

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Пушмин Павел Сергеевич

Иркутск 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ	11
1.1 Анализ показателей эффективности алмазного бурения.....	11
1.2 Обзор исследований механики процесса разрушения горных пород при приложении динамической нагрузки на забой	16
1.3 Обзор технических решений по совершенствованию процесса разрушения горных пород при приложении статической либо динамической нагрузки на забой	25
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	31
ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ	32
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ ОСЕВЫХ И АССИМЕТРИЧНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ЛИБО ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЗАБОЙ.....	33
2.1 Исследование механики процесса разрушения твердых горных пород при алмазном бурении	33
2.2 Исследование влияния асимметричных динамических нагрузок на процесс разрушения горной породы.....	42
2.3 Анализ влияния асимметричной статической либо динамической нагрузки на показатели эффективности алмазного бурения	47
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	51
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ	52
3.1 Описание этапов экспериментальных исследований.	52
3.2 Методика экспериментальных исследований по опытному бурению блоков горных пород	53
3.3 Методика экспериментальных исследований совокупного влияния величины эксцентриситета и расстояния между точкой нанесения удара и забоем	57
3.4 Методика исследования моделей напряжения в буровом инструменте и горной породе путем конечно-элементного анализа.....	59

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	62
4.1 Анализ результатов экспериментальных исследований влияния величины эксцентриситета на механическую скорость бурения.....	62
4.2 Анализ результатов исследования совокупного влияния величины эксцентриситета и расстояния от точки нанесения удара до забоя на процесс разрушения горных пород.....	68
4.3 Анализ распределения напряжений в буровом инструменте и на контакте с горной породой методом конечных элементов.....	71
4.4 Статистическая оценка достоверности результатов экспериментальных исследований	79
4.5 Возможные варианты реализации предложенной технологии	83
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	88

ВВЕДЕНИЕ

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 ассиметричной 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 ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой.
5. Проведение экспериментальных исследований процесса разрушения горных пород при приложении ассиметричной динамической нагрузки на забой.
6. Исследование влияния приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой на показатели эффективности алмазного бурения.
7. Разработка технологии алмазного бурения с приложением ассиметричной 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 ассиметричной 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 ассиметричной 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 ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой.

В работе защищаются следующие научные положения.

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Научная новизна работы.

1. Выявлены основные закономерности повышения эффективности процесса разрушения горных пород при изменении характера приложения статической либо динамической нагрузки на забой на ассиметричную.
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 асимметричной 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 ИРНИТУ (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 работы 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 Нескормных 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

1.1 Анализ показателей эффективности алмазного бурения

Эффективность буровых работ включает совокупность показателей процесса, исходя из которых определяется целесообразность и экономический эффект от проведения тех или иных операций. 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. Нескормных, П.С. Пушмина, С.Я. Рябчикова, Н.В. Соловьева, В.И. Спирина, С.С. Сулакшина, А.В. Шадринной и других исследователей.

Эффективность алмазного бурения выражается в максимальной производительности и качестве проведения работ в совокупности с минимально возможными затратами на процесс. Стоит отметить, что затраты при бурении включают в себя потери энергии (энергозатраты) и расход ресурсов, а также подразделяются на рациональные и нерациональные [62]. Рациональные затраты обусловлены необходимым и достаточным потреблением энергии и ресурсов для того, чтобы осуществлять процесс бурения в заданных условиях, таких как: способ бурения, физико-механические свойства горных пород, способ очистки забоя и ствола скважины от выбуренной породы и др. Нерациональные – это затраты ресурсов и энергии, потребляемые сверх необходимого минимума в результате низкого КПД применяемого оборудования и технологии бурения. Очевидно, нерациональные затраты должны стремиться к нулю.

Таким образом, эффективность процесса бурения имеет прямую зависимость от производительности (в частности, скорости углубки) и обратную – от количества ресурсов и энергии, затрачиваемых на процесс (искривление стволов скважин, износ породоразрушающего инструмента, энергоемкость процесса разрушения пород).

Учитывая вышеизложенное, а также опираясь на многочисленные исследования [17, 19, 24, 28, 81, 59, 71], наиболее значимыми показателями

эффективности вращательно-ударного бурения твердых горных пород являются:

1. Механическая скорость бурения:

$$V_M = \frac{N}{A_s \times F_3}, \quad (1.1.1)$$

где N – мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы в единицу времени, даН·м/с;

A_s – удельная объемная работа, даН·м/м³;

F_3 – площадь забоя, м².

Из зависимости (1.1.1) следует, что эффективность процесса разрушения горных пород может быть повышена за счет:

- увеличения подводимой к забою мощности, в том числе приложения к породоразрушающему инструменту дополнительной динамической нагрузки;
- уменьшения энергоемкости процесса разрушения;
- снижения площади забоя, либо перераспределения удельной нагрузки.

Производная от механической скорости – углубка за один оборот инструмента ($h_{об} = \frac{V_M}{n}$, где n – частота вращения инструмента) – также может быть использована для анализа эффективности алмазного бурения.

2. Ресурс бурового инструмента.

Горные породы при алмазном бурении, как правило, твердые и абразивные. Помимо высокой механической скорости для эффективного бурения необходимо достигать максимально возможной проходки на коронку/долото.

3. Интенсивность естественного искривления ствола скважины.

Соблюдение заданного направления ствола скважины является одной из важнейших задач при бурении скважин. Затраты энергии и ресурсов на ликвидацию искривлений значительно превышают меры по предотвращению их возникновения.

4. Отношение энергии, затрачиваемой на разрушение горной породы в единицу времени, к механической скорости бурения:

$$\frac{N}{V_M} \rightarrow \min \quad (1.1.2)$$

Данный критерий характеризует возможность оптимизации буровых работ

путем снижения затрачиваемой мощности на процесс отделения частиц горной породы от массива, что, как правило, достигается путем применения специальных технических средств или технологии.

Приведенные показатели эффективности позволяют определить основные направления совершенствования вращательно-ударного способа бурения.

Известно [5, 40, 58, 92, 93], что процесс разрушения горной породы сопровождается стадиями упругого и пластического деформирования. Затраты времени и энергии, необходимые для их успешного преодоления, зависят от прочностных свойств буримой горной породы. В этой связи, для повышения эффективности процесса разрушения забоя, необходимо минимизировать влияние твердости и крепости породы на работу резцов породоразрушающего инструмента. Решения поставленной задачи можно достигнуть за счет увеличения удельной нагрузки на забой, что позволит реализовать большую эффективность работы алмазных резцов за счет оптимизации распределения усилий, действующих на них [70, 94].

Удельная нагрузка определяется величиной осевой нагрузки, деленной на площадь контакта породоразрушающего инструмента с забоем.

$$P_{уд} = \frac{P_{ос}}{S_k} \quad (1.1.3)$$

Очевидно, что уменьшение площади контакта породоразрушающего инструмента с забоем при сохранении величины осевого усилия повысит удельную нагрузку и, соответственно, резцы такого инструмента будут лучше внедряться и работать с большей эффективностью. Такое явление мы наблюдаем в ряде технических решений, направленных на повышение эффективности алмазного бурения [43,59].

Следует отметить, что увеличение осевого усилия с сохранением площади контакта породоразрушающего инструмента с забоем является малоэффективным способом повышения механической скорости, так как приводит к нерациональному износу матрицы, изгибу колонкового снаряда, повышению затрат мощности и др. [33].

Усилие резания-скалывания, действующее в направлении движения резца,

выражено через частоту вращения породоразрушающего инструмента, и, как видно из многочисленных исследований [9,10, 46], увеличение данного параметра повышает мгновенную механическую скорость, однако значительно снижает углубку за один оборот инструмента.

Следовательно, рост эффективности алмазного бурения обусловлен повышением удельной нагрузки при оптимально подобранных параметрах режима бурения, обеспечивающих максимальную механическую скорость и минимально возможные затраты энергии и ресурсов.

В работе П.С. Пушмина [59] предлагается способ уменьшения площади забоя без изменения диаметра бурения за счет оптимальной геометрии торца матрицы породоразрушающего инструмента. Автор предлагает увеличивать механическую скорость бурения в совокупности со снижением интенсивности естественного искривления посредством уменьшения площади каждого сектора таким образом, чтобы наружный и внутренний диаметры бурения оставались прежними [43].

На базе ИРНТУ Н.А. Бугловым и А.В. Карпиковым [11] разработана и экспериментально исследована коронка с уменьшенной площадью торца матрицы, полученная при увеличении одного или нескольких промывочных каналов. Создаваемый эксцентриситет торца матрицы способствует повышению эффективности буровых работ в анизотропных горных породах за счет снижения интенсивности естественного искривления.

Также стоит отметить распространенный способ изменения площади забоя с сохранением наружного диаметра за счет применения тонкоматричных алмазных импрегнированных коронок, способствующих созданию оптимальных условий кернаобразования в совокупности со снижением требуемой осевой нагрузки на инструмент [22, 36, 76]. Такое исполнение породоразрушающего инструмента обеспечивает повышение качества опробования за счет увеличения диаметра керна без изменения наружного диаметра. Применение тонкоматричных снарядов со съемным кернаприемником позволяет увеличить скорость проходки, снизить интенсивность естественного искривления стволов скважин. Вместе с тем, применение данного инструмента значительно повышает требования к

прочностным свойствам всей нижней части колонны бурильных труб, что может привести к повышению стоимости проведения буровых работ [91].

Увеличения удельной нагрузки также можно достигнуть посредством приложения динамической нагрузки на забой. Несмотря на применение большинством производственных предприятий снаряда со съёмным керноприемником, алмазное бурение с приложением динамической нагрузки на забой является одним из перспективных способов бурения на сегодняшний день.

Увеличение механической скорости при использовании забойных гидроударников обусловлено образованием дополнительных напряжений в породе и появлением новых трещин вследствие приложения высокочастотных ударных импульсов малой и средней мощности [29, 35, 41, 53]. При этом наибольшая эффективность достигается при бурении весьма твердых, хрупких и неабразивных горных пород, так как динамическая нагрузка будет компенсировать недостаток осевого усилия, зачастую возникающий в данных геолого-технических условиях при вращательном способе бурения.

Важными параметрами здесь являются давление в линии нагнетания гидроударника и масса ударника [95]. При увеличении этих параметров наблюдается значительный рост механической скорости бурения и ресурса породоразрушающего инструмента. Вместе с тем, это приводит к увеличению мощности, затрачиваемой на процесс бурения, а, согласно зависимости (1.1.2), для повышения эффективности вращательно-ударного способа бурения необходимо минимизировать энергозатраты.

Таким образом, совершенствование алмазного бурения должно быть связано с исследованием влияния удельной нагрузки на механику процесса разрушения горных пород, а также поиском путей её повышения при минимально возможной затрачиваемой мощности.

В этой связи необходимо более подробно исследовать особенности применения динамической нагрузки на забое для повышения эффективности алмазного бурения.

1.2 Обзор исследований механики процесса разрушения горных пород при приложении динамической нагрузки на забой

Исследования механики разрушения горных пород при приложении динамической нагрузки на забой рассмотрены в работах О.Д. Алимова, Ю.Е. Будюкова, Б.И. Воздвиженского, Л.А. Графа, А.Г. Калинина, А.Т. Киселева, Е.А. Козловского, М.И. Койфмана, В.В. Кривошеева, И.Н. Крусира, И.Ф. Медведева, В.В. Нескоромных, Ю.М. Парийского, П.С. Пушмина, В.П. Рожкова, С.Я. Рябчикова, Н.В. Соловьева, С.С. Сулакшина и других исследователей.

Вращательно-ударный способ бурения характеризуется нанесением по забою ударных импульсов малой и средней энергии с высокой частотой. Эффективность применения забойных гидроударников обусловлена высокой удельной нагрузкой под резцами породоразрушающего инструмента. Глубина внедрения резцов в горную породу, как правило, превышает аналогичный показатель для вращательного бурения, что позволяет говорить о более совершенной механике процесса разрушения забоя.

Исследования многочисленных ученых и производственных предприятий [2, 5, 10, 15, 21, 71, 92, 95] связывают положительное влияние ударных импульсов с тем, что сопротивление динамическому воздействию у большинства твердых тел на порядок ниже сопротивления статическому напряжению сжатия. При работе бурового инструмента в области контакта резцов с поверхностью забоя образуется слой растрескавшейся горной породы, значительно превышающий глубину внедрения резцов [7, 64, 77]. Этот слой был впервые описан академиком И.А. Ребиндером и назван «зоной предразрушения» [8, 67, 68]. При этом наибольшая величина этой зоны наблюдается при разрушении твердых и хрупких горных пород, что обусловлено взаимодействием между собой кристаллов массива. Также известно [54, 83], что под действием циклической динамической нагрузки, действующей перпендикулярно плоскости забоя, глубина поражения забоя существенно увеличивается.

Скорость образования трещин в горной породе пропорциональна подводимой к забою мощности [67], что говорит о целесообразности повышения

удельной нагрузки для увеличения производительности. Рост эффективности процесса разрушения обусловлен снижением затрат времени и энергии на преодоление упругого и пластического деформирования. Известно [14, 53, 56], что резцы работают в условиях сниженной прочности горной породы в результате большого количества трещин в зоне предразрушения. Следуя данной логике, для увеличения производительности вращательно-ударного способа бурения необходимо обеспечить максимальную глубину поражения забоя, а при подборе породоразрушающего инструмента необходимо учитывать влияние зоны предразрушения на механику процесса разрушения [55, 86].

В работах [11, 58, 59] авторы указывают на влияние величины зоны предразрушения на деформационные процессы в горных породах, обладающих анизотропией прочностных свойств. При увеличении её глубины, интенсивность естественного искривления уменьшается по причине снижения дестабилизирующего усилия, действующего на породоразрушающий инструмент. Так как интенсивность естественного искривления стволов скважин является одним из важных показателей эффективности процесса бурения, необходимо обеспечивать максимально равномерный рост зоны предразрушения по всей площади забоя [33, 85].

На величину интенсивности естественного искривления стволов скважин, помимо анизотропии горной породы, оказывает влияние множество технологических и технических факторов, таких как изгибающее усилие в сжатой части колонны бурильных труб, жесткость компоновки [23, 33, 34, 65, 91] и др. Одним из наиболее важных факторов, согласно работе [49], является соотношение скорости фрезерования и механической скорости бурения, которое определяется режимными параметрами, в частности, осевой нагрузкой. Бурение с применением забойных гидроударников, как было отмечено ранее, способствует повышению механической скорости без увеличения осевой нагрузки, что сводит к минимуму возможность перекоса бурового инструмента на забое и снижает скорость фрезерования стенки скважины.

Стоит отметить, что снижение перекоса инструмента положительно

сказывается на качестве опробования [84]. Ввиду того, что данный показатель является одним из наиболее важных с точки зрения достоверности информации, рост производительности работ, согласно [50], должен обеспечиваться при минимально возможном осевом усилии. В работах [18, 50, 84] говорится о прямой зависимости между механической скоростью бурения и % выхода керна. Исследование влияния дестабилизирующего усилия на механику процесса разрушения горной породы [58, 59, 78] показывают, что снижение скорости фрезерования стенок скважины приводит к увеличению производительности буровых работ за счет уменьшения объема разрушенной горной породы в единицу времени при одновременной стабилизации диаметров выработки и керновых проб.

Очевидно, что снижение дестабилизирующего усилия положительно воздействует на многие показатели эффективности, такие как интенсивность износа торца матрицы инструмента, искривления стволов скважин, энергоемкость процесса разрушения горной породы, механическая скорость бурения, а также качество опробования [44, 88]. Таким образом, объясняется тесная взаимосвязь между ростом производительности буровых работ и снижением нерациональных затрат энергии и ресурсов, связанных с выполнением резцами работы сверх необходимого минимума.

Анализ литературных источников позволил сделать вывод о безусловной важности исследования зоны предразрушения с точки зрения механики работы единичных резцов.

Известно [6, 17, 50, 59], что движение резца инструмента по поверхности горной породы сопровождается образованием на его передней грани поля максимальных напряжений, называемых ядром сжатия-смятия. Форма и размеры ядра влияют на интенсивность развития трещин в массиве горной породы, причем глубина борозды разрушения, как правило, в несколько раз превышает глубину внедрения резца. Приложение циклических ударных нагрузок к породоразрушающему инструменту (рис. 1.2.1, б) изменяет продольный размер ядра сжатия (перпендикулярно плоскости забоя), что значительно увеличивает глубину поражения забоя [46, 50].

На рисунке 1.2.1 заметно влияние ударных импульсов на вертикальные размеры ядра сжатия-смятия. Динамическая нагрузка увеличивает глубину внедрения резца в горную породу, а рост глубины борозды увеличивает зону предразрушения.

Характер нанесения ударных импульсов напрямую влияет на способность образования новых и развития имеющихся трещин [21, 45, 50, 71] – большое значение имеет оптимальное сочетание между частотой нанесения ударов и угловой скоростью инструмента. В работах [29, 48, 57] говорится о необходимости совпадения частоты создания ударных импульсов с частотой циклов разрушения $n_{ц}$ горной породы резцами. Величина $n_{ц}$ за один оборот инструмента зависит от соотношения длины периметра забоя радиусом R и интервала скола передней гранью резца $l_{ц}$ [29, 47]:

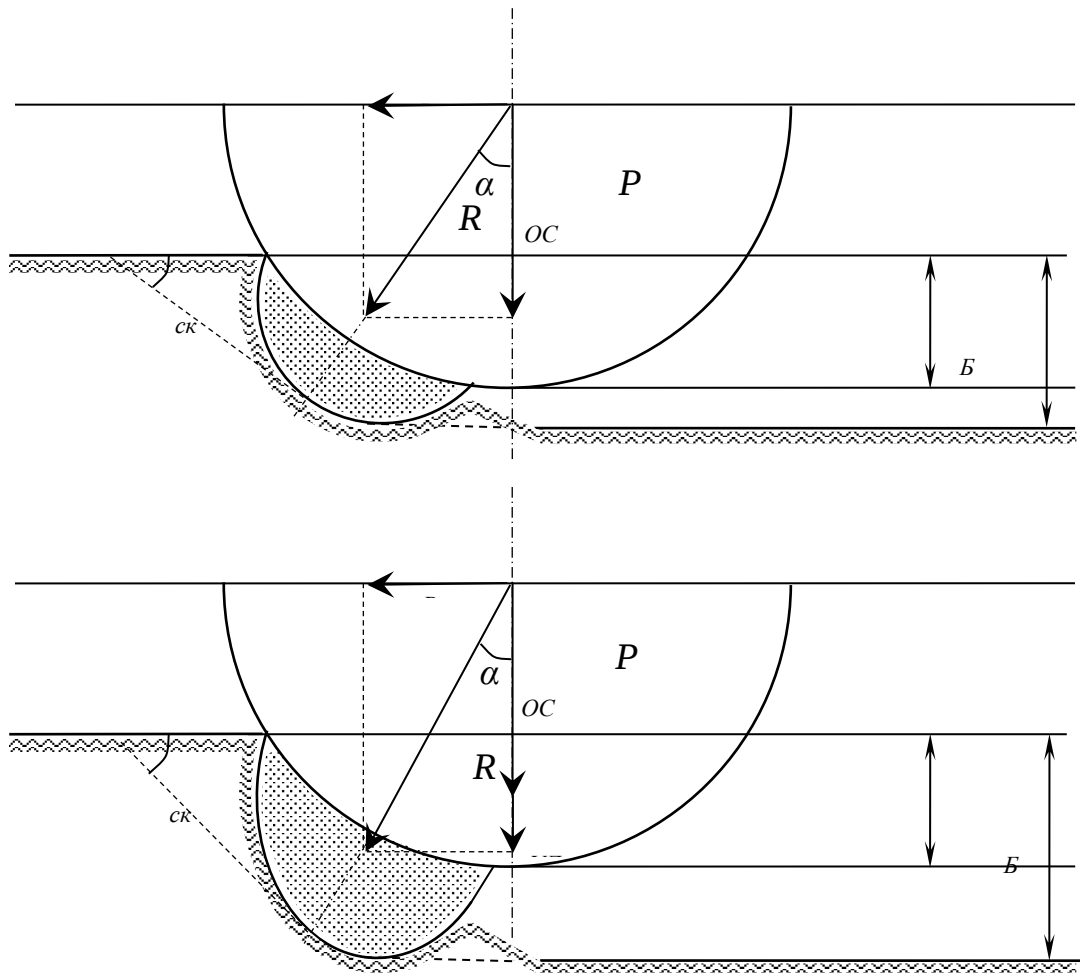


Рисунок 1.2.1 – схема, показывающая изменение глубины борозды от приложения динамической нагрузки: а – статическое осевое усилие; б – приложение динамической нагрузки; F_P – усилие резания; P_{OC} – осевое усилие; R – результирующий вектор; α – угол наклона результирующего

$$n_{ц} = \frac{2\pi \times R}{l_{ц}} \quad (1.2.1)$$

Тогда оптимальная частота нанесения ударов определяется из зависимости [50]:

$$n_{уд} = \frac{\omega \times n_{ц}}{n_p}, \quad (1.2.2)$$

где n_p – число активно работающих резцов в линии резания на торце коронки.

Таким образом, оптимальное значение частоты ударов, наносимых по забою, пропорционально частоте вращения ω породоразрушающего инструмента. Это отражено в исследованиях [12, 21, 25]: рост частоты вращения при постоянном значении частоты нанесения ударных импульсов приводит к снижению темпов прироста механической скорости по сравнению с вращательным способом.

Рациональную частоту вращения бурового инструмента, при известном значении частоты нанесения ударов $n_{уд}$, можно найти из следующей зависимости [50]:

$$\omega = \frac{n_{уд} \times N_0 \times h}{2\pi \times R \times \tan \gamma_{ск}}, \quad (1.2.3)$$

где N_0 – число резцов в линии резания на торце коронки (средняя линия торца матрицы на расстоянии от центра торца равном R);

h – глубина внедрения резца в горную породу, м;

$\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы.

Максимальная эффективность вращательно-ударного способа бурения, согласно работе [50], достигается при бурении алмазными импрегнированными коронками в горно-геологических условиях, предрасположенных к возникновению заполирования алмазных резцов. Механическая скорость бурения повышается на 30-40%, проходка за один рейс увеличивается на 15-25%, износостойкость инструмента улучшается на 35-50%, выход керна возрастает с 70% до 80-90%, а также снижается интенсивность естественного искривления стволов скважин. Такие результаты могут быть обусловлены увеличением зоны предразрушения за счет достаточно большого числа активно работающих резцов в линии резания и повышения удельной нагрузки.

Влияние осевой нагрузки также имеет большое значение на эффективность вращательно-ударного способа бурения, так как при недостаточном её значении во время «отскока» бойка ударной машины существует риск потери контакта резцов с забоем, что может существенно снизить производительность буровых работ [16, 30, 71, 95, 96]. Оптимальные значения осевой нагрузки, согласно [20, 69, 82], помимо параметров забойной ударной машины, определяются исходя из диаметра бурения, типа породоразрушающего инструмента, прочностных свойств горной породы и сопутствующих режимных параметров.

Величина подачи бурового раствора при гидроударном бурении имеет неоднозначное влияние на эффективность буровых работ. Известно [20, 21, 29], что повышение давления в линии нагнетания промывочной жидкости способствует увеличению энергии единичного удара. Согласно данным из отчета ПГО «Сосновгеология», увеличение энергии единичного удара при бурении гидроударниками с 75 до 200 Дж привело к росту механической скорости в 3,5 раза, а ресурса инструмента в 7,4 раза [35, 80].

На рисунке 1.2.2 приведены зависимости, полученные в результате исследования влияния энергии удара на механическую скорость бурения и ресурс инструмента [30]. Из зависимостей видно, что рост данного фактора способствует улучшению показателей, но лишь до некоторого момента, после которого идет снижение темпов прироста производительности, а износ коронок повышается. Вместе с тем, в работе [50] описан механизм скачкообразного увеличения объема разрушенной горной породы в результате повышения удельной нагрузки при определенных значениях энергии удара. Следовательно, дальнейшее увеличение энергии удара может привести к появлению новых пиков роста показателей бурения, что говорит о безусловной важности повышения динамической нагрузки с учетом технико-технологических условий проведения работ. Основные рекомендации по рациональной энергии удара для различных горных пород и типа породоразрушающего инструмента приводятся в работах [3, 4, 89].

