угольных предприятий» (г. Новокузнецк), получены соответствующие акты внедрения.

Апробация работы.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: заседании объединенного научного семинара специалистов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томского науч-

ного центра СО РАН, Научно-исследовательского института прикладной математики и механики при Томском государственном университете; научных семинарах в Институте природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; на заседании научного семинара в Институте горного дела СО РАН (г. Новосибирск); на международных симпозиумах и научно-практических конференциях: «Проблемы геологии и освоения недр», 1998, 2003 – 2011, 2014 гг. (г. Томск); «Современные проблемы машиностроения», 2011 гг. (г. Томск); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС – 12 – 2006)», 2006 г. (г. Тюмень); «Science and Technology. KORUS-2005», 2005 г. (г. Новосибирск); «Динамика и прочность горных машин», 2003 г. (г. Новосибирск); «Современные техника и технологии 2003», 2003 г. (г. Томск); «Science and Technology. KORUS-2003», 2003 г. (г. Ульсан, Южная Корея); «Наука и инновации XXI века», 2005 г. (г. Сургут).

Личный вклад автора состоит:

- в формулировке проблемы и задач исследований; выборе методов и разработке методик исследований;
- в проведении теоретических исследований передачи импульсов силы по бурильной колонне, экспериментальных исследований по оценке потерь энергии при передаче волн деформаций через резьбовые соединения на основе гистерезисных диаграмм;
- в обработке осциллограмм импульсов силы и получении графических зависимостей изменения их амплитуды, энергии, длительности в процессе распространения по бурильной колонне;
- в разработке стенда и создании методики экспериментальных исследований для определения рациональных параметров ударного взаимодействия ПРИ различного типа с горной породой (на примере гранита);
- в разработке экспериментального стенда для исследования возможностей безбойкового гидравлического механизма формирования импульсов силы;
- в проведении экспериментальных исследований разрушения гранита ПРИ различного типа, обработке и анализе полученных результатов;
- в проведении экспериментальных исследований работы безбойкового гидравлического механизма формирования импульсов силы, обработке и анализе полученных результатов;
- в разработке математической модели работы бурового агрегата и методики расчета и обоснования рациональных параметров агрегатов для бурения скважин в условиях подземных рудников.

Часть исследований выполнена при непосредственном участии автора совместно с Л.А. Саруевым, А.И. Авдеевой, А.Л. Саруевым, А.А. Казанцевым, А.П. Колодиным, В.Г. Крец, Д.В. Фединым.

Публикации. Результаты диссертационного исследования изложены в 55 печатных работах:

- в изданиях перечня ВАК Министерства образования и науки РФ – 21 публикация;
- в 3-х монографиях, одна из которых единоличная;
- в других изданиях – 24 публикации;
- в 7-ми патентах на полезную модель РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа объемом 272 страницы содержит введение, шесть глав, заключение и библиографический список из 271 наименования, включает 71 рисунок, 27 таблиц и 9 приложений.

Введение диссертации содержит актуальность работы, цели и основные задачи исследований, методы, которыми достигались поставленные цели. Приведены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена научному обобщению теоретических и экспериментальных данных об ударно-вращательном способе бурения скважин малого диаметра.

Во второй главе изложены методики и средства проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Третья глава содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов в бурильной колонне, основанные на фундаментальных представлениях волновой теории удара.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального определения рациональных параметров ударного взаимодействия и оценка эффективности ПРИ различного типа с горной породой (на примере гранита).

Пятая глава посвящена теоретическому и экспериментальному обоснованию возможности применения безбойкового гидравлического механизма генерирования импульсов силы для разрушения горных пород с целью повышения эффективности вращательного бурения.

Шестая глава включает вопросы, связанные с разработкой модели работы бурового агрегата и методики расчёта его рациональных параметров для бурения скважин в условиях подземных рудников.

Автор выражает благодарность научному консультанту д.т.н., профессору Саруеву Л.А. за методическую помощь и консультации; признательность сотрудникам кафедр транспорта и хранения нефти и газа, геологии и разведки полезных ископаемых, гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии, теоретической и прикладной механики, бурения скважин Национального исследовательского политехнического университета за помощь в организации и проведении экспериментов. Особая благодарность д.т.н., профессору С.Я. Рябчикову за полезные рекомендации и ценные замечания по работе.

Структура автореферата сформирована согласно защищаемым положениям.

Первое научное положение. *Конструкция бурильной колонны с ниппельными соединениями закрытого типа позволяет передавать к породоразрушающему инструменту порядка 70 % энергии волны деформации на глубину 40 м. Теоретически и экспериментально определены условия эффективной передачи импульсов силы в буровом инструменте. Установлено, что передача амплитуды и энергии волн деформаций по колонне с ниппельными соединениями закрытого типа осуществляется с меньшими потерями энергии за счет:*

- применения бурильных труб с большей относительной толщиной стенки;
- повышения жесткости резьбовых участков бурильных труб, жесткости контактного взаимодействия рабочих поверхностей витков резьбы бурильных труб и ниппеля, а также снижения жесткости ниппеля;
- уменьшения в элементах ниппельных соединений закрытого типа танген-

циальных напряжений.

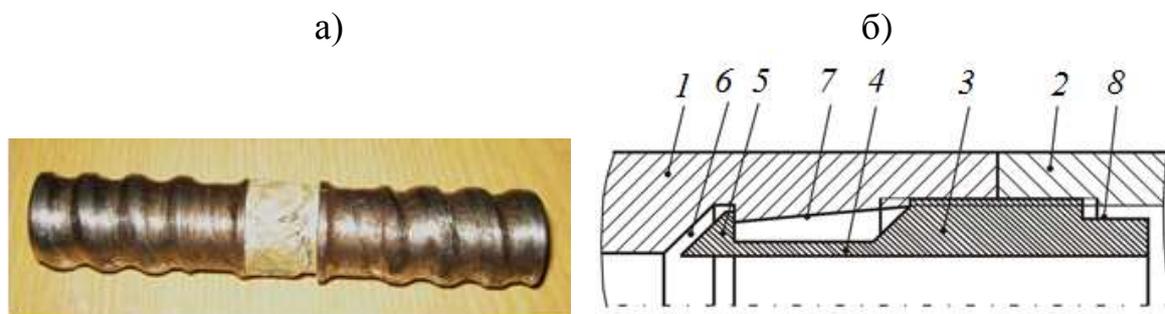
Современные виды соединений бурильных труб, применяемых в геологоразведочном бурении, совершенно не пригодны для передачи через них энергии удара.

Изначально конструкция бурильной колонны с ниппелями закрытого типа была разработана на основе волновой теории удара исходя из чисто интуитивных конструкторских соображений, без достаточного научного обоснования параметров соединения, без оценки коэффициента передачи энергии импульсов силы по бурильной колонне, что представлено в настоящей работе.

Для оценки ее эффективности ранее были проведены производственные испытания на Хайдарканском ртутном комбинате (Кыргызстан). В процессе бурения 925 м геологоразведочных скважин в породах высокой твердости не было отмечено ни одного случая выхода из строя ниппельного соединения. Аналогичные испытания бурильных колонн проводились на руднике «Риддерский» в Казахстане, где также имели положительные результаты.

Конструкция ниппельного соединения бурильных труб, защищенная патентами на полезную модель РФ (рисунок 4) характеризуется следующим [24, 54]:

– ниппель расположен внутри соединяемых стык в стык бурильных труб, что обеспечивает передачу энергии волны деформации непосредственно от трубы к трубе с минимальными потерями;



а) – натуральный образец ниппеля закрытого типа (Пат. 79926 Российская Федерация, 2009 г.) [53]; б) – принципиальное устройство ниппельного соединения закрытого типа (Пат. 95731 Российская Федерация, 2010 г.) [54]:

1, 2 – бурильные трубы, 3 – ниппель закрытого типа; 4 – пластины; 5 – буртики; 6 – кольцевая проточка; 7 – конусная проточка; 8 – лыски

Рисунок 4 – Ниппельное соединение бурильных труб закрытого типа

- использование ниппелей закрытого типа позволяет уменьшить общий диаметр скважины и обеспечить ресурсосберегающую технологию бурения;
- при распространении волны деформации резьбовые участки бурильных труб сжимаются, а ниппель закрытого типа освобождается от нормальных напряжений растяжения и деформации предварительного закручивания в резьбовом соединении.
- конструкция ниппельного соединения закрытого типа позволяет повысить надежность работы бурильной колонны. При этом улучшаются условия выноса

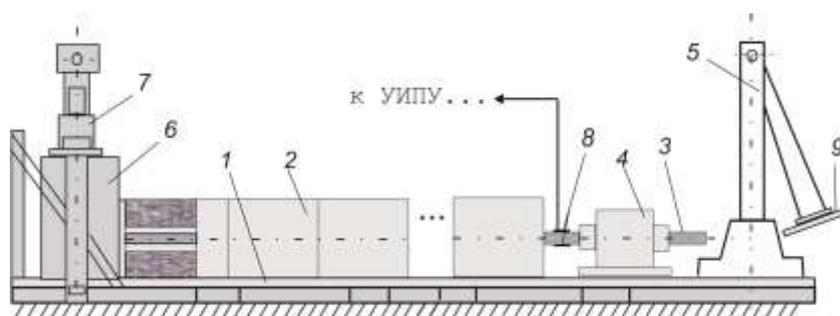
шлама из скважины, исключается возможность заклинивания бурильной колонны в скважине продуктами разрушения.

Исследование волновых процессов в бурильной колонне новой конструкции (таблица 1) и закономерностей изменения параметров импульсов силы при их распространении к ПРИ проводилось на стенде, представляющем собой несущую конструкцию 1 с блоками бетона 2 размерами $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м. Сквозные отверстия диаметром 42 мм в блоках имитировали искусственную скважину глубиной до 39 м. Осевая нагрузка 3 (от 0 до 12 кН) создавалась пневмоподатчиком 4 (рисунок 5).

Таблица 1 – Параметры принятых для эксперимента бурильных труб геологоразведочного сортамента по ГОСТ 8467–57 и резьбовых соединительных элементов

Диаметр ниппеля, мм	25,5
Длина ниппеля, мм	122
Диаметр трубы наружный, мм	33,5
Диаметр трубы внутренний, мм	24
Длина трубы, мм	1300
Тип резьбы	Круглая КП 25×12

Удары бойками по хвостовику бурильной колонны наносились цилиндрическими бойками (таблица 2) посредством копра 5. Бурильная колонна нагружалась крутящим моментом, постоянным по величине ($265 \text{ Н}\cdot\text{м}$), создаваемым рычагом с грузом [12, 13, 21, 24].



1 – несущая конструкция; 2 – блоки бетона; 3 – бурильная колонна; 4 – пневмоподатчик; 5 – копер; 6 – блок чугуна; 7 – домкрат; 8 – тензодатчики; 9 – цилиндрический боек; УИПУ – установка для измерения параметров удара

Рисунок 5 – Принципиальная схема стенда для исследования передачи импульсов силы в колонне бурильных труб

Изменяя высоту сбрасывания ударников (1,51 и 2,76 м) с учетом расстояния от пола до продольной оси ударника, равного 0,26 м, обеспечивались разные скорости приложения ударной нагрузки $V_{уд}$ – 5 и 7 м/с соответственно.

Тензодатчики наклеивались на одну бурильную трубу, которая вместе с измерительной аппаратурой поочередно устанавливалась в пяти точках колонны.

При этом применяется метод определения энергии удара по импульсам силы в трубе во время удара, и, в частности, методом выделения первого импульса и вычисление его энергии. Метод позволяет производить измерение энергетических показателей без разборки бурового агрегата. Данная методика реализована в измерительной аппаратуре УИПУ-4М, соответствующей стандарту ISO 2787 («Инструменты пневматические ротационные и ударные. Эксплуатационные испытания»).

Таблица 2 – Параметры ударников, принятых для эксперимента

Параметры	Номер ударника						
	1	2	3	4	5	6	
Длина l_y , мм	350	450	700	309	253	450	
Диаметр d_y , мм	35	45	35	ступенчатый ударник буровой установки БУ – 70: $d_1 = 130$ мм; $d_2 = 59$ мм		75	75
Масса m_y , кг	2,50	5,48	5,48	7,4	8,32	15,45	
Обозначение	C1	C2	C3		C4		

Анализ графиков относительного изменения энергии, амплитуды силы и длительности импульсов показывает, что при соединении буровых труб ниппелями закрытого типа потери энергии волны деформации, сформированной различными бойками, изменяется на глубине скважины 36 м, то есть после прохождения через 28 ниппельных соединений, в пределах 25÷30 % от первоначальной величины (рисунки 6, 7).

Из графических зависимостей видно, что при прохождении импульсов силы через первых 7 ниппельных соединений (9 метров буровой колонны) уменьшение амплитуды силы и энергии волны сжатия происходит более интенсивно. Это связано с волнами поперечной деформации, распространяющимися в материале буровых труб со скоростью около 3 000 м/с. Наибольшие нагрузки действуют на первых метрах буровой колонны, где происходит совместное воздействие на неё деформации сжатия и изгиба, а далее волна деформации изгиба начинает отставать от продольной волны.

