

На правах рукописи



РОМАНОВ ГРИГОРИЙ РАДИОНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ НА
ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
АССИМЕТРИЧНЫХ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ
НАГРУЗОК НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на кафедре нефтегазового дела

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент

Пушмин Павел Сергеевич

Официальные оппоненты:

Борисов Константин Иванович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ, г. Красноярск), заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин

Ковалев Артем Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск), доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ), г. Москва

Защита диссертации состоится «24» декабря 2018 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, г. Томск, ул. Белинского, д. 55) и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

К. Г.-М. Н



Жорняк Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Алмазное бурение считается одним из наиболее перспективных и производительных способов проходки геологоразведочных скважин на сегодняшний день. Вместе с тем, существуют особенности конструктивного исполнения алмазного породоразрушающего инструмента, не позволяющие максимально реализовать потенциал скорости углубки забоя данным способом.

Механика процесса разрушения горной породы зависит от её физико-механических свойств и характера взаимодействия резцов породоразрушающего инструмента с забоем. По этой причине процесс бурения может осложняться такими явлениями, как увеличение нерациональных затрат энергии, повышенный износ породоразрушающего инструмента, а также отклонение оси ствола скважины от заданного направления. Таким образом, эффективность алмазного бурения определяется не только скоростью углубки забоя, но и ресурсом бурового инструмента, оптимальными энергозатратами, а также интенсивностью естественного искривления стволов скважин.

Снижение ресурса породоразрушающего инструмента обусловлено механизмом его взаимодействия с горной породой, результатом которого является постоянный контакт породоразрушающих элементов с частицами разрушенной горной породы, нагрев матрицы инструмента, естественные колебания нижней части снаряда.

Интенсивность искривления ствола скважины вызвана отклоняющим усилием, возникающим в результате ориентированного изгиба компоновки нижней части колонны бурильных труб. Повышенное энергопотребление объясняется высоким коэффициентом трения между колонной бурильных труб и стенкой скважины, нерациональным сочетанием параметров режима бурения, неправильно выбранным буровым инструментом.

Таким образом, рост эффективности алмазного бурения, достигаемый без повышенных затрат энергии и ресурса, связан со снижением интенсивности износа бурового инструмента и искривления ствола скважины, а также уменьшением энергоемкости процесса разрушения горной породы за счет оптимального распределения удельной нагрузки на забой, например, за счет приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой.

Изучение механики забойных процессов, в том числе и при бурении с приложением ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой, позволит разработать эффективную технологию для комплексной реализации потенциала алмазного бурения. Повышение эффективности алмазного бурения, разработка новых и усовершенствование существующих технологий разрушения горных пород является актуальной задачей в современных условиях проведения буровых работ.

Поиск новых способов повышения производительности и качества буровых работ без увеличения затрачиваемой энергии и ресурса породоразрушающего инструмента путем модернизации технологии алмазного бурения имеет важное научное и практическое значение.

Цель работы. Повышение эффективности алмазного бурения.

Идея работы. Совершенствование технологии алмазного бурения на основе реализации метода приложения ассиметричной статической и динамической нагрузки на забой.

Объект исследования. Эффективность работы алмазных резцов в зависимости от их радиального расположения.

Предмет исследования. Влияние асимметричной статической либо динамической нагрузки на процесс разрушения горных пород алмазным породоразрушающим инструментом.

Основные задачи исследования:

1. Анализ показателей эффективности алмазного бурения.
2. Обзор исследований процесса разрушения горных пород при приложении динамической нагрузки на забой.
3. Обзор технических решений по совершенствованию процесса разрушения горных пород при приложении динамической нагрузки на забой.
4. Исследование механики работы резцов при алмазном бурении, в том числе и с приложением асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой.
5. Проведение экспериментальных исследований процесса разрушения горных пород при приложении асимметричной динамической нагрузки на забой.
6. Исследование влияния приложения асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой на показатели эффективности алмазного бурения.
7. Разработка технологии алмазного бурения с приложением асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой, в том числе и за счет создания технических средств, реализующих предложенную технологию.

Методика исследования. Для решения поставленных задач выбраны следующие методы исследований:

- сбор, анализ и обобщение литературных источников;
- аналитическое исследование механики разрушения твердых горных пород при алмазном бурении с приложением асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой;
- комплекс экспериментальных исследований;
- инженерно-компьютерное моделирование с использованием конечно-элементного анализа;
- обработка, оценка достоверности и анализ результатов исследований.

Личный вклад автора состоит: в постановке и реализации цели и задач диссертационного исследования; в составлении обзора и анализе основных положений механики разрушения твердых горных пород; обзоре и анализе близких по тематике технических решений; в исследовании особенностей механики разрушения горных пород при приложении осевой и асимметричной нагрузки на забой; в уточнении зависимостей, определяющих теоретическую модель формирования забоя при приложении динамической нагрузки на забой; в планировании и реализации экспериментальных исследований, анализе и статистической оценке достоверности их результатов; в участии при разработке технологии и технических средств, реализующих приложение асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой.

Научная новизна работы.

1. Выявлены основные закономерности повышения эффективности процесса разрушения горных пород при изменении характера приложения статической либо динамической нагрузки на забой на асимметричную.

2. Аналитически и экспериментально обосновано явление уменьшения энергоемкости процесса разрушения твердых горных пород, снижения интенсивности искривления ствола скважины и износа породоразрушающего инструмента при бурении с приложением ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой.
3. Исследована зависимость, характеризующая влияние параметра удельной нагрузки на механику процесса разрушения и позволяющая выявить наиболее перспективные направления совершенствования алмазного бурения.
4. Аналитически и экспериментально исследованы зависимости величин напряжений, возникающих в буровом инструменте при различных значениях смещения точки приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется современным уровнем теоретических и достаточным объемом экспериментальных исследований, близкой сходимостью их результатов и воспроизводимостью данных при повторных исследованиях. Статистическая оценка результатов экспериментальных исследований показала, что погрешность составляет не более 5 %.

Практическая ценность и реализация работы заключается в разработке эффективной технологии алмазного бурения, способствующей повышению производительности процесса разрушения горных пород, а также в создании технических средств, позволяющих реализовать предложенную технологию. Результаты работы могут найти применение при производстве буровых работ, а также в учебном процессе при подготовке студентов горно-геологических специальностей.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей, из которых 6 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, одна статья – в зарубежном журнале. Подготовлена заявка на изобретение.

Апробация исследований. Основные материалы диссертации представлены и обсуждены на научно-технических конференциях института недропользования ИРНТУ (г. Иркутск, ИРНТУ, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.); XIX Международном симпозиуме студентов, молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, ТПУ, 2014 г.); научном докладе на расширенном заседании кафедры современных технологий бурения скважин МГРИ РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (г. Москва, 2015 г.); научном семинаре кафедры бурения скважин Института природных ресурсов ФГАОУ ВО НИ ТПУ (г. Томск, 2015 г.); научных семинарах кафедры нефтегазового дела Института недропользования ФГБОУ ВО ИРНТУ (г. Иркутск, 2016, 2018 гг.).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы из 98 наименований. Работа изложена на 97 страницах машинописного текста, включает 33 рисунка и 11 таблиц.

Во **введении** изложена общая характеристика работы, раскрыта основная цель, обоснована актуальность и практическая значимость диссертационного исследования, изложены защищаемые положения и научная новизна.

В **первой главе** проанализированы показатели эффективности алмазного бурения; представлены обзор исследований механики разрушения горных пород при приложении динамической нагрузки на забой; обзор технических решений по

совершенствованию буровых работ при приложении динамической нагрузки на забой; определены задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** проведено аналитическое исследование механики разрушения твердых пород при алмазном бурении; проанализирован механизм углубки породоразрушающего инструмента в горную породу при осевом и асимметричном приложении статической либо динамической нагрузки на забой; теоретически обоснован механизм повышения показателей эффективности алмазного бурения.

В **третьей главе** изложены методики экспериментальных исследований процесса разрушения горной породы при приложении асимметричной динамической нагрузки на забой.

В **четвертой главе** представлен анализ результатов экспериментальных исследований, произведена статистическая оценка достоверности их результатов, описаны возможные варианты реализации предложенной технологии.