Однако, следует учесть [30, 72], что многие попытки достигнуть больших механических скоростей путем увеличения ударной мощности за счет потока

очистного агента, приводили к повышенным затратам энергии и ресурсов, снижающим рентабельность применяемых методов. Также чрезмерная интенсификация потока промывочной жидкости [63] зачастую приводит к таким явлениям, как: размыв керна и стенок скважины, обводнение проницаемых

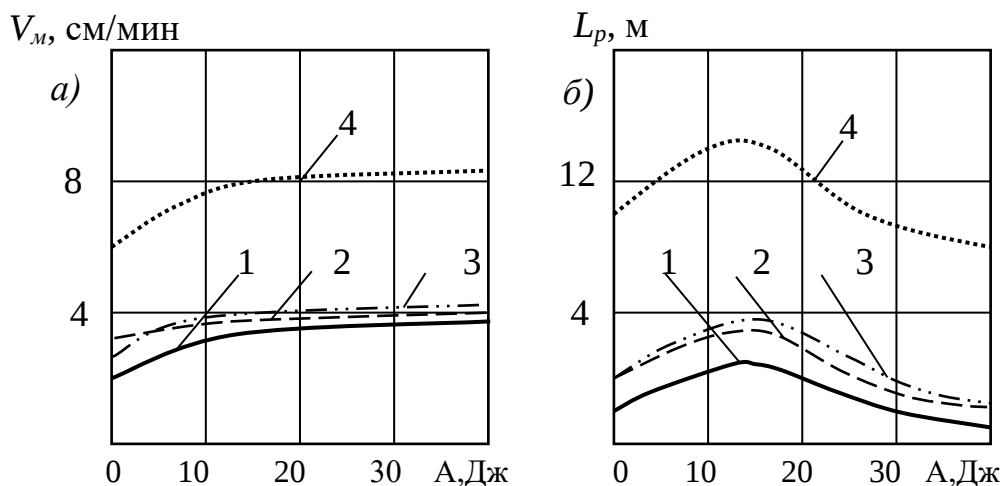


Рисунок 1.2.2 – Зависимости показателей бурения алмазной коронкой 01А3 от энергии удара A : а – механической скорости; б – проходки на коронку по породам: 1 – кварцит; 2 – гранит; 3 – лабрадорит; 4 – песчаник

пластов, гидроподпор, повышенный расход бурового раствора.

Увеличение массы ударника [75] также способствует повышению энергии единичного удара, однако это может привести к уменьшению максимальной частоты нанесения ударов, что, согласно зависимости (1.2.3), потребует снижения частоты вращения.

Вышеуказанное объясняет резкое снижение темпов развития гидроударного способа бурения с одновременным широким применением и развитием снарядов и комплексов со съёмным кернаприемником. Таким образом, для повышения эффективности буровых работ при комбинировании ударной нагрузки с вращением, требуется оптимизация распределения имеющейся энергии по забою посредством конструктивного изменения породоразрушающего инструмента или забойных машин ударного действия.

Помимо разрушающего воздействия на забой скважины со стороны бурового инструмента, весьма большое значение имеет эффективность очистки забоя от шлама [62, 63]. Для этого поток промывочной жидкости под торцом породоразрушающего инструмента должен обладать максимально возможной турбулентностью и

оптимальной скоростью течения. В работах [38, 63] описывается влияние количества шлама в области забоя на интенсивность искривления стволов скважин при наклонно-направленном бурении. Накопление частиц выбуренной горной породы происходит под действием эффекта Бойкотта [63], который выражается в активном их осаждении в наклонных участках ствола скважины.

Средствами, улучшающими эффективность очистки забоя и ствола скважины, как правило, являются реагенты, повышающие реологические характеристики буровых растворов, либо технические средства, обеспечивающие пульсацию потока промывочной жидкости [30, 63]. Забойные ударные машины гидравлического действия реализуют высокую скорость и турбулентный характер течения жидкости в области забоя, что благоприятно влияет на эффективность очистки призабойной области и ствола скважины от шлама. При этом чрезмерный перепад давления, негативно воздействующий на проницаемые пласты и породы, склонные к размыву, можно снизить посредством делителей потока [31].

Весьма большое значение имеет направление и упорядоченность колебаний, вызванных в буровом инструменте, как на забое, так и в колонне бурильных труб [60]. В работе [50] автор указывает на тот факт, что продольные колебания в буровом инструменте способствуют улучшению большинства показателей эффективности буровых работ, в то время как крутильные и поперечные колебания повышают крутящий момент, способствуют уменьшению механической скорости и повышению интенсивности износа инструмента, керна и стенок скважины.

Производственные исследования ПГО «Сосновгеология» [73] показали, что применение высокочастотной гидроударной машины при высокооборотном алмазном бурении способствует увеличению механической скорости и снижению энергозатрат, независимо от глубины ее расположения в масштабах скважины.

Такие результаты свидетельствуют о влиянии продольных колебаний, в первую очередь, на работу колонны бурильных труб, как весьма важную составляющую от общей эффективности процесса углубки скважины. Энергия удара, доходившая до забоя в ходе всех этапов экспериментального исследования, не оказывала решающего воздействия на процесс разрушения горных пород, однако частоты и амплитуды,

создаваемой гидроударником, было достаточно для снижения коэффициента трения между колонной бурильных труб и стенкой скважины, а также уменьшения влияния и вероятности возникновения поперечных и крутильных колебаний.

Следует отметить, что колебания, вызванные искусственно, существенно отличаются от естественных колебаний, возникающих в процессе работы бурильного инструмента [50, 90]. Эксперименты, проведенные в буровой лаборатории ИРНИТУ [60] показали, что естественные колебания значительно повышают затраты мощности на вращение колонны бурильных труб. Среда, в которой происходило вращение, оказывала влияние, в первую очередь, на возможность возникновения естественных колебаний в колонне, а реологические свойства, с точки зрения сопротивления её вращению, имели второстепенное значение. Увеличение глубины скважины несколько изменяет ситуацию, так как под действием сил растяжения бурильная колонна начинает меньше колебаться в поперечной плоскости, но при этом увеличивается вероятность возникновения крутильных колебаний. Продольные колебания, создаваемые забойными ударными машинами, являются упорядоченными и способствуют снижению влияния хаотичных естественных колебаний на механику движения колонны бурильных труб, при этом важным фактором является коэффициент трения в непосредственном контакте породоразрушающего инструмента с забоем [26, 69, 79].

Согласно работе [50], кратковременное воздействие ударных импульсов в направлении, перпендикулярном плоскости забоя, позволяет более полно реализовать резерв прочностных свойств резцов бурового инструмента. Благодаря высокой частоте нанесения ударных импульсов, сила трения между резцом и горной породой не успевает развиваться, вследствие чего разрушающее воздействие со стороны забоя на резец невелико.

Однако, несмотря на все преимущества в механике процесса разрушения горных пород, вращательно-ударный способ бурения претерпевает кризис развития, что во многом вызвано его невысокими адаптационными характеристиками и общим спадом темпов развития отечественного геологоразведочного оборудования.

Таким образом, одной из важных задач является исследование технических

решений, направленных на повышение эффективности вращательно-ударного способа бурения с целью поиска путей его совершенствования и увеличения области применения.

1.3 Обзор технических решений по совершенствованию процесса разрушения горных пород при приложении статической либо динамической нагрузки на забой

Технические решения, направленные на повышение эффективности процесса разрушения горных пород, зачастую заключаются в увеличении подводимой к забою мощности, в разработке нового и усовершенствовании существующего породоразрушающего инструмента.

Целью большинства разрабатываемых технических средств является увеличение износостойкости буровых инструментов, уменьшение энергоемкости процесса разрушения горных пород, снижение стоимости одного метра бурения, а также повышение КПД применяемого оборудования.

В таблице 1.3.1 приведены технические решения, предназначенные для повышения эффективности процесса разрушения горных пород при приложении статической либо динамической нагрузки на забой.

Таблица 1.3.1 – Технические решения по совершенствованию процесса разрушения горных пород при приложении статической либо динамической нагрузки на забой

Предназначение и сущность технического решения	Тип инструмента
1	2
Повышение эффективности бурения крепких пород в условиях проходки гидрогеологических скважин	Ударное устройство для бурения скважин по а.с. № 2012758 (РФ)
Повышение эффективности вращательно-ударного разрушения горных пород путем наложения на ударный импульс дополнительного импульса за счет движения тяжелой магнитоактивной жидкости	Способ разрушения горных пород ударными импульсами и устройство для его реализации по а.с. № 2209913 (РФ)

Продолжение таблицы 1.3.1

1	2
Повышение энергии единичного удара за счет использования реактивных камер и инерционных втулок-золотников	Гидроударник двойного действия по а.с. № 449141 (СССР)
Повышение эффективности и расширение области применения гидроударного бурения путем повышения КПД работы гидроударных машин	Способ бурения погружными гидроударниками и отражатель-синхронизатор гидроударника по а.с. № 2192534 (РФ)
Повышение эксплуатационной надежности и эффективности работы двойного колонкового снаряда при бурении с применением гидро- и пневмоударников	Двойной колонковый снаряд по а.с. № 2098595 (РФ)
Повышение эффективности бурения снарядами со съёмным кернаприемником	Устройство для бурения комплексом КССК-76 с гидроударником ССГ-76
Повышение эффективности бурения за счет повышения скорости бурения и снижения искривления скважин	Способ бурения по а.с. № 2528316 (РФ)
Повышение эффективности алмазного бурения путем снижения интенсивности естественного искривления скважины	Алмазная коронка по а.с. № RU49085U1

Большая часть изобретений связана с разработкой эффективной конструкции забойных ударных машин, обеспечивающих оптимальные показатели работы в различных условиях. Как правило, вращательно-ударный способ бурения применяется в твердых, хрупких горных породах, обладающих большой энергоемкостью процесса разрушения [28, 73].

Устройство по а.с. № 2012758 предназначено для бурения в условиях проходки гидрогеологических скважин и позволяет повысить эффективность бурения крепких горных пород. Конструктивное исполнение данного устройства позволяет обеспечивать нанесение ударных импульсов по забою за счет массы ударника при повороте его относительно специальной втулки – т.е. без использования энергии потока очистного агента, что можно считать преимуществом по отношению к другим забойным ударным машинам. Вместе с

тем, частота и энергия ударных импульсов, создаваемых устройством, зависит от угловой скорости инструмента и массы ударного механизма.

Основным недостатком данного устройства можно считать невозможность обеспечения оптимального соотношения частоты вращения инструмента с частотой и энергией нанесения ударных импульсов для разных типов горных пород. Также следует отметить, что работа ударного механизма приведенного устройства обеспечивается силой притяжения Земли, что делает малоэффективным бурение скважин с отклонением от вертикали.

Повысить энергию единичного удара можно при помощи наложения дополнительных ударных импульсов, как это описывается в авторском свидетельстве № 2209913. Согласно описанию устройства, дополнительные ударные импульсы образуются поверх импульсов, возникающих при работе ударной машины, путем перемещения в поршне ударника тяжелой магнитоактивной жидкости с низкой вязкостью. Формирование такого импульса обеспечивается за счет внешнего магнитного поля, возникающего в катушке обмотки, расположенной в корпусе ударной машины в области движения поршня. Ударный импульс приобретает свойства динамического экспоненциального нагружения с последующим резким снижением давления на породоразрушающий инструмент. Данный способ создания ударных импульсов позволяет повысить удельную нагрузку без увеличения давления в линии нагнетания забойной машины ударного действия. Вместе с тем, данное устройство имеет достаточно сложную схему регулирования параметров нанесения ударных импульсов. При этом для создания дополнительных ударных импульсов требуется передача электроэнергии на забой по силовому кабелю, что значительно усложняет реализацию работы устройства, особенно в условиях отдаленных участков проведения буровых работ.

Зачастую для достижения эффективного процесса разрушения горных пород при вращательно-ударном способе бурения требуется высокая скорость течения промывочной жидкости, что обусловлено низким КПД рабочих органов забойного гидроударника. Снижение гидравлических потерь в ударной машине позволит уменьшить оптимальное значение данного параметра, либо повысить энергию

единичного удара за счет более рационального использования энергии потока. Решения поставленной задачи можно достичь путем конструктивного усовершенствования рабочих элементов в линии нагнетания, которое позволит оптимально распределить расходуемую энергию.

Устройство по а.с. № 449141 является гидроударником двойного действия и обеспечивает решение поставленной задачи при помощи энергии, образующейся в реактивных камерах, расположенных в верхней и нижней частях бойка и попеременно соединяемых с камерами низкого давления посредством перемещения инерционных втулок-золотников. Такая конструкция обеспечивает повышение энергии единичного удара, и позволяет более рационально расходовать промывочную жидкость. Однако, при всей перспективности данной технологии, следует отметить низкую надежность и высокую сложность изготовления указанного устройства.

Современные научные исследования гидроударного бурения [27] направлены, в основном, на изменение длины хода и скорости перемещения бойка при его движении вверх. Это позволяет повысить энергию единичного удара, КПД ударной машины, и увеличить область применения погружных гидроударников двойного действия. В частности, сегодня известна практика применения гидравлических ударных механизмов для извлечения прихваченных буровых снарядов.

Повышение КПД гидравлических ударных механизмов является важной и актуальной задачей, которую решают множеством способов. Один из таких способов описан в а.с. № 2192534. Его реализация обеспечивается применением расчетно-проективного метода регулирования параметрами работы погружного гидроударника, а также использованием в составе оборудования отражателя-синхронизатора. Сущность изобретения заключается в определении оптимального расхода промывочной жидкости из соотношения, учитывающего плотность бурового раствора, основные диаметры проходных отверстий, продольные размеры каналов, габариты и сечения основных рабочих органов устройства и др. При этом отражатель-синхронизатор, расположенный над гидроударником,

выполнен в соответствии с оптимальным отношением диаметра канала между отражающими элементами и его длиной. Такой подход позволяет рационально использовать энергию подаваемой на забой жидкости, так как величина ее расхода отвечает потребностям рабочих узлов в давлении. Синхронизатор-отражатель в свою очередь увеличивает энергию ударного импульса за счет отраженной волны давления, приход которой в рабочую камеру совпадает с движением бойка в сторону забоя.

Способ и устройство имеют довольно сложную схему работы, для реализации которой требуется устойчивая обратная связь, а также постоянный контроль изменения плотности и реологических свойств промывочной жидкости, давления от гидравлических сопротивлений. Несмотря на это, данный способ обладает перспективами в развитии, так как позволяет повысить удельную нагрузку на забое, и при должной проработке может применяться в бурении разведочных и эксплуатационных скважин.

При вращательно-ударном способе бурения [23] зачастую используется одинарный колонковый снаряд, что не может обеспечить максимальную сохранность керна по причине частого контакта с внутренней стороной колонковой трубы. В устройстве по а.с. № 2098595 используется двойной колонковый снаряд, причем конструкция его такова, что обеспечивается сбор кернашамовой пробы по всему диаметру бурения, а также упрощенный монтаж и повышенная надежность оборудования. Основным недостатком устройства является передача ударных импульсов буровому инструменту через кернаприемную трубу, что не позволит передавать импульсы большой энергии и ограничивает область применения данного способа.

Ввиду того, что бурение со съемным кернаприемником является одним из наиболее эффективных и широко применяемых способов, перспективными могут быть разработки в области адаптации гидро- и пневмоударных машин к снарядам ССК и КССК. Одним из вариантов решения такой задачи является опыт компании СКБ ВПО «Союзгеотехника», которая разработала снаряд ССК-59СГ, в верхней части подшипникового узла которого закреплен высокочастотный гидроударник,

передающий ударные импульсы алмазной коронке через наружную колонковую трубу. При самозаклинивании керна удары наносятся также и по внутренней кернаприемной трубе, что исключает возможность преждевременного прекращения работы снаряда даже в условиях высокой степени трещиноватости горных пород [98]. Указанное техническое решение является перспективным в области рационального применения гидроударников, так как позволяет совместить преимущества снарядов со съёмными кернаприемниками и гидроударного бурения.

Применение алмазной коронки по а.с. № RU49085U1 повышает эффективность бурения путем интенсификации углубки забоя и снижения интенсивности естественного искривления скважины. Уменьшение площади контакта породоразрушающего инструмента с горной породой при сохранении наружного и внутреннего диаметров способствует увеличению удельной нагрузки на забой, в результате чего резцы имеют возможность внедряться на большую глубину.

Согласно проведенному анализу, можно сделать вывод, что совершенствованию бурения с приложением статических либо динамических нагрузок на забой посвящено сравнительно небольшое количество разработок, несмотря на значительный потенциал повышения удельной нагрузки, в том числе и при динамическом разрушении горных пород. Это связано, вероятнее всего, с невысоким КПД большинства серийных гидроударных машин прошлого столетия.

Таким образом, повышение эффективности алмазного бурения может быть обеспечено приложением, например, ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой с целью повышения или оптимального перераспределения удельной нагрузки без дополнительных затрат энергии.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

По результатам проведенного анализа литературных источников, очевидно, что совершенствование алмазного бурения является актуальной задачей и требует дополнительных исследований, связанных с механикой работы резцов породоразрушающего инструмента.

Рост показателей эффективности алмазного бурения, в том числе и с приложением динамической нагрузки на забой, обусловлен повышением либо оптимальным перераспределением удельной нагрузки, обеспечивающей внедрение алмазных резцов в горную породу.

Наиболее важным аспектом механики процесса разрушения горных пород является глубина зоны предразрушения, формируемая сочетанием усилий резания и осевого, действующих на каждый резец породоразрушающего инструмента. Увеличение глубины поражения забоя позволяет значительно повысить эффективность алмазного бурения за счет снижения сопротивления перемещению резцов в зоне пониженной прочности горной породы. Бурение с приложением динамической нагрузки на забой, как было отмечено ранее, способствует уменьшению требуемого осевого усилия, что сводит к минимуму возможность перекоса бурового инструмента на забое.

Согласно проведенному анализу литературных источников, рост производительности буровых работ с приложением динамической нагрузки на забой зачастую связан с увеличением затрат энергии и ресурсов. Следовательно, важной и актуальной задачей совершенствования алмазного бурения, в том числе и с приложением динамической нагрузки на забой, является поиск методов интенсификации работы резцов породоразрушающего инструмента без увеличения затрачиваемой мощности.

Большинство технических решений, предназначенных для повышения эффективности бурения с приложением динамической нагрузки на забой, направлены на увеличение КПД ударного механизма и оптимизацию забойных процессов. При этом перспективы развития алмазного бурения связаны с повышением или оптимальным распределением удельной нагрузки на забое.

Реализовать это возможно за счет приложения на забой ассиметричных статических либо динамических нагрузок. Исходя из этого, требуется более глубокое исследование алмазного бурения, в том числе и с приложением динамической нагрузки на забой, с точки зрения механики работы единичного резца.

ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ

Исходя из цели диссертационного исследования, а также в соответствии с выводами, полученными при обзоре литературных источников, определены основные исследовательские задачи:

1. Исследование механики процесса разрушения горных пород при алмазном бурении, в том числе и с приложением динамической нагрузки.
2. Исследование влияния ассиметричной статической либо динамической нагрузки на процесс разрушения горной породы.
3. Анализ влияния ассиметричной статической либо динамической нагрузки на показатели эффективности алмазного бурения.
4. Проведение экспериментальных исследований процесса разрушения горных пород при алмазном бурении с приложением ассиметричной динамической нагрузки на забой.
5. Исследование величины напряжений в буровом инструменте при осевом и ассиметричном приложении нагрузки методом конечно-элементного анализа.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ ОСЕВЫХ И АССИМЕТРИЧНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ЛИБО ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЗАБОЙ

2.1 Исследование механики процесса разрушения твердых горных пород при алмазном бурении

Согласно проведенному анализу технических решений, повышение эффективности алмазного бурения связано с увеличением, либо оптимальным распределением, удельной нагрузки на забой.

Для того чтобы выявить наиболее эффективные методы, позволяющие оптимизировать процесс разрушения горной породы, необходимо проанализировать некоторые особенности конструктивного исполнения алмазного породоразрушающего инструмента с точки зрения механики работы единичного резца.

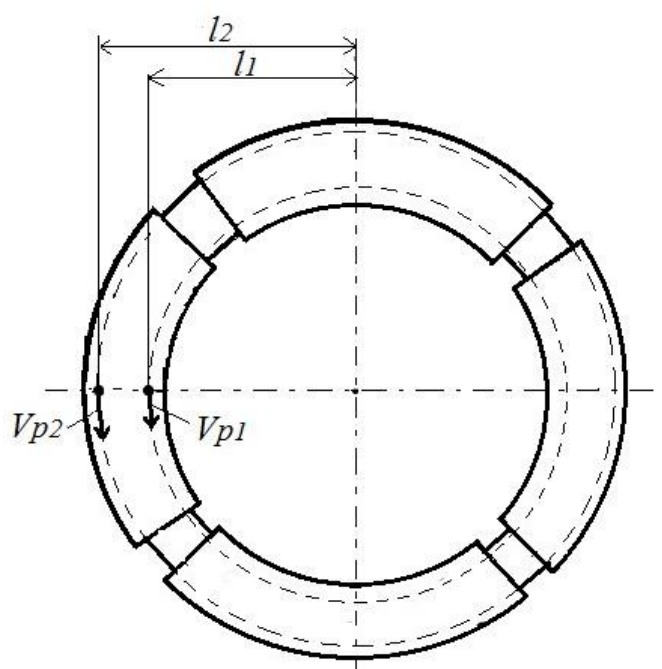


Рисунок 2.1.1 – Схема для анализа работы алмазных резцов

Известно [59], что алмазный буровой инструмент обладает большим количеством резцов малого размера, равномерно распределенных по торцу матрицы. Каждый из резцов находится на некотором расстоянии от оси вращения инструмента на условной концентрической окружности (рис. 2.1.1), в соответствии с определенными схемами раскладки. При изменении расстояния l от оси вращения инструмента до алмазного зерна, его

линейная скорость перемещения V_p изменяется пропорционально расстоянию. Таким образом, линейная скорость перемещения резцов, расположенных на периферии торца матрицы будет значительно выше скорости резцов, расположенных на внутренних концентрических окружностях. По этой причине

бурение алмазным инструментом характеризуется неравномерностью распределения разрушающих усилий под торцом рабочей части, что приводит к неполной реализации возможностей его работы.

Забойные процессы, происходящие в момент работы алмазного инструмента, характеризуются наличием большого числа точек концентрации касательных напряжений, возникающих перед каждым активным алмазным резцом (ядра сжатия-смятия). Одним из наиболее важных элементов механики работы единичного резца является глубина борозды разрушения, которая образуется в результате взаимодействия между собой кристаллов упруго-хрупкой горной породы при движении алмазного зерна по забою и обусловлена формой и размерами ядра сжатия-смятия породы (рис. 2.1.2).

Глубина борозды разрушения h_B определяется из зависимости:

$$h_B = 0,25 \cos \alpha (2h + \sqrt{dh}), \quad (2.1.1)$$

где α – угол смещения ядра сжатия-смятия под действием тангенциального усилия;

h – глубина внедрения резца в горную породу.

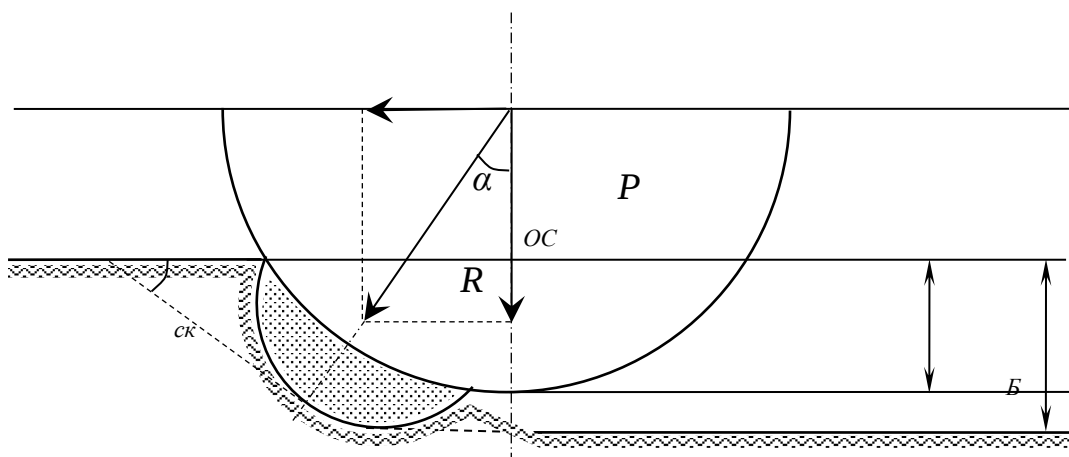


Рисунок 2.1.2 – Схема, показывающая процесс разрушения горной породы единичным алмазным резцом

Известно [47,59], что глубина борозды разрушения в несколько раз больше глубины внедрения резца в горную породу и растет при уменьшении угла α . Увеличение угловой скорости ω приводит к смещению ядра сжатия-смятия по направлению движения резца, так как усилие резания-скалывания для каждого

резца будет выше. Сопротивление горной породы разрушению увеличивается, и, как следствие, ядро сжатия-смятия не успевает сформироваться, угол трещины отрыва $\gamma_{ск}$ уменьшается и резец может начать «всплывать» над забоем [97].