Повышение предударной скорости бойка приводит к незначительному уменьшению амплитуды силы (у пяти бойков из шести) и энергии волны деформации (у четырех бойков из шести).

Согласно волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

где u – смещение сечения буровой трубы вдоль продольной оси, м; t – время, с; a_0 – фазовая скорость распространения продольных волн в материале буровых труб, м/с; x – координата сечения трубы, форма волны при ее распространении не изменяется. Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют об обратном: при распространении волны деформации её амплитуда снижается, кроме того, отмечается частичная потеря (диссипация) её энергии.

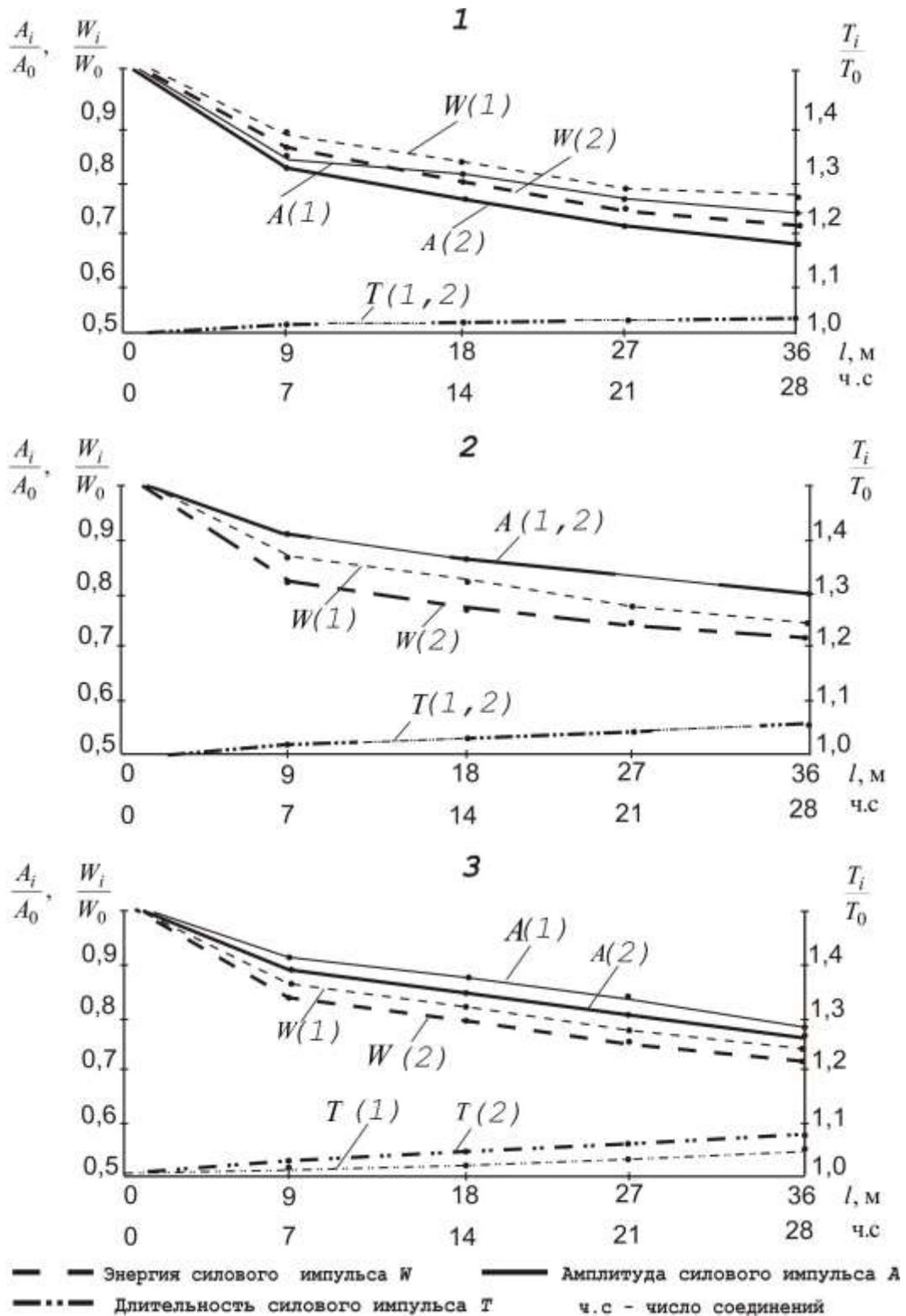


Рисунок 6 – Относительное изменение параметров силовых импульсов при распространении по бурильной колонне диаметром 33,5 мм с ниппельными соединениями закрытого типа:

1 – диаметр бойка 35 мм, длина бойка 330 мм; 2 – диаметр бойка 35 мм, длина бойка 700 мм; 3 – диаметр бойка 45 мм, длина бойка 450 мм; l , м – место наклейки датчиков на бурильной колонне; (1) – значение соответствующего параметра при скорости приложения ударной нагрузки 5 м/с (тонкая линия); (2) – значение соответствующего параметра при скорости приложения ударной нагрузки 7 м/с (утолщенная линия)

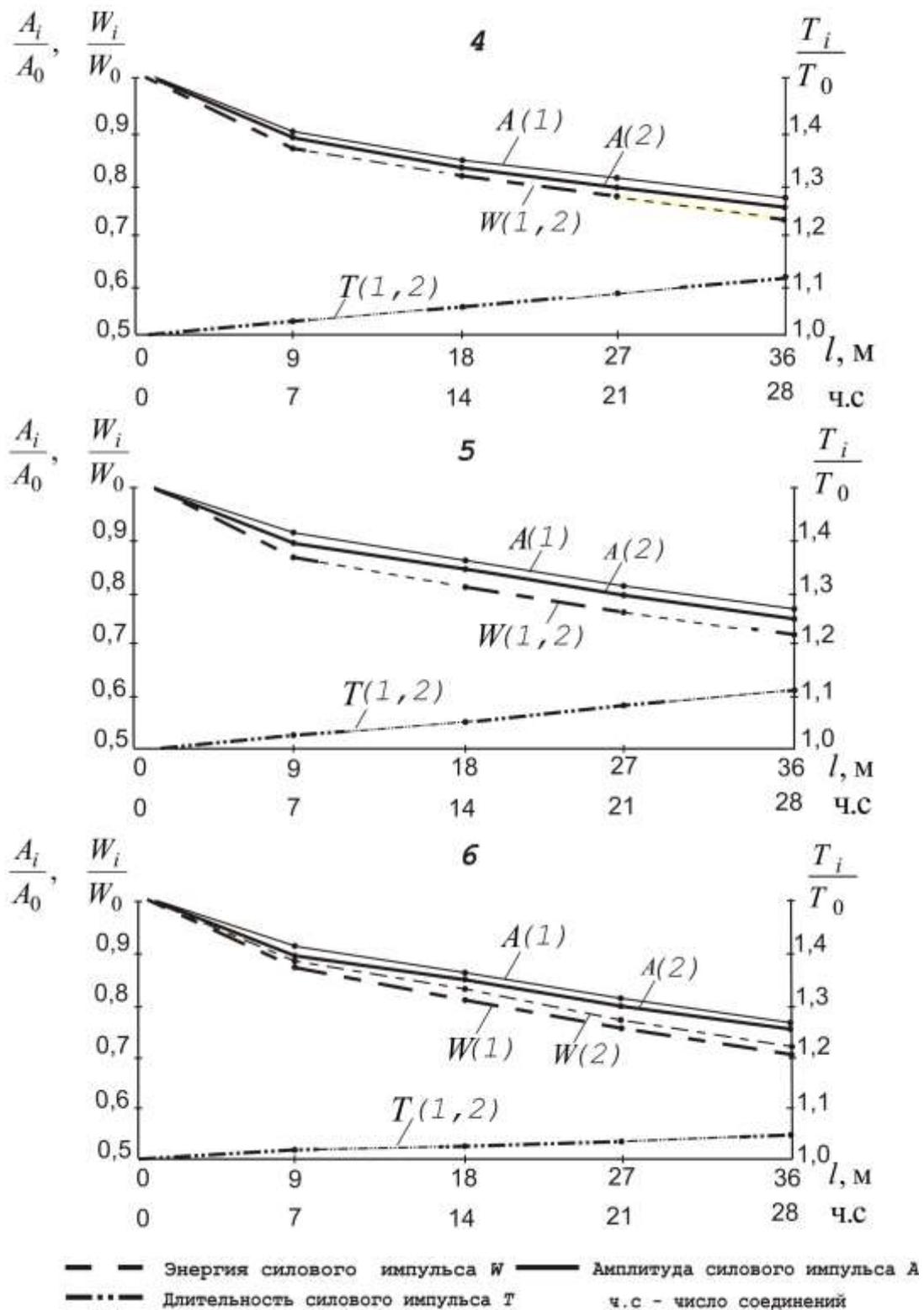


Рисунок 7 – Относительное изменение параметров силовых импульсов при распространении по бурильной колонне диаметром 33,5 мм с ниппельными соединениями закрытого типа:

4 – поршень буровой установки БУ - 70; 5 – диаметр бойка 75 мм, длина бойка 253 мм; 6 – диаметр бойка 75 мм, длина бойка 450 мм; l , м – место наклейки датчиков на бурильной колонне;

(1) – значение соответствующего параметра при скорости приложения ударной нагрузки 5 м/с (тонкая линия); (2) – значение соответствующего параметра при скорости приложения ударной нагрузки 7 м/с (утолщенная линия)

Данное явление связано с объемным напряженным состоянием на участке бурильной колонны, охваченном импульсами. Объемное напряженное состояние обусловлено присутствием поперечных радиальных и изгибных волн, которые не связаны с движением ПРИ на забой скважины.

Была проведена оценка влияния эффектов, вызванных наличием поперечных волн в бурильных трубах, на распространение продольных волн на основе приближенной постановки задачи [4, 35].

Уравнение движения волны деформации в бурильной трубе составим на основе принципа стационарности действия, согласно которому специальный функционал – действие (разность кинетической W_k и потенциальной W_{Π} энергий) принимает наименьшее значение:

$$\int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} (W_k - W_{\Pi}) r dr d\varphi dx dt. \quad (1)$$

Кинетическая энергия волны деформации равна:

$$W_k = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала бурильной трубы.

Потенциальная энергия определяется суммой энергий продольной деформации, продольно-сдвиговой, деформации изгиба:

$$W_{\Pi} = \frac{1}{2} \left[E \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + G \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + G \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Введем обозначения $a_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, $\frac{E}{G} = 2(1 + \nu)$ и перейдем от функционала к уравнению:

$$\frac{1}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет граничные условия, подразумевающие, что боковые поверхности цилиндра свободны от нагрузки и непрерывность $u_x = u(r, \varphi, x, t)$ по φ :

$$u_x = u_0(r, \varphi) e^{i\omega t} \text{ при } x = 0, \quad (5); \quad \tau_{xr} = G \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r_0; r = r_1, \quad (6);$$

$$u|_{\varphi=0} = u|_{\varphi=2\pi}. \quad (7)$$

Волновое уравнение (4) в цилиндрических координатах удобно решать методом разделения переменных в виде бегущих в положительном направлении оси x гармонических волн [4, 35].

Получена зависимость для определения смещения сечения бурильной трубы на заданном удалении x от нагружаемого торца бурильной трубы в зависимости

от круговой частоты ω , волнового числа χ_{km} и геометрических параметров бурильных труб, а именно внутреннего (r_0) и наружного (r_1) радиусов:

$$u(r, \varphi, x, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[J_m(\gamma r) N'_m(\gamma r_0) - N_m(\gamma r_0) J'_m(\gamma r_0) \right] \cdot \bar{D} e^{-i\chi x} \cdot \bar{E} e^{im\varphi} \cdot \bar{A} e^{i\omega t}. \quad (8)$$

При этом множитель в скобках представляет собой одну из форм решения дифференциального уравнения Бесселя:

$$R_m(r) = J_m(\gamma r_1) N'_m(\gamma r_0) - N_m(\gamma r_1) J'_m(\gamma r_0),$$

а J_m и N_m – соответственно функции Бесселя и Неймана m -го порядка, γ – корни уравнения Бесселя. Обозначим γ_{km} k -тый корень уравнения (9) и определим их в соответствии с выражением:

$$\gamma_{km} \left[J'_m(\gamma_{km} r_1) N'_m(\gamma_{km} r_0) - N'_m(\gamma_{km} r_1) J'_m(\gamma_{km} r_0) \right] = 0. \quad (9)$$

Из проведенных расчетов следует, что $\gamma_{00} = 0$, $0 < \gamma_{10} < \gamma_{01}$.