В **заключении** обобщены результаты исследований, выполненных в соответствии с поставленными задачами, решение которых обеспечило достижение цели диссертационной работы. Поставлены задачи дальнейших исследований.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту Павлу Сергеевичу Пушмину за постоянную методическую помощь и консультации; особую благодарность доктору технических наук, профессору Вячеславу Васильевичу Нескоромных за оказанную поддержку, рекомендации и замечания; искреннюю признательность кандидату технических наук, заведующему кафедрой нефтегазового дела ИРНИТУ Буглову Николаю Александровичу за оказанную помощь и содействие в подготовке защиты диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Разработке и совершенствованию способов повышения эффективности алмазного бурения, посвящены исследования Г.А. Блинова, К.И. Борисова, Н.А. Буглова, Ю.Е. Будюкова, В.И. Власюка, Б.И. Воздвиженского, В.Д. Евсеева, А.Г. Калинина, А.В. Карпикова, В.В. Нескоромных, П.С. Пушмина, С.Я. Рябчикова, Н.В. Соловьева, В.И. Спирина, С.С. Сулакшина, А.В. Шадринной и других исследователей.

Исследованию способов бурения с приложением динамической нагрузки на забой посвящены работы Л.А. Графа, В.Г. Кардыша, А.Т. Киселева, И.Н. Крусира, Е.Ф. Эпштейна, В.Г. Ясова и других исследователей.

Первое защищаемое положение. Резерв повышения скорости углубки забоя при бурении алмазным породоразрушающим инструментом обусловлен неодинаковой эффективностью процесса разрушения горной породы разноудаленными от оси вращения резцами. Эффективность алмазного бурения обеспечивается интенсификацией работы резцов, расположенных на внешних радиальных окружностях торца породоразрушающего инструмента за счет повышения либо оптимального распределения удельной нагрузки.

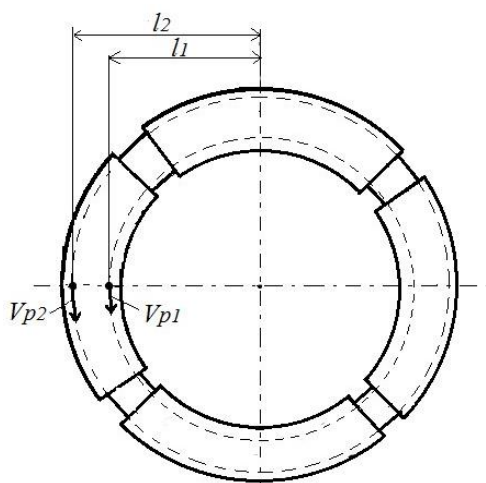


Рисунок 1 - Схема работы алмазных резцов на разных концентрических окружностях торца инструмента:

V_{pi} – линейная скорость перемещения резца на i концентрических окружностях, м/с;

l_i – расстояние от оси вращения инструмента до резца, м

Особенность конструктивного исполнения бурового инструмента, разрушающее воздействие которого заключается в резании-скалывании горной породы, является причиной неодинаковой эффективности работы резцов, находящихся на разном расстоянии l_i от оси вращения. Это происходит из-за неравной линейной скорости перемещения резцов (скорости резания-скалывания), расположенных на разных радиальных окружностях торца породоразрушающего инструмента (см. рисунок 1).

Глубина поражения забоя резцами (борозды разрушения), расположенными на разном расстоянии от оси вращения инструмента, существенно отличается, так как при увеличении линейной скорости перемещения, возникает неоптимальное сочетание усилия резания-скалывания и осевого, что препятствует внедрению резца в породу. Отсюда следует, что скорость углубки забоя будет формироваться периферийными резцами, работающими с наименьшей эффективностью.

Анализ технических решений по увеличению производительности алмазного бурения, в том числе и с приложением динамической нагрузки, а также проведенные теоретические исследования позволили выявить один из важных факторов, влияющих на глубину внедрения резцов в горную породу, – величину осевого усилия, приложенного на единицу площади контакта инструмента с породой (удельную нагрузку). Известно, что осевая нагрузка распределяется равномерно по всему забою, и усилие, требуемое для внедрения всех резцов в горную породу, растет пропорционально его площади. Следовательно, резцы, расположенные на разном расстоянии от оси вращения, получают одну и ту же величину осевого усилия, но при этом двигаются с разной линейной скоростью. Это приводит к снижению эффективности работы алмазного инструмента, так как возникает недостаток

осевого усилия для резцов, движущихся с большей линейной скоростью – расположенных на внешних радиальных окружностях его торца.

Теоретические исследования показали, что продольные размеры ядер сжатия-смятия, формируемых ближними к оси вращения резцами, превышает аналогичные показатели ядер, формируемых периферийными резцами. Сочетание усилий резания-скалывания и осевого обуславливают величину и направление вектора результирующего усилия R (см. рисунок 2). При увеличении усилия резания-скалывания, ядро сжатия-смятия перемещается на переднюю грань алмазного резца, уменьшая тем самым глубину борозды разрушения h_B . Зависимость глубины борозды разрушения от осевой нагрузки при разных значениях расстояния от оси вращения до алмазного резца (для однослойной алмазной коронки диаметром 59 мм) показана на рисунке 3.

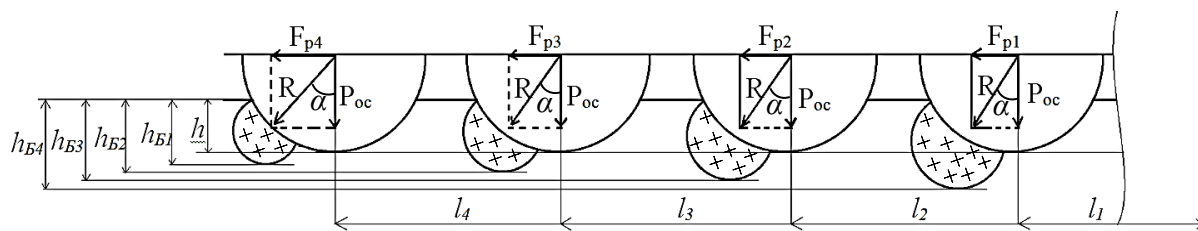


Рисунок 2 - Схема работы алмазных резцов на разном расстоянии от оси вращения породоразрушающего инструмента:

F_{pi} – усилие резания-скалывания алмазным резцом, кН; h – глубина внедрения резцов в породу, м; h_{Bi} – глубина борозды разрушения, м; l – расстояние от оси вращения до резца, м; R – результирующее усилие, кН; α – угол между вертикалью и вектором результирующего усилия.

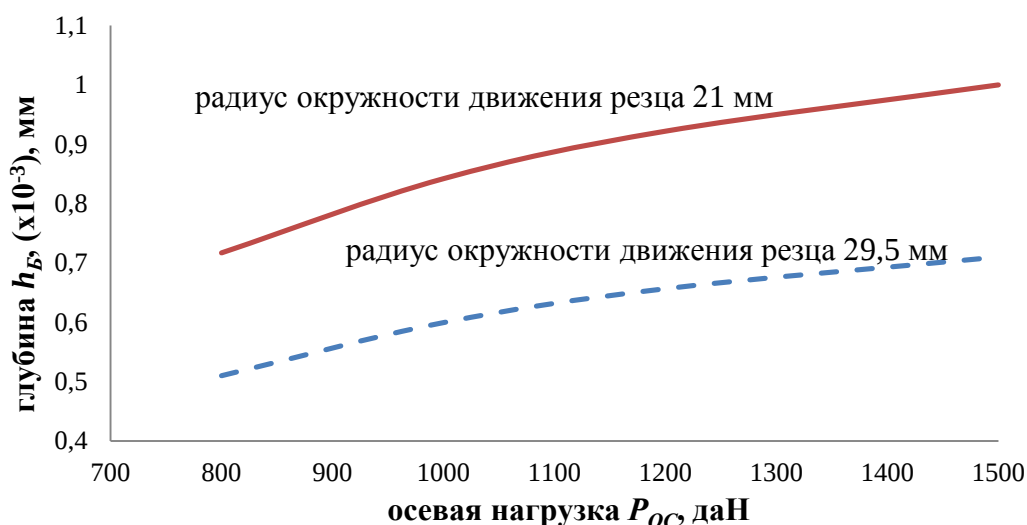


Рисунок 3 – Зависимости глубины борозды разрушения h_B от осевой нагрузки P_{OC} и радиуса концентрической окружности алмазной коронки при постоянном значении частоты вращения $n=1200$ мин⁻¹

Согласно проведенным аналитическим исследованиям, оптимальная линейная скорость перемещения резца V_P зависит от таких факторов, как скорость трещинообразования, глубина внедрения резца в породу и др.:

$$V_P = \frac{V_T \times P}{0,25 \times \cos \alpha \times (2h_p + \sqrt{d h_p}) \times S \times a}, \quad (1)$$