В работе [64] приводятся данные, согласно которым «для алмазной коронки с наружным диаметром 0,059 м и внутренним 0,042 м при частоте вращения 1200 мин⁻¹ и осевой нагрузке $P_{OC}=1200$ даН скорость резания-скалывания V_P составит (рис. 2.1.3):

- для торцевых алмазов, располагающихся на дальней от оси вращения концентрической окружности, и подрезных внешних алмазов: 3,7 м/с;
- для торцевых алмазов, располагающихся на ближней к оси вращения концентрической окружности, и подрезных внутренних алмазов: 2,6 м/с».

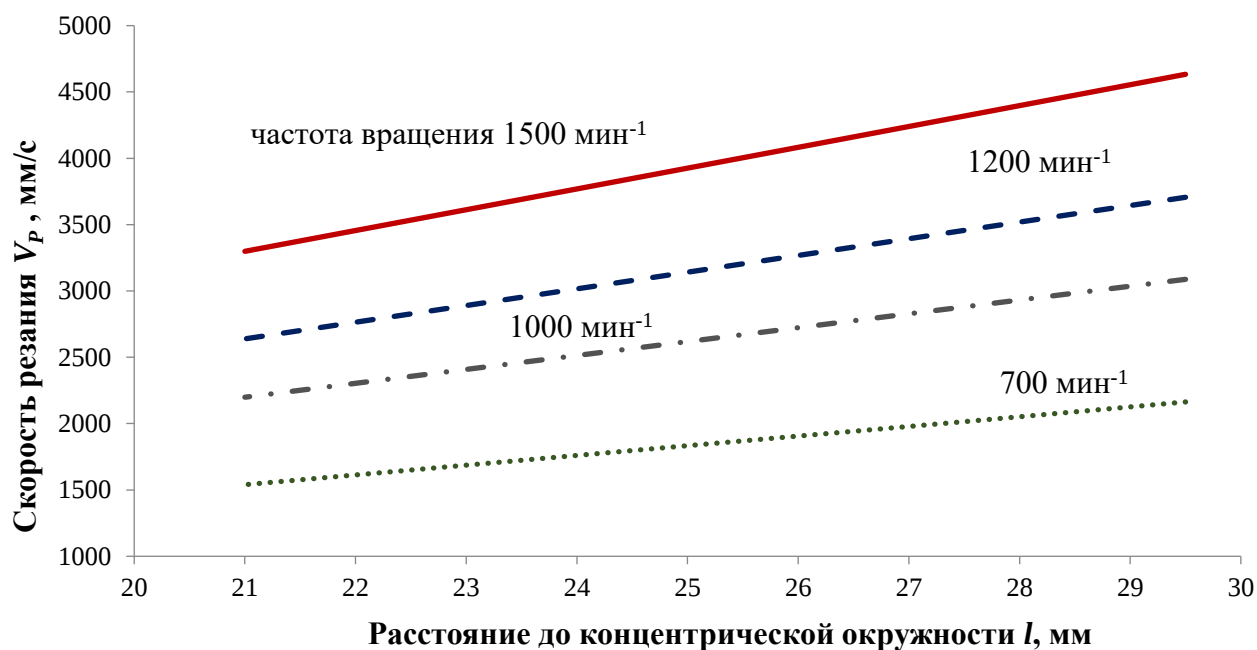


Рисунок 2.1.3 – Зависимость скорости резания V_P от расстояния l между резцом и осью вращения инструмента при различных значениях частоты вращения и постоянной осевой нагрузке $P_{OC} = 1200$ даН.

Зависимость для расчета скорости резания-скалывания горной породы V_P единичным алмазным резцом выглядит следующим образом [59]:

$$V_P = \frac{\sin \gamma_{ск} V_T l_d}{0,25 \times (2h + \sqrt{dh}) \times \sin \alpha'}, \quad (2.1.2)$$

где V_T – скорость образования трещины отрыва длиной l_d , м/с;

d – диаметр алмазного резца (поперечный размер), м.

Как следует из зависимости (2.1.2), с увеличением линейной скорости перемещения резца (скорости резания-скалывания V_P), приводящей к возрастанию силы сопротивления породы разрушению, происходит уменьшение глубины внедрения алмаза в горную породу h , угла смещения ядра сжатия α , и соответствующее снижение эффективной осевой нагрузки на резец P_{oc} (см. рис. 2.1.2). Тем самым, согласно (2.1.1), глубина формируемой борозды разрушения h_B и, соответственно, углубка за один оборот инструмента также снижаются. В свою очередь, инициирование процесса развития трещин отрыва l_o и скорости трещинообразования V_T будут способствовать созданию эффективной скорости резания-скалывания V_P горной породы алмазным резцом.

С учетом зависимостей, приведенных ранее, получим формулу для расчета глубины борозды разрушения, формируемой алмазным резцом за один оборот породоразрушающего инструмента:

$$h_B = \frac{60 \times \sin \gamma_{ск} \times V_T \times l_d}{n \times \pi \times R \times \sin 2\alpha} \quad (2.1.3)$$

Согласно зависимости (2.1.3), глубина поражения забоя алмазными резцами, находящимися на разных концентрических окружностях торца инструмента, будет неодинаковой. Следовательно, породоразрушающий инструмент реализует углубку за один оборот, соответствующую глубине борозды разрушения породы h_B , формируемой резцами, находящимися на внешней концентрической окружности торца инструмента (рис. 2.1.4).

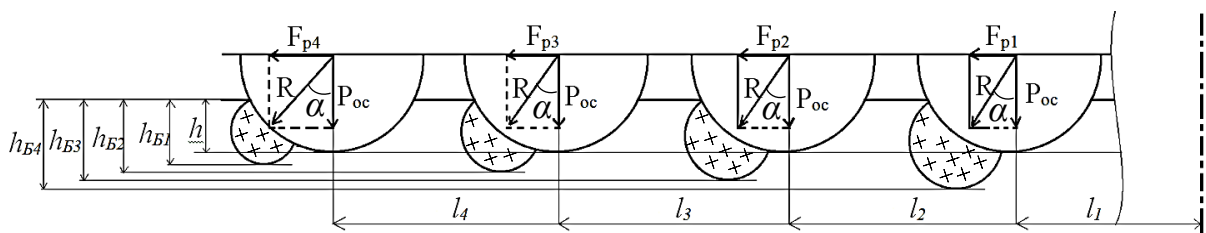


Рисунок 2.1.4 – Схема для анализа работы резцов, расположенных на разных концентрических окружностях инструмента:

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

Механизм формирования борозды разрушения в этом случае выглядит следующим образом. Рост осевого усилия P на породоразрушающий инструмент приводит к повышению суммарного коэффициента сопротивления перемещению работающих алмазных резцов, поскольку увеличиваются площадки контакта резцов с породой и глубины их внедрения h (рис. 2.1.5). В связи с этим, одновременно работающим алмазным резцам на каждой концентрической окружности требуется соответствующее усилие и интервал времени для эффективного разрушения породы передней гранью. Таким образом, резцы с неоптимальным сочетанием скорости резания V_P и осевого усилия P замедляют эффективный процесс углубки забоя в целом.

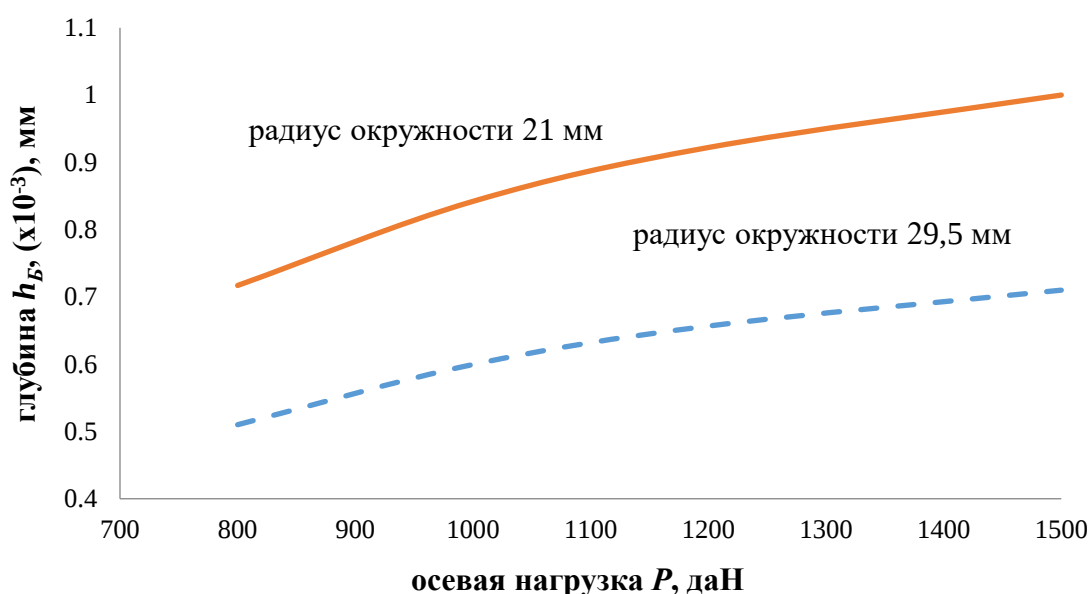


Рисунок 2.1.5 – Зависимости глубины борозды разрушения h_B от осевой нагрузки P_{OC} и радиуса концентрической окружности алмазной коронки при постоянном значении частоты вращения $n=1200 \text{ мин}^{-1}$

Следовательно, любое расчетное значение оптимальной частоты вращения для алмазного бурения не способствует полной реализации потенциала породоразрушающего инструмента, так как матрица всегда содержит резцы, работа которых будет менее эффективной и обуславливает итоговую скорость углубки.

Для формирования оптимальной глубины борозды разрушения h_B следует синхронизировать два основных параметра: скорость резания-скалывания

(линейная скорость перемещения резца) V_P и скорость развития деформаций перед передней гранью резца (скорость образования трещин) V_T .

$$V_P = \frac{V_T \times P}{0,25 \times \cos \alpha \times (2h_p + \sqrt{d h_p}) \times S \times a}, \quad (2.1.4)$$

Тогда углубка h_{OB} будет равна:

$$h_{OB} = \frac{V_T \times P}{0,25 \times \cos \alpha \times (2h_p + \sqrt{d h_p}) \times S \times a \times n}, \quad (2.1.5)$$

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, мм²;

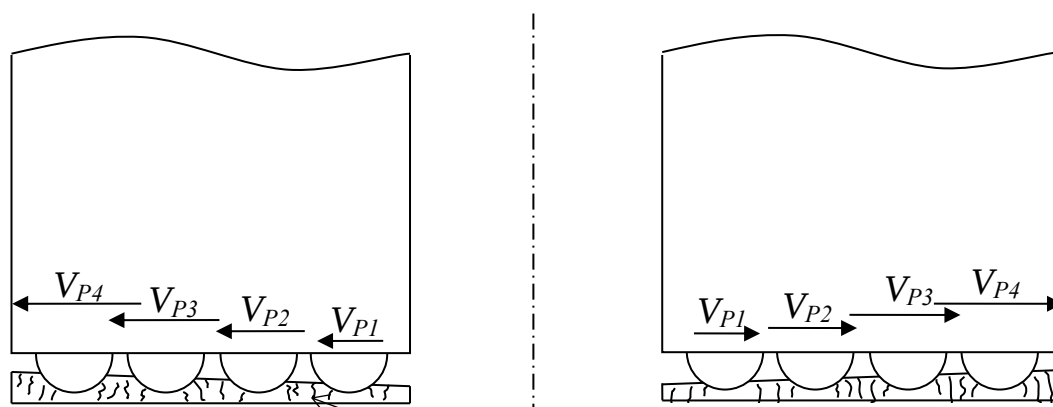
h_p – величина деформации (глубина внедрения резца под действием P), мм.

Согласно полученной зависимости, увеличение линейной скорости перемещения резца по условной концентрической окружности без уменьшения глубины поражения забоя (глубины борозды разрушения) h_B , может быть связано:

- с повышением осевого усилия P , темпы прироста которого должны быть ниже увеличения линейной скорости, так как глубина внедрения резца в горную породу напрямую зависит от осевой нагрузки (удельной нагрузки);

- с углом α , рост которого приводит к необходимости повышения скорости резания-скалывания и характеризующего соотношение в степени $\frac{1}{2}$ глубины внедрения резца и его диаметра;

Взаимодействие резцов с частицами выбуренной горной породы, преимущественно на периферии торца матрицы породоразрушающего инструмента, создает дополнительный барьер на пути к эффективному процессу разрушения забоя. Буровой шлам образуется на всей площади контакта бурового инструмента с горной породой, однако при его перемещении от оси вращения инструмента к периферии происходит многократное перемалывание каждой частички резцами, расположенными на внешних концентрических окружностях. Количество энергии, затрачиваемое на повторное разрушение обломков горной породы, растет с уменьшением их размера. Это связано с проявлением, так называемого, масштабного фактора упрочнения обломков разрушенной горной породы, описанной в работах В.Д. Евсеева – повышение прочности единичного



Промывочная жидкость, обогащенная шламом

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

Рисунок 2.1.6 – Схема для анализа условий работы резцов породоразрушающего инструмента в зависимости от расстояния до оси вращения

обломка при уменьшении его размера [24].

Указанный эффект приводит к нерациональному износу резцов, расположенных на периферии торца матрицы инструмента, а также к повышенному потреблению забойной мощности на процесс разрушения горной породы. Снизить влияние описанного эффекта можно за счет обеспечения максимально турбулентного и радиально направленного потока очистного агента под торцом породоразрушающего инструмента.

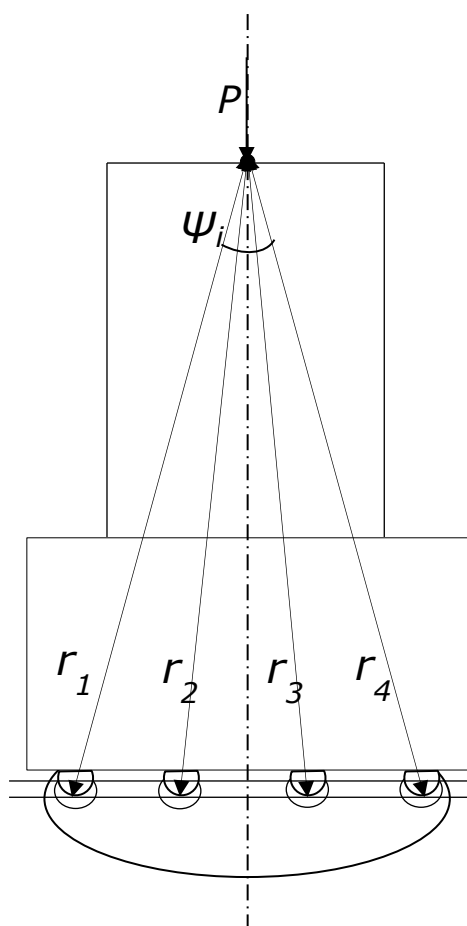


Рисунок 2.1.7 – Схема для исследования осевого приложения динамической нагрузки

r_i – расстояние от точки приложения удара до разрушающего элемента, м;
 ψ_i – угол между вертикалью и направлением от центра приложения удара к i породоразрушающему элементу, град.; $F_{уд}$ – сила осевого удара, кН

Очевидно, что при всех своих преимуществах, вращательное алмазное бурение обладает рядом недостатков, решить которые возможно путем изменения механики работы единичного резца. Статическое осевое усилие не обеспечивает оптимальную глубину поражения забоя резцами, расположенными на внешних концентрических окружностях, что создает резерв в повышении механической скорости бурения. Одним из вариантов оптимизации процесса разрушения горной породы является увеличение забойной мощности за счет приложения динамической нагрузки на забой (см. рисунок 2.1.7).

Вращательно-ударный способ бурения характеризуется сравнительно небольшой энергией единичного удара, высокой частотой и малой амплитудой их нанесения. Реализация дополнительного разрушающего воздействия на забой обусловлена повышением удельной нагрузки, что в свою очередь увеличивает глубину борозды разрушения.

Величина осевого усилия при вращательно-ударном способе бурения, как правило, ниже, чем для вращательного бурения, что снижает возможность возникновения естественного искривления ствола скважины. Поток очистного агента под торцом породоразрушающего инструмента имеет пульсирующий характер течения, что обеспечивает улучшенную очистку от шлама. Вместе с тем, механика работы вращательно-ударного способа бурения нуждается в усовершенствовании, так как для достижения высокой

производительности требуется повышение энергии единичного удара, что увеличивает стоимость и снижает качество проведения буровых работ.

Энергия удара, передаваемая через породоразрушающий инструмент на забой, распределяется по всей площади контакта с горной породой, что обеспечивает равное увеличение глубины борозды разрушения для каждого резца, независимо от концентрической окружности, на которой он располагается. Разница в продольных размерах ядер сжатия-смятия (рис. 2.1.8) и, как следствие, эффективности работы резцов, расположенных на разных концентрических окружностях торца породоразрушающего инструмента, отрицательно сказывается на производительности вращательно-ударного способа бурения.

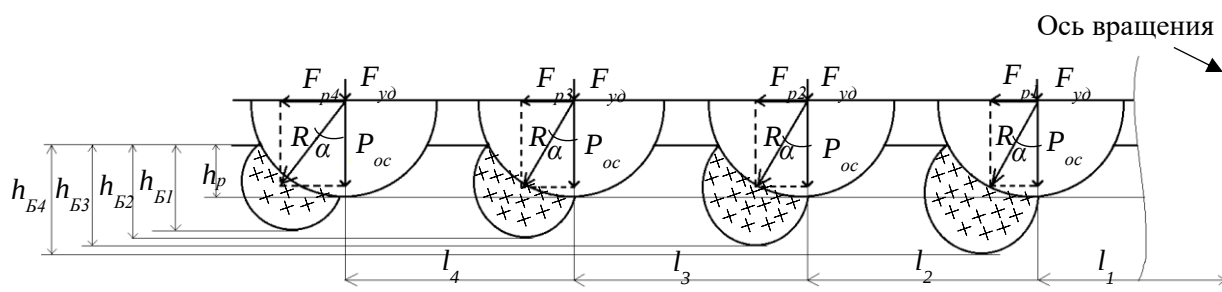


Рисунок 2.1.8 – Схема для анализа работы резцов при приложении динамической нагрузки на забой:

F_{pi} – сила резания алмазным резцом, кН; $F_{уд}$ – сила удара; h_p – глубина внедрения резцов в породу, м; h_{Bi} – глубина борозды, м; l – расстояние от оси вращения до резца, м; R – результирующий вектор.

Реализация высокой удельной нагрузки, при которой разница глубины поражения забоя резцами незначительна, обеспечивается за счет большой энергии единичного удара. Это, как было отмечено ранее, обуславливает низкую адаптивность вращательно-ударного способа бурения, а также нецелесообразность его применения при наличии более производительных способов с высоким качеством опробования, например, вращательного бурения с комплексами ССК.

Повышение эффективности работы резцов, расположенных на внешних концентрических окружностях торца породоразрушающего инструмента, без увеличения затрачиваемой мощности возможно путем приложения асимметричной статической либо динамической нагрузки на забой.

2.2 Исследование влияния асимметричных динамических нагрузок на процесс разрушения горной породы

Изменение характера приложения динамической нагрузки с осевого на асимметричный (см. рисунок 2.2.1) позволяет обеспечить рост эффективности алмазного вращательно-ударного бурения без увеличения затрачиваемой мощности. Оптимизация процесса разрушения горной породы достигается за счет увеличения удельной нагрузки в точке максимальной концентрации напряжений при неизменных или сниженных показателях износа инструмента и затрат мощности. Глубина поражения забоя удаленными от оси вращения резцами значительно увеличивается, так как дополнительная ударная нагрузка компенсирует недостаток осевого усилия, характерный для вращательного бурения.

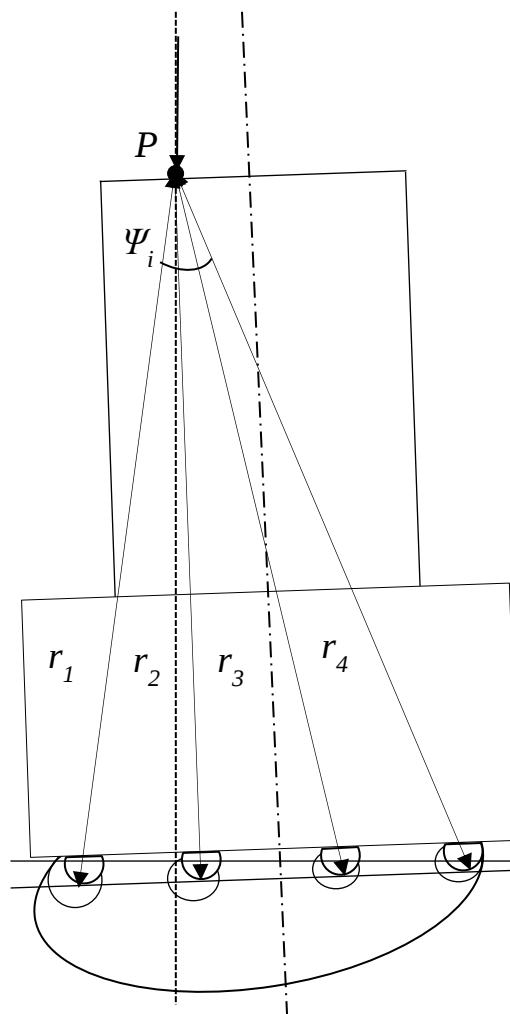


Рисунок 2.2.1 – Схема для исследования процесса разрушения горной породы при асимметричном приложении динамической нагрузки на забой:

P – сила ударного импульса;

r_i – расстояние от точки приложения удара до породоразрушающего элемента;

Ψ_i – угол между вертикалью и направлением от точки приложения нагрузки к i -му породоразрушающему элементу.

При условии оптимального сочетания величины эксцентриситета приложения динамической нагрузки, расстояния между точкой приложения 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 2.2.2).

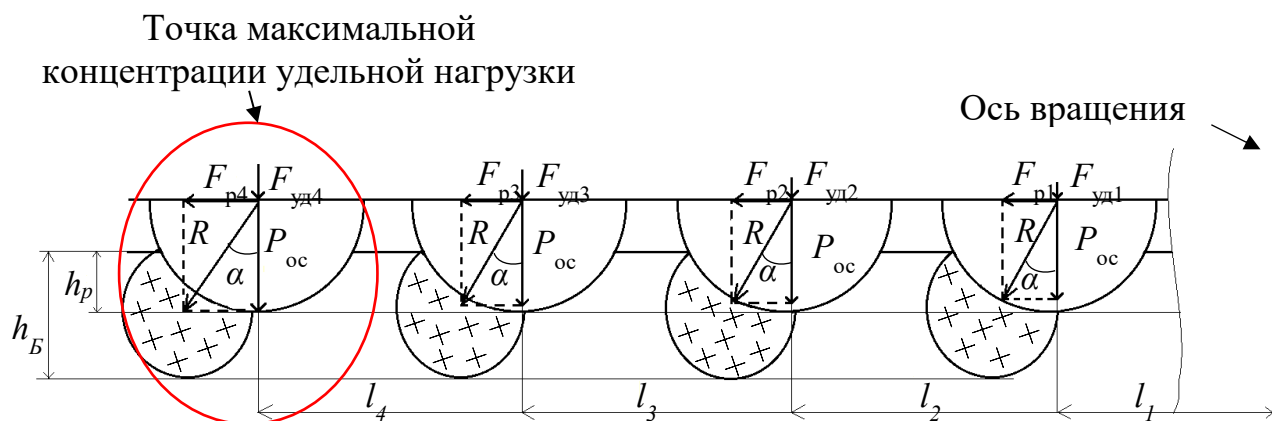


Рисунок 2.2.2 – Схема работы алмазных резцов при приложении асимметричной динамической нагрузки на забой:

F_{pi} – сила резания-скалывания алмазным резцом, кН; h_p – глубина внедрения резцов в породу, м; h_{Bi} – глубина борозды разрушения, 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

Глубина борозды разрушения зависит не только от характера и величины приложенной нагрузки, но и от физико-механических свойств горной породы. Так, при бурении твердой упруго-хрупкой породы, наиболее целесообразно приложение динамической нагрузки на забой, что позволит увеличить количество и размеры трещин. Для упруго-пластичной породы такой способ является неэффективным, так как горная порода будет сминаться под действием приложенной нагрузки без образования зоны предразрушения.