При любой комбинации m и k получаем решение уравнения (4), тогда решение (8) представим следующим образом:

$$u(r, \varphi, x, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{km} \cdot e^{im\varphi} \cdot \left[J_m(\gamma r_1) N'_m(\gamma r_0) - N_m(\gamma r_1) J'_m(\gamma r_0) \right] e^{i(\omega t - \chi_{km} x)}. \quad (10)$$

При этом

$$\chi_{km} = \sqrt{\frac{\omega^2}{a_0^2} - \frac{\gamma_{km}^2}{2(1+\nu)}}. \quad (11)$$

Это означает, что на частотах $\omega < \frac{\gamma_{10} a_0}{\sqrt{2(1+\nu)}}$ лишь член с амплитудой A_{00}

представляет продольную плоскую волну деформации, имеющую волновое число

$\chi_{00} = \frac{\omega}{a_0}$. Другие члены при $k^2 + m^2 > 0$ – это экспоненциально убывающие с ро-

стом x волны.

Разрушение горной породы будет обеспечиваться воздействием упругих волн в частотном диапазоне:

$$\omega \leq \omega_0 = \frac{\gamma_{10} a_0}{\sqrt{2(1+\nu)}}, \quad (12)$$

где γ_{10} – наименьший, отличный от нуля корень уравнения (9).

Поведение гармонической волны, которая несет энергию для разрушения горной породы, определится выражением:

$$u_x = A_{00} e^{i(\omega t - \chi_{00} x)} \text{ при } \omega \leq \omega_0, \quad (13)$$

где $\chi_{00} = \frac{\omega_0}{a_0}$.

Величину A_{00} найдем по формуле:

$$A_{00} = \frac{1}{\pi(r_1^2 - r_0^2)} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_1} r \cdot u_0(r, \varphi) dr d\varphi, \quad (14)$$

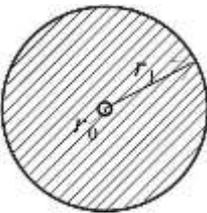
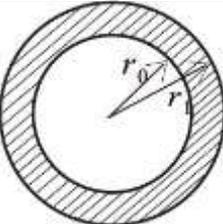
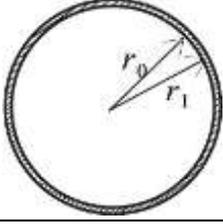
где $\pi \cdot (r_1^2 - r_0^2)$ – площадь поперечного сечения цилиндра, тогда A_{00} – среднее значение продольного смещения $u_0(r, \varphi)$; $r dr d\varphi$ – элемент площади.

Поскольку в спектре упругой волны, формируемой в бурильной колонне присутствуют составляющие с частотами $\omega > \omega_0$, часть энергии уйдет на возбуждение поперечных волн.

Таким образом, установлено, что на участках постоянного поперечного сечения бурильных труб передача осуществляется с меньшими потерями энергии при увеличении относительной толщины стенок бурильных труб. Это способствует снижению доли энергии, приходящейся на поперечные деформации, совершенно не связанные с разрушением горной породы, т.к., только продольная деформация обеспечивает процесс внедрения буровой коронки в горную породу.

Из таблицы 3 следует, что доля энергии удара, передаваемая через волновод сплошного сечения будет больше, чем через тонкостенную трубу.

Таблица 3 – Значения первых корней γ_{km} уравнения

$r_1, \text{ м}$	$r_0, \text{ м}$	$\omega_0, \text{ с}^{-1}$	Вид сечения волновода	m	$k = 0 (0,0001)$	$k = 1$
0,017	0,001	346 541,8		0	317,20	-
				1	107,36	-
				2	179,65	-
				3	176,471	-
0,017	0,012	223 657,6		0	2,00	128,91
				1	69,29	-
				2	138,49	-
				3	176,47	-
0,017	0,016	195 672,1		0	1,13	129,18
				1	60,62	-
				2	123,23	-
				3	176,47	-

В процессе ударно-вращательного бурения соединение труб испытывает

влияние нагрузок, вызванных действием осевой нагрузки, импульса силы, а также крутящего момента.

Надежная работа резьбового соединения обеспечивается, прежде всего, снижением доли потерянной в нём энергии волны деформации. Энергия волны, направленная не на продольное перемещение бурильной колонны с ПРИ, а рассеянная в соединении, связана с неоднократными знакопеременными деформациями в нём и нагревом.

Многими исследователями высказываются противоречивые суждения о величине таких потерь: указываются значения 6 % на одно соединения, 1,1 %, 0,4 % и т.д.

Главной причиной потери энергии волны деформации в соединениях является работа сил трения при прохождении волн деформаций.

Весьма важным является вопрос, каким образом можно сократить величину силы неупругого сопротивления.

Для рассматриваемого в работе нового типа резьбового соединения автором установлена зависимость средней величины диссипативной силы от воздействующего крутящего момента: при увеличении крутящего момента отмечается максимальная величина этой силы при прикладываемой нагрузке порядка 150 Н·м (рисунок 8). Подобный характер зависимости объясняется направлением поперечной деформации бурильных труб – при сжатии резьбовой части труб соединения в процессе прохождения силового импульса поперечная деформация направлена от ниппеля. При достижении определенной величины крутящего момента давление в контактах витков и диссипативная сила в резьбе соединения снижаются.

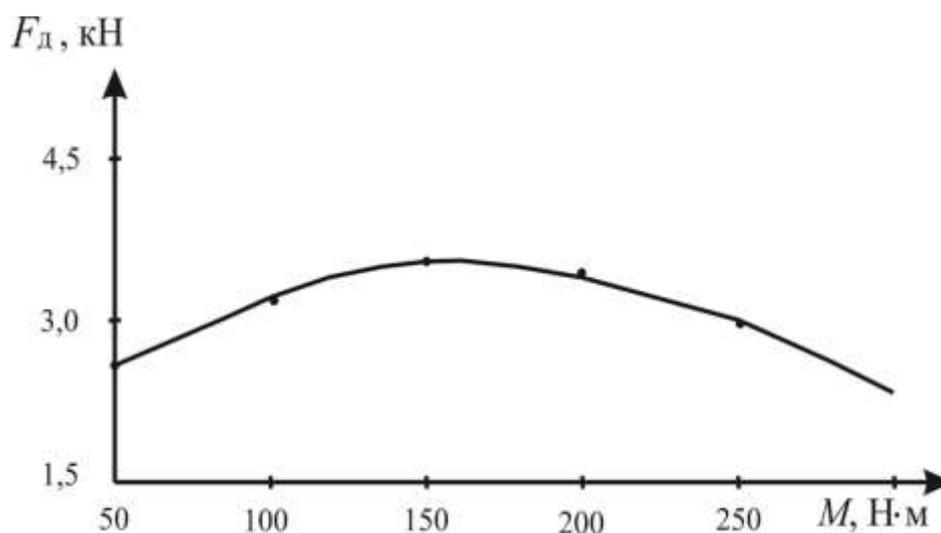
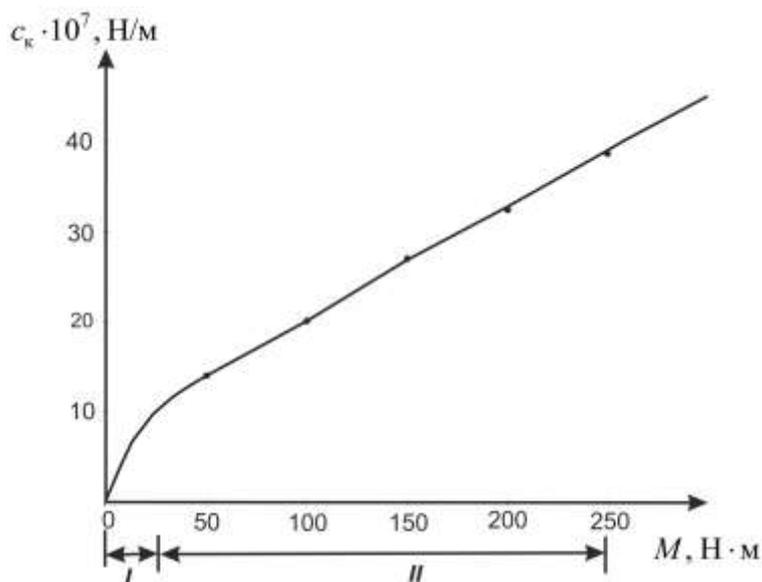


Рисунок 8 – Зависимость диссипативной силы F_d от крутящего момента M

Учитывая, что общая жёсткость резьбового соединения труб (c_0) включает жёсткости ниппеля (c_n), резьбового участка бурильных труб ($c_{тр}$) и контакта между витками резьбы труб и ниппеля (c_k)

$$c_k = \frac{c_n(c_0 - c_{тр})}{c_n + c_{тр} - c_0}.$$

был построен график зависимости контактной жёсткости ниппельного соединения труб от величины прилагаемого крутящего момента (рисунок 9).



I – процесс деформации шероховатостей во взаимодействующих витках резьбы;

II – стабильный режим работы ниппельного соединения в зоне действия закона упругости

Рисунок 9 – График зависимости контактной жёсткости соединения c_k от крутящего момента M (без воздействия импульсного сжатия)

Из графика следует, что увеличение крутящего момента приводит к повышению жёсткости контакта между витками резьбы труб и ниппеля. Исследуемые параметры изменяются в соответствии с параболическим законом. При этом участок *I* на графике соответствует процессам деформации шероховатостей во взаимодействующих витках резьбы, а участок *II* – стабильному режиму работы ниппельного соединения в зоне действия закона упругости, где изменение жёсткости контакта взаимодействующих витков резьбы от крутящего момента имеет линейный характер.

Таким образом, коэффициент передачи импульса силы можно повысить за счет рационального подбора жёсткостей резьбы труб и ниппеля. Увеличение жёсткости контакта между витками резьбы труб и ниппеля уменьшает их относительное перемещение, при этом работа диссипативных сил снижается.

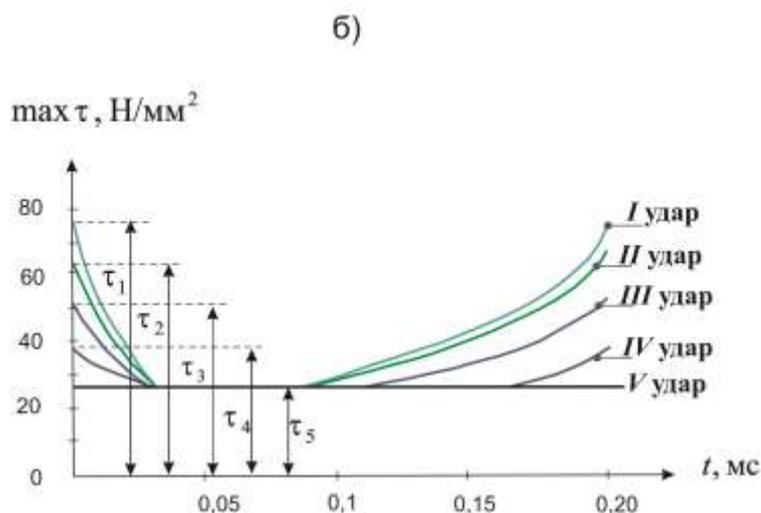
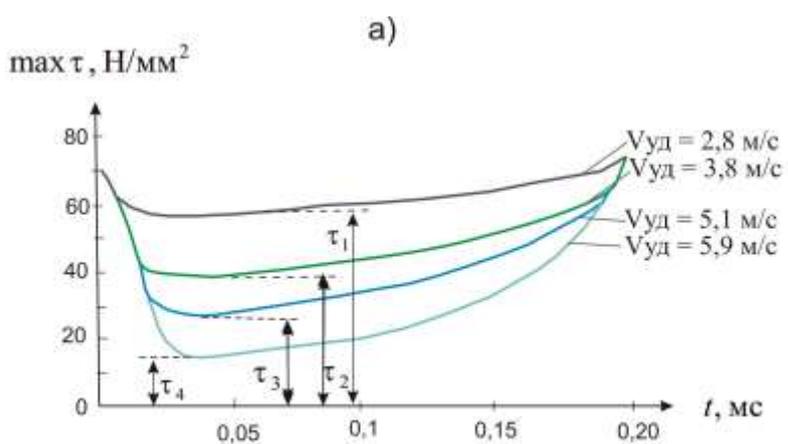
Экспериментами установлено, что импульсы силы, формируемые при ударе, способствуют снижению тангенциальных напряжений в ниппеле, возникающих в элементах соединений буровой колонны в результате приложения крутящего момента [2, 8, 24, 25].

Изначально, при сборке буровой колонны, ниппельное соединение труб подвергается деформации от действия осевой силы на упорный стык. Усилие затяжки, действующее в ниппельном соединении закрытого типа в начальный момент, вызывает сжатие последних и растяжение ниппеля. В процессе распространения импульса силы происходит увеличение усилия сжатия в резьбовой части

бурильных труб до амплитудных значений самого силового импульса и снятие усилия растяжения в ниппеле.

После полного освобождения ниппеля от нагрузки растяжения появляется зазор между смежными витками ниппеля и бурильных труб, что приводит к дополнительному осевому перемещению резьбовой части трубы относительно ниппеля за счет крутящего момента. Все это вызывает в результате завершения прохождения импульса через соединение дополнительное растяжение ниппеля и сжатие резьбовой части трубы, равных по величине – происходит дозатяжка резьбового соединения.