Тогда углубка h_{OB} будет равна:

$$h_{OB} = \frac{V_T \times P}{0,25 \times \cos \alpha \times (2h_p + \sqrt{d h_p}) \times S \times a \times n}, \quad (2)$$

где V_T – скорость трещинообразования, м/с;

α – угол между вертикалью и вектором действия результирующего усилия (угол смещения ядра сжатия-смятия), град;

d – диаметр резца (поперечный размер), мм;

n – частота вращения инструмента, мин^{-1} ;

a – удельная жесткость горной породы;

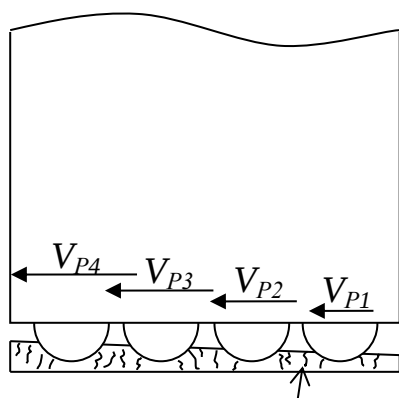
P – статическая осевая нагрузка, даН ;

S – площадь контакта основания резца с образцом горной породы, мм^2 ;

h_p – величина деформации (глубина внедрения резца под действием P), мм .

Согласно зависимости (1), наиболее благоприятным условием для эффективного процесса разрушения горной породы является равенство скоростей резания-скалывания V_P и трещинообразования V_T . В этом случае сопротивление горной породы разрушению будет минимальным при определенной постоянной глубине поражения забоя (глубине борозды разрушения) h_B . Также из зависимости (2) следует, что повышение частоты вращения n способствует снижению углубки, а повышение осевого усилия P приводит к её росту. Таким образом, для увеличения углубки h_{OB} без снижения глубины поражения забоя необходимо обеспечивать достаточную глубину внедрения резца путем увеличения осевого усилия (удельной нагрузки), причем интенсивность прироста последнего должна быть несколько ниже темпа роста скорости резания-скалывания.

Таким образом, для повышения эффективности алмазного бурения необходимо повышать удельную нагрузку, либо распределять по забою таким образом, чтобы резцы, расположенные на периферии торца матрицы, внедрялись в горную породу на большую глубину, чем при стандартной схеме создания осевого усилия.



Промывочная жидкость, обогащенная шламом

$$V_{P1} < V_{P2} < V_{P3} < V_{P4}$$

Рисунок 4 – Схема для анализа условий работы резцов породоразрушающего инструмента в зависимости от расстояния до оси вращения

Процесс разрушения горной породы усложняется еще и тем, что резцы породоразрушающего инструмента, расположенные на внешних радиальных окружностях торца матрицы, контактируют с частицами бурового шлама, поступающего от резцов, расположенных на внутренних окружностях (см. рисунок 4). В результате многократного перемалывания шлама на забое происходит увеличение нерациональных энергозатрат на повторное разрушение породы, снижение глубины внедрения резцов и глубины борозды разрушения, повышение интенсивности износа периферийных резцов. Это связано с проявлением, так называемого, масштабного фактора упрочнения обломков разрушенной горной породы, описанной в работах В.Д. Евсеева – повышение

прочности единичного обломка при уменьшении его размера.

Для повышения удельной нагрузки без увеличения осевого усилия целесообразно применение алмазного вращательно-ударного бурения, позволяющего достичь более эффективного процесса разрушения горной породы, в сравнении с вращательным способом бурения. Приложение дополнительной динамической нагрузки на породоразрушающий инструмент будет способствовать более глубокому внедрению резцов в горную породу.

Вместе с тем, следует учитывать тот факт, что энергия удара при использовании высокочастотного гидроударника распределяется равномерно по всей площади забоя (рис. 5, а), вследствие чего для создания высокой удельной нагрузки на периферийных резцах требуется значительное увеличение энергии единичного удара. Последнее в большинстве случаев приводит к росту затрачиваемой энергии и, как следствие, повышению стоимости и снижению рентабельности буровых работ. В связи с этим, совершенствование алмазного

бурения должно обеспечивать повышение производительности без увеличения затрат, чего можно достичь, например, за счет приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки.

Второе защищаемое положение. Интенсификация работы резцов, расположенных на внешних радиальных окружностях торца алмазного породоразрушающего инструмента, может быть достигнута за счет приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки. Повышение скорости углубки забоя достигается путем увеличения глубины внедрения резцов в породу на периферии торца инструмента за счет оптимизации сочетания усилий резания-скалывания и осевого.

Изменение характера приложения статической либо динамической нагрузки с центрального на внецентренный (ассиметричный) позволяет обеспечить рост производительности алмазного бурения без увеличения параметров режима бурения и дополнительных затрат на повышение энергии удара (см. рисунок 5). Оптимизация процесса разрушения горной породы достигается за счет увеличения удельной нагрузки в той части забоя, на которую приходится центр приложения ассиметричной нагрузки. Глубина поражения забоя дальними от оси вращения резцами значительно увеличивается, так как перераспределение удельной нагрузки на забое компенсирует недостаток осевого усилия на его периферии, характерный для вращательного бурения.

При условии оптимального сочетания величины эксцентриситета приложения нагрузки, расстояния между точкой создания эксцентриситета и забоем, а также частоты вращения бурового инструмента, ядра сжатия-смятия (области максимальных касательных напряжений) под резцами будут иметь приблизительно равные продольные размеры (см. рисунок 6). Таким образом, улучшение механики работы резцов обусловлено повышением удельной нагрузки в точке максимальной концентрации напряжений, расположенной на периферии торца матрицы породоразрушающего инструмента.

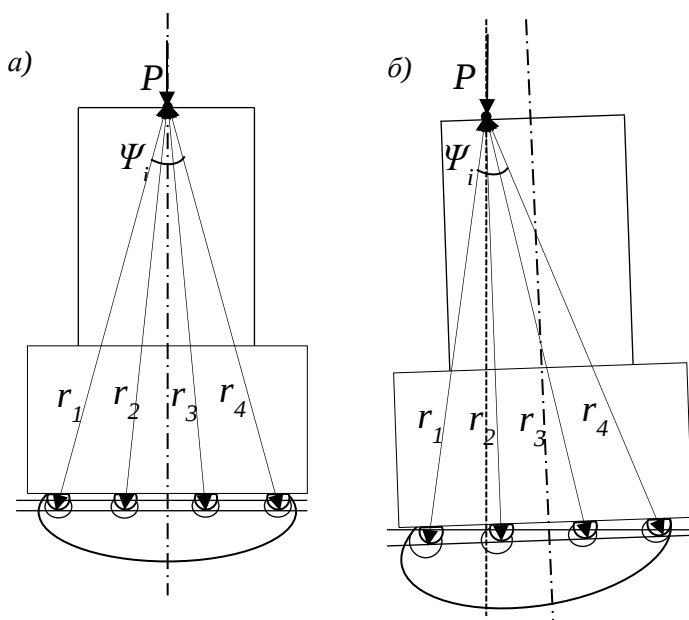


Рисунок 5 – Схема для исследования процесса ударно-вращательного разрушения горной породы при центральном (а) и внецентренном (б) нанесении ударных импульсов:

P – сила ударного импульса; r_i – расстояние от точки нанесения удара до породоразрушающего элемента; Ψ_i – угол между вертикалью и направлением от центра нанесения удара к i -му породоразрушающему элементу;

женной на периферии торца матрицы породоразрушающего инструмента.