Одним из параметров прочностных свойств горных пород, позволяющих проанализировать эффективность процесса их разрушения, является параметр удельной жесткости a [66]. Он характеризует способность горной породы сопротивляться развитию деформации в каждый момент времени и может применяться при исследовании динамического взаимодействия породоразрушающего инструмента с забоем. Стоит отметить, что в отличие от

удельной жесткости, параметр твердости горной породы, наиболее часто применяемый для описания свойств ее буримости, характеризует сопротивление внедрению резца лишь в момент разрушения.

Величина удельной жесткости, как правило, определяется по методике Л.А. Шрейнера на приборе УМГП-3 из соотношения:

$$a = \frac{P}{S \times h}, \quad (2.2.1)$$

где P – статическая осевая нагрузка, даН;

S – площадь контакта основания штампа с образцом горной породы, мм²;

h – величина деформации (глубина внедрения штампа), мм.

Стандартная методика определения удельной жесткости основана на статическом вдавливании индентора в образец горной породы, что не позволяет применять её для анализа взаимодействия резцов с горной породой в процессе бурения. В этой связи целесообразно проведение аналитического исследования влияния удельной жесткости на процесс деформирования горной породы в течение всего времени ее взаимодействия с резцами.

Выразив из зависимости (2.2.1) параметр деформирования h через соотношение осевого усилия P , площади контакта S и удельной жесткости горной породы a , получим:

$$h = \frac{P}{a \times S}, \quad (2.2.2)$$

В качестве примера воспользуемся экспериментальными данными определения прочностных характеристик долерита и мрамора, полученными в результате проведенных работ на экспериментальной базе кафедры технологии геологической разведки ИРНИТУ. Для определения значения удельной жесткости горной породы на интервале упруго-пластического деформирования на графиках проводится прямая (средняя) линия от точки начала деформирования до точки разрушения горной породы А. В этом случае получаем усредненный график деформирования горной породы. Параметр удельной жесткости горной породы в этом случае определяется из зависимости $a = \frac{P}{S \times h_{\text{упл}}}$.

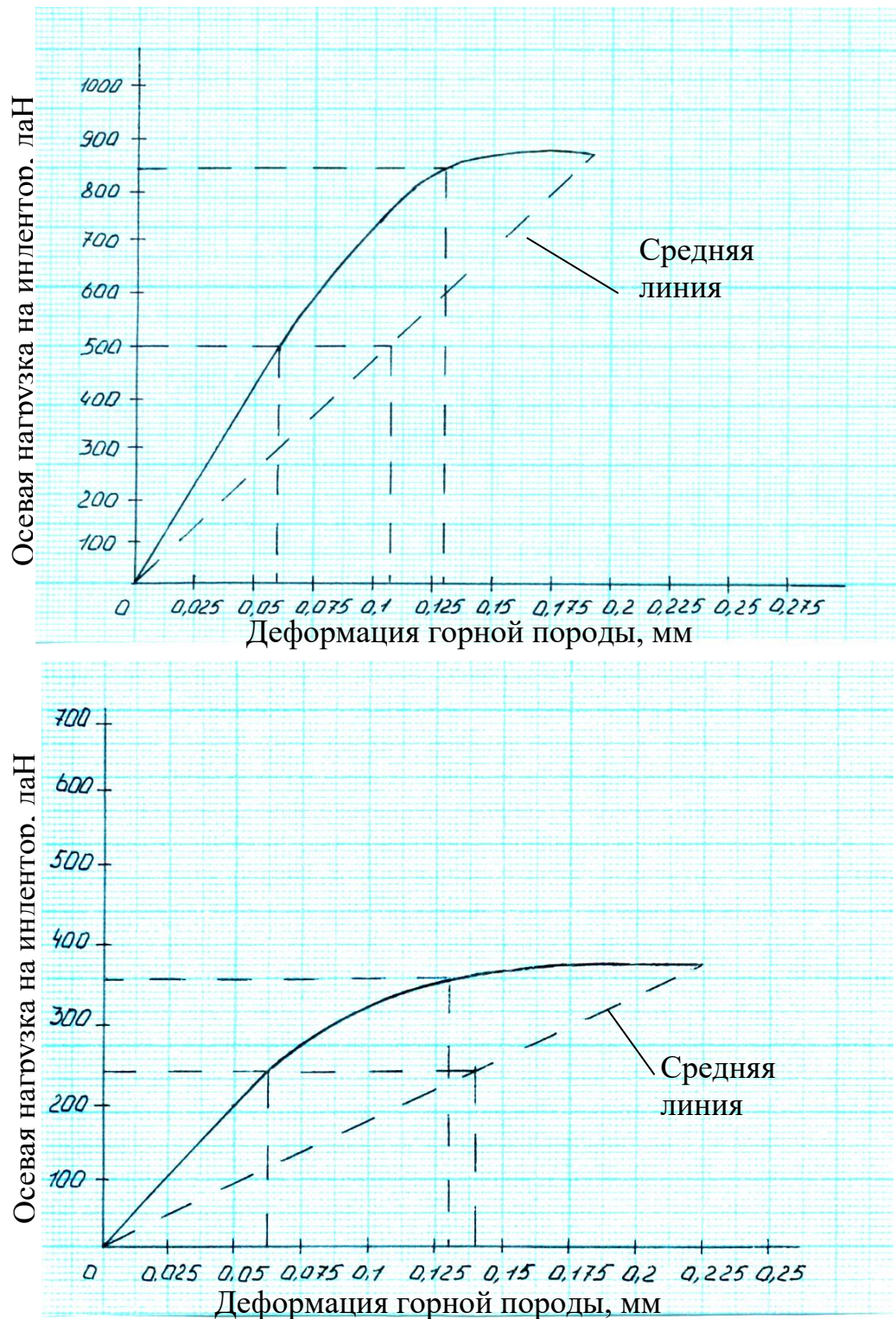


Рисунок 2.2.3 – Методика определения жесткости горной породы на участках упругого, пластического и упруго-пластического деформирования, основанная на методике Л.А. Шрейнера:

- а) экспериментальные данные по определению прочностных характеристик долерита; б) экспериментальные данные по определению прочностных характеристик мрамора

Результаты расчетов удельной жесткости горных пород на разных участках статического деформирования приведены в табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1 – Экспериментальные данные определения удельной жесткости горных пород

Осевая нагрузка	Удельная жесткость горной породы (a), даН/мм ³ :		
	на участке упругого деформирования	на участке пластического деформирования	на участке упруго-пластического деформирования
1	2	3	4
Долерит			
100	10000	-	5714
300	8571	-	4800
500	8333	-	4651
600	-	8000	4615
800	-	6666	4507
870	-	5800→4462	4462
Мрамор			
100	4000	-	1818
200	4000	-	1702
300	-	3243	1666
400	-	2277→1644	1644

Анализ результатов расчета, представленный в таблице 2.2.1, показывает, что на интервале упругого деформирования горной породы по мере роста осевого усилия наблюдается снижение величины удельной жесткости горной породы, что объясняет высокую степень влияния осевой (удельной) нагрузки на процесс деформирования. Данная закономерность справедлива и для деформирования на интервале пластического деформирования – величина удельной жесткости продолжает интенсивно снижаться. При этом, на стадии пластического деформирования рост деформации в горной породе продолжается при постоянном значении осевого усилия до момента разрушения.

Согласно результатам исследования, для эффективного процесса разрушения горной породы необходимо обеспечивать оптимальную глубину внедрения резца в горную породу при определенной скорости резания-скалывания. Как было отмечено ранее, резцы на торце породоразрушающего инструмента, расположенные на разных концентрических окружностях, двигаются с разной линейной скоростью. Следовательно, удельная нагрузка, обеспечивающая

оптимальную глубину внедрения резца в горную породу, должна увеличиваться от центра к периферии.

Таким образом, приложение ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой обеспечивает улучшение механики работы резцов путем повышения удельной нагрузки в точке максимальной концентрации напряжений, расположенной на периферии торца матрицы породоразрушающего инструмента. Для определения оптимальной величины эксцентриситета приложения ассиметричной статической либо динамической нагрузки необходимо провести экспериментальные исследования.

2.3 Анализ влияния ассиметричной статической либо динамической нагрузки на показатели эффективности алмазного бурения

Основными показателями эффективности алмазного бурения являются: механическая скорость, интенсивность естественного искривления скважин, ресурс породоразрушающего инструмента, энергоемкость процесса разрушения горной породы. Повышение механической скорости обусловлено ростом удельной нагрузки под резцами, расположенными на внешних концентрических окружностях торца породоразрушающего инструмента. В момент приложения динамической нагрузки происходит увеличение глубины внедрения резцов в горную породу с одновременным их боковым перемещением относительно своей траектории по окружности. В результате происходит увеличение объема разрушенной горной породы за один оборот инструмента, что обеспечивает повышение механической скорости бурения.

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.

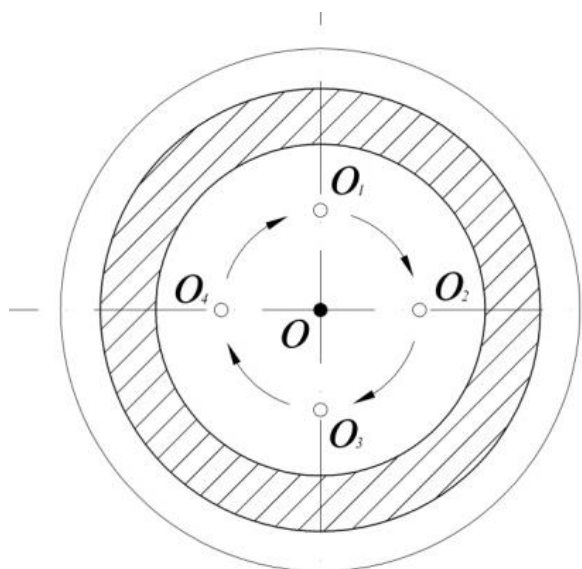


Рисунок 2.3.1 – Схема смещения центра вращения бурового инструмента при нанесении внецентренных ударных импульсов

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 2.3.1). Это исключает возможность возникновения ориентированного изгиба в нижней части колонны буровых 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.

Возрастание динамической нагрузки под резцами, расположенными на внешних радиальных окружностях торца породоразрушающего инструмента, будет способствовать интенсификации развития деформационных процессов, так как сопротивление разрушению при динамическом воздействии горных пород в 10 раз меньше, чем при статическом деформировании, а скорость углубки забоя скважин пропорциональна удельной нагрузке. При этом характер процесса разрушения будет определяться значительно меньшим влиянием физико-механических свойств горных пород на скорость их разрушения, благодаря чему зависимость интенсивности естественного искривления от свойств и

неоднородности прочностных характеристик анизотропных горных пород будет выражена в меньшей степени. То есть, в совокупности с высокой эффективностью динамического разрушения, возможные отклоняющие усилия и изгибающие моменты, величина которых определяется разностью соответствующих прочностных характеристик со стороны забоя, станут существенно меньше. В результате этого и затраты энергии на процесс разрушения горных пород будут снижаться.

Вероятность возникновения условий для фрезерования стенки скважины со стороны породоразрушающего инструмента обусловлена различным сопротивлением горной породы разрушению на забое. По причине неоптимального соотношения тангенциального и осевого усилий, сопротивление горной породы разрушению в периферийной части забоя выше, чем в центральной. Приложение ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой будет способствовать выравниванию и повышению эффективности работы резцов породоразрушающего инструмента, что обеспечит оптимальную скорость углубки забоя, а также снизит риск возникновения естественного искривления скважины.

В процессе бурения зачастую происходит ухудшение очистки забоя скважины в связи с изменением условий циркуляции и контроля качества очистного агента, смены типа горной породы и др. Увеличение количества бурового шлама на забое происходит также в наклонно-направленных скважинах под действием эффекта Бойкотта. В результате образования шламовой подушки скорость углубки забоя резко снижается, повышается интенсивность износа породоразрушающего инструмента, а также возникают условия для искривления ствола скважины – в наклонной скважине шлам скапливается в нижней части забоя со стороны лежащей стенки и является причиной снижения зенитного угла [63].

Улучшение очистки забоя происходит в результате перераспределения удельной нагрузки под торцом породоразрушающего инструмента. В момент приложения ассиметричной динамической нагрузки на забой большее количество шлама образуется со стороны центра ее приложения. С противоположной стороны забоя в момент удара создаются условия для эффективной очистки от выбуренной

породы, так как разница напряжений обеспечивает возникновение мгновенного перекоса породоразрушающего инструмента. Также при использовании потока очистного агента для создания динамической нагрузки, в призабойной области возникает пульсирующее турбулентное течение, обеспечивающий наилучшую промывку от шлама [63].

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.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Приложение ассиметричной динамической нагрузки на забой способствует созданию условий для эффективного удаления шлама с забоя за счет пульсирующего потока жидкости, что снижает нерациональный износ породоразрушающих элементов, обеспечивает стабилизацию работы породоразрушающего инструмента и нижней части бурильной колонны, уменьшая вероятность возникновения естественного искривления скважин.

Повышение скорости углубки забоя в совокупности со снижением энергоемкости процесса разрушения обусловлено оптимизацией усилий резания-скалывания и осевого для резцов, расположенных на периферии торца породоразрушающего инструмента.

Таким образом, новая и перспективная технология алмазного бурения с приложением ассиметричной статической либо динамической нагрузки на забой может характеризоваться способностью к значительному улучшению основных показателей эффективности без дополнительных затрат.

Для того, чтобы подтвердить полученные выводы необходимо проведение экспериментальных исследований предложенной технологии методом полного факторного эксперимента, обеспечивающего максимально возможную достоверность при сравнительно небольшом количестве опытов.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

3.1 Описание этапов экспериментальных исследований

Для решения поставленных задач целесообразно проведение комплекса экспериментальных исследований по методике, включающей четыре этапа.

Первый этап экспериментальных исследований проводился с целью выявления основных закономерностей влияния величины смещения центра приложения динамической нагрузки на забой на эффективность процесса разрушения горных пород. Итогом первого этапа исследования является определение диапазона оптимальных значений величины эксцентриситета приложения динамической нагрузки на забой для горных пород различной категории по буримости.

Исследования проводились по методике полного факторного эксперимента типа 2^3 [1], в котором изменяемыми входными параметрами (факторами) являлись: величина эксцентриситета, осевая нагрузка, частота вращения инструмента. Выбор буримых горных пород обусловлен характером их разрушения – упруго-хрупкий у долерита и упруго-пластичный у мрамора. Опытное бурение проводилось в стендовых условиях высокочастотным гидроударником. В качестве промывочной жидкости применялась техническая вода.

Второй этап – изучение совокупного влияния эксцентриситета приложения динамической нагрузки и расстояния между точкой нанесения удара и забоем на эффективность процесса разрушения горных пород при бурении долерита. Величина эксцентриситета ударной нагрузки подбиралась из диапазона оптимальных значений, полученных в результате анализа результатов предыдущих экспериментальных исследований. Изменение расстояния между точкой нанесения удара и забоем характеризовало различную энергию ударной нагрузки. Планирование и реализация полного факторного эксперимента осуществлялись по схеме 2⁴.

Третий этап заключался в построении и исследовании компьютерных моделей напряжений, возникающих в буровом инструменте в момент нанесения внецентренного удара, методами конечно-элементного анализа. Цель данного этапа – изучение влияния

величины эксцентриситета на напряжение в инструменте и горной породе при приложении ассиметричной динамической нагрузки.

Четвертый этап – анализ и математическая обработка результатов экспериментальных исследований, статистическая оценка достоверности проведенных экспериментов.

С целью минимизации погрешностей при сопоставлении полученных результатов, на всех этапах экспериментального исследования были использованы единые блоки горных пород, один и тот же тип породоразрушающего инструмента и очистной агент.

Мрамор – средней твердости, упруго-пластичная горная порода VI категории по буримости, изотропная, малоабразивная, монолитная. Долерит – твердая упруго-хрупкая горная порода X категории по буримости, изотропная, абразивная, монолитная. Минимизация погрешности опыта, возникающая по причине влияния нескольких изменяющихся факторов одновременно, обеспечивалась оптимальным подбором параметров режима бурения и работы ударной машины.

3.2 Методика экспериментальных исследований по опытному бурению блоков горных пород

Исследование основных закономерностей внецентренного приложения ударной нагрузки и их влияние на эффективность процесса разрушения горных пород при различных параметрах режима алмазного бурения проводилось по методике, включающей планирование и реализацию полного факторного эксперимента типа 2^k , где k – это количество факторов. На данном этапе работы проводились путем опытного бурения блоков горных пород (мрамора и долерита), характеризующихся разными прочностными свойствами, гидроударником типа Г-59 в стендовых условиях [61].

Интервалы и уровни варьирования факторами эксперимента показаны в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1. – Интервалы и уровни варьирования факторами экспериментального исследования

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевое усилие, даН	Величина эксцентриситета бойка, мм
Основной уровень	572,5	1000	1,2 / 3,4 / 5,5
Интервал варьирования	137,5	200	1,2 / 3,4 / 5,5
Нижний уровень	435	800	0
Верхний уровень	710	1200	2,4 / 6,8 / 11,0

Подача промывочной жидкости в ходе экспериментов осуществлялась

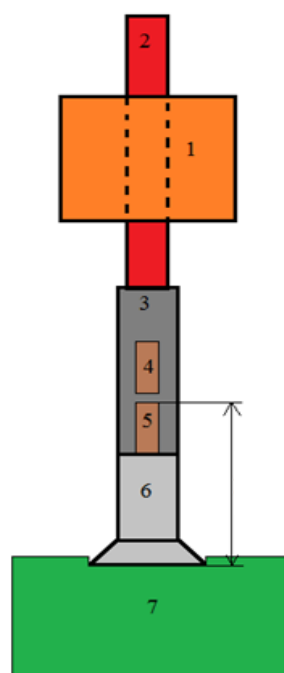


Рисунок 3.2.1 – Схема стеновой установки СКБ-4:

1 – вращатель, 2 – ведущая штанга, 3 – корпус гидроударника, 4 – боек, 5 – наковальня, 6 – алмазная коронка, h – расстояние от точки нанесения удара до забоя.

насосом НБ-3, позволяющим обеспечивать равномерный поток с оптимальным давлением, и составляла 120 л/мин, что являлось необходимым и достаточным для работы высокочастотной ударной машины. Буровой стенд (рис. 3.2.1), применяемый для экспериментальных исследований, состоял из бурового 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 наковальню 5 и забоем, который находился 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 забойной ударной машины. Регистрация мощности, затрачиваемой на бурение, осуществлялась киловаттметром, которым оснащен буровой стенд. Перед выполнением

экспериментальных стендовых работ была проведена тарировка осевого усилия бурового станка динамометром типа ДОСМ-3-3 с классом точности I. Предел

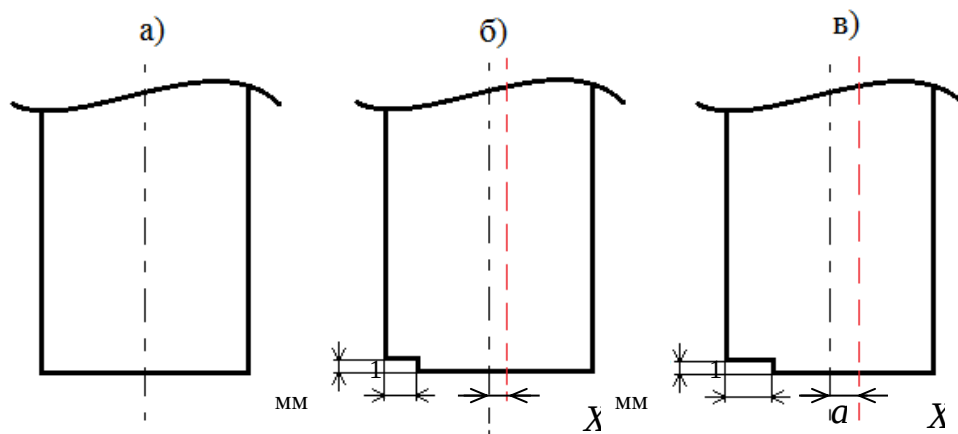


Рисунок 3.2.2 – Схема видоизменения формы торца бойка гидроударника измерения динамометра – 3 000 кгс.

В качестве породоразрушающего инструмента была использована однослойная алмазная коронка наружным диаметром 0,059 м. Интервал установления режимов бурения составил 0,01 – 0,02 м. Время t , затраченное на бурение интервала скважины l_B , замерено электронным секундомером с высокой точностью измерения.

Помимо измерения скорости углубки забоя в ходе экспериментов были проведены наблюдения за такими показателями эффективности алмазного бурения, как износ матрицы алмазного породоразрушающего инструмента; 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 путем нанесения наплавки 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.

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 эксцентриситета ударных импульсов достигалось за счет снятия слоя материала с торца бойка толщиной 1 мм на следующие величины $a = 6,7; 13,4; 20,1$ мм (рис. 3.2.2, 3.2.3). Значения эксцентриситетов рассчитаны по формулам для каждой конкретной величины a .

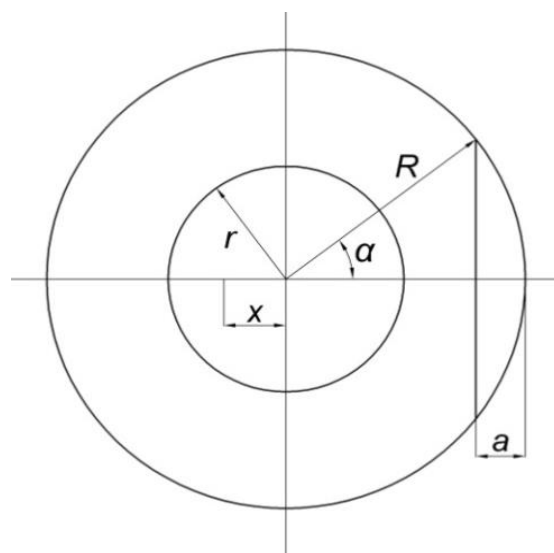


Рисунок 3.2.3 – Схема, поясняющая методику расчета величины эксцентриситета приложения ударной нагрузки

Для варианта исследований, когда величины сточенной части бойка составляют $a = 6,7$ мм и $a = 20,1$ мм:

$$X' = -\frac{2}{3} \times \frac{R^3 \sin^2 \alpha_1}{\pi(R^2 - r^2) - R^2(\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)}, \quad (3.2.1)$$

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:

$$X// = \frac{S_1 X_1 - S_2 X_2}{(S_1 - S_2)}, \quad (3.2.2)$$

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:

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

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

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

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

Согласно результатам расчетов по формулам (3.2.1) и (3.2.2), значения смещения центров приложения ударной нагрузки относительно оси вращения забойной машины ударного действия составляют 2,4; 6,8 и 11 мм.

3.3 Методика экспериментальных исследований совокупного влияния величины эксцентриситета и расстояния между точкой нанесения удара и забоем

Экспериментальное бурение блока долерита с различной величиной смещения центра приложения ударной нагрузки и расстояния от точки нанесения удара до забоя проводилось в соответствии с методикой планирования полного факторного эксперимента типа 2^4 . Опытные работы осуществлялись в условиях, аналогичных первому этапу исследований. Интервалы варьирования входными параметрами экспериментов подбирались на основе выводов, полученных в результате анализа предшествующих работ. Величины эксцентриситета ударной нагрузки были выбраны из диапазона оптимальных значений, определенного на стадии изучения общих закономерностей влияния данного фактора на эффективность процесса разрушения горных пород. Расстояние между точкой нанесения удара и забоем характеризовало энергию единичного удара, достигающую до горной породы через колонковую трубу, и регулировалось путем изменения ее длины.