На рисунке 10 приведены кривые распределения статических тангенциальных напряжений в ниппеле при одновременном воздействии крутящего момента 196 Н·м и импульсов силы, сформированных при различной скорости приложения ударной нагрузки (рисунок 10 а).



- а) продольные удары по бурильной колонне при разной скорости приложения ударной нагрузки;
 б) нанесение ударов при одной скорости приложения ударной нагрузки по бурильной колонне

Рисунок 10 – Распределение тангенциальных напряжений в ниппеле при совместном воздействии крутящего момента и импульсов силы

Полученные кривые свидетельствуют о том, что повышение скорости приложения ударной нагрузки приводит к снижению статических тангенциальных напряжений, которые для скорости приложения ударной нагрузки 5,9 м/с уменьшились на 75 %.

Также были проведены исследования, в которых произведен ряд ударов при постоянной скорости приложения ударной нагрузки, равной 5,1 м/с (рисунок 10 б). При этом также наблюдалось снижение статических тангенциальных напряжений в ниппеле. Приблизительно через 5 ударов напряжения снижались примерно в 3 раза (рисунок 10 б, V удар), что соответствует прекращению дозатяжки рассматриваемого резьбового соединения.

При прохождении волны сжатия через соединение труб закрытого типа, витки ниппеля отходят от витков резьбовой части бурильных труб, и основная часть крутящего момента передается через упорный стык соединения.

Снижение нормальных нагрузок растяжения на витки резьбы ниппеля приводит к снижению тангенциальных напряжений благодаря существенному уменьшению или отсутствию сил трения между витками резьбы ниппеля и труб.

Второе научное положение. *Безбойковая гидромеханическая система, включающая упругий элемент с нелинейной зависимостью давления от объёма жидкости, вытесняемой плунжером в замкнутую полость упругого элемента, может быть использована вместо ударных механизмов буровых установок ударно-вращательного действия, а также как дополнительный компоновочный элемент, приводящий к интенсификации вращательного бурения, путем формирования направленных, высокоэнергетических силовых импульсов.*

Развивая научные исследования по повышению механической скорости бурения путем дополнительного воздействия на буровые коронки импульсов силы, проводимые представителями научной школы кафедры бурения скважин Томского политехнического университета Рожковым В.П., Нейштетером И.А. и др., применительно к скважинам малого диаметра в условиях подземных рудников, нами предложен механизм генерирования импульсов силы, в котором исключены динамические потери энергии, вызванные возвратно-поступательным движением бойка, а также потери на трение жидкости при её движении по рукавам высокого давления. Их величина составляют примерно 10 % от инерционных потерь.

Разработанный безбойковый гидравлический механизм может применяться вместо ударных механизмов буровых агрегатов ударно-вращательного действия, кроме того, как источник направленных высокоэнергетических упругих колебаний для буровых агрегатов вращательного действия. Импульсы формируются в замкнутом контуре с нелинейной характеристикой упругого элемента практически без перетекания в нем жидкости (рисунок 11).

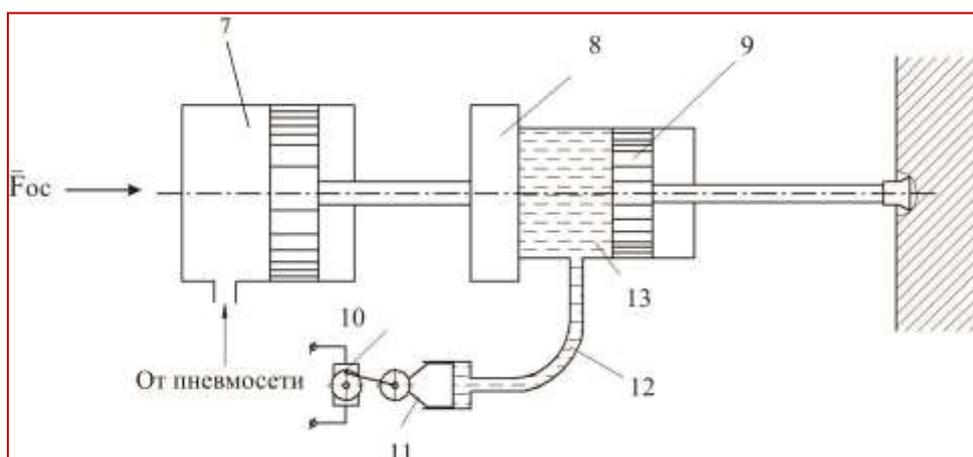
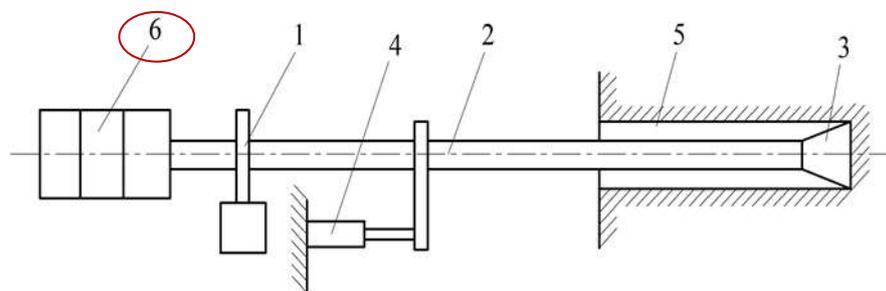
Исследование работы такой системы проводилось на специальном стенде. Результаты в виде осциллограмм импульсов получены методами тензометрирования [10,].

Предлагаемый гидравлический механизм включает две колебательные системы:

- 1) вынужденные синусоидальные колебания давления жидкости, создаваемые

мые генератором колебаний. При этом периодические перемещения плунжера вытесняют в замкнутый объем жидкость, создавая в нем импульсы давления;

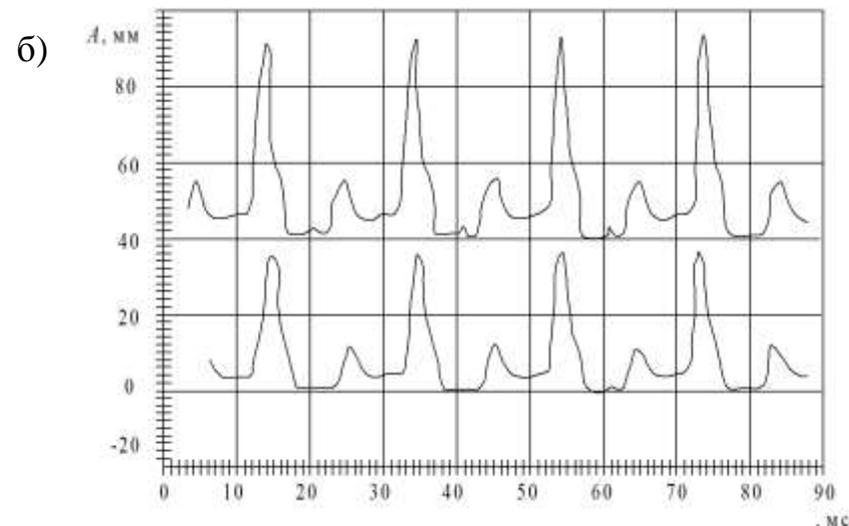
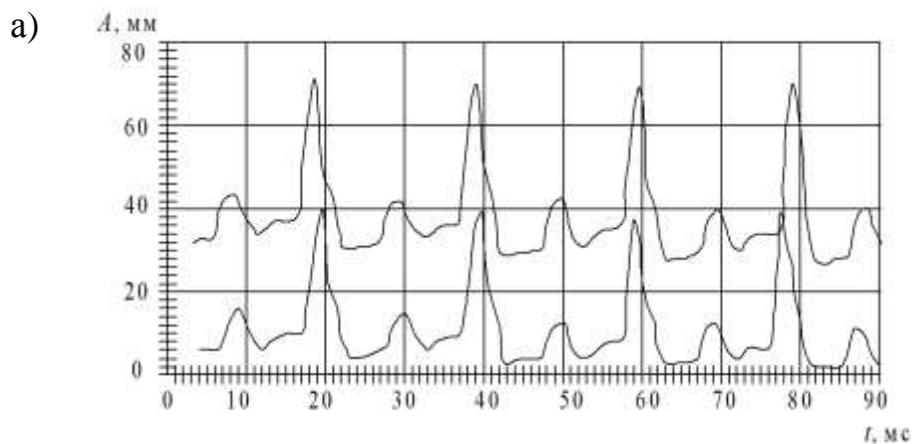
2) обычный классический колебательный контур – масса с упругим элементом.



Пат. 69135 Российская Федерация, 2008 г. [49]
 Пат. 71369 Российская Федерация, 2008 г. [50]
 Пат. 79923 Российская Федерация, 2009 г. [51]
 Пат. 79924 Российская Федерация, 2009 г. [52]
 Пат. 124298 Российская Федерация, 2013 г. [55]

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1 – вращатель; | 7 – пневмоподатчик (пневмопружина); |
| 2 – бурильная колонна; | 8 – инерционная масса (чугунная пластина); |
| 3 – породоразрушающий инструмент; | 9 – поршень гидравлического цилиндра; |
| 4 – механизм подачи бурового снаряда; | 10 – электродвигатель; |
| 5 – скважина; | 11 – источник вынужденных колебаний давления жидкости (пульсатор); |
| 6 – генератор импульсов давления | 12 – рукав высокого давления; |
| | 13 – жидкость в гидравлическом цилиндре; |
| | F_{oc} – осевое усилие подачи на забой скважины |

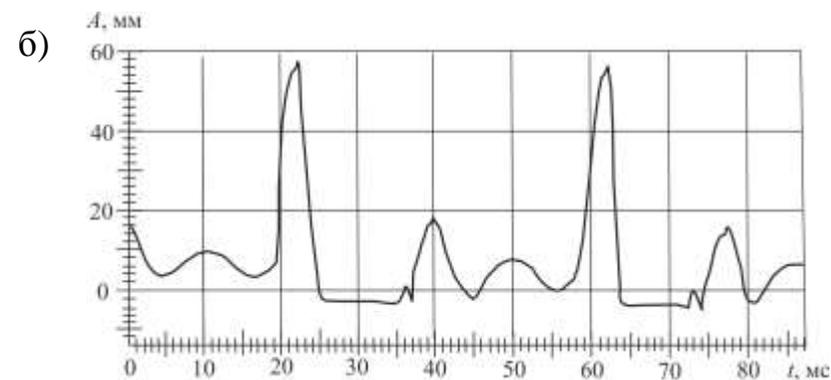
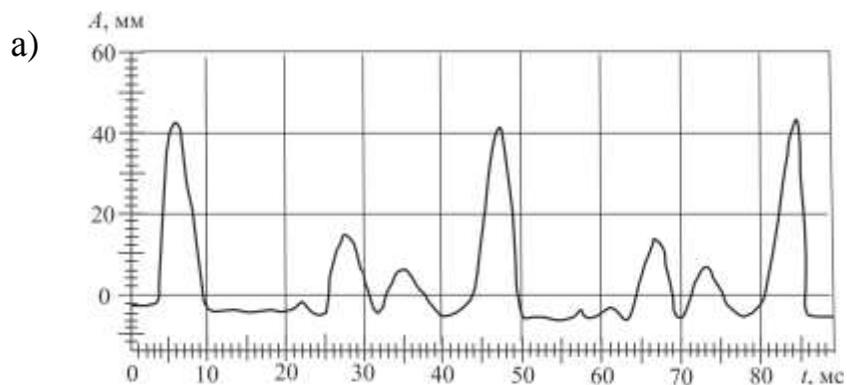
Рисунок 11 – Технологические элементы и механизмы бурового агрегата, оснащенного безбойковым гидравлическим механизмом формирования импульсов силы



а) – РВД: диаметр $d = 16$ мм, длина $l = 2,5$ м; б) – РВД: диаметр $d = 20$ мм, длина $l = 0,95$ м

верхний канал – амплитуда силы импульса в бурильной трубе; нижний канал – давление в гидравлическом цилиндре (20 мм соответствует 36 кН); частота вынужденных колебаний пульсатора $\omega_r = 25$ Гц

Рисунок 12 – Осциллограммы импульсов сил



а) – 9,4 кН; б) – 11,75 кН; РВД: диаметр $d = 20$ мм, длина $l = 1,16$ м

Рисунок 13 – Зависимость амплитуды силы от времени при разной осевой нагрузке (20 мм соответствует 36 кН)

Исследование предлагаемого механизма позволили выявить:

- характер влияния линейных размеров рукава высокого давления на параметры импульса силы в буровом инструменте (рисунок 12);
- закономерности изменения амплитуды силы импульса от прилагаемой осевой нагрузки (рисунок 13).

Опыты показали, что импульсы давления формируются при ходе плунжера и инерционной массы на сжатие замкнутого объёма жидкости [10].