С целью подтверждения эффективности предложенной технологии был проведен ряд экспериментальных исследований, заключающихся в разбурировании блоков горных пород различных категорий по буримости на специализированном стенде. Исследования влияния величины эксцентриситета приложения ассиметричной нагрузки на забой наиболее целесообразно проводить при вращательно-ударном способе бурения. В качестве стенда использовалась буровая установка на базе станка СКБ-4 с вращателем 1 шпиндельного типа, к ведущей трубе 2 которого присоединен гидроударник 3 с расстоянием h между точкой нанесения удара бойком 4 о нако-

Точка максимальной концентрации удельной нагрузки

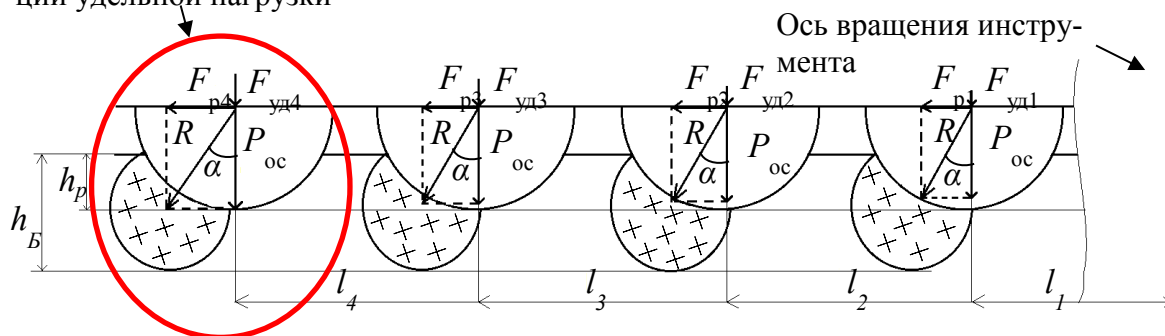


Рисунок 6 – Схема работы алмазных резцов при нанесении внецентренных ударных импульсов:

F_{pi} – сила резания-скалывания-скалывания алмазным резцом, кН; h_p – глубина внедрения резцов в породу, м; h_B – глубина борозды, м; l – расстояние от оси вращения до резца, м; R – результирующий вектор; $F_{удi}$ – сила удара, кН; α – угол между вертикалью и вектором результирующего усилия

вальню 5 и забоем, который находится в блоке горной породы 7. К нижней части гидроударника присоединен породоразрушающий инструмент 6.

Выбор станка обусловлен надежностью основных узлов и способностью обеспечивать необходимые параметры режима бурения для работы гидроударника (см. рисунок 7). Стенд предназначен для измерений скорости углубки забоя при влиянии различных регулируемых факторов, в том числе и величины эксцентриситета приложения статической либо динамической нагрузки на забой.

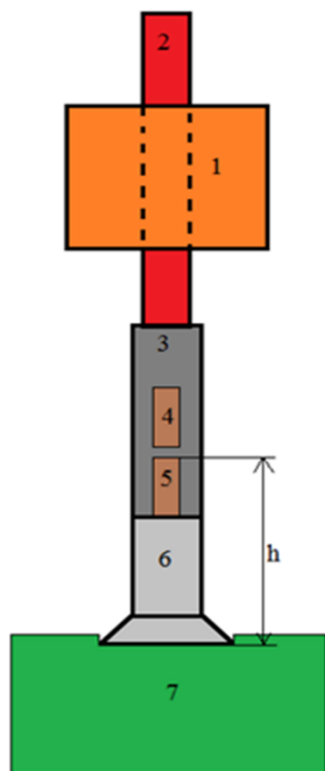


Рисунок 7 - Схема стендовой буровой установки на базе станка СКБ-4: 1 – вращатель; 2 – ведущая штанга; 3 – корпус гидроударника; 4 – боек; 5 – наковальня; 6 – колонковая труба с алмазной коронкой; 7 – блок горной породы; h – расстояние от точки приложения динамической нагрузки до забоя

Эксперименты проводились по методике планирования полного факторного эксперимента в два этапа. Регулирование величины эксцентриситета производилось путем видоизменения формы торца бойка ударника таким образом, чтобы центр удара был смещен на определенную величину (см. рисунок 8).

Стандартные профили бойка и наковальни ударного механизма примененной в процессе исследований высокочастотной гидроударной машины имеют форму кольца наружным диаметром 26,8 мм и внутренним диаметром 13,4 мм. Создание эксцентриситетов ударных импульсов достигнуто за счет снятия слоя материала с торца бойка толщиной 1 мм на следующие величины $a = 6,7; 13,4; 20,1$ мм. Значения эксцентриситетов рассчитаны по формулам для каждой конкретной величины a (см. рисунок 9).

Воспользуемся формулой для расчета эксцентриситета приложения асимметричной динамической нагрузки: для варианта исследований, когда величины сточенной части бойка составляют $a = 6,7$ мм и $a = 20,1$ мм:

$$X' = -\frac{2}{3} \times \frac{R^3 \sin^2 \alpha_1}{\pi(R^2 - r^2) - R^2(\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)}, \quad (3)$$

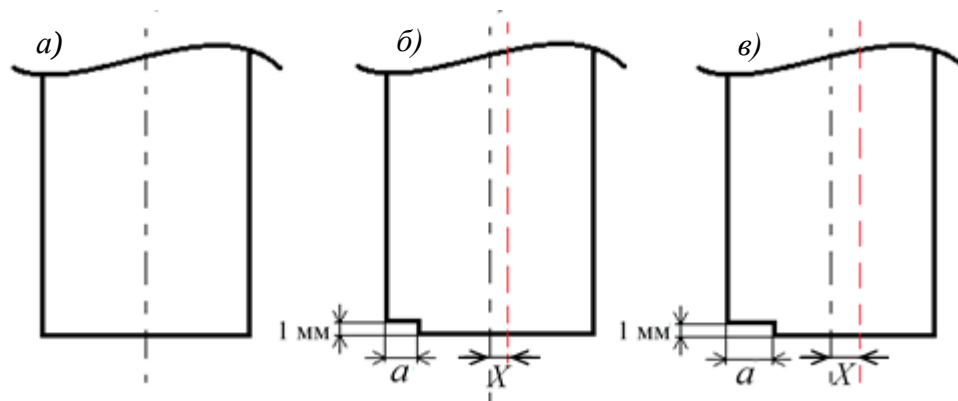


Рисунок 8 – Схема видоизменения формы торца бойка гидроударника:
 h_c – толщина съема материала бойка (1 мм), x_i – ширина сточенной части торца бойка, E_i – величина эксцентриситета нанесения ударных импульсов

где R – радиус кольца (наружный), мм (рис. 2);

r – радиус кольца внутренний, мм;

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right).$$

Для варианта исследований, когда величина сточенной части бойка составляет $a = 13,4$ мм:

$$X_{//} = \frac{S_1 X_1 - S_2 X_2}{(S_1 - S_2)}, \quad (4)$$

где S – площади сегментов, мм²:

$$S_1 = \frac{1}{2} R^2 \left(2 \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right) - \sin\left(2 \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right)\right) \right);$$

$$S_2 = \frac{1}{2} r^2 \left(2 \arccos\left(\frac{R-a}{r}\right) - \sin\left(2 \arccos\left(\frac{R-a}{r}\right)\right) \right);$$

X – координаты центра тяжести по оси X для сегментов:

$$X_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{R \cdot \sin^3 \alpha}{\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha}, \text{ – для сегмента, образуемого кругом радиусом } R;$$

$$X_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{r \cdot \sin^3 \beta}{\beta - \sin \beta \cdot \cos \beta} \text{ – для сегмента, образуемого кругом радиусом } r;$$

$$\alpha = \pi - \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right);$$

$$\beta = \pi - \arccos\left(\frac{R-a}{r}\right).$$

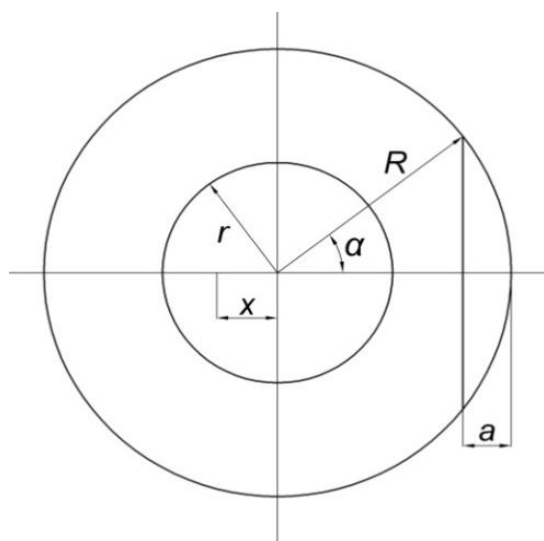


Рисунок 9 – Схема, поясняющая методику расчета величины эксцентриситета приложения динамической нагрузки

Согласно результатам расчетов по формулам (3) и (4), значения смещения центров приложения динамической нагрузки относительно оси вращения забойного гидроударника составляют 2,4; 6,8 и 11 мм. Анализ результатов экспериментальных исследований позволил получить математические модели, характеризующие эффективность процесса бурения.