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-пластичных пород. Следовательно, построение модели процесса внецентренного разрушения более актуально для горных пород высокой категории по буримости, поэтому для проведения второго этапа экспериментальных исследований целесообразно использование долерита.

Интервалы варьирования факторами эксперимента, их кодирование и уровни представлены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Интервалы варьирования, уровни и кодирование факторов эксперимента по опытному бурению блока долерита.

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевое усилие, даН	Величина эксцентриситета ударной нагрузки, м	Расстояние между точкой нанесения ударной нагрузки и забоем, м
1	2	3	4	5
Основной уровень	550	1000	0,002	0,7
Интервал варьирования	160	200	0,002	0,1
Нижний уровень	390	800	0	0,6
Верхний уровень	710	1200	0,004	0,8
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3	x_4

В целях более точного сопоставления результатов, дополнительно проведены исследования с вариацией факторами x_1 , x_2 , x_3 и x_4 в пределах эксперимента. Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^4 приведена в таблице 3.3.2.

Для осуществления обработки и анализа проведенных экспериментальных исследований на данном этапе работ, было принято решение ориентироваться на результирующий признак воздействия, в частности, на механическую скорость бурения V_M (3.3.1).

$$V_M = \frac{36 \times l}{t}, \text{ м/ч,} \quad (3.3.1)$$

где l – интервал бурения горной породы, м;

t – время бурения интервала l горной породы, ч.

Таблица 3.3.2 – Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^4

№	Факторы эксперимента в кодовом обозначении															
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_4$	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$
1	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
2	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
3	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
6	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
9	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
10	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
11	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
12	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
13	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
14	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
15	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-

Таким образом, для фиксированных параметров осевого усилия $P_{ос}$, частоты вращения n , величины эксцентриситета E и расстояния между точкой нанесения удара и забоем $h_{уд}$, достаточно замерить время бурения t определенного интервала l горной породы, рассчитать по приведенной зависимости (3.2.1) величину механической скорости бурения V_M .

3.4 Методика исследования моделей напряжения в буровом инструменте и горной породе путем конечно-элементного анализа

Построение модели напряжений в буровом инструменте производилось в программе с возможностями конечно-элементного анализа AutoCAD Mechanical (Autodesk). В качестве исследуемых объектов для моделирования распределения напряжений в инструменте при внецентренном ударе были выбраны колонковая труба, соответствующая по размерам условиям проведения стендового

экспериментального бурения блоков горных пород забойным гидроударником (рис. 3.3.1, *а*), а также буровое долото с тремя различными линейными размерами (рис. 3.3.1, *б*).

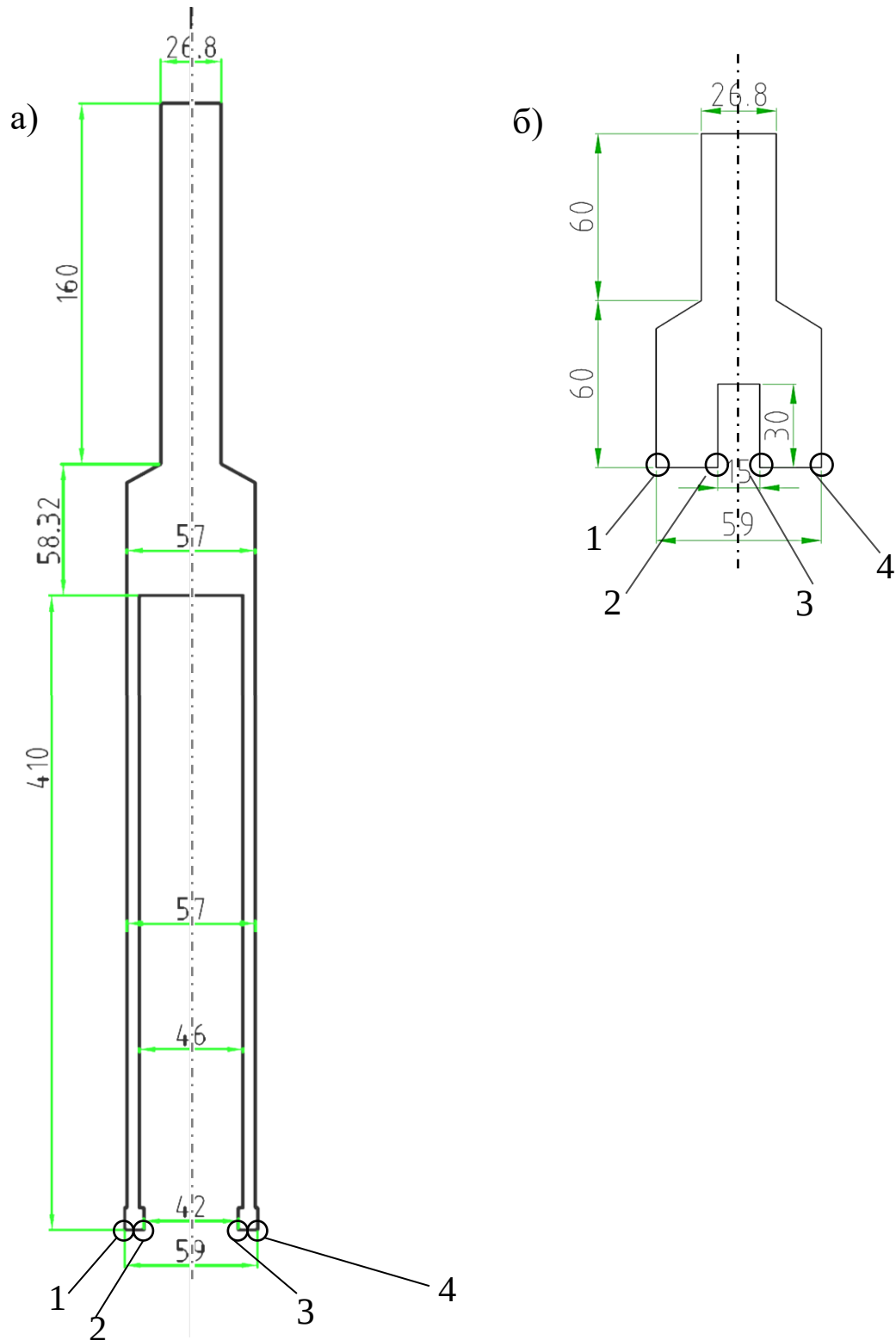


Рисунок 3.3.1 – Схема модели напряжений:
а) в колонковой трубе; *б*) в долоте.

Для облегчения процесса исследования на моделях были выделены ключевые точки (пронумерованы от 1 до 4 на рисунках), характеризующиеся наибольшей значимостью для изучения влияния величины напряжений на процесс разрушения горных пород. Наиболее важные ключевые точки находятся на периферии и в ближайшей к оси вращения области контакта бурового инструмента с горной породой.

Исследование процесса изменения напряжений заключалось в создании статической нагрузки на верхнюю часть инструмента, которая имитирует энергию единичного удара. По мере изменения центра приложения динамической нагрузки и расстояния от точки нанесения удара до забоя, напряжения в ключевых точках изменялись. Эти изменения заносились в таблицу, на основе которой были построены графические зависимости величины напряжений от задаваемых параметров.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Анализ результатов экспериментальных исследований влияния величины эксцентриситета на механическую скорость бурения

Методика проведения экспериментальных исследований по опытному бурению блоков горных пород описана в третьей главе диссертации.

В ходе первого этапа экспериментального исследования при бурении блоков горных пород выявлены основные закономерности изменения механической скорости и углубки за один оборот инструмента при изменении величины эксцентриситета приложения динамической нагрузки и параметров режима бурения. Графическое отображение зависимостей показано на рисунках 4.1.1 – 4.1.4.

Анализ результатов проведенных экспериментов проводился в соответствии с методикой подбора оптимальных параметров режима бурения, приведенной в работе [61]. В качестве критерия оценки оптимальности процесса разрушения горных пород была взята механическая скорость бурения (V_M), позволяющая оценить углубку забоя в единицу времени. На основании полученных моделей были построены графические зависимости механической скорости от режимных параметров и величины эксцентриситета приложения ударной нагрузки для каждого типа разбуриваемой горной породы.

Анализ графических зависимостей показал, что максимальные значения механической скорости бурения при всех значениях эксцентриситета ударной нагрузки были достигнуты при наибольшем значении частоты вращения породоразрушающего инструмента, что говорит об эффективности применения внецентренных ударных импульсов. При этом рост механической скорости наблюдается при наименьшем смещении центра приложения ударной нагрузки: четверть сточенной части бойка (по условиям эксперимента $x_1 = 2,4$ мм).

Такие результаты могут быть обусловлены тем, что при невысокой частоте вращения породоразрушающего инструмента не создаются условия для

уменьшения глубины внедрения алмазного резца по сравнению с высокой угловой скоростью, что говорит о режиме объемного разрушения горной породы.

Зависимости механической скорости, аналогичные зависимостям при исследовании долерита, наблюдаются при бурении более пластичного мрамора, однако величина углубки за оборот для всех условий эксперимента остается практически неизменной. Мрамор оказывает гораздо меньшее, по сравнению с долеритом, сопротивление разрушению породоразрушающим инструментом и глубина резания единичным алмазным резцом не уменьшается с ростом параметров режима бурения.

Отсюда следует, что оптимальная величина эксцентриситета не превышает значения в 2,4 мм. Увеличение эксцентриситета до большего значения не приносит положительного эффекта, так как при сильном смещении центра приложения динамической нагрузки, каждый единичный импульс заставляет алмазный резец совершать боковые перемещения. Чем больше реализуется перекося при нанесении удара, тем сильнее боковое усилие перемещения резца, а также теряется энергия удара. Это приводит к тому, что глубина внедрения алмазного резца уменьшается, следовательно, углубка за один оборот и механическая скорость будут снижаться.

Таким образом, в результате первого этапа экспериментальных исследований были выявлены основные зависимости механической скорости от величины эксцентриситета ударной нагрузки, определен оптимальный диапазон исследуемого параметра с целью его дальнейшего изучения. Полученные зависимости свидетельствуют о перспективности применения данного способа повышения эффективности процесса разрушения горных пород. Для более детального исследования процесса необходимо проанализировать влияние величины эксцентриситета в совокупности с расстоянием между точкой нанесения удара и забоем

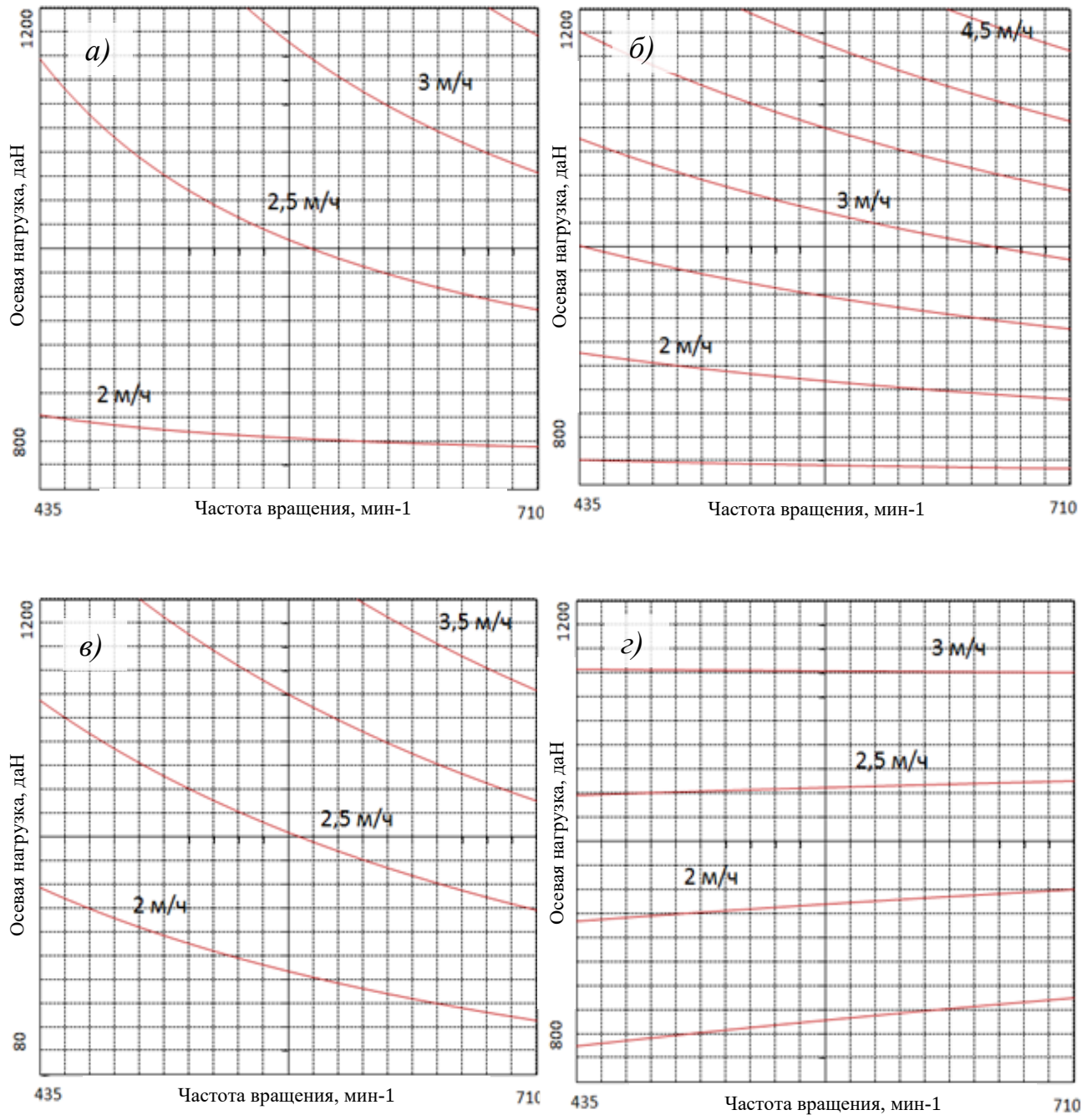


Рисунок 4.1.1 – Зависимости механической скорости от параметров режима бурения долерита при различных значениях эксцентриситета приложения динамической нагрузки E :

а) $E=0$ мм; б) $E=2,4$ мм; в) $E=6,8$ мм; г) $E=11$ мм

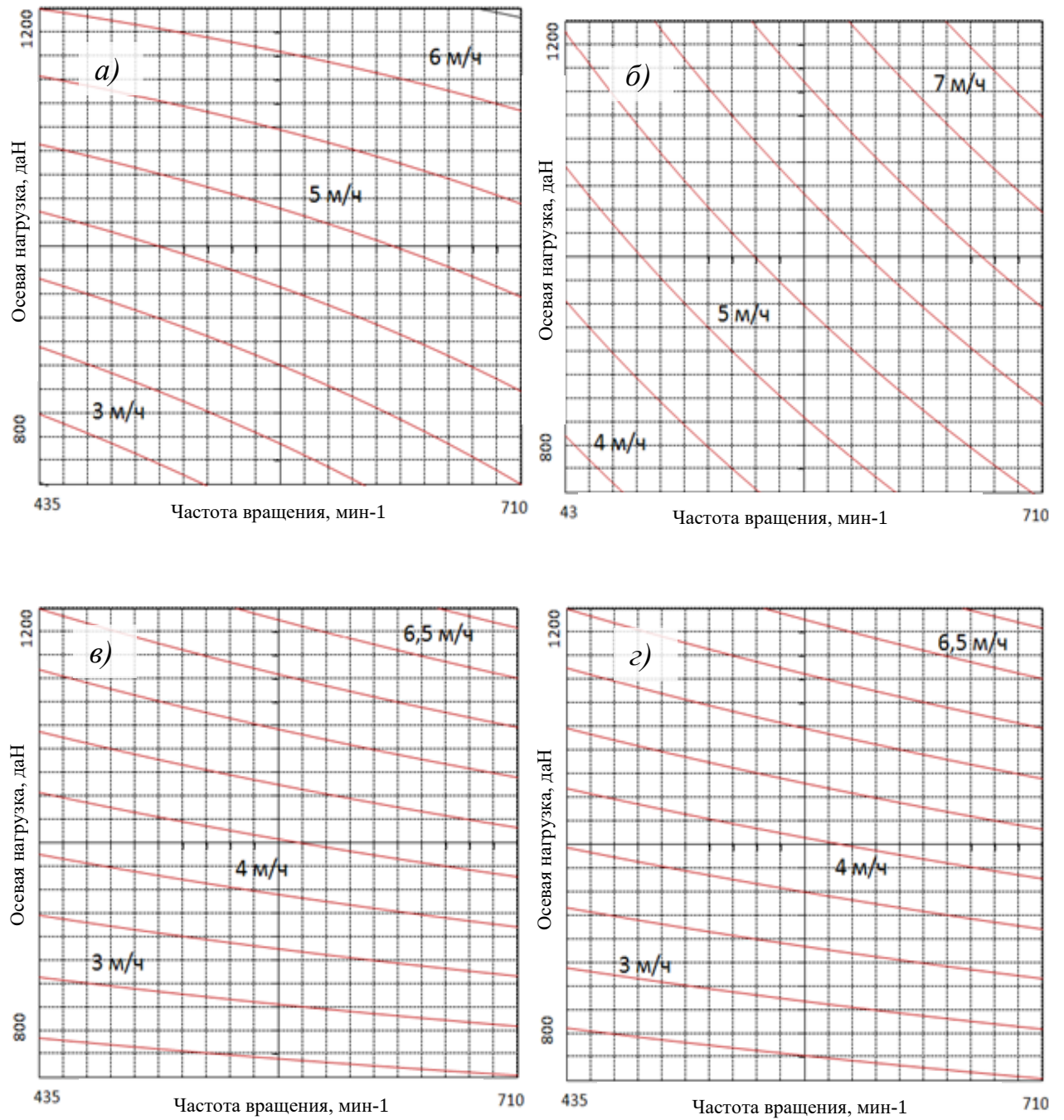


Рисунок 4.1.2 – Зависимости механической скорости от параметров режима бурения мрамора при различных значениях эксцентриситета приложения удара E :

а) $E=0$ мм; б) $E=2,4$ мм; в) $E=6,8$ мм; г) $E=11$ мм

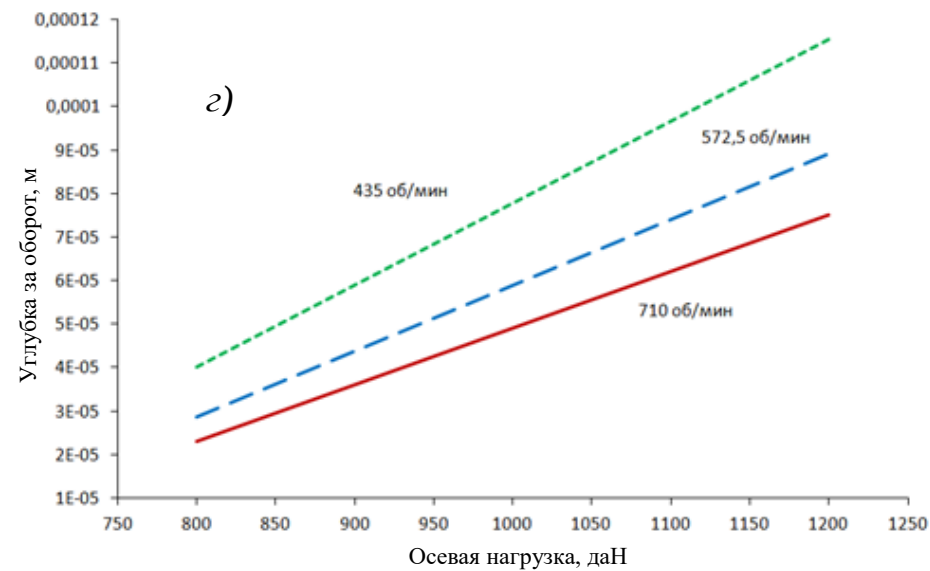
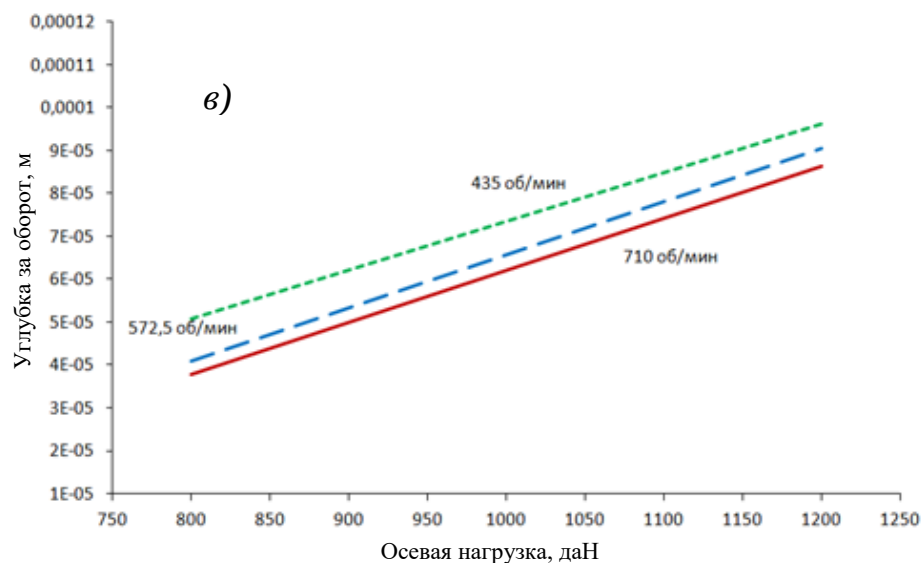
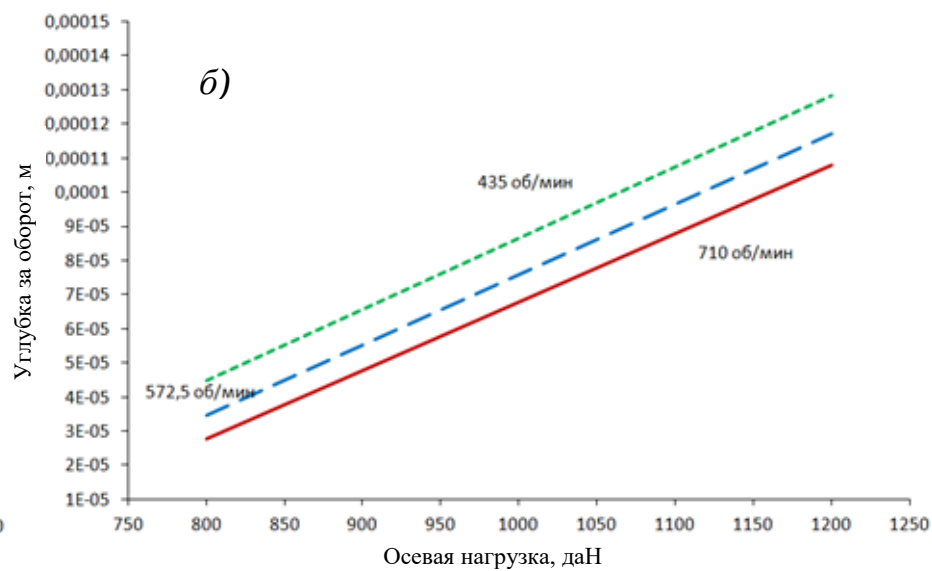
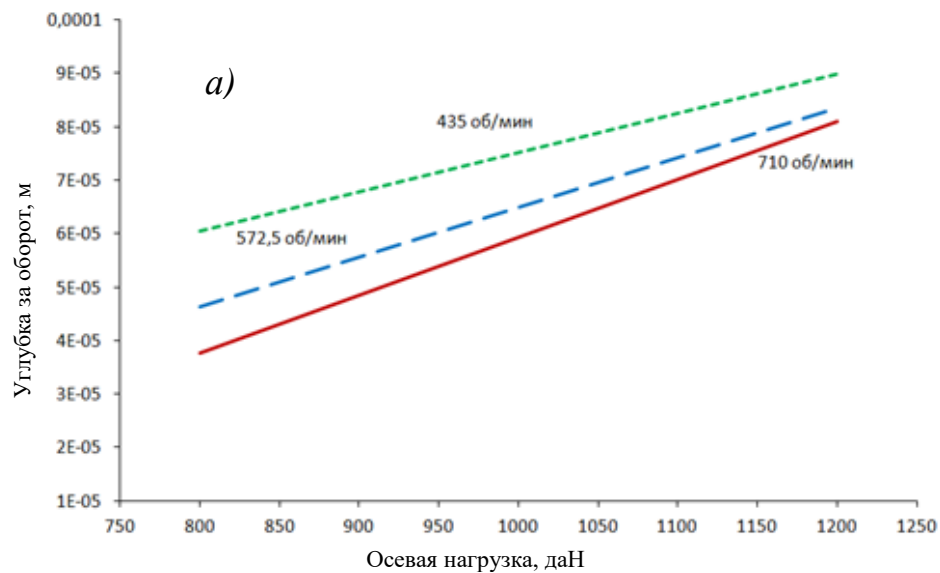