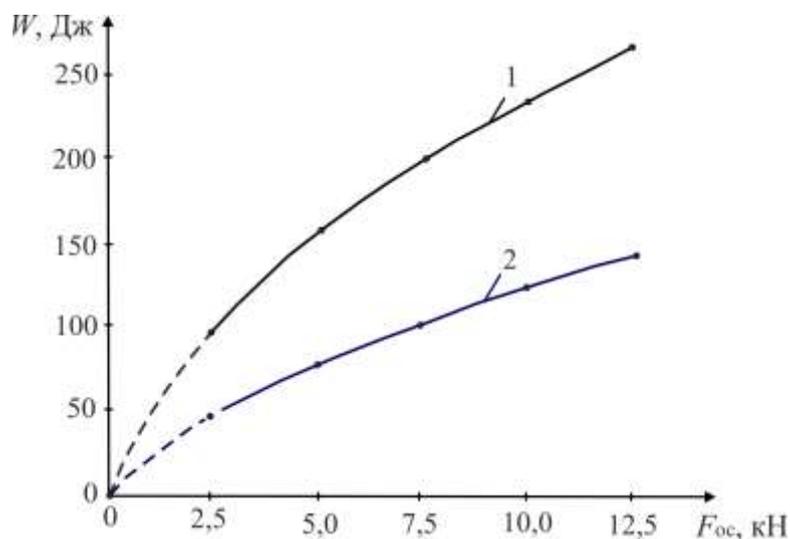
Наибольшие значения амплитуды и энергии волны деформации в буровом инструменте отмечаются при меньшей длине и большем диаметре рукава высокого давления (РВД). Это объясняется тем, что при большей длине РВД, соединяющего гидропульсатор и гидравлический цилиндр, отмечается меньшее относительное изменение объёма $\frac{\Delta V}{V}$ при тех же параметрах гидропульсатора, что вызывает снижение амплитуды импульса давления жидкости в гидравлическом цилиндре, а, значит, и импульса силы в буровой колонне. Кроме того, при уменьшении диаметра РВД увеличивается его жёсткость при одновременном повышении сопротивления пульсациям жидкости. Это также приводит к уменьшению амплитуды и энергии импульсов силы.

Как отмечается многими авторами наиболее полно при разрушении горной породы используется энергия волны деформации, характеризующаяся относительно сглаженным передним фронтом и круто падающим задним фронтом.

Энергия силовых импульсов, полученных на экспериментальном стенде, соответствует энергии единичного удара современных буровых агрегатов (рисунок 14).

Минимальная длительность импульса давления, а соответственно и импульса силы, отмеченная в результате испытаний, равна 5 мс, что на порядок выше длительности удара в ударных механизмах современных буровых установках (0,2 – 0,6 мс).

В целом результаты убедительно показали, что предлагаемый безбойковый механизм является перспективной разработкой.



1 – объём РВД $V = 265 \text{ см}^3$;

2 – $V = 515 \text{ см}^3$; $m = 230 \text{ кг}$

Рисунок 14 – Зависимость энергии силовых импульсов от осевой нагрузки

Третье научное положение. Закономерности изменения энергоёмкости разрушения горной породы от параметров ударной системы определяются особенностями взаимодействия импульсов силы в буровой колонне с горной породой:

- при равной энергии удара для штыревой коронки импульс силы с более продолжительным передним фронтом обеспечивает меньшую энергоёмкость разрушения за счет выкола крупных фракций; для долотчатой и крестовой коронок отмечается обратная зависимость;
- при энергии удара более 60 Дж и скорости приложения ударной нагрузки 5 м/с штыревая коронка формирует частицы шлама бóльшей крупности по сравнению с долотчатой и крестовой коронками. При скорости удара 7 м/с показатели фракционного состава шлама приближаются к значениям для долотчатой и крестовой коронок.

Для исследования рациональных параметров ударного взаимодействия и оценки эффективности ПРИ различного типа с горной породой в качестве модельного материала был принят гранит. Гранит представляет собой относительно однородную породу, разброс результатов испытаний невелик, кроме того данный модельный материал использовался многими исследователями, что позволяет сопоставлять результаты различных исследований.

Эксперимент проводился на модифицированном стенде, использованном при исследовании процесса передачи импульсов силы по бурильной колонне (рисунок 5) [9, 15, 17, 22].

В качестве ПРИ были приняты типовые буровые коронки диаметром 43 мм: штыревая (рисунок 15 а), крестовая (рисунок 15 б) и долотчатая (рисунок 15 в), имеющие соответственно суммарную длину лезвия: 49; 60; 43 мм.



Рисунок 15 – Типовые буровые коронки

В ходе эксперимента оценивалось влияние формы коронки, предупредительной скорости бойка, его размеров и массы, а также угла поворота ПРИ после удара на величину объёма разрушенной породы, углубления лунки за удар и удельной энергоёмкости разрушения горной породы. Удары наносились в предварительно подготовленную лунку.

Воспроизводимость экспериментов считалась приемлемой при получении достаточно близких значений результатов семи – десяти опытов в каждой серии. В отдельных случаях число опытов увеличивалось до 20–40. Каждый отдельный опыт включал десять единичных ударов.

Определение удельной энергоёмкости разрушения проводилось с учётом общей энергии, формируемой бойком при ударе, которую относили к объёму разрушенной горной породы.

Всего проведено 862 опыта (72 серии ударов). Обобщенные результаты опытов для штыревой коронки представлены в таблице 5. Аналогичные таблицы, составленные для крестовой и долотчатой коронок, приведены в диссертации.

Полученные значения энергоёмкости разрушения гранита коррелируются с экспериментами других авторов (Иванова К.И., Куликова И.В., Мавлютова М.Р.) и находятся в диапазоне 220–440 Дж/см³.

Полученные нами результаты позволили выявить следующие особенности и

основные закономерности разрушения горной породы с точки зрения оценки энергоёмкости процесса разрушения:

– предупредная скорость бояка в рассматриваемом диапазоне изменения (5 и 7 м/с) несущественно влияет на энергоёмкость разрушения; причем при скорости удара 7 м/с графики изменения удельной энергоёмкости разрушения от величины удельной энергии удара имеют подобный, но менее выраженный гиперболический характер, что подтверждает вывод некоторых авторов о снижении влияния типа буровой коронки на процесс разрушения горной породы при увеличении энергии удара (рисунки 16, 17);

– опыты по исследованию влияния формы ударника на энергоёмкость разрушения горной породы бойками с постоянной массой, но различной длиной и диаметром дали следующие результаты: с увеличением длины ударника от 450 до 700 мм энергоёмкость разрушения для штыревой коронки снижается на 6–10 %, а для крестовой и долотчатой увеличивается на 9–16 % и до 5 % соответственно. Для крестовой и долотчатой коронок это можно объяснить влиянием чрезмерной длины бояка, а соответственно и большей длительности переднего фронта импульса, при которых не используется хвостовая часть силового импульса и приводит к повышению доли отражённой энергии. Для штыревой коронки не выявлено влияние длительности переднего фронта импульса силы на показатель энергоёмкости разрушения гранита;

– влияние угла поворота ПРИ между единичными ударами на энергоёмкость разрушения установлено для крестовой и долотчатой коронок. Очевидно, проявление данных закономерностей обусловлено различными условиями скалывания. Для крестовой коронки, практически для всех бойков, при угле поворота 40° отмечается наименьшее значение энергоёмкости разрушения. Для долотчатой коронки при малой энергии удара (31 Дж) рациональным является угол поворота ПРИ в 20° . В целом увеличение энергии удара приводит к увеличению рационального угла поворота ПРИ после удара. Для штыревой коронки воздействие данного параметра не установлено.

На основе ситового анализа был исследован гранулометрический состав шлама гранита, поскольку он также является показателем величины затрат энергии при бурении скважин. При этом выделили 5 классов крупности частиц: фракция частиц наименьшего диаметра ограничивалась диаметром 0,25 мм, диаметр частиц крупной фракции превышал 2 мм.

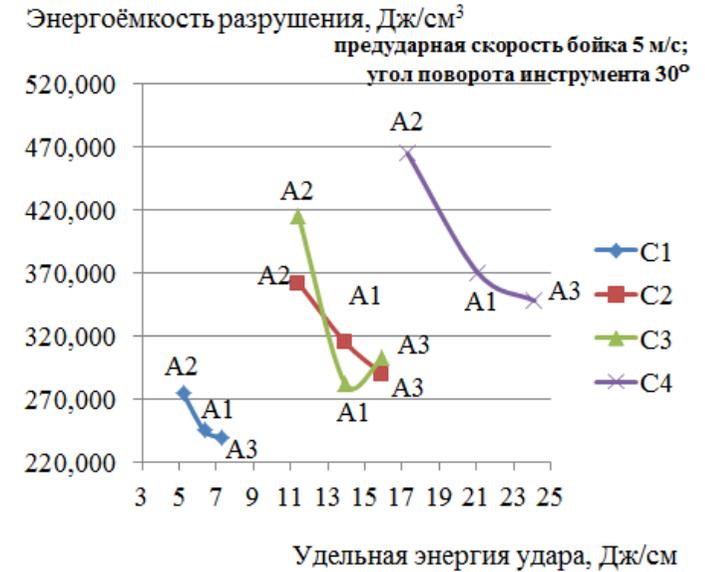
Были построены и проанализированы графики зависимости фракционного состава от диаметра выбуренных частиц для различных условий эксперимента. При предупредной скорости бояка 5 м/с и энергии удара с 68 Дж доля 0,25 мм-фракции шлама у штыревой коронки не превышает 49 %, доля частиц диаметром более 2 мм увеличивается в среднем до 10 %. При скорости удара 7 м/с содержание крупных фракций шлама значительно снижается, результаты близки к значениям для долотчатой и крестовой коронок [14, 17].

Из всех фракций максимальной по процентному содержанию является фракция 0,25 мм. Все указанные зависимости имеют выраженный гиперболический характер и стабильное процентное содержание выбуренных частиц определённого диаметра: содержание частиц наименьшего диаметра составляет 40–60 %; содержание частиц диаметром более 2 мм – 2–14 %.

Таблица 5 – Обобщенные результаты экспериментов для штыревой коронки

Коды факторов ¹ (серии ударов)				Удельная энергия удара, Дж/с	Средний объем разрушения за удар, см ³	Удельная энергоемкость разрушения, Дж/см ³	Углубление лунки за удар, мм	Процентное содержание частиц различных диаметров, %				
								менее 0,25 мм	0,25-0,5 мм	0,5-1,0 мм	1,0-2,0 мм	более 2 мм
A1	B1	C1	D1	6,35	0,130	242,978	0,09	51,23	21,89	15,24	9,09	2,54
A1	B1	C1	D2	6,35	0,130	241,107	0,09	51,04	19,38	15,12	10,74	3,72
A1	B1	C1	D3	6,35	0,126	249,552	0,09	54,85	18,88	14,01	9,46	2,82
A1	B2	C1	D1	12,45	0,255	242,029	0,15	51,84	19,67	15,07	9,01	4,41
A1	B2	C1	D2	12,45	0,225	273,948	0,15	52,20	19,36	15,21	9,37	3,86
A1	B2	C1	D3	12,45	0,237	259,258	0,15	51,82	19,35	14,92	9,28	4,63
A1	B1	C2	D1	13,92	0,212	328,403	0,14	48,81	19,58	15,16	9,26	7,20
A1	B1	C2	D2	13,92	0,212	325,949	0,14	42,01	18,88	15,52	10,25	13,35
A1	B1	C2	D3	13,92	0,237	290,315	0,16	43,86	17,95	15,30	12,89	10,00
A1	B2	C2	D1	27,29	0,432	312,814	0,3	49,99	19,01	15,47	10,27	5,28
A1	B2	C2	D2	27,29	0,409	328,942	0,29	52,84	19,40	14,72	8,66	4,38
A1	B2	C2	D3	27,29	0,455	295,113	0,25	54,92	18,41	14,20	8,75	3,72
A1	B1	C3	D1	13,92	0,231	297,082	0,16	42,87	18,17	16,25	13,22	9,50
A1	B1	C3	D2	13,92	0,240	287,519	0,17	43,71	19,23	16,11	11,60	9,34
A1	B1	C3	D3	13,92	0,259	264,772	0,16	43,75	18,90	16,09	12,08	9,16
A1	B2	C3	D1	27,92	0,460	292,465	0,29	55,12	19,22	14,02	8,13	3,52
A1	B2	C3	D2	27,92	0,456	295,051	0,29	52,74	20,07	14,78	9,24	3,17
A1	B2	C3	D3	27,92	0,455	295,659	0,3	52,93	19,27	14,39	9,19	4,22
A1	B1	C4	D1	21,09	0,289	361,199	0,19	44,19	18,25	15,53	11,77	9,88
A1	B1	C4	D2	21,09	0,278	374,564	0,19	48,08	18,32	14,82	10,34	8,42
A1	B1	C4	D3	21,09	0,282	373,081	0,16	53,97	18,81	13,87	8,03	5,31
A1	B2	C4	D1	41,33	0,479	427,043	0,31	46,34	18,60	16,11	12,15	6,80
A1	B2	C4	D2	41,33	0,519	392,444	0,34	53,51	19,07	14,55	9,11	3,75
A1	B2	C4	D3	41,33	0,499	408,313	0,37	57,55	18,07	13,39	7,83	3,16