Первый этап экспериментальных исследований заключался в определении диапазона оптимальных величин эксцентриситета приложения динамической нагрузки для горных пород VI (мрамор) и X (долерит) категорий по буримости. В ходе экспериментов на данном этапе были сделаны основные выводы об эффективности ассимет-

ричного динамического нагружения при различных значениях параметров режима бурения. Стало известно, что для пород с разными физико-механическими свойствами оптимальная величина эксцентриситета имеет различное значение. Например, для упруго-хрупкой горной породы (долерита) оптимальная величина эксцентриситета находится в небольшом диапазоне (от 0 до 2,4 мм), в то время как для упруго-пластичной породы (мрамора), изменение эксцентриситета приложения динамической нагрузки не оказывает значительного влияния на скорость углубки забоя (см. рисунок 10, 11).

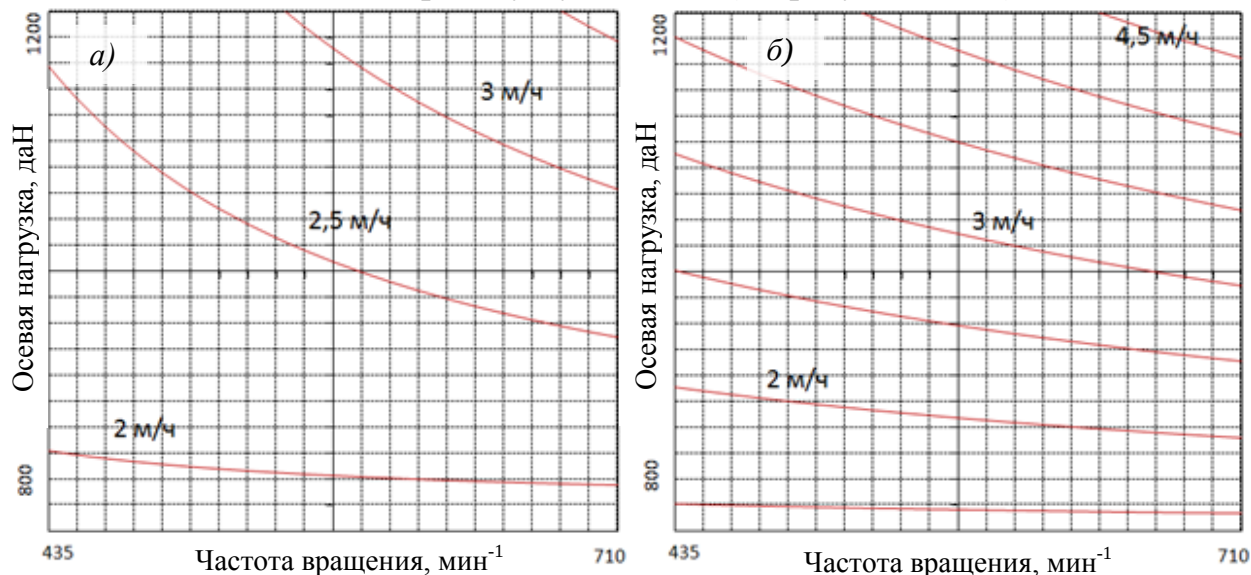


Рисунок 10 – Зависимости скорости углубки забоя от параметров режима бурения долерита при различных значениях эксцентриситета приложения динамической нагрузки E :
а) $E=0$ мм; б) $E=2,4$ мм

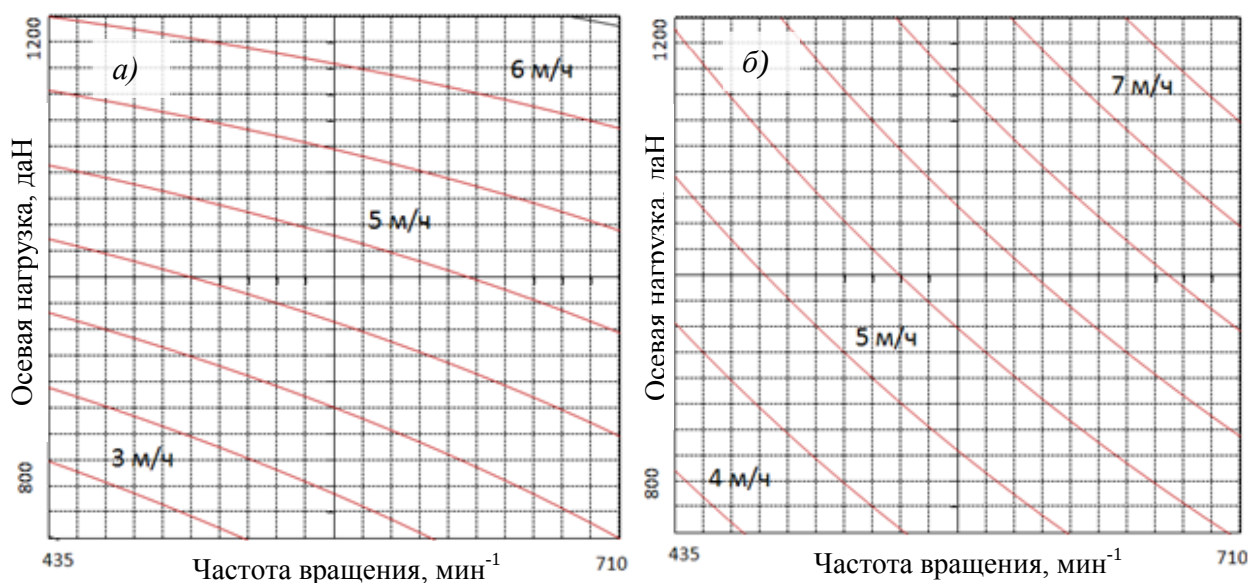


Рисунок 11 – Зависимости скорости углубки забоя от параметров режима бурения мрамора при различных значениях эксцентриситета приложения динамической нагрузки E :
а) $E=0$ мм; б) $E=2,4$ мм

Помимо измерения скорости углубки забоя в ходе экспериментов были проведены наблюдения за такими показателями эффективности алмазного бурения, как износ матрицы алмазного породоразрушающего инструмента (однослойная алмазная коронка и однослойное алмазное долото); мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы; интенсивность искривления выработки.

Измерение износа алмазного породоразрушающего инструмента проводилось путем замера высоты его матрицы до и после проведения каждого эксперимента при помощи штангенциркуля. Измерение интенсивности искривления скважины проводилось

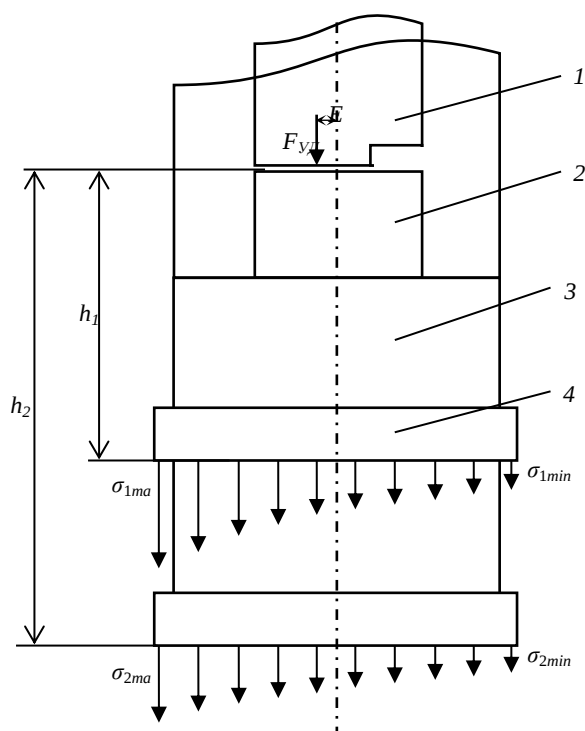


Рисунок 12 – Схема изменения распределения напряжений под торцом породоразрушающего инструмента при изменении расстояния между точкой приложения нагрузки и забоем:

1 – боек с эксцентриситетом нанесения ударной нагрузки E , 2 – наковальня, 3 – корпус инструмента, 4 – породоразрушающий элемент, $F_{уд}$ – сила удара, h_i – расстояние между точкой нанесения удара и забоем, σ_{max} и σ_{min} – максимальные и минимальные напряжения соответственно

ном нанесении ударных импульсов. При подведении итогов первого этапа экспериментальных исследований, было установлено, что для горной породы, обладающей упруго-хрупким характером разрушения, изменение эксцентриситета приложения ударной нагрузки в большей степени влияет на производительность бурения, чем для упруго-

путем нанесения наплавов из сварки на боковую поверхность корпуса породоразрушающего инструмента с целью определения возможности его перекоса в процессе бурения. Регистрация мощности, затрачиваемой на бурение, осуществлялась киловаттметром, которым оснащен буровой стенд.