Рисунок 4.1.3 – Зависимости величины углубки за один оборот от параметров режима бурения долерита при различных значениях эксцентриситета приложения динамической нагрузки E :
а) $E=0$ мм; б) $E=2,4$ мм; в) $E=6,8$ мм; г) $E=11$ мм

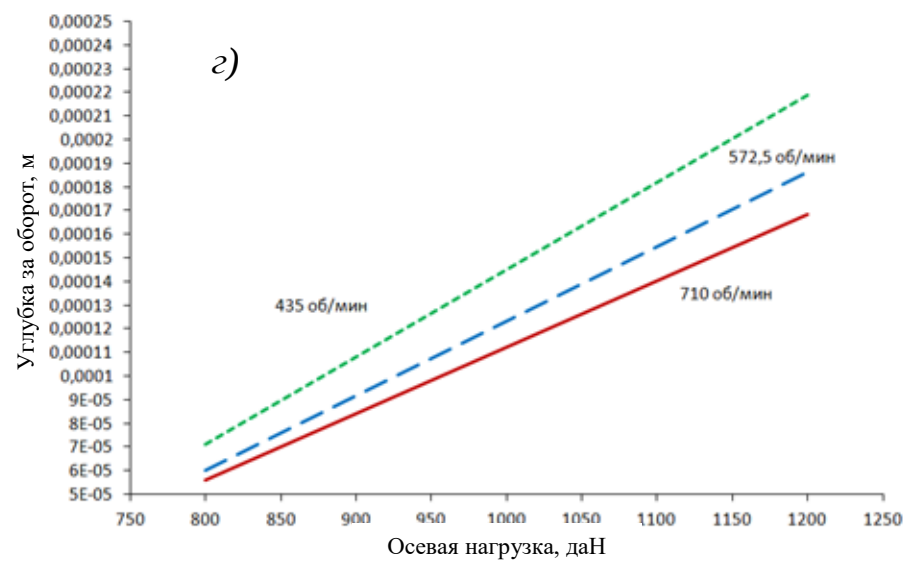
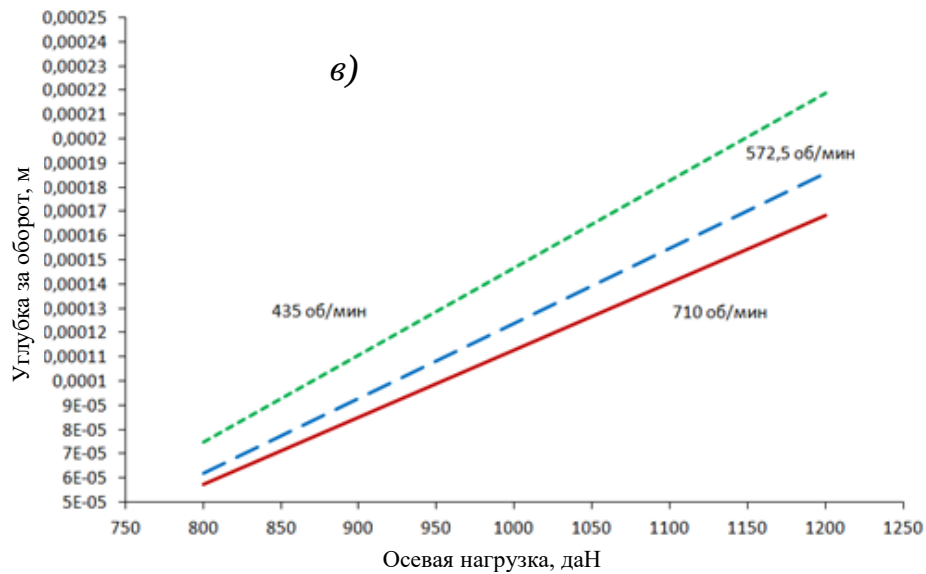
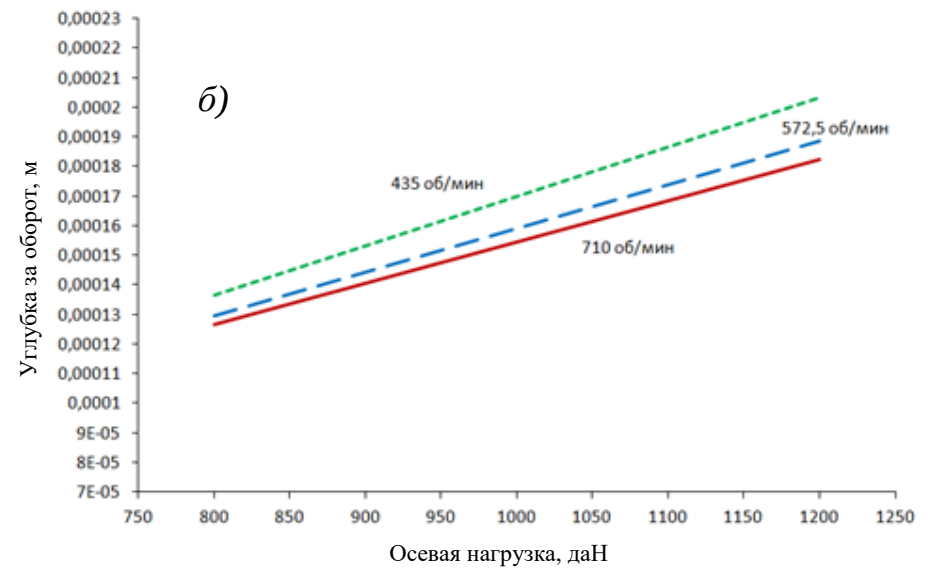
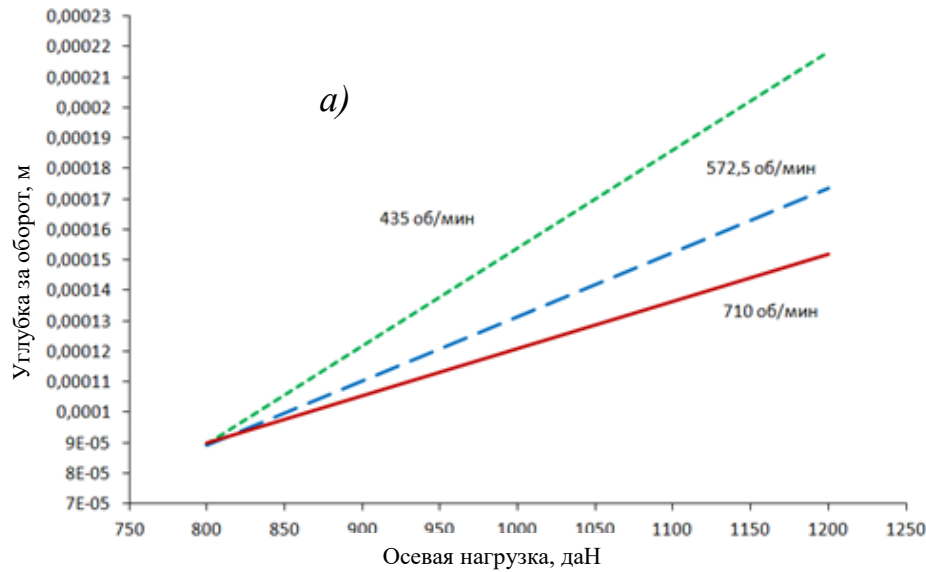


Рисунок 4.1.4 – Зависимости величины углубки за один оборот от параметров режима бурения мрамора при различных значениях эксцентриситета приложения динамической нагрузки E :

а) $E=0$ мм; б) $E=2,4$ мм; в) $E=6,8$ мм; г) $E=11$ мм

4.2 Анализ результатов исследования совокупного влияния величины эксцентриситета и расстояния от точки нанесения удара до забоя на процесс разрушения горных пород

На основе выводов, сделанных по результатам первого этапа экспериментов, были проведены исследования влияния величины эксцентриситета на эффективность процесса разрушения горных пород с учетом влияния расстояния между точкой нанесения удара и забоем. В ходе первого этапа опытного бурения было отмечено позитивное влияние всех величин эксцентриситета на эффективность бурения упруго-пластичной горной породы, в то время как для упруго-хрупкой горной породы оптимальная величина эксцентриситета находилась в небольшом диапазоне (до 2,4 мм). Следовательно, процесс разрушения внецентренными ударными импульсами необходимо изучать более детально для горных пород высокой категории по буримости. Во втором этапе объектом экспериментального исследования была выбрана твердая и хрупкая горная порода – долерит.

Анализ результатов опытного бурения блока горной породы позволил построить математические модели механической скорости бурения и энергоемкости разрушения забоя от величины эксцентриситета и расстояния между точкой нанесения удара и забоем. На основе полученных моделей были построены графические зависимости основных показателей от регулируемых факторов. Математические модели позволяют определить коэффициенты влияния осевого усилия (фактор x_1), частоты вращения (фактор x_2), величины эксцентриситета (фактор x_3) и расстояния между точкой нанесения удара и забоем (фактор x_4) на основные показатели эффективности процесса бурения: механическую скорость (V_M) и энергоемкость разрушения горной породы (W).

Математическая модель механической скорости бурения:

$$V_{\text{мех}} = 4,2 + 0,3x_1 + 0,98x_2 + 0,3x_3 - 0,13x_4 + 0,07x_1x_2 + 0,03x_1x_3 - 0,16x_1x_4 - 0,03x_2x_3 + 0,14x_2x_4 - 0,09x_3x_4 - 0,08x_1x_2x_3 + 0,06x_1x_2x_4 - 0,12x_1x_3x_4 + 0,09x_2x_3x_4 + 0,02x_1x_2x_3x_4 \quad (4.2.1)$$

Математическая модель энергоёмкости процесса разрушения горных пород:

$$W = 2,23 + 0,01x_1 - 0,33x_2 - 0,22x_3 + 0,05x_4 - 0,07x_1x_2 + 0,02x_1x_3 + 0,09x_1x_4 + 0,1x_2x_3 - 0,09x_2x_4 + 0,04x_3x_4 + 0,02x_1x_2x_3 - 0,06x_1x_2x_4 + 0,03x_1x_3x_4 - 0,06x_2x_3x_4 + 0,01x_1x_2x_3x_4 \quad (4.2.2)$$

Таблица 4.1.1 – Коэффициенты влияния факторов эксперимента на механическую скорость бурения и энергоёмкость бурения, рассчитанные по средним значениям коэффициентов регрессии

Влияние факторов эксперимента (совокупности факторов) на отклики:	Факторы и совокупности факторов эксперимента в кодовом обозначении:														
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{23}	x_{24}	x_{34}	x_{123}	x_{124}	x_{134}	x_{234}	x_{1234}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
механическую скорость бурения	0,075	0,23	0,07	-0,03	0,017	0,007	-0,04	-0,01	0,032	-0,02	-0,02	0,015	-0,03	0,022	0,005
Энергоёмкость разрушения	0,003	-0,15	-0,1	0,022	-0,03	0,008	0,039	0,046	-0,04	0,019	0,01	-0,03	0,016	-0,03	0,005

Согласно результатам исследований, энергия удара снижается по мере увеличения эксцентриситета его приложения E , что говорит о существенном снижении энергоемкости разрушения породы при некотором эксцентриситете его приложения в сравнении с центральным ударом. При этом объем разрушения при внецентренном ударе превышает объем разрушения породы при центральном ударе ($E=0$), а прирост объема разрушения более значителен для твердых и хрупких горных пород. Это объясняется тем, что в момент внецентренного удара проявляется действие не только осевого, в направлении забоя, ударного импульса, но и сдвиговые динамические усилия в плоскости забоя.

Увеличение эксцентриситета ударной нагрузки (в пределах оптимального диапазона) положительно влияет на механическую скорость бурения, однако в совокупности с расстоянием между точкой нанесения удара и забоем влияние может оказаться неоднозначным. Расстояние от точки нанесения удара до забоя характеризует энергию единичного удара – чем больше значение фактора, тем меньше энергии доходит до породоразрушающего инструмента. Вместе с тем, минимальное расстояние до забоя не всегда соответствует максимальной эффективности процесса разрушения, так как сочетание данного фактора с величиной эксцентриситета не всегда оптимально.

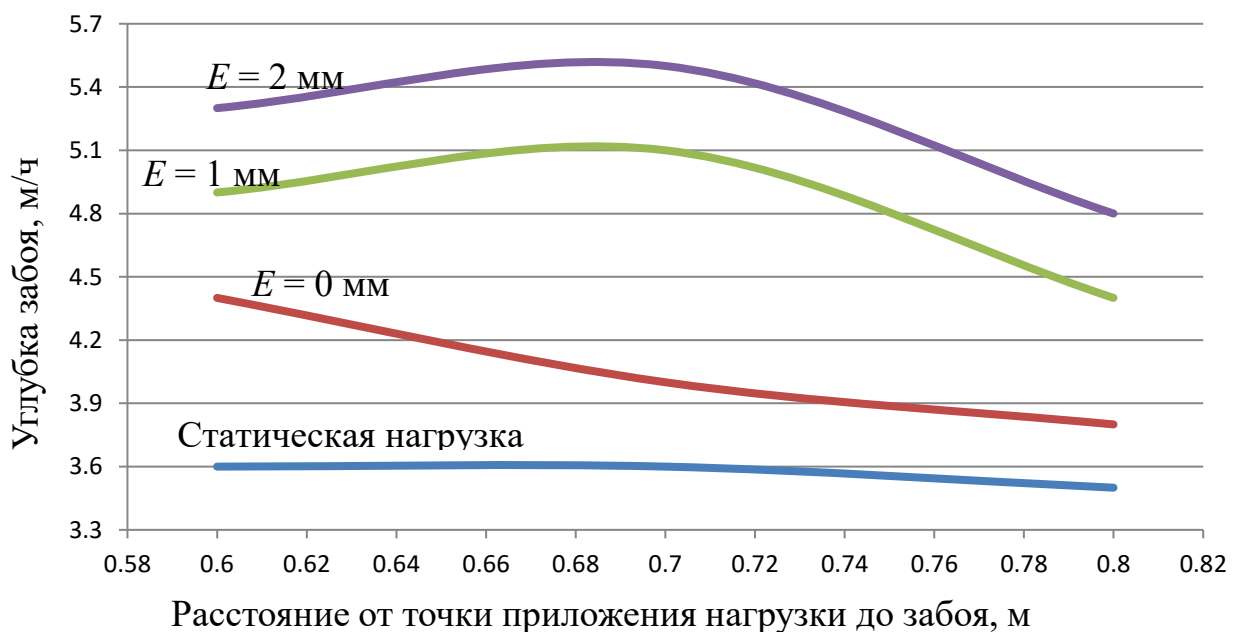


Рисунок 4.2.1 - Зависимость скорости углубки от величины эксцентриситета E и расстояния между точкой приложения нагрузки и

Увеличение основных параметров режима бурения, в частности, частоты вращения, способствует росту механической скорости практически во всех случаях, что говорит об эффективности применения внецентренных ударных нагрузок.

4.3 Анализ распределения напряжений в буровом инструменте и на контакте с горной породой методом конечных элементов

Методика исследования моделей распределения напряжений в буровом инструменте и на контакте с горной породой описана в третьей главе диссертации.

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 4.3.1). 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 (описаны в главе 3) изменялись. Все полученные значения заносились в таблицу, на основе которой были построены графические зависимости величины напряжений от задаваемых параметров (см. рисунки 4.3.2-4.3.7).

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.

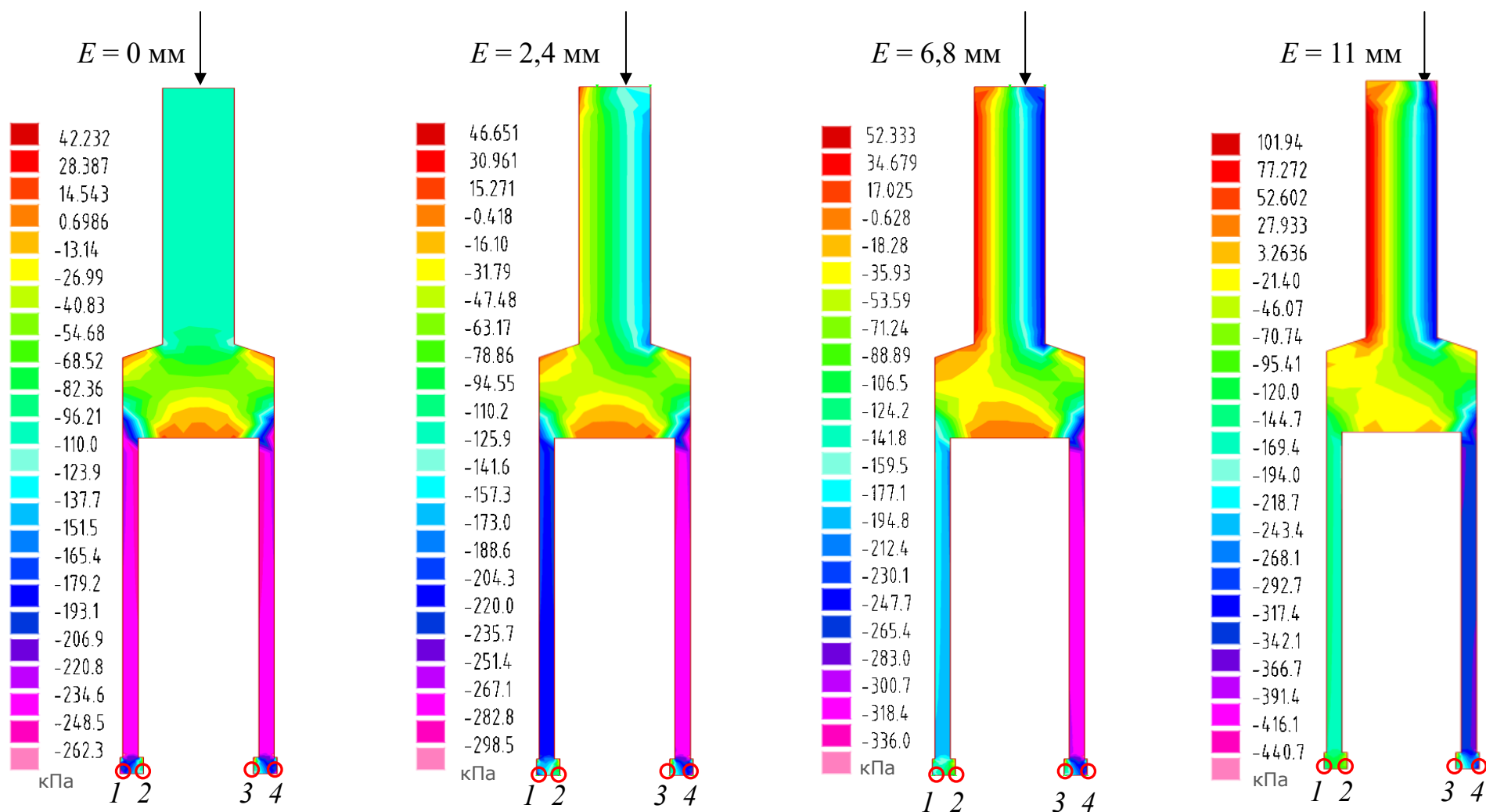


Рисунок 4.3.1 – Компьютерные модели для исследования напряжений в инструменте при различных значениях эксцентриситета приложенной нагрузки:
1,2,3,4 – ключевые точки измерения величины напряжений

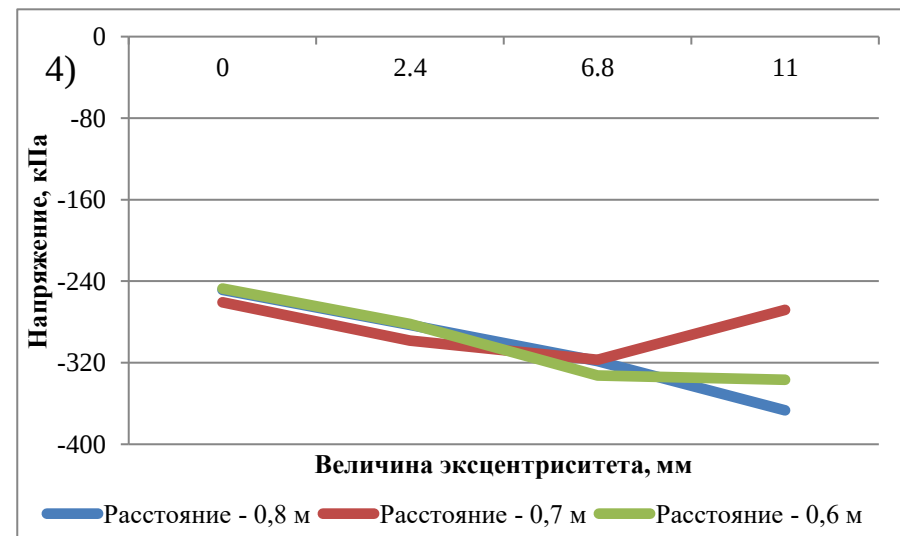
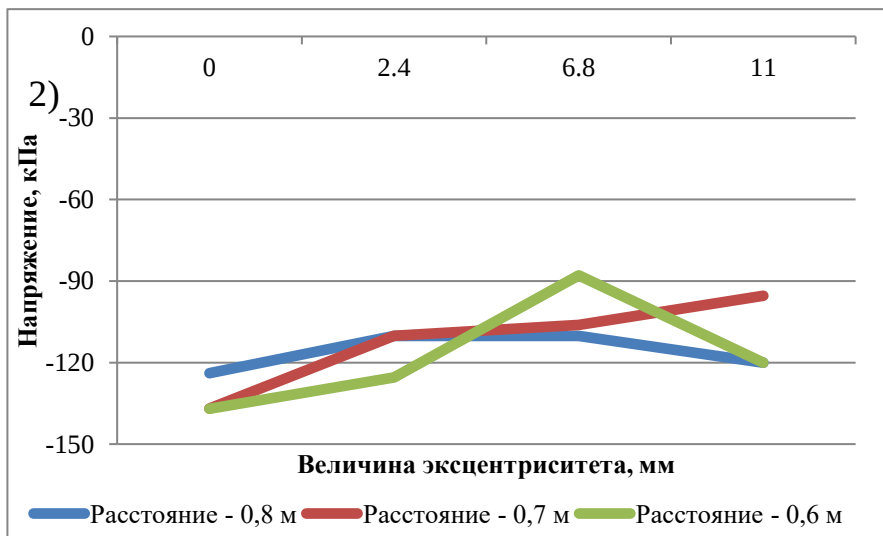
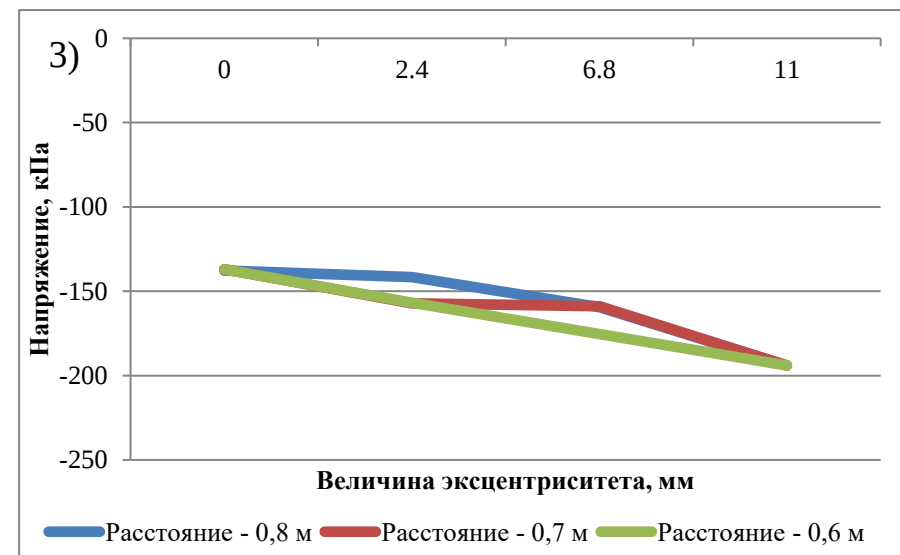
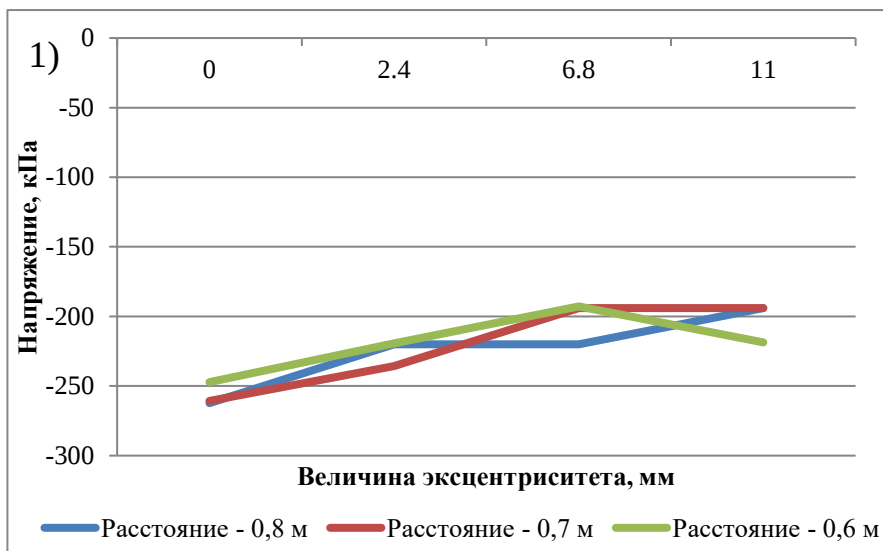