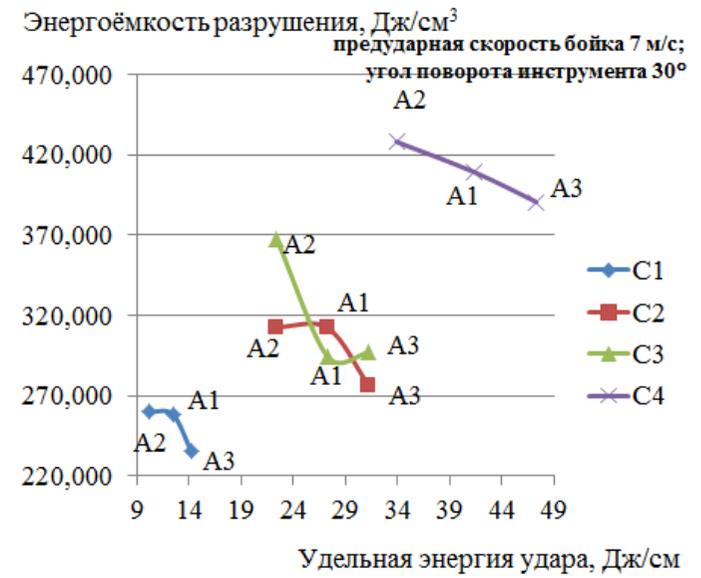
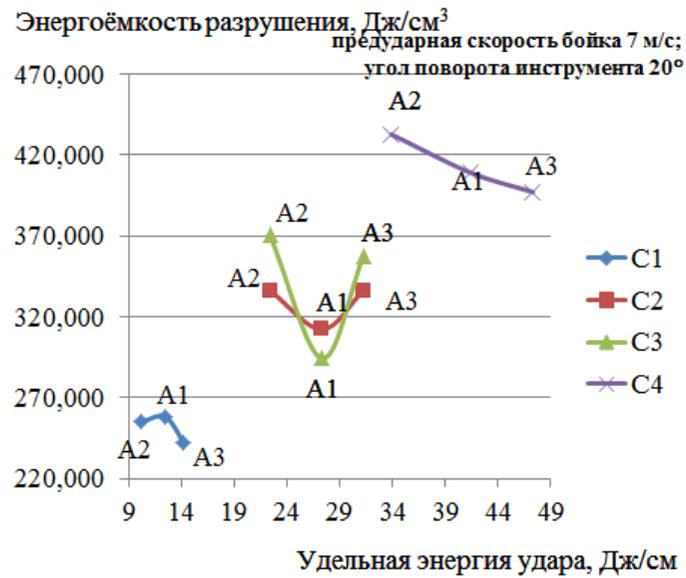
¹Примечание. *A* – тип буровой коронки: A1– штыревая. *B* – скорость приложения ударной нагрузки: B1 и B2 соответственно 5 и 7 м/с. *C* – тип ударника (таблица 2): C1 – боек длиной 350 мм и диаметром 35 мм, массой 2,5 кг; C2 – боек длиной 450 мм и диаметром 45 мм, массой 5,48 кг; C3 – боек длиной 700 мм и диаметром 35 мм, массой 5,48 кг; C4 – боек длиной 253 мм и диаметром 75 мм, массой 8,32 кг. *D* – угол поворота коронки: D1 – 20°; D2 – 30°; D3 – 40°.



C1 – длина бойка 350 мм; диаметр 35 мм; масса 2,5 кг;
 C2 – длина бойка 450 мм; диаметр 45 мм; масса 5,48 кг;
 C3 – длина бойка 700 мм; диаметр 35 мм; масса 5,48 кг;
 C4 – длина бойка 253 мм; диаметр 75 мм; масса 8,32 кг;
 A1 – штыревая, A2 – крестовая, A3 – долотчатая коронки

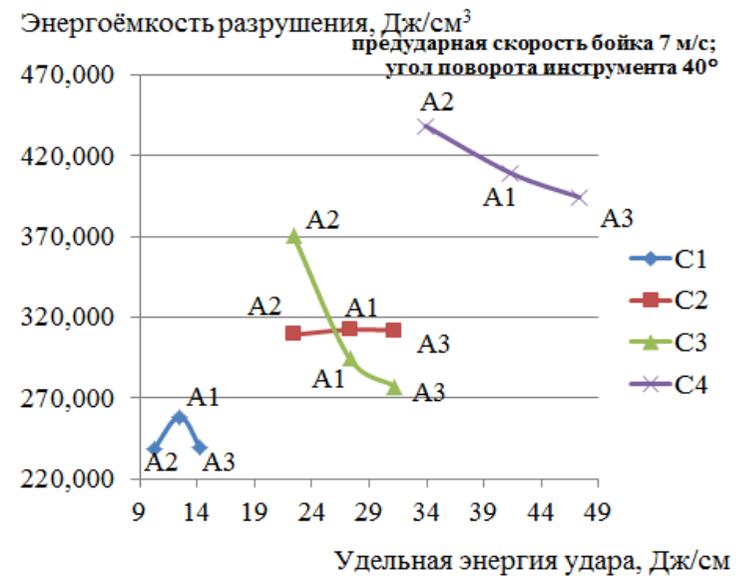
Рисунок 16 – Зависимости удельной энергоёмкости разрушения горной породы силовыми импульсами, сформированными различными бойками от удельной энергии удара при предварительной скорости бойка 5 м/с





C1 – длина бойка 350 мм; диаметр 35 мм; масса 2,5 кг;
 C2 – длина бойка 450 мм; диаметр 45 мм; масса 5,48 кг;
 C3 – длина бойка 700 мм; диаметр 35 мм; масса 5,48 кг;
 C4 – длина бойка 253 мм; диаметр 75 мм; масса 8,32 кг;
 A1 – штыревая, A2 – крестовая, A3 – долотчатая коронки

Рисунок 17 – Зависимости удельной энергоёмкости разрушения горной породы силовыми импульсами, сформированными различными бойками от удельной энергии удара при предударной скорости бойка 7 м/с



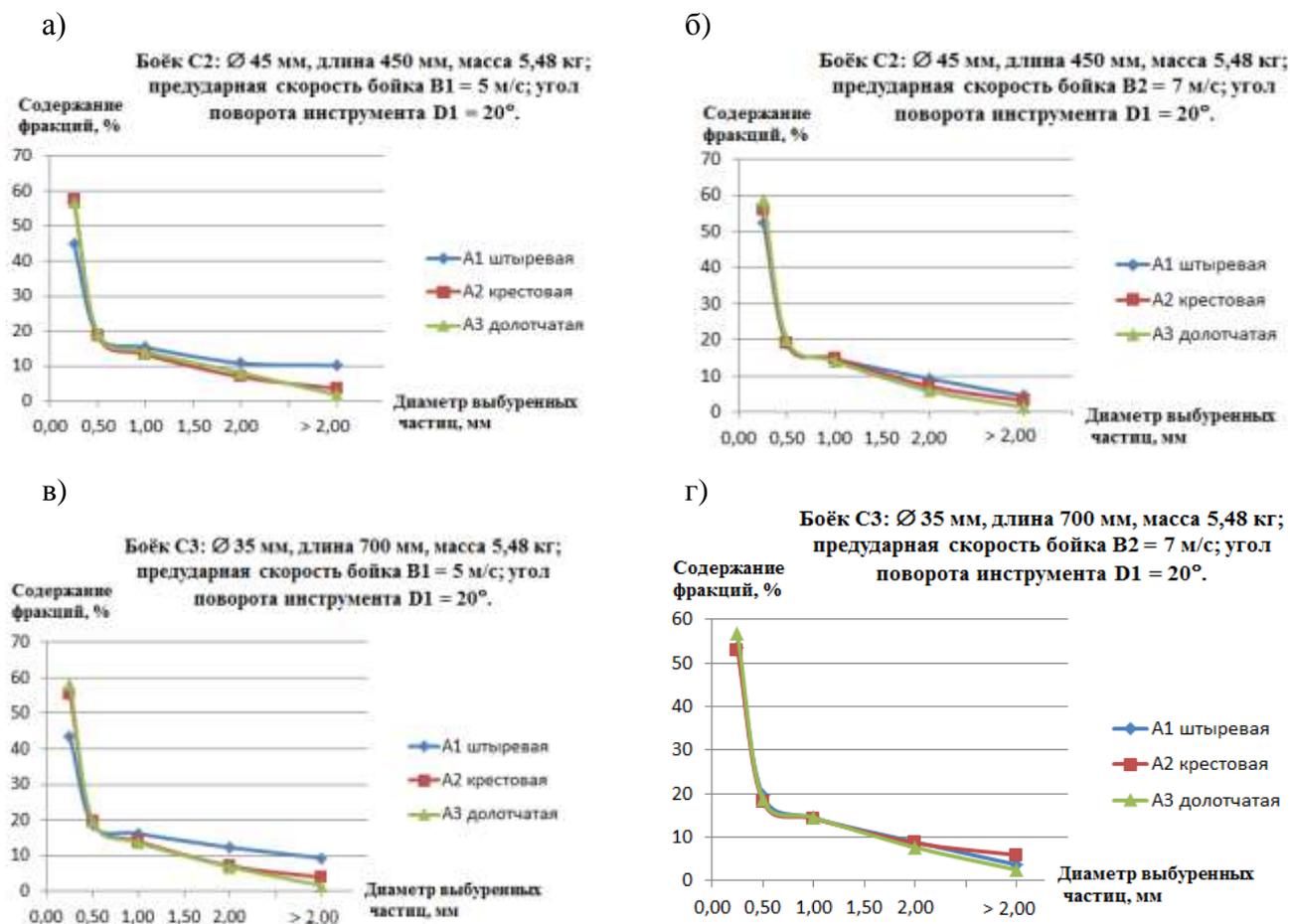


Рисунок 18 – Графики зависимости процентного содержания частиц шлама от их диаметра для некоторых условий эксперимента

Крупность шлама определяется типом буровой коронки, энергией удара, углом поворота бурового инструмента (для долотчатой и крестовой коронок), скоростью приложения ударной нагрузки.

Таким образом, для штыревой коронки при скорости удара 7 м/с содержание крупных фракций шлама значительно снижается, результаты приближаются к значениям для долотчатой и крестовой коронок.

Четвертое научное положение. Разработанная модель работы бурового агрегата и методика расчета и обоснования его рациональных параметров для бурения скважин из подземных горных выработок позволяет на этапе проектирования оценить их ресурсоэффективность на основе таких технико-экономических показателей, как производительность, удельные приведенные затраты, себестоимость метра пробуренной скважины, материалоемкость станка и бурового инструмента и т.д.

Какой бы совершенной не была технология бурения скважин, очевидно, что сменную производительность бурения сложно существенно увеличить, так как затраты времени на выполнение вспомогательных и подготовительно-заключительных операций, напрямую связанных с обеспечением полного технологического цикла бурения скважин в подземных условиях, могут достигать 50 %.

Это приводит к необходимости поиска возможностей снижения времени на их выполнение.

Все операции, выполняемые буровым агрегатом можно разделить на 2 группы: операции, длительность выполнения которых не определяется параметрами агрегата и приводов его механизмов (обозначим – T_1), и операции, время выполнения которых зависит от последних (обозначим – $T_{з.п.}$).

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что наиболее существенное влияние на производительность бурения оказывают операции второй группы [6, 18, 19, 27].

Продолжительность этих операций определяется конструктивными и режимными параметрами работы бурового агрегата, приводов и инструмента. Кроме того, рост производительности бурения за счет совершенствования параметров агрегата и приводов должен сопровождаться повышением уровня его экономической эффективности. Взаимосвязь всех параметров и процессов возможно представить математической моделью работы бурового агрегата.

Входными данными в модели являются: исходные параметры бурового агрегата, приводов, инструмента; крепость горной породы; количество скважин в веере и их длина.

При этом суть моделирования заключается в математическом выражении составляющих производительности, экономических показателей через параметры бурового агрегата и приводов механизмов. Далее каждый параметр изменяется на определенный интервал и среди вновь полученных значений выбирается тот параметр, который обеспечил бы максимальное снижение средней продолжительности операций, при соблюдении заданных ограничений.

Таким образом, путем многошагового поиска на выходе получаем рациональные параметры бурового агрегата, обеспечивающие максимальное приращение производительности в соответствии с поставленными целями.

Наиболее удобным и лучше других характеризующим процесс исследования вспомогательных операций критерием является средняя продолжительность операции, выполняемой приводом.

Выявить условия, определяющие экономический эффект позволяет технико-экономическая модель процесса бурения.

Данная технико-экономическая модель позволяет определить такие параметры буровой установки и её приводов, которые обеспечивают максимальную или близкую к ней производительность бурения, но при этом удельные приведённые затраты, себестоимость метра пробуренной скважины не превышали бы определённого уровня. Кроме того в модель могут входить дополнительные ограничения, например, вес и мощность буровой установки.

Процесс поиска рациональных параметров бурового агрегата на основе предложенной технико-экономической модели укрупнённо включает следующие действия [30]:

- 1). Представление всего цикла бурения скважины в виде двух групп операций.
- 2). Математическое представление зависимостей длительности операций группы $T_{з.п.}$ от параметров буровой установки и приводов её механизмов.
- 3). Определение граничных значений параметров буровой установки и при-

водов её механизмов.