Анализ наблюдений показал, что рост скорости углубки (в среднем на 30 %) не приводит к снижению ресурса породоразрушающего инструмента, увеличению интенсивности искривления ствола скважины, а также энергозатрат на разрушение забоя. Бурение с применением однослойного алмазного долота показало идентичные результаты по влиянию эксцентриситета ударных импульсов на скорость углубки забоя, что говорит о возможности применения предложенного способа как при колонковом бурении, так и при бурении сплошным забоем.

На втором этапе экспериментов было исследовано влияние энергии единичного удара на эффективность разрушения горных пород при внецентрен-

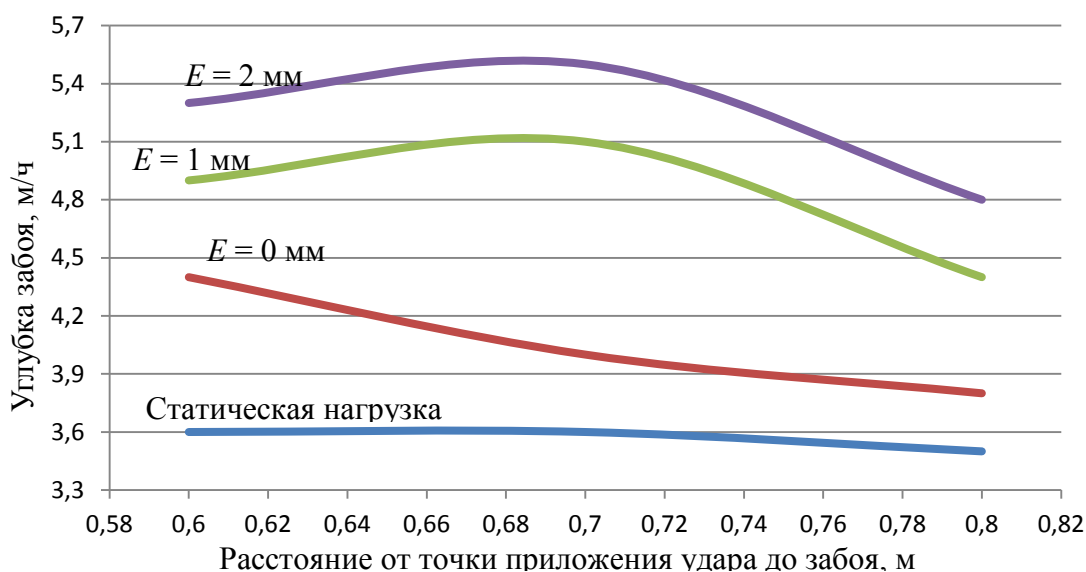


Рисунок 13 - Зависимость скорости углубки от величины эксцентриситета E и расстояния между точкой приложения нагрузки и забоем

пластичных пород. Следовательно, построение модели процесса внецентренного разрушения более актуально для горных пород высокой категории по буримости и для проведения второго этапа экспериментальных исследований используется долерит.

Регулирование величины энергии удара осуществлялось путем изменения расстояния h_i от точки нанесения удара до забоя. При этом расстояние h_i также оказывало влияние на механизм взаимодействия породоразрушающих элементов с горной породой. Это объясняется сочетанием осевого ударного импульса и скручивающего усилия, появляющегося в результате смещения центра нанесения удара (см. рисунок 12).

Таким образом, на втором этапе экспериментов было изучено влияние на скорость углубки сочетания двух факторов – величины эксцентриситета и расстояния от точки нанесения удара до забоя, что характеризует также и значение энергии единичного удара. Интервалы величин параметров режима бурения были приняты из диапазона, который был определен на первом этапе исследований. Изменение расстояния от точки нанесения удара до забоя h_i производилось исходя из технологических и технических возможностей стендовой буровой установки, в том числе и размеров гидроударника.

В ходе исследования было отмечено, что максимальная скорость углубки достигается при наибольших значениях частоты вращения инструмента, что говорит об эффективности внецентренных ударных импульсов. При этом зависимость скорости углубки от расстояния между точкой нанесения удара и забоем не является линейной. Некоторое снижение темпов прироста производительности бурения при минимальном расстоянии h_i объясняется неоптимальным сочетанием данного параметра с величиной эксцентриситета ударных импульсов.

Изменение двух исследуемых параметров процесса – величины эксцентриситета и расстояния от точки приложения нагрузки до забоя – позволило оценить их влияние, в том числе и совокупное, на скорость углубки забоя (см. рисунок 13).

Из второго этапа исследований можно сделать следующие выводы:

- эффективность разрушения горной породы определяется оптимальным сочетанием величины эксцентриситета и расстояния между точкой приложения нагрузки и забоем;
- минимальное расстояние от точки нанесения внецентренного удара до забоя не всегда соответствует максимальной скорости углубки, что может говорить о необходимости увеличения эксцентриситета;
- существует некоторый резерв в области увеличения параметров режима бурения, так как в рамках проведения исследований максимальные значения частоты вращения соответствовали наибольшей механической скорости.

Третье защищаемое положение. Приложение ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой способствует улучшению показателей эффективности алмазного бурения за счет оптимизации движения нижней части бурильной колонны. Разрушающие напряжения в горной породе обусловлены величиной прилагаемой нагрузки и расстоянием от точки ее приложения до забоя.

Интенсивность естественного искривления скважин является одним из важнейших показателей эффективности бурения геологоразведочных скважин, так как он напрямую влияет на качество их опробования. Равномерное разрушение забоя по всему периметру при приложении ассиметричной динамической нагрузки обеспечивается при условии несовпадения частоты вращения инструмента с частотой ударов гидроударника.

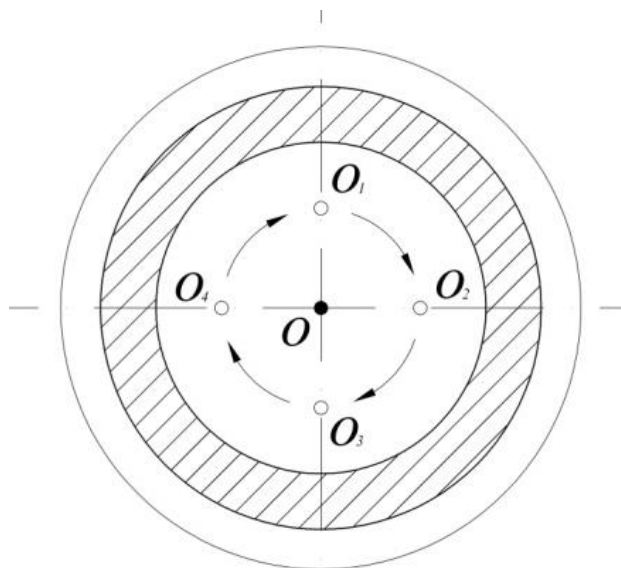


Рисунок 14 - Схема смещения центра вращения бурового инструмента при нанесении внецентренных ударных импульсов

В каждый момент приложения ассиметричной динамической нагрузки точка концентрации напряжений под торцом породоразрушающего инструмента, а, следовательно, и центр вращения, будут смещаться по окружности (см. рисунок 14). Это исключает возможность возникновения ориентированного изгиба в нижней части колонны бурильных труб, являющегося частой причиной отклонения оси ствола скважины от заданного направления.

Известен способ направленного бурения, предложенный В.В. Нескоромных, в котором внецентренные ударные импульсы наносятся в одной плоскости, что создает условия для искусственного искривления скважины в заданном направлении. Механизм искривления скважины обусловлен возникновением

перекоса породоразрушающего инструмента в момент приложения ассиметричной нагрузки и, как следствие, ориентированное разрушение забоя. Следовательно, если ассиметричная динамическая нагрузка будет регулярно смещаться по окружности, то вероятность естественного искривления скважины сводится к минимуму.

Ресурс породоразрушающего инструмента также является важным показателем эффективности алмазного бурения. Он характеризуется долговечностью эксплуатации матрицы в условиях постоянного контакта с абразивными частицами выбуренной горной породы, интенсивного нагрева и вибрации. Для разрушения горной породы необходимо преодолеть стадии упругого и пластического деформирования, при этом известно, что сопротивление горной породы динамическому разрушению на порядок меньше, чем при статическом вдавливании резца.