Рисунок 4.3.2 – Зависимость продольных напряжений в инструменте от величины эксцентриситета приложенной нагрузки при различных расстояниях от точки приложения до забоя

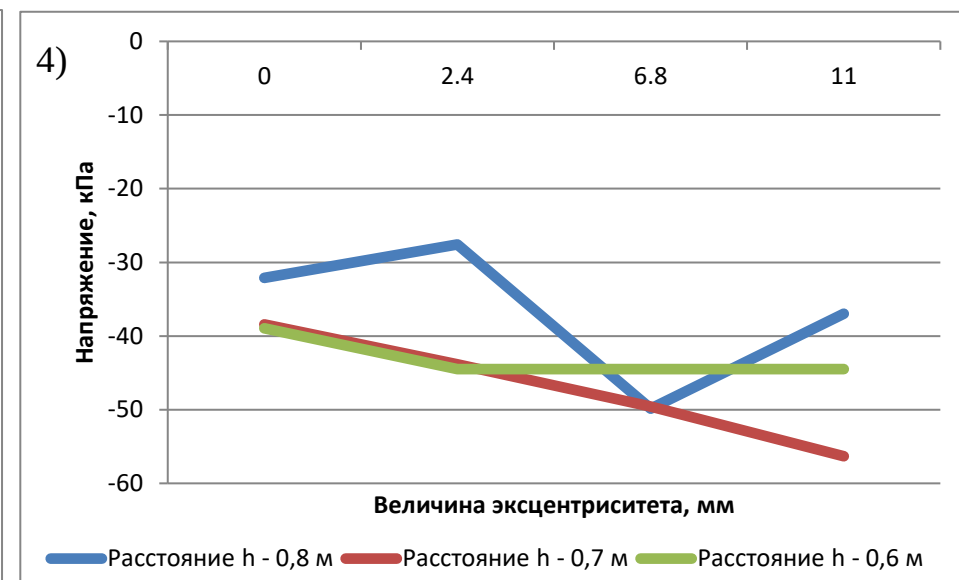
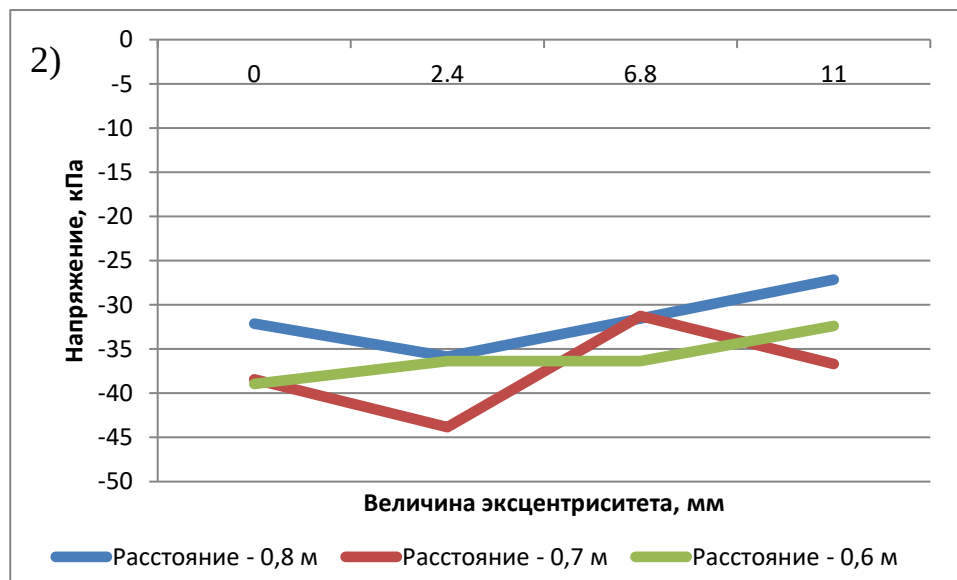
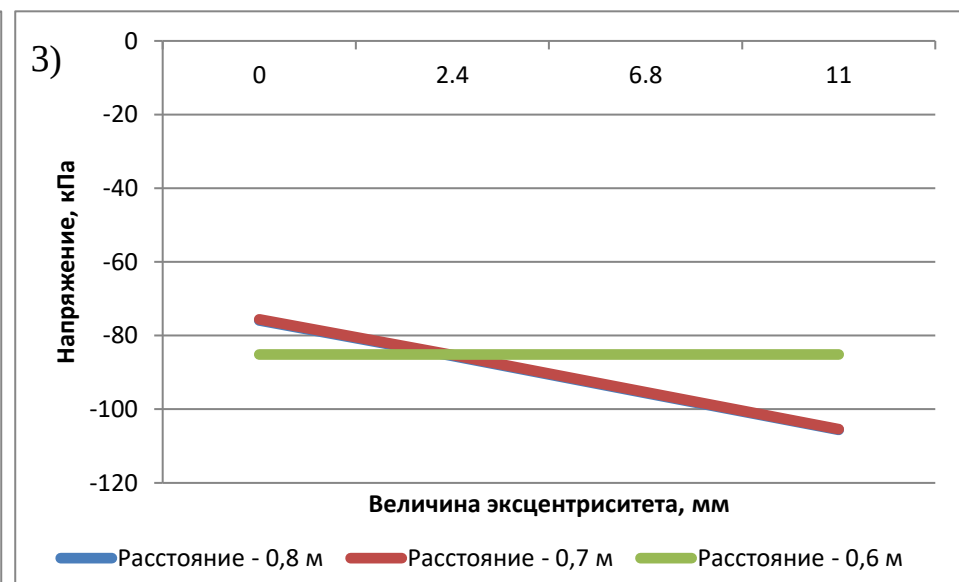
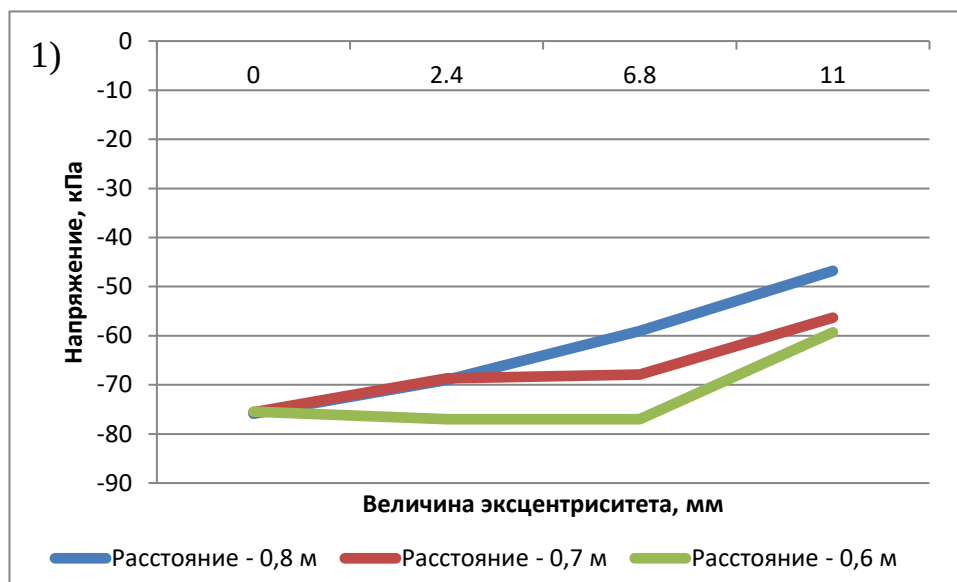


Рисунок 4.3.3 – Зависимость поперечных напряжений в инструменте от величины эксцентриситета приложенной нагрузки при различных расстояниях от точки приложения до забоя

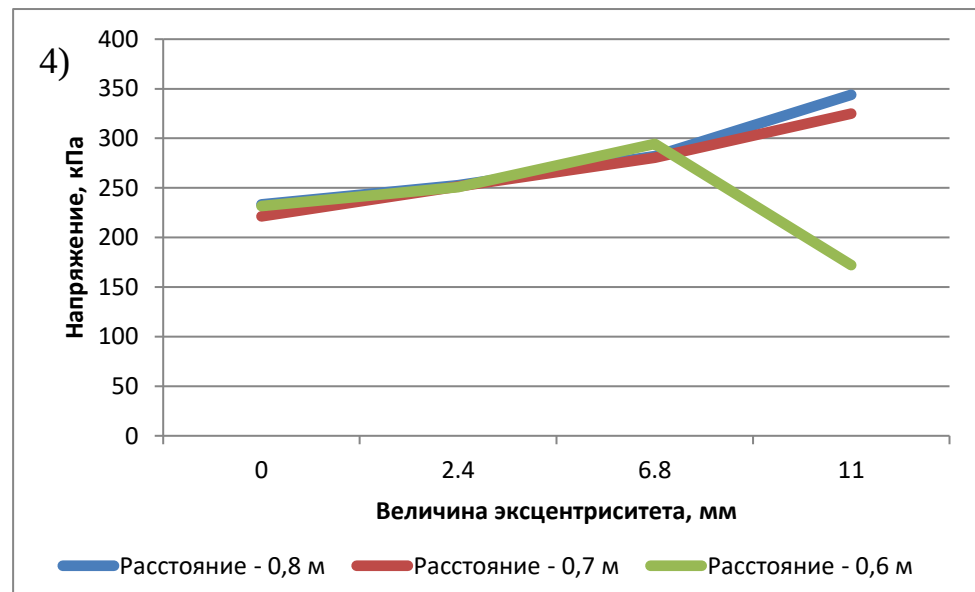
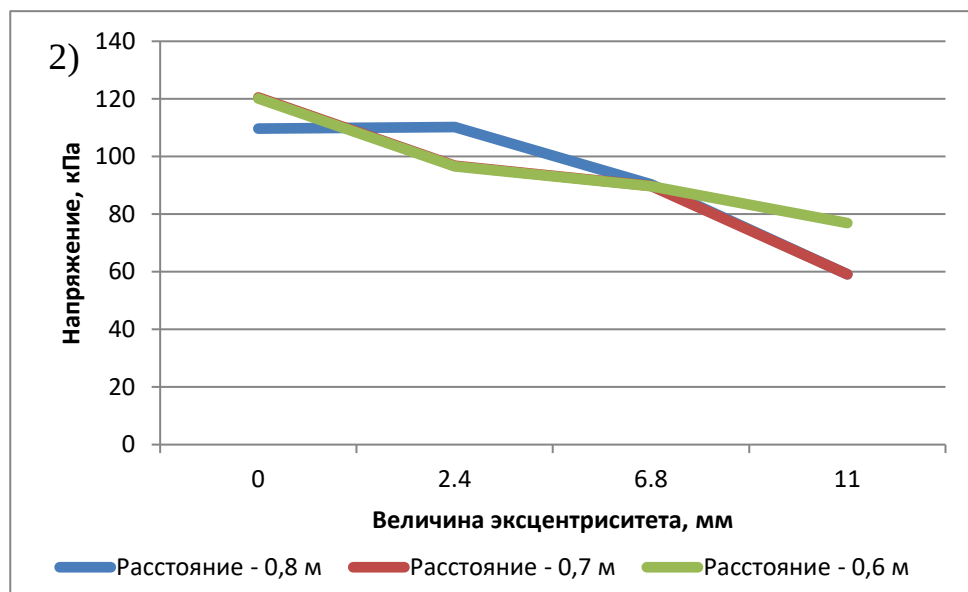
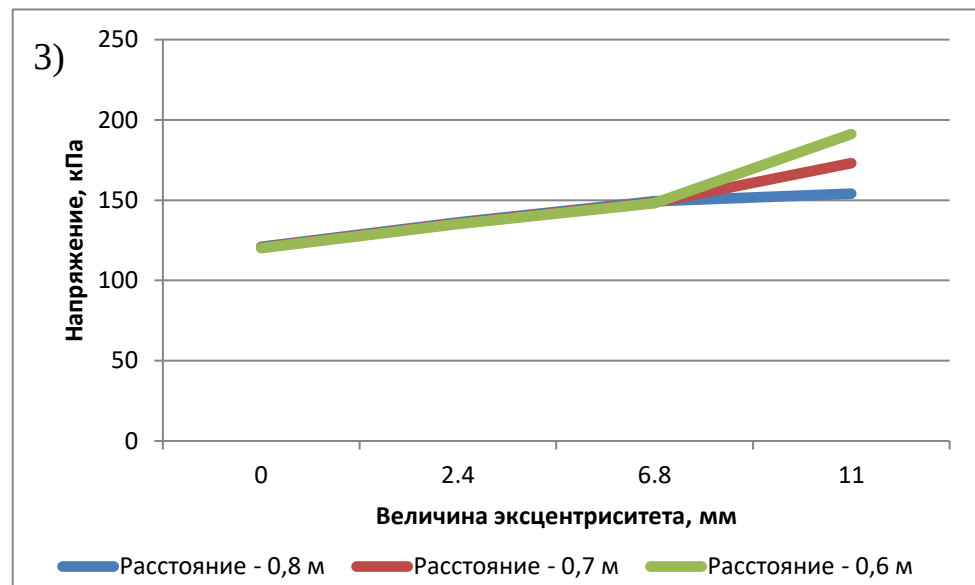
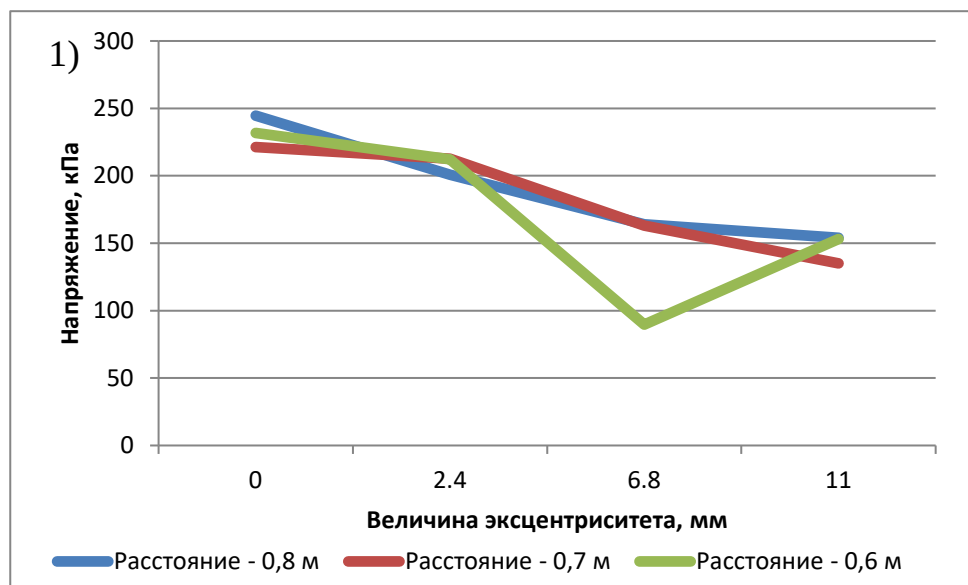


Рисунок 4.3.4 – Зависимость эквивалентных напряжений в инструменте от величины эксцентриситета приложенной нагрузки при различных расстояниях от точки приложения до забоя

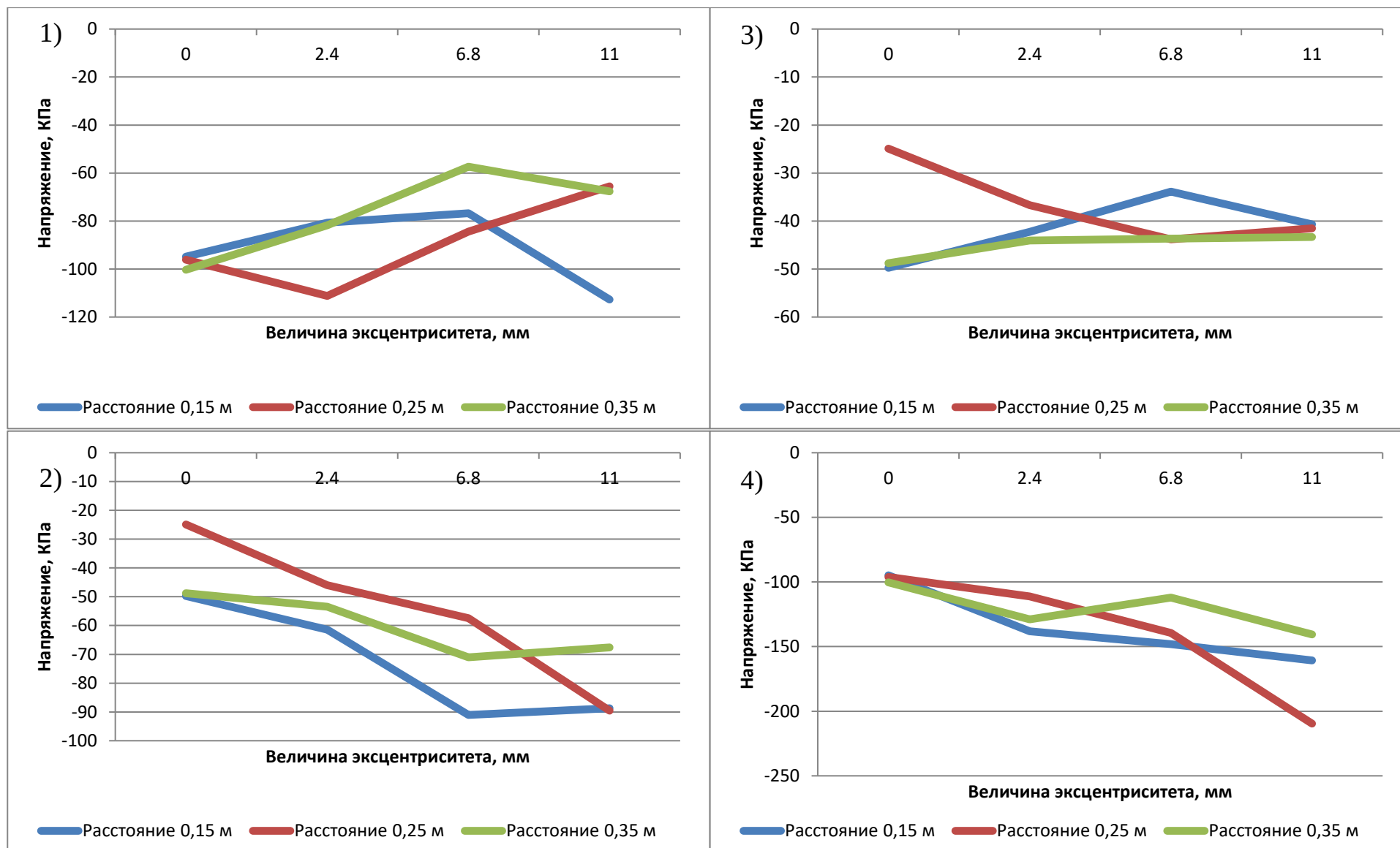


Рисунок 4.3.5 – Зависимость продольных напряжений в инструменте от величины эксцентриситета приложенной нагрузки при различных расстояниях от точки приложения до забоя

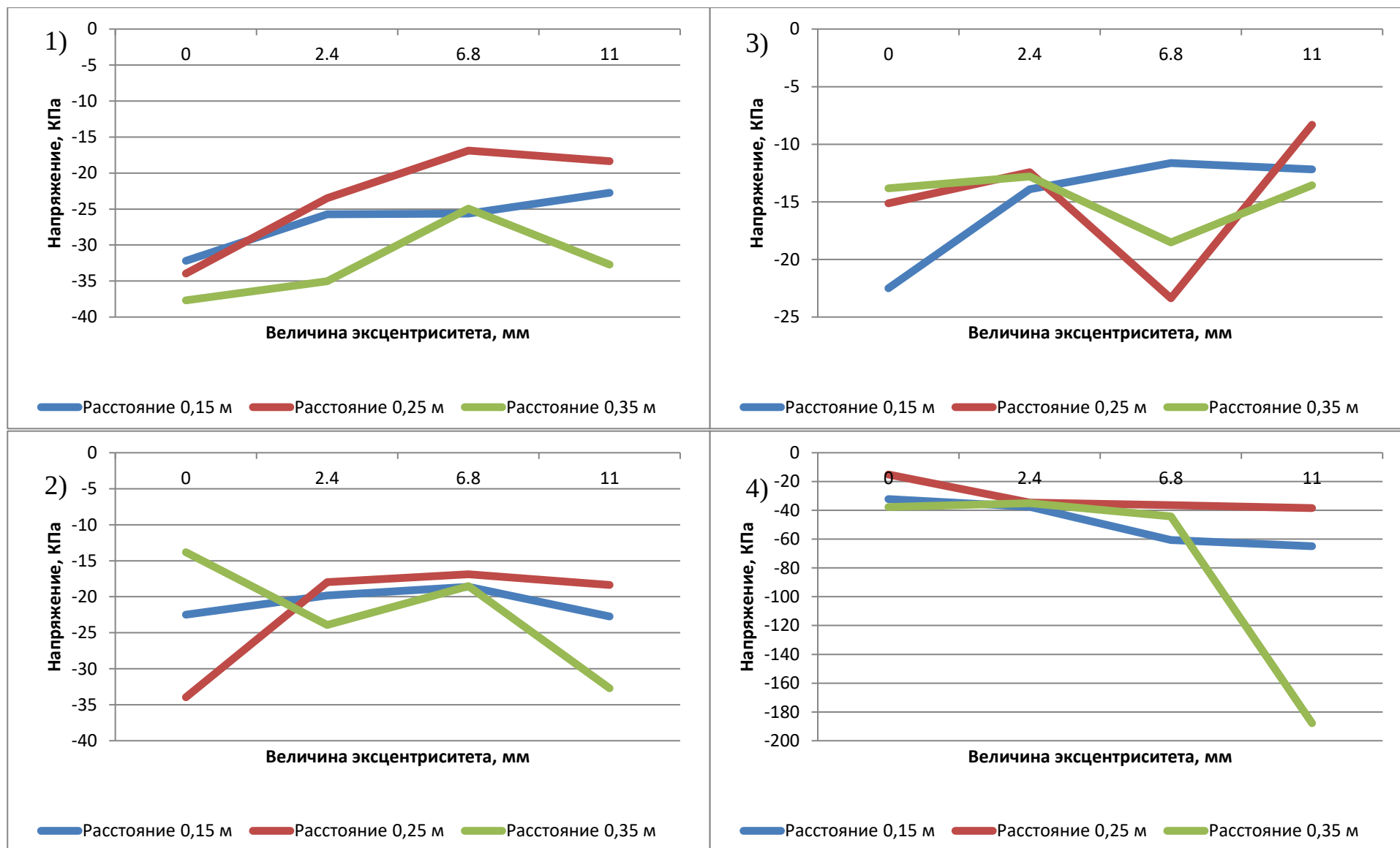


Рисунок 4.3.6 – Зависимость поперечных напряжений в инструменте от величины эксцентриситета приложенной нагрузки при различных расстояниях от точки приложения до забоя