4). Определение себестоимости метра пробуренной скважины, удельных приведённых затрат, относительного веса и удельной мощности буровой установки соответственно при исходных значениях параметров.

5). Определение интервалов изменения параметров буровой установки и приводов её механизмов.

6). Вычисление средней продолжительности операции группы $T_{з.п.}$ при исходных значениях параметров буровой установки и приводов её механизмов.

7). Вычисление средней продолжительности вспомогательных технологических операций при изменении каждого параметра буровой установки и приводов её механизмов на заданный интервал.

8). Многошаговый поиск параметров, обеспечивающих максимальное приращение производительности при соблюдении заданных ограничений.

Пример оптимизации одной из установок для бурения скважин малого диаметра буровой установки с пневмогидравлическим приводом приведён в таблице 8.

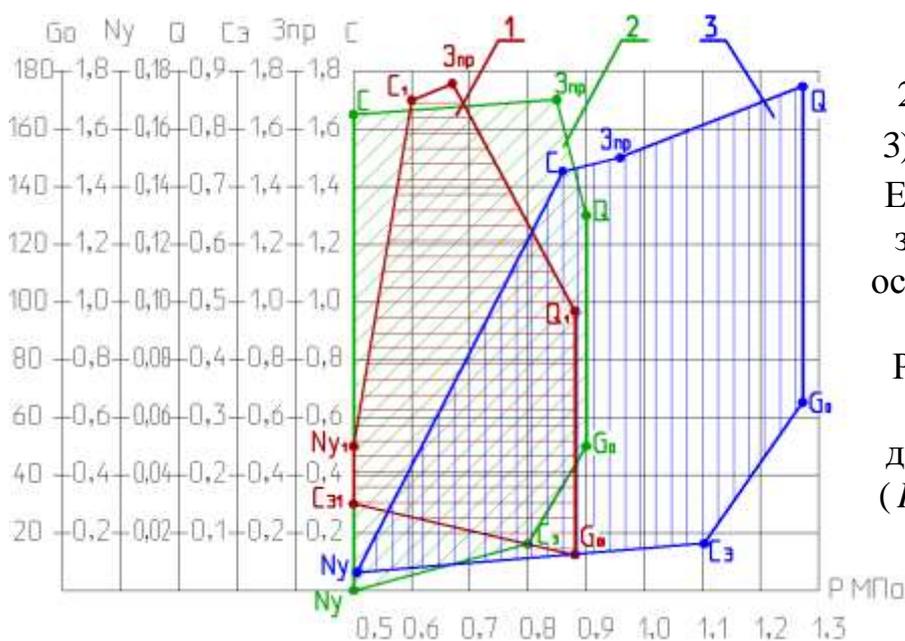
Таблица 8 – Пример расчета рациональных параметров бурового агрегата (на примере бурения гранита)

Параметры	Обозначения	Единицы измерения	Исходные параметры	Рациональные параметры
Давление сжатого воздуха	P	МПа	0,5	0,95
Давление в гидросистеме	P_r	МПа	10	10
Мощность податчика	N_p	кВт	1,9	2,5
Мощность двигателя механизма переезда	$N_{пер}$	кВт	8,0	8,0
Мощность двигателя механизма поворота рамы	$N_{п.р.}$	кВт	1,35	1,35
Длина бурильной трубы	$l_{тр}$	м	1,0	1,3
Рейсовая проходка	l_p	м	4,0	6,0
Производительность насоса маслостанции	Q_n	л/мин	9	9
Производительность буровой установки	Q	м/мин	0,085	0,133
Относительный вес установки	G_0	кг/м/мин	78	51
Удельная мощность приводов установки	N_y	кВт/м/мин	2,0	1,46
Себестоимость, в т. ч.:	C	усл. ед.	1,643	1,645
– заработная плата	C_z		0,330	0,212
– амортизация	C_a		0,132	0,085
– материалы	C_m		0,680	0,842
– ремонт	$C_{т.р.}$		0,033	0,021
– энергия, в т. ч.:	$C_э$		0,319	0,336

- на бурение	$C_{э.б.}$		0,267	0,252
- на вспомогательные операции	$C_{э.всп.}$		0,052	0,084
Приведенные затраты	$Z_{пр.}$	усл. ед.	1,710	1,635

Наиболее актуальным с точки зрения оптимизации буровых установок является комплексный анализ установок на основе нескольких критериев одновременно.

На рисунке 19 приведен график, отражающий результаты исследований параметров буровой установки от давления сжатого воздуха по критериям: себестоимость 1 м бурения, стоимость энергии, удельные приведённые затраты, производительность бурения, удельные мощность привода и вес установки.



- 1) – пневмопривод;
 - 2) – пневмогидропривод;
 - 3) – электропневмопривод
- Единицы измерения показателей на вертикальных осях приведены в таблице 8

Рисунок 19 – Диаграмма границ рационального давления сжатого воздуха (P) для буровых агрегатов с разными приводами

Были определены экстремальные значения по всем критериям при варьировании параметра P для каждого привода.

Так, например, при давлении сжатого воздуха $P = 0,5$ МПа у пневмопривода отмечается минимальные удельная мощность привода (N_{y1}) и стоимости энергии ($C_{э1}$); при давлении $P = 0,85$ МПа – максимум производительности Q_1 и минимум по весу G_{01} .

Экстремальные значения критериев соответствуют вершинам полученных многоугольников. Площадь многоугольника представляет область рациональных значений давления сжатого воздуха для конкретного привода в соответствии с рассматриваемыми критериями.

Из рисунка также следует, что если за критерий оптимальности принять максимальную производительность Q_1 , то, например, для пневмопривода данное условие выполняется при давлении сжатого воздуха 0,85 МПа; минимальную себестоимость бурения C_1 возможно обеспечить при давлении сжатого воздуха

0,65 МПа и т. п.

Рациональное значение давления сжатого воздуха по всем критериям одновременно определяется как центр площади многоугольника: у пневмопривода эта величина составляет 0,7 МПа.

Разработанная технико-экономическая модель буровых установок позволяет оптимизировать их основные параметры одновременно по нескольким критериям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена проблема научного обоснования ресурсоэффективной технологии ударно-вращательного бурения скважин малого диаметра для разведки в условиях подземных рудников месторождений со сложными горно-геологическими условиями, в частности, часто перемежающимися по твердости и трещиноватости горными породами.

Все возможности эффективного применения агрегатов ударно-вращательного действия в области геологоразведочного бурения в твердых горных породах в настоящее время, к сожалению, еще не реализованы.

Обобщая полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований результаты, можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Настоящая работа относится к направлению исследований, связанных с развитием представлений о волновых процессах, протекающих в системе «ударно-вращательный механизм – буровой снаряд – горная порода».

2. В данной работе предпринята попытка рассмотреть вопросы генерирования импульсов силы при ударе, передачи их по буровому инструменту и внедрения в горную породу неразрывно с решением двуединой задачи: обеспечение рационального силового воздействия на горную породу со стороны бурового инструмента и установление основных факторов, оказывающих влияние на эффективность разрушения горной породы (форма импульса силы, его амплитуда, энергия волны деформации, геометрия ПРИ).

3. Рассматриваемая в настоящем исследовании технология бурения разведочных скважин является новой для данного направления работ и, судя по полученным результатам, может быть весьма эффективной. Разработка научно-методических основ проектирования данной технологии является существенным вкладом в решение проблемы повышения энерго- и ресурсоэффективности технологии и техники геологоразведочных работ.

4. Теоретические исследования передачи импульсов силы по цельным бурильным трубам, основанные на спектральном анализе импульсов, позволили выявить влияние соотношения наружного и внутреннего радиусов бурильных труб на передачу энергии удара. Установлено, что увеличение относительной толщины стенки бурильных труб приводит к снижению доли энергии, приходящейся на поперечные деформации, не связанные с разрушением горной породы.

5. Экспериментальные исследования передачи импульсов силы по бурильной колонне с ниппельными соединениями закрытого типа показали возможность передачи к ПРИ порядка 70 % энергии импульса на глубину до 40 м.

6. Установлено, что коэффициент передачи импульса силы можно повысить за счет рационального подбора жесткости резьбы труб и ниппеля. При этом необхо-

димо увеличивать жесткость резьбы труб, жесткость контакта между витками резьбы труб и ниппеля, что уменьшает их относительное перемещение, а, соответственно, и работу диссипативных сил.

7. Характер распределения нагрузки между витками резьбы является одной из оценок совершенства динамически нагруженных резьбовых соединений. Предложенный новый тип ниппельного соединения труб является перспективной разработкой, потому что учитывает волновые процессы при эксплуатации бурильных колонн в условиях ударно-вращательного способа бурения и характеризуется следующими особенностями распределения нагрузок:

- при распространении импульса силы через резьбовое соединение закрытого типа происходит постепенная разгрузка контактов витков резьбы; ниппель, находясь внутри труб, освобождается от 3/4 части продольных и поперечных нагрузок, а крутящий момент передается до 70 % через торцы соединяемых бурильных труб;

- нежесткая связь ниппеля с бурильной трубой в значительной степени снижает изгибающие нагрузки на соединительный элемент, что способствует увеличению долговечности его работы;

- наблюдаемая в процессе многократных испытаний ниппельного соединения закрытого типа дозатяжка бурильных труб приводит к снижению тангенциальных напряжений в соединительном элементе в 2–3 раза.

8. Результаты исследований по разрушению горной породы (гранита) являются определенным вкладом в расширение знаний об энергоемкости процесса разрушения горных пород при бурении скважин без отбора керна и позволяют для рассматриваемых импульсов силы провести оценку рациональных параметров ударного взаимодействия и эффективности применяемых в настоящее время типов ПРИ с горной породой:

- предупредительная скорость боя в рассматриваемом диапазоне изменения скорости (5 и 7 м/с) несущественно влияет на энергоемкость разрушения; причем при скорости удара 7 м/с графики изменения удельной энергоемкости разрушения от величины удельной энергии удара имеют подобный, но менее выраженный гиперболический характер, что подтверждает вывод некоторых авторов о снижении влияния типа буровой коронки на процесс разрушения горной породы при увеличении энергии удара;

- опыты по исследованию влияния формы ударника на энергоемкость разрушения горной породы единичным ударом на блоке гранита с бойками постоянной массы, но различной длины и диаметра (С2 и С3) дали следующие результаты: с увеличением длины ударника с 450 до 700 мм энергоемкость разрушения для штыревой коронки снижается на 6 и 10 % соответственно при скорости приложения ударной нагрузки 5 и 7 м/с. Для крестовой буровой коронки энергоемкость разрушения единичным ударом увеличивается в среднем на 15 % при обоих значениях скорости приложения ударной нагрузки. Энергоемкость разрушения горной породы единичным ударом долотчатой коронкой увеличивается в среднем на 5 и 8 % соответственно при скорости приложения ударной нагрузки 5 и 7 м/с. Для крестовой и долотчатой коронок это можно объяснить влиянием чрезмерной длины бойка, а соответственно и большей длительности переднего фронта импульса, при которых не используется хвостовая часть импульса силы и приводит к повы-

шению доли отраженной энергии. Для штыревой коронки не выявлено влияние длительности переднего фронта импульса силы на показатель энергоемкости разрушения гранита;

– установлено влияние угла поворота ПРИ между единичными ударами на энергоемкость разрушения для крестовой и долотчатой коронок. Очевидно, проявление полученных закономерностей обусловлено различными условиями скалывания. Для крестовой коронки практически для всех бойков, при угле поворота 40° отмечается наименьшее значение энергоемкости разрушения. Для долотчатой коронки при малой энергии удара (31,25 Дж) рациональным является угол поворота ПРИ в 20° . В целом увеличение энергии удара приводит к увеличению рационального угла поворота ПРИ после удара. Для штыревой коронки в процессе испытаний угол поворота между ударными воздействиями не оказывал заметного влияния на энергоемкость разрушения горной породы;

– крупность шлама определяется типом буровой коронки, энергией удара, углом поворота бурового инструмента (для долотчатой и крестовой коронок), предупредительной скоростью бойка. Для штыревой коронки при скорости удара 7 м/с содержание крупных фракций шлама значительно снижается, результаты близки к значениям для долотчатой и крестовой коронок. При предупредительной скорости бойка 5 м/с и энергии удара (31,25 Дж) крестовая коронка дает частицы большей крупности по сравнению с долотчатой и штыревой коронками. Во всех остальных случаях при скорости приложения ударной нагрузки 5 м/с штыревая коронка дает уменьшение доли 0,25 мм-фракции (не превышает 49 %) и увеличение доли частиц диаметром более 2 мм (до 10 %).

9. Предложенное в работе техническое решение по новому способу генерирования импульсов силы в бурильной колонне является перспективной разработкой. Отсутствие бойка, маслостанции с напорным и сливным трубопроводами обеспечивает повышение к.п.д. по сравнению со всеми современными гидравлическими машинами ударного действия.