Анализ производственного отчета ПГО Сосновгеология показал, что увеличение энергии удара гидроударника с 75 до 200 Дж способствовало повышению скорости углубки в 3,5 раза, а ресурса породоразрушающего инструмента – в 7,4 раза. Следовательно, износостойкость алмазного породоразрушающего инструмента напрямую зависит от величины прилагаемой удельной нагрузки. Приложение ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой приведет к локальному увеличению удельной нагрузки, что позволит без дополнительных энергозатрат увеличить скорость углубки забоя и повысить ресурс алмазного породоразрушающего инструмента.

При изменении характера приложения нагрузки на забой напряжения в нижней части бурильной колонны изменяются – появляется изгибающий момент, изменяется распределение нагрузки на забое. С целью исследования данных явлений, в программе AutoCAD Mechanical были построены графические модели нижней части бурильной колонны и породоразрушающего инструмента с последующим их анализом при помощи метода конечных элементов (см. рисунок 15, а). К верхней части построенных моделей была приложена статическая осевая либо ассиметричная нагрузка. Варьировались значения смещения центра приложения нагрузки и расстояния между точкой приложения и забоем.

При смещении центра приложения нагрузки и расстояния от точки приложения до забоя, величины напряжений в ключевых точках (выделены красным) изменялись. Все полученные значения заносились в таблицу, на основе которой были построены графические зависимости величины напряжений от задаваемых параметров (см. рисунок 15, б).

В результате исследования было отмечено, что влияние эксцентриситета E приложения ассиметричной нагрузки на величину продольных напряжений является наиболее значимым и заметным. Во всех случаях наблюдался их рост со стороны центра приложения нагрузки, и уменьшение с противоположной стороны. Такое изменение напряжений способствует лучшему внедрению резцов в горную породу и развитию зоны предразрушения. Вместе с тем, слишком большое внедрение резцов в твердую горную породу может отрицательно сказаться на процессе её разрушения по причине нерационального сочетания сил, действующих на породоразрушающий элемент.

Изменения напряжений в горизонтальной плоскости незначительны, однако присутствуют при всех значениях варьируемых параметров. Боковые перемещения резцов инструмента, которые происходят в момент приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки, способствуют увеличению объема разрушенной горной породы, что положительно сказывается на скорости углубки забоя. Однако чрезмерные поперечные напряжения в твердой горной породе будут снижать эффективность ее разрушения за счет уменьшения глубины внедрения резцов.

Также приложение ассиметричной статической либо динамической нагрузки приводит к появлению изгибающего момента в нижней части бурильной колонны. Это, с одной стороны, способствует снижению интенсивности естественного искривления скважины, с другой – превышение оптимальной величины эксцентриситета приложения нагрузки, либо большое расстояние между точкой приложения ассиметричной нагрузки и забоем, может привести к поломке инструмента либо потере энергии.

Эквивалентные напряжения в буровом инструменте позволяют оценить интенсивность снижения энергии удара на пути от точки ее нанесения до забоя в зависимости от регулируемых параметров процесса (E и h). В среднем, величина напряжений в нижней части бурильных труб Анализ инженерно-компьютерных моделей позволил сделать вывод о том, что с ростом величины эксцентриситета потери энергии от точки нанесения удара до забоя возрастают. Следовательно, во избежание больших потерь энергии, точку приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки следует располагать на минимально возможном расстоянии от забоя.

Технология алмазного бурения с приложением ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой позволяет перераспределить удельную нагрузку под торцом породоразрушающего инструмента таким образом, чтобы обеспечить максимально равномерную интенсивность работы и степень износа резцов, расположенных на разном расстоянии от оси вращения. Изменение расстояния между точкой приложения динамической нагрузки и забоем влияет на эффективность передачи энергии породоразрушающему инструменту. Для создания рациональной величины эксцентриситета приложения динамической нагрузки целесообразно, как было сказано ранее, максимально приблизить точку смещения центра удара к забою.

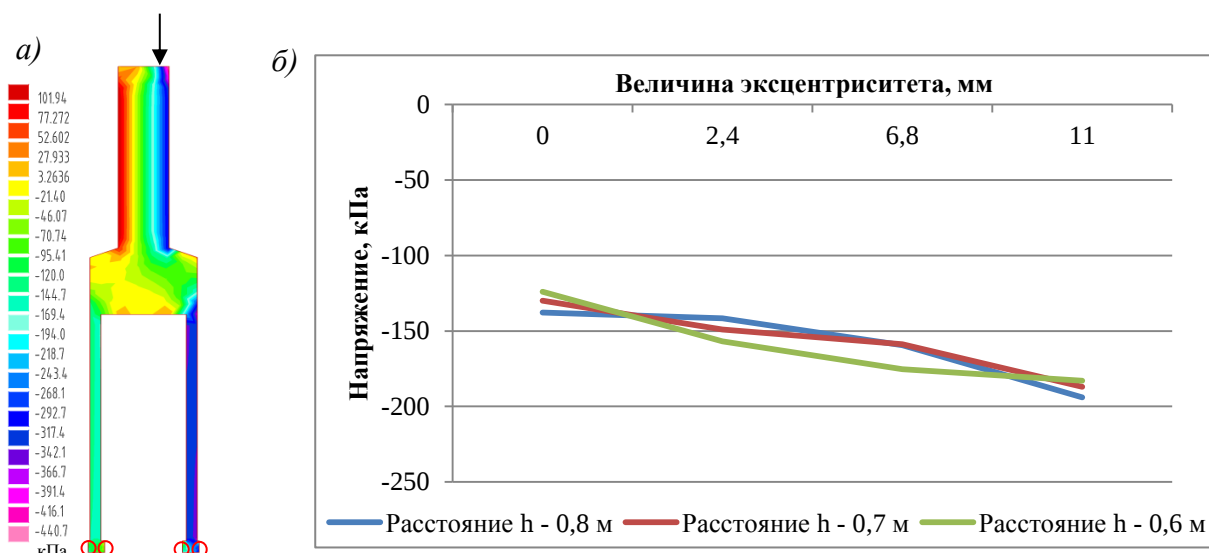


Рисунок 15 – Результаты компьютерных исследований величины напряжений:
 а – Графическая модель напряжений, возникающих в колонковой трубе; б – Пример графической зависимости значения напряжений в точке от величины эксцентриситета

Реализовать предложенную идею возможно за счет внедрения в конструкцию породоразрушающего инструмента шарнирного элемента, обеспечивающего перекося торца матрицы в момент приложения статической либо динамической нагрузки. При этом для вращательно-ударного способа бурения возможно применение серийных забойных гидроударников без необходимости модернизации механизма передачи ударной энергии к буровому инструменту.

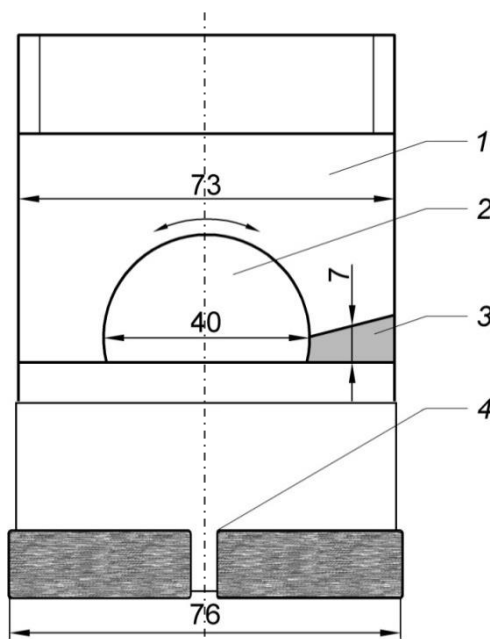


Рисунок 16 – Модель породоразрушающего инструмента, реализующая способ приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой

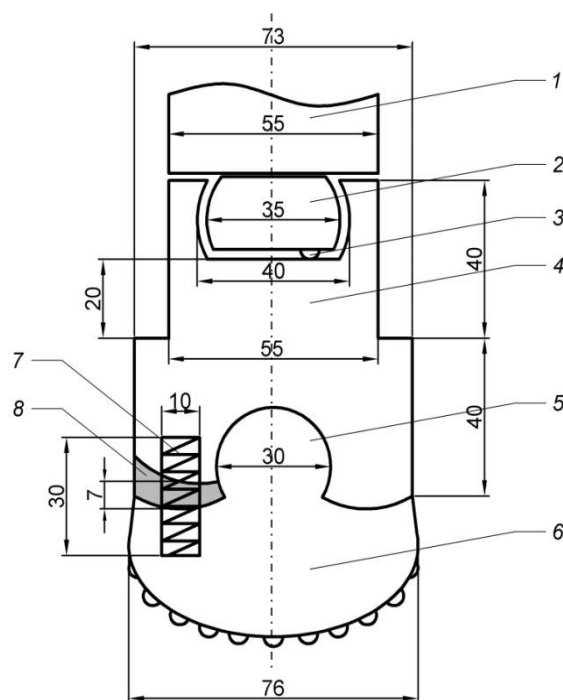


Рисунок 17 – Модель породоразрушающего инструмента, реализующая способ приложения ассиметричной динамической нагрузки на забой с высокой энергией единичного удара

Модель породоразрушающего инструмента, предназначенная для бурения вращательно-ударным способом с малой и средней энергией удара и высокой частотой нанесения ударных импульсов, изображена на рисунке 16. Принцип работы данного инструмента заключается в следующем: шарнир 2, установленный по центру корпуса долота 1, создает эксцентриситет приложения статической либо динамической нагрузки на забой посред-

ством проворота в горизонтальной плоскости за счет эластичной вставки 3, которая одновременно является амортизатором. Точка концентрации напряжений находится в периферийной части торца породоразрушающего инструмента 4. Предложенная модель может быть использована также и без приложения динамической нагрузки.

Значительное повышение энергии единичного удара приводит к появлению чрезмерного скручивающего усилия, результатом которого может являться поломка корпуса инструмента. Подобная ситуация может возникнуть при бурении ударно-вращательным способом с высокой энергией и малой частотой нанесения ударов. Известно, что в ряде стран это один из наиболее распространенных и часто применяемых способов при проведении геологоразведочных работ, используемый в комбинации с вращательным колонковым бурением, позволяющий сократить затраты времени и энергии.

Модель бурового инструмента, представленная на рисунке 17, ориентирована на бурение ударно-вращательным способом с большой энергией единичного удара. Ударный импульс передается от бойка 1 на подвижную наковальню 2, к которой крепится металлическая вставка 3, обеспечивающая смещение центра нанесения удара. Такое конструктивное исполнение породоразрушающего инструмента позволяет предотвратить преждевременную поломку корпуса 4 от большого скручивающего усилия, появляющегося в результате перекоса в шарнирном соединении 5. Торец породоразрушающего инструмента 6 совершает поперечные перемещения за счет пружины 7 и эластичной вставки 8, увеличивая тем самым объем разрушенной горной породы и глубину поражения забоя.

Также одним из вариантов повышения эффективности работы резцов, расположенных на периферии торца алмазного инструмента без применения забойных ударных машин, является увеличение их зернистости (см. рисунок 18). Такое конструктивное решение обеспечит снижение сопротивления внедрению дальних от оси вращения резцов за счет меньшего диаметра алмазного зерна, а объем разрушаемой горной породы возрастет за счет увеличения количества режущих кромок.

Бурение предложенными инструментами позволит обеспечивать высокие показатели эффективности алмазного бурения. Применение компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов позволит производить предварительный расчет и оптимизацию параметров режима работы инструмента и технологических режимов.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с детальным изучением механики работы резцов, расположенных на разном расстоянии от оси вращения, а также анализом забойных процессов методами математического и инженерно-компьютерного моделирования с использованием конечно-элементного анализа.

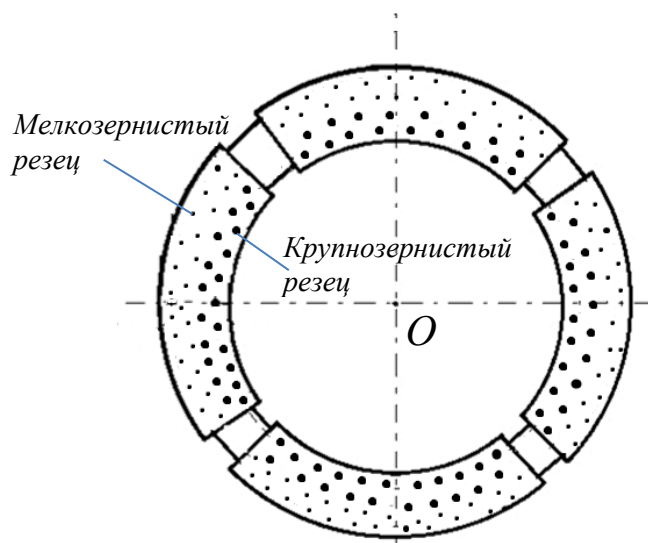


Рисунок 18 – Схема торца алмазной коронки с разной зернистостью объемных алмазов:
O – Ось вращения породоразрушающего инструмента;

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Основные выводы, научные и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Резерв повышения скорости углубки забоя возникает по причине неодинаковой эффективности работы резцов, расположенных на разном расстоянии от оси вращения породоразрушающего инструмента.
2. Повышение скорости углубки при алмазном бурении с приложением асимметричной статической либо динамической нагрузки происходит за счет выравнивания и увеличения глубины поражения горной породы резцами по кольцевой площади забоя.
3. Снижение интенсивности естественного искривления стволов скважин при бурении с приложением асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой обусловлено регулярным смещением центра вращения инструмента относительно оси скважины, в результате чего исключается возможность возникновения ориентированного изгиба нижней части колонны бурильных труб.
4. Создание базовой модели породоразрушающего инструмента позволит реализовать постоянное оптимальное сочетание величины эксцентриситета и расстояния от точки приложения асимметричной статической либо динамической нагрузки до забоя без конструктивного изменения забойных машин ударного действия.
5. Увеличение зернистости алмазных резцов, расположенных на периферии торца породоразрушающего инструмента, повышает скорость углубки путем увеличения количества режущих кромок на единицу площади инструмента.
6. Дальнейшие исследования в области эффективности работы резцов, расположенных на разном расстоянии от оси вращения, могут быть связаны с детальным изучением забойных процессов методами инженерно-компьютерного моделирования с использованием конечно-элементного анализа.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Романов, Г.Р. Проблемы промывки наклонно-направленных скважин / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – Вып. 3 (46). – С. 56-60.
2. Романов, Г.Р. Особенности механизма разрушения твердой горной породы алмазным породоразрушающим инструментом / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – Вып. 5 (48). – С. 59-64.
3. Романов, Г.Р. Исследование влияния внецентренного приложения ударных импульсов на эффективность алмазного бурения / В.В. Нескормных, П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – Вып. 6 (49). – С. 54-61.
4. Романов, Г.Р. Перспективы развития энергосберегающих технологий бурения / Г.Р. Романов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – Вып. 12 (95). – С. 98-102.
5. Романов, Г.Р. Способ снижения величины естественного искривления стволов разведочных скважин / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2016. – вып. 4 (57). – С. 43-47.
6. Романов, Г.Р. Удельная жесткость как показатель эффективности деформации горной породы в процессе бурения / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2016. – том 40, № 1. – С. 107-113.

Статьи в зарубежных изданиях

1. Romanov, G Efficiency increase of hard rock destruction with the use of eccentric pulses / P. Pushmin, G. Romanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 27 (2015) 012052.

Статьи в прочих изданиях:

1. Романов, Г.Р. Исследование затрат мощности на холостое вращение бурильной колонны / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов [и др.] // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. науч. тр. / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2013. – Вып. 13. – С. 260-262.
2. Романов, Г.Р. Оценка рационального сочетания режимных параметров алмазного бурения / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. трудов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – Вып. 13. – С. 107-110.
3. Романов, Г.Р. Возможные пути снижения нерациональных энергозатрат в бурении (на примере производственных данных ФГУП «Иркутскгеология») / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Проблемы освоения минеральной базы Во-

сточной Сибири: сб.науч.трудов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – Вып. 14. – С. 79-84.

4. Романов, Г.Р. Повышение эффективности разрушения твердых горных пород с применением забойных машин ударного действия / Г.Р. Романов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIX Международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. Том II. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2015. – С. 407-409.
5. Романов, Г.Р. Результаты экспериментальных исследований бурения твердых горных пород при приложении внецентренных ударных импульсов / Г.Р. Романов, П.В. Семенов, А.В. Логинов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIX Международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. Том II. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2015. – С. 409-411.

Патенты:

1. Способ бурения скважин с внецентренным нанесением ударных импульсов по забою и устройство для его реализации // В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, Г.Р. Романов [подготовлена заявка на изобретение].