Формируемые в замкнутом объеме импульсы давления через поршень в гидравлическом цилиндре передаются в виде продольной волны упругой деформации хвостовику с бурильной колонной. Сформированная таким образом волна деформации со скоростью звука распространяется в материале бурильных труб к ПРИ, который благодаря импульсам силы интенсифицирует разрушение горной породы, обеспечивая существенное увеличение механической скорости бурения скважины.

10. Математическое моделирование и анализ рабочих процессов агрегатов для бурения скважин в условиях подземных рудников позволил разработать методику расчета рациональных параметров бурового агрегата, обеспечивающих максимальное приращение производительности при снижении времени выполнения подготовительно-заключительных и вспомогательных операций в соответствии с заданными ограничениями (например, в условиях постоянства себестоимости бурения метра скважины, приведенных затрат или снижения материалоемкости бурового агрегата). При этом в качестве критерия, характеризующего процесс исследования длительности подготовительно-заключительных и вспомогательных операций выбрана средняя продолжительность операций, выполняемых приводом.

Разработанная методика расчета позволила выявить возможность увеличения в 1,4 раза производительности буровых агрегатов с пневмоприводом, в 2,4 раза – агрегатов с гидроприводом без увеличения удельных приведенных затрат, их веса и мощности и рекомендуется научно-исследовательским институтам, проектным, конструкторским и производственным организациям, которые занимаются разработкой бурового оборудования для ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра.

Список основных опубликованных работ по теме диссертации

Монографии:

1. Шадрина А.В. Теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в бурильной колонне при ударно-вращательном бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.В. Шадрина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 160 с.

2. Шадрина А.В. Динамические процессы в колонне труб при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 175 с.

3. Шадрина А.В. Закономерности распространения силовых импульсов по колонне труб к породоразрушающему инструменту / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 115 с.

Статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

4. Авдеева А.И. «Исследование влияния геометрических параметров бурильных труб на эффективность передачи энергии волны деформации при её распространении по участкам постоянного сечения» / А.И. Авдеева, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – № 5. – С. 231–238.

5. Авдеева А.И. «Разработка методики расчета распространения продольных волн деформаций по буровому инструменту» / А.И. Авдеева, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – № 5. – С. 239–246.

6. Колодин А.П. Определение области рационального использования станков с различными типами приводов для бурения скважин из подземных горных выработок / А.П. Колодин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – № 1. – Т. 319. – С. 191 – 195.

7. Саруев Л.А. Исследования распространения упругих волн в колонне буровых штанг при ударно-вращательном бурении скважин в лабораторных условиях / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – № 6. – Т. 309. – С. 140 – 144.

8. Саруев Л.А. Экспериментальная оценка напряжений в ниппельных соединениях бурильных труб при вращательно-ударном нагружении / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина, А.Л. Саруев // Известия Томского политехнического университета;

Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – Т.317 – № 2. – С. 78–83.

9. Федин Д.В. Оценка эффективности передачи силовых импульсов на разрушаемый гранит при вращательно-ударном способе бурения скважин малого диаметра / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 179–183.

10. Федин Д.В. Экспериментальные исследования механизма формирования гидравлических импульсов для разрушения горных пород при бурении / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – Т. 321, № 1. – С. 175–178.

11. Шадрина А.В. Исследование влияния массы бойка на формирование силовых импульсов в колонне бурильных труб / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Актуальные вопросы транспорта углеводородов: Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – С. 30–34.

12. Шадрина А.В. Исследование влияния распространения волн деформаций по бурильной колонне и параметров буровых агрегатов на производительность вращательно-ударного бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев, А.А. Казанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – М.: Изд-во «Горная книга», 2010. – № 11. – С. 232–238.

13. Шадрина А.В. Исследование возможностей вращательно-ударного способа бурения для разведочных скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия вузов. Геология и разведка. – М.: РГГРУ, 2012. – № 5. – С. 62–66.

14. Шадрина А.В. Исследование гранулометрического состава шлама и оценка эффективности буровых коронок различного типа / А.В. Шадрина, В.Г. Крец // Актуальные вопросы надежности горного и нефтегазового оборудования: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – С. 18–21.

15. Шадрина А.В. Исследование эффективности передачи силовых импульсов по колонне бурильных труб к разрушаемой горной породе (на примере гранита) / А.В. Шадрина // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Отдельный выпуск № 3. Горное машиностроение. – М.: Изд-во «Горная книга» – 2012. – № 3. – С. 443–449.

16. Шадрина А.В. Исследование процессов циклической деформации резьбовых соединений бурильных труб / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Отдельный выпуск. Горное машиностроение. – М.: Изд-во «Горная книга», 2012. – № 3. – С. 450–459.

17. Шадрина А.В. Исследование разрушения твердой горной породы энергией удара / А.В. Шадрина, Т.В. Кабанова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – № 6. – С. 381–385.

18. Шадрина А.В. Методика расчета и обоснования параметров станков для бурения скважин из подземных горных выработок для оптимизации их проектирования / А.В. Шадрина, А.П. Колодин, Л.А. Саруев // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2010. – № 6.

19. Шадрина А.В. Оценка эффективности применения различных типов приводов станков для бурения геолого-разведочных скважин из подземных горных выработок / А.В. Шадрина, Д.В. Федин // Известия вузов. Геология и разведка. – М.: РГГРУ, 2013. – № 3. – С. 57–62.

20. Шадрина А.В. Разработка новой конструкции резьбового соединения бурильных труб / А.В. Шадрина, А.Л. Саруев, Л.А. Саруев, А.П. Колодин // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 157–160.

21. Шадрина А.В. Разработка новых соединений труб для бурения опережающих скважин при проходке тоннелей и прокладке в них газонефтепроводов / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Нефтяное хозяйство. – М. – 2011. – № 2. – С. 36 – 37.

22. Шадрина А.В. Экспериментальное исследование влияния параметров ударной системы на разрушение гранита / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Актуальные вопросы транспорта углеводородов: Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – С. 34–38.

23. Шадрина А.В. Энергетическая эффективность ударных импульсов, переданных на разрушаемый гранит по колонне бурильных труб длиной 50 м / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Горное оборудование и электромеханика. – М.: Новые технологии, 2009. – № 10. – С. 15 – 18.

24. Shadrina A. Exploration and determination of the principles of rotary-percussive underground slimhole drilling / A. Shadrina, L. Saruev // International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(2): 245–249.

Статьи в научных тематических сборниках:

25. Саруев Л.А. Исследование напряжений в ниппельных соединениях бурильных труб при вращательно-ударном нагружении / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина, А.Л. Саруев // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Кемерово, 2011. – Вып. 13. – С. 82–90.

26. Саруев Л.А. Исследования распространения упругих волн в колонне буровых штанг при ударно-вращательном бурении скважин в лабораторных условиях / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Кемерово, 2009. – С. 27 – 31.

27. Саруев Л.А. Разработка методики оценки технико-экономической эффективности машин для бурения скважин малых диаметров из подземных горных выработок / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина, А.П. Колодин // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Кемерово, 2009. – С. 32 – 39.

28. Саруев Л.А. Разработка методики расчета максимальных напряжений в элементах резьбовых соединений труб при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина, А.Л. Саруев // Вестник Рос-

сийской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Кемерово, 2010. – Вып. 12. – С. 11–15.

29. Шадрина А.В. Исследование процессов циклической деформации резьбовых соединений бурильных труб как упруго-фрикционной системы / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – № 1. – Т. 312. – С. 51 – 54.

30. Шадрина А.В. Методика исследования технико-экономической эффективности машин для бурения подземных скважин малых диаметров / А.В. Шадрина, А.Л. Саруев, Л.А. Саруев, А.А. Казанцев // Известия Томского политехнического университета; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – № 1. – Т. 312. – С. 55 – 58.

Материалы, опубликованные в трудах научных конференций:

31. Ефремова Н.А. Волны в вязкоупругих деформированных средах / Н.А. Ефремова, А.Л. Саруев, А.В. Крец (А.В. Шадрина) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды II международной научной конференции студентов и аспирантов. – Томск, 1998. – Ч. 2. – С. 91 – 92.

32. Колодин А.П. Исследование и разработка методики обоснования рациональных параметров станков для бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.П. Колодин, А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIII Международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. 6–11 апреля 2009; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 549–551.

33. Колодин А.П. Исследования зависимости времени операций при бурении веера подземных скважин малого диаметра от параметров станков и их приводов / А.П. Колодин, А.В. Шадрина // Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин: Труды Всероссийской научно-технической конференции; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 177–183.

34. Саруев Л.А. Динамическая модель резьбовых соединений буровых штанг и оценка потерь энергии при прохождении силовых импульсов / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина // Современные техника и технологии – 2003: Труды IX международной научно-практической конференции; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – Томск, 2003. – С. 228 – 229.

35. Саруев Л.А. Распространение силовых импульсов по буровым штангам постоянного сечения / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина // Динамика и прочность горных машин: Сборник трудов II международной конференции. – Новосибирск, 2003. – С. 64 – 69.

36. Саруев Л.А. Распространение силовых импульсов через муфтовые соединения буровых штанг / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина // Современные техника и технологии – 2003: Труды IX международной научно-практической конференции; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – С. 227– 228.

37. Саруев Л.А. Результаты исследований передачи энергии ударных импульсов по колоннам штанг при бурении подземных скважин малого диаметра / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС – 12 – 2006): Сборник докладов 12 международной научно-практической конференции. – Тюмень, 2006. – С. 173 – 176.

38. Шадрина А.В. Динамические процессы при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XV Международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – Т. 2 – С. 406–409.

39. Шадрина А.В. Закономерности распространения силовых импульсов по колонне буровых штанг при ударно-вращательном бурении скважин / А.В. Шадрина // Наука и инновации XXI века: Материалы VI открытой окружной конференции молодых ученых. Сургут: Изд-во СурГУ, 2005. – С. 92 – 93.

40. Шадрина А.В. Исследование динамики и разработка новых конструкций колонн бурильных труб для повышения безопасности работы угольных шахт бурением дегазационных скважин из подземных горных выработок / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 555–556.

41. Шадрина А.В. Исследование потерь энергии силового импульса в соединениях буровых штанг / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VIII международного научного симпозиума; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2004. – С. 681–682.

42. Шадрина А.В. Методика эксплуатационной разведки ртутных месторождений бурением вееров скважин из подземных выработок / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VII Международного научного симпозиума; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – С. 544 – 545.

43. Шадрина А.В. Проблема передачи мощности выносных бурильных головок ударного действия по ставу штанг к породоразрушающему инструменту / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды IX Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – С. 573 – 575.

44. Шадрина А.В. Распространение силовых импульсов по колоннам буровых штанг, помещенным в горизонтальные искусственные скважины / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VII Международного научного симпозиума; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – С. 545 – 546.

45. Шадрина А.В. Силы упругого и неупругого сопротивления при циклическом нагружении резьбовых соединений штанг / А.В. Шадрина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды X международного научного симпозиума; Томский

политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – С. 488 – 490.

46. Шадрина А.В. Экспериментальная оценка передачи энергии силовых импульсов по колоннам буровых штанг с использованием искусственных скважин / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин: Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры бурения ИГНД ТПУ; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2004. – С. 207–211.

47. Shadrina A.V. Analysis of energy loss on friction in carving connection of rods using of hysteresis diagrams / A.V. Shadrina, L.A. Saruev // Наука и технология KORUS–2003: Материалы 7-го Корейско-Русского международного симпозиума. – Ульсан, 2003. – С. 118 – 122.

48. Shadrina A.V. Experimental researches methods and results of impact impulse parameters in real rods columns // A.V. Shadrina, L.A. Saruev // Наука и технология KORUS–2005: Материалы 9-го Корейско-Русского международного симпозиума. – Новосибирск, 2005. – С. 525 – 527.

Патенты:

49. Пат. 69135 Российская Федерация. Буровой станок для проходки скважин в подземных условиях / А.В. Шадрина, А.А. Казанцев, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Бюл. № 34. – 2008.

50. Пат. 71369 Российская Федерация. Буровой станок для проходки скважин в подземных условиях / А.В. Шадрина, А.А. Казанцев, А.Л. Саруев, Л.А. Саруев // Бюл. № 7. – 2008 .

51. Пат. 79923 Российская Федерация. Ударный узел станка ударно–вращательного бурения / А.А. Казанцев, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Бюл. № 2. – 2009.

52. Пат. 79924 Российская Федерация. Ударный узел установки ударно–вращательного бурения / А.А. Казанцев, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Бюл. № 2. – 2009.

53. Пат. 79926 Российская Федерация. Ниппельное соединение буровых штанг / А.В. Шадрина, А.А. Казанцев, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Бюл. № 2. – 2009.

54. Пат. 95731 Российская Федерация. Ниппельное соединение буровых штанг / А.П. Колодин, А.В. Шадрина, А.А. Казанцев, Л.А. Саруев, А.Л. Саруев // Бюл. № 19. – 2010.

55. Пат. 124298 Российская Федерация. Устройство для регулирования энергии импульса гидроимпульсного механизма бурового станка / Д.В. Федин, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Бюл. № 2. – 2013.