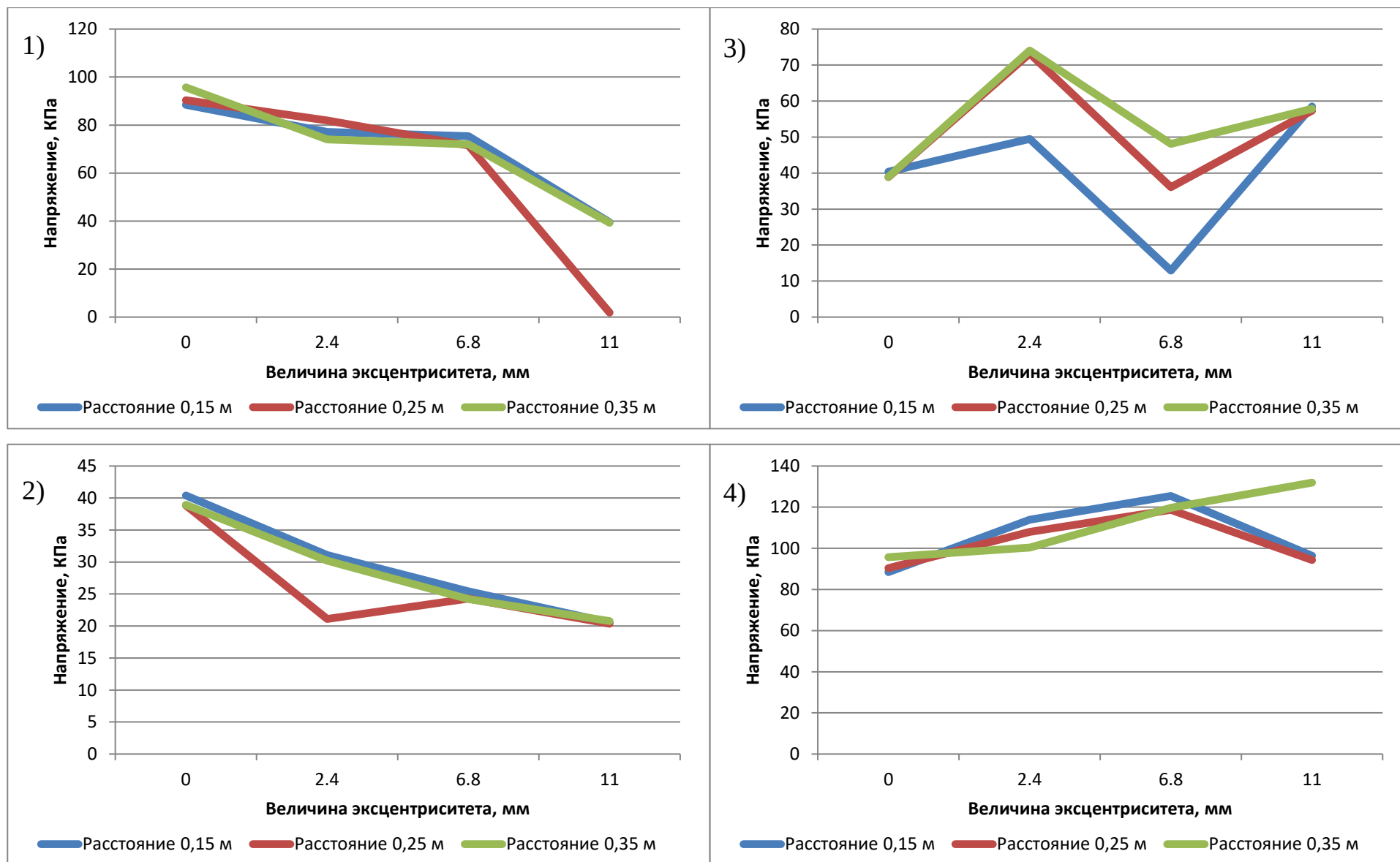


Рисунок 4.3.7 – Зависимость эквивалентных напряжений в инструменте от величины эксцентриситета приложенной нагрузки при различных расстояниях от точки приложения до забоя

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 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.

4.4 Статистическая оценка достоверности результатов экспериментальных исследований

В целях снижения объемов экспериментальных работ при сохранении достаточной их точности, а также для оценки достоверности результатов

проведенных экспериментальных исследований был применен метод планирования полного факторного эксперимента.

1. Оценка достоверности результатов экспериментального бурения блоков мрамора и долерита произведена в соответствии с планом полного факторного эксперимента типа 2³. Результаты экспериментального бурения обработаны для параметра механической скорости бурения V_M и для параметра энергоемкости процесса разрушения W .

2. Оценка достоверности результатов экспериментального бурения блока долерита произведена в соответствии с планом полного факторного эксперимента типа 2⁴. Результаты экспериментального бурения обработаны для параметра механической скорости бурения V_M и для параметра энергоемкости процесса разрушения W .

Преимуществом полного факторного эксперимента является то, что при проведении исследований одновременно варьируются все переменные, в связи с чем, каждый коэффициент регрессии определяется по результатам всех экспериментов, а точность определения коэффициентов регрессии возрастает.

На основании результатов экспериментальных исследований на каждом этапе работ были определены значения выборочных дисперсий и проведена полная статистическая оценка полученных результатов с использованием соответствующих аналитических зависимостей [1, 41].

Таблица 4.4.1. Матрица планирования полного факторного эксперимента 2⁴

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевое усилие, даН	Величина эксцентриситета ударной нагрузки, м	Расстояние между точкой нанесения ударной нагрузки и забоем, м
Основной уровень	550	1000	0,002	0,7
Интервал варьирования	160	200	0,002	0,1
Нижний уровень	390	800	0	0,6
Верхний уровень	710	1200	0,004	0,8
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3	x_4

Значения выборочных дисперсий S_u^2 (табл. 4.4.2):

$$S_u^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (\bar{Y}_u - Y_{uj})^2}{m-1}, \quad (4.4.1)$$

где $\bar{Y}_u$ – средние величины измеренных в процессе исследования значений;

Y_{uj} – значения, измеренные в процессе исследования;

m – количество повторений опытов.

Таблица 4.4.2 – Значения выборочных дисперсий S_u^2 для каждой стадии экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования	Бурение блока долерита		Измерение диаметров наплавов
1	2	3	4
Стадии оценки	Механическая скорость	Энергоемкость	Оценка произведена в 1 стадию
Значения выборочных дисперсий S_u^2	$6,16 \cdot 10^{-5}$	$6,11 \cdot 10^{-13}$	0,0114 0,0113 0,0251 0,0099
	$5,45 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-13}$	
	$6,21 \cdot 10^{-5}$	$7,67 \cdot 10^{-11}$	
	$5,64 \cdot 10^{-2}$	$4,87 \cdot 10^{-11}$	
	$8,03 \cdot 10^{-5}$	$9,59 \cdot 10^{-13}$	
	$3,52 \cdot 10^{-2}$	$3,58 \cdot 10^{-11}$	
	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$3,44 \cdot 10^{-13}$	
	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$6,09 \cdot 10^{-12}$	
	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-12}$	
	$7,15 \cdot 10^{-4}$	$7,13 \cdot 10^{-13}$	
	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-12}$	
	$4,08 \cdot 10^{-2}$	$3,12 \cdot 10^{-11}$	
	$5,17 \cdot 10^{-4}$	$7,16 \cdot 10^{-12}$	
	$4,14 \cdot 10^{-2}$	$2,98 \cdot 10^{-11}$	
	$7,27 \cdot 10^{-4}$	$9,21 \cdot 10^{-12}$	
	0	0	
Сумма:	0,17	$2,42 \cdot 10^{-10}$	0,0577

Проверка гипотезы однородности дисперсий (G – критерий Кокрена) (табл. 4.4.3):

$$G = \frac{S_{u_{max}}^2}{\sum S_u^2}, \quad (4.4.2)$$

где $S_{u_{max}}^2$ – максимальное значение выборочных дисперсий;

$\sum S_u^2$ – суммарное значение выборочных дисперсий.

Определение статистической значимости коэффициентов регрессии (t – критерий Стьюдента) (табл. 4.4.4):

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}, \quad (4.4.3)$$

где b_i – значение каждого отдельного коэффициента регрессии;

$S\{b_i\}$ – среднеквадратическое отклонение дисперсии ошибки.

Таблица 4.4.3 – Проверка гипотезы однородности дисперсий (G – критерий Кокрена) для каждой стадии исследований

Экспериментальные исследования	Бурение блока долерита		Измерение диаметров наплавов
1	2	3	4
Стадии оценки	Механическая скорость	Энергоемкость	Оценка произведена в 1 стадию
Значения G – критерия Кокрена	0,346228	$7,82 \cdot 10^{-11}$	0,435
Табличное значение	0,45		0,629
Вывод	Дисперсии однородны		

Таблица 4.4.4 – Определение статистической значимости коэффициентов регрессии (t – критерий Стьюдента) для каждого вида экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования	Бурение блока долерита		Измерение диаметров наплавов
1	2	3	4
Стадии оценки	Механическая скорость	Углубка за один оборот	Оценка произведена в 1 стадию
Значения t – критериев Стьюдента	171,34	199,05	1209,8 3,082 3,499 0,083
	110,92	22,22	
	98,66	112,95	
	44,28	53,15	
	32,93	47,68	
	65,44	15,70	
	27,07	2,79	
	12,52	12,05	
	31,12	33,84	
	10,62	17,15	
	6,16	7,22	
	22,30	8,04	
	2,37	6,97	
	3,94	0,70	
	5,29	7,40	
	2,25	1,50	
Табличное значение	2,12		1,120

Вывод	Основная часть коэффициентов регрессии значима; незначимые коэффициенты зачеркнуты	Основная часть коэффициентов значима; зачеркнутый коэффициент незначим
-------	--	--

Проверка адекватности модели исследуемому процессу (F – критерий Фишера) (табл. 4.4.5):

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}}, \quad (4.4.4)$$

где S_{ad}^2 – дисперсия адекватности модели;

$S^2\{y\}$ – дисперсия параметра оптимизации (функции отклика).

Таблица 4.4.5 – Проверка адекватности модели (F – критерий Фишера) для каждого вида экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования	Бурение блока долерита		Измерение диаметров наплавов
1	2	3	4
Стадии оценки	Механическая скорость	Углубка за один оборот	Оценка произведена в 1 стадию
Значения F – критериев Фишера	В проверке нет необходимости	1,36	0,0087
Табличное значение		3,6	$\approx 2,5$
Вывод	Модели адекватны исследуемым процессам		

Статистическая оценка результатов экспериментальных исследований, проведенная при уровне значимости $P = 0,05$, показала, что достоверность результатов экспериментальных исследований на каждом этапе работ соответствует 95 %.

4.5 Возможные варианты реализации предложенной технологии

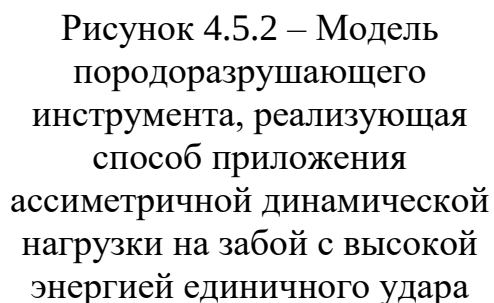
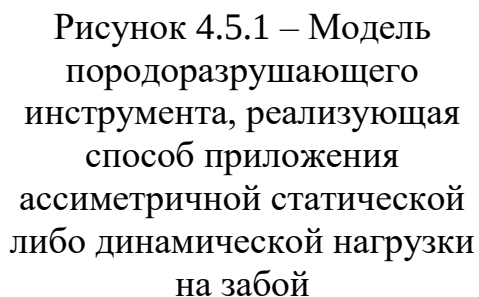
Реализовать предложенную идею возможно за счет внедрения в конструкцию породоразрушающего инструмента шарнирного элемента, обеспечивающего перекося торца матрицы в момент приложения статической либо динамической нагрузки. При этом для вращательно-ударного способа бурения возможно применение серийных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

необходимости модернизации механизма передачи ударной энергии к буровому инструменту (что не исключает необходимости совершенствования механизма создания и передачи динамической нагрузки забойных гидроударников).

Модель породоразрушающего инструмента, предназначенная для бурения вращательно-ударным способом с малой и средней энергией удара и высокой частотой нанесения ударных импульсов, изображена на рисунке 4.5.1. Принцип работы данного инструмента заключается в следующем: шарнир 2, установленный по центру корпуса долота 1, создает эксцентриситет приложения статической либо динамической нагрузки на забой посредством 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 4.5.2, 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,



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 4.5.3). 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.

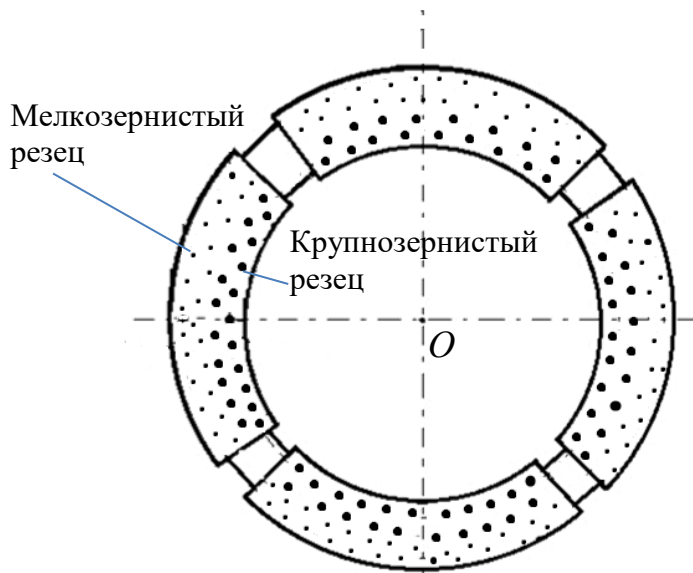


Рисунок 4.5.3 – Схема торца алмазной коронки с разной зернистостью объемных алмазов:
О – Ось вращения породоразрушающего инструмента;

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.

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 ассиметричной 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 ассиметричной 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 ассиметричной 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1968. – 155 с.
2. Алимов, О. Д. Закономерности вращательно-ударного бурения шпуров / О.Д. Алимов, Л. Т. Дворников. / Фрунзе: "Илим", 1974. – 56 с.
3. Александров, Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 199 с.
4. Андреев, В.Д. Расчет передачи энергии ударного импульса через инструмент и породу. В кн.: Горный породоразрушающий инструмент / В.Д. Андреев. – Киев: Техника, 1969. – с. 71-79.
5. Арцимович, Г.В. Влияние забойных условий и режима бурения на эффективность проходки / Г.В. Арцимович. – Новосибирск: Наука, 1974. – 124 с.
6. Арцимович, Г.В. Исследование и разработка породоразрушающего инструмента для бурения / Г.В. Арцимович, Е.П. Поладко, И.А. Свешников. – Новосибирск, 1978. – 181 с.
7. Арцимович, Г.В. Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента / Г.В. Арцимович. – Новосибирск: Наука, 1985. – 265 с.
8. Ахматова, А.С. Молекулярная физика граничного слоя / А.С. Ахматова. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
9. Блинов, Г.А. Алмазосберегающая технология бурения / Г.А. Блинов, В.И. Васильев, М.Г. Глазов [и др.]. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
10. Богданов, Р.К. Некоторые представления механизма работы алмазного резца буровой коронки / Р.К. Богданов, А.П. Закора, А.М. Исонкин // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. – 2003. – Вып. 25. – С. 71 – 80.
11. Буглов, Н.А. Повышение эффективности бурения скважин в анизотропных породах путем применения специальных коронок / Н.А. Буглов, А.В. Карпиков, И.А. Скрипченко // Материалы X международной конференции Керуленской экспедиции «Проблемы геологии и металлогении центральной Азии». – Иркутск: ИрГТУ, 1995. – С. 102 – 103.

- 12.Будюков, Ю.Е. Разработка научных основ проектирования специального алмазного породоразрушающего инструмента и технологии его применения: дис. ... доктора техн. наук: 25.00.14 / Будюков Юрий Евдокимович. – Москва, 2003. – 301 с.
- 13.Будюков, Ю.Е. Алмазный породоразрушающий инструмент / Ю.Е. Будюков, В.И. Власюк, В.И. Спирин. – Тула: ИПП «Гриф и К», 2005. – 288 с.
- 14.Быченков, Е.И. К вопросу исследования напряженного состояния горных пород в призабойной зоне буровых скважин / Е.И. Быченков // Методика и техника разведки: сб. науч. тр. – Л.: ВИТР, 1971. – Вып. 74. – С. 11 – 14.
- 15.Васильев, В.В. Бурение скважин двойными колонковыми трубами с наложением высокочастотных ударных импульсов. В кн.: Методика и техника разведки / В.В. Васильев, В.А. Каулин. – Л.: ОНТИ ВИТР, 1978, № 122. – С. 20-26.
- 16.Владиславлев, В.С. Теория работы породоразрушающих инструментов: учеб. пособие / В.С. Владиславлев. – М.: МГРИ, 1982. – 77 с.
- 17.Воздвиженский, Б.И. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения / Б.И. Воздвиженский, И.П. Мельничук, Ю.А. Пешалов. – М.: Недра, 1973. – 240 с.
- 18.Воздвиженский, Б.И. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения / Б.И. Воздвиженский, Г.А. Воробьев, Л.К. Горшков [и др.] – М.: Недра, 1990. – 208 с.
- 19.Вудс, Г. Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 162 с.
- 20.Ганджумян, Р.А. Расчеты в бурении: справочное пособие / Р.А. Ганджумян, А.Г. Калинин, Н.И. Сердюк / Под редакцией А.Г. Калинина. – М.: РГГРУ, 2007. – 668 с.
- 21.Глазов, М.Г. Опыт бурения скважин алмазными коронками с применением высокочастотных гидроударников / М.Г. Глазов, У.Е. Есентаев, А.М. Тихонов. // Техника и технология геол.-развед. работ: Экспресс-информ / ВИЭМС. – 1977, № 4. – С. 1-9.

22. Горшков, Л.К. Определение количества и глубины внедрения режущих зерен при разрушении горных пород импрегнированными алмазными коронками / Л.К. Горшков // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1975. – Вып. 1. – С. 128 – 135.
23. Граф, Л.Э. Техника и технология гидроударного бурения / Л.Э. Граф, А.Т. Киселев, Д.И. Коган. – М.: Недра, 1975 г. – 144 с.
24. Евсеев, В.Д. Пути повышения эффективности разрушения горных пород / В.Д. Евсеев, М.Р. Мавлютов // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – 2000. – Т. I. – С. 463.
25. Закиров-Зиев, А. Выбор технических средств и рациональная технология бурения скважин гидроударниками в Кузбассе. В кн.: Бурение скважин гидроударными механизмами / А. Закиров-Зиев, Д.И. Коган. – Кемерово: Кемеров. кн. изд-во, 1974. – С. 21-28.
26. Калинин, А.Г. Разведочное бурение: учеб. пособие / А.Г. Калинин [и др.]. – М.: Недра – Бизнесцентр, 2000. – 748 с.
27. Каракозов, А.А. Разработка гидроударников двойного действия с дифференциальным поршнем для бурения скважин различного целевого назначения / А.А. Каракозов, С. Н. Парфенюк // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2015. Вып. 1. – С. 65-78.
28. Кардыш, В.Г. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин / В.Г. Кардыш, Б.В. Мурзаков, А.С. Окмянский. – М.: Недра, 1984. – 200 с.
29. Киселев, А.Т. Исследование и разработка рекомендаций по бурению гидроударными машинами с применением алмазного породоразрушающего инструмента / А.Т. Киселев, И.Н. Крусир. // Техника и технология геол.-развед. работ: Экспресс-информ / ВИЭМС. – 1976, № 18. – С. 3-10.
30. Киселев, А.Т. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин / А.Т. Киселев, И.Н. Крусир. – М.: Недра, 1982. – 103 с.
31. Кожевников, А.А. Импульсные технологии бурения геологоразведочных скважин / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко – К.: УкрГГИ, 2003. – 208 с.

32. Койфман, М.И. Обобщение некоторых закономерностей разрушения горных пород при вращательном, ударном и вращательно-ударном бурении // Вопросы горного дела. – М.: Углетехиздат. – 1958. – С. 111–132.
33. Кривошеев, В.В. Искривление скважин в анизотропных породах / В.В. Кривошеев. – Томск: НТЛ, 1999. – 240 с.
34. Кривошеев, В.В. Направленное бурение / В.В. Кривошеев. – Томск: ТПИ, 1991. – 91 с.
35. Крусир, И.Н. Эффективность гидроударного бурения в тресте «Ворошиловградгеология» / И.Н. Крусир, В.Я. Голиков, А.Н. Проходько. // Техника и технология геол.-развед. работ: Экспресс-информ / ВИЭМС. – 1976, № 6. – С. 4-11.
36. Кудайкулов, С.К. Бурение скважин в сложных условиях снарядами со съёмными керноприемниками (ССК) / С.К. Кудайкулов. – Алматы: КазНТУ, 2010. – 248 с.
37. Куликов, И.В. Пневмоударное бурение разведочных скважин. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.В. Куликов, В.Н. Воронов, И.И. Николаев. – М.: Недра, 1989. – 235 с.
38. Ламбин, А.И. Некоторые результаты изучения влияния промывочной жидкости на эффективность разрушения пород в процессе бурения / А.И. Ламбин // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. науч. тр. / Иркутский гос. техн. ун-т. – 2003. – Вып. 3. – С. 196 – 198.
39. Ламбин, А.И. Планирование эксперимента в технологии бурения скважин: учеб. пособие / А.И. Ламбин, Тан Фуньлинь. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1985. – 84 с.
40. Макклиток, Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток, А. Аргон. – М.: МИР, 1970. – 360 с.
41. Медведев, И.Ф. Вращательно-ударное бурение шпуров и скважин / И.Ф. Медведев, А.И. Пуляев. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 210 с.
42. Михайлова, Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения / Н.Д. Михайлова. – М.: Недра, 1985. – 200 с.

- 43.Музапаров, М.Ж. Направленное бурение: Учебник. – Том 1. Бесклиновая технология / М.Ж. Музапаров – Алматы: КазНТУ, 2001. – 205 с.
- 44.Нейштетер, И.А. Исследование энергоемкости разрушения горных пород при вращательном и ударно-вращательном способах бурения алмазными коронками с целью прогнозирования механической скорости бурения: дис. ... канд. тех. наук: 04.00.19 / Нейштетер Иван Артурович. – Томск, 1984. – 223 с.
- 45.Нескоромных, В.В. Результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами / В.В. Нескоромных // Изв. вузов. Геология и разведка. – М.: 1999. – № 6. – С. 115-120.
- 46.Нескоромных, В.В. Анализ влияния технических и технологических параметров на скорость резания горной породы алмазным резцом / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, Д.А. Коновалов // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые: сб. науч. тр. / Уральская гос. горно-геологическая академия. – 2003. – Вып. 25. – С. 81 – 87.
- 47.Нескоромных, В.В. Аналитическое исследование влияния усилия резания-скалывания и коэффициента сопротивления на процесс разрушения горной породы алмазным резцом / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. науч. тр. / Иркутский гос. техн. ун-т. – 2003. – Вып. 3. – С. 212 – 217.
- 48.Нескоромных, В.В. Механика разрушения горной породы алмазным резцом с учетом деформационно-пластических явлений в процессе резания-скалывания / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, Р. Пурэвсурэн // Известия ВУЗов. Геология и разведка: сб. науч. тр. – 2005. – Вып. 1. – С. 48 –51.
- 49.Нескоромных, В.В. Направленное бурение: учеб. пособие / В.В. Нескоромных, А.Г. Калинин. – М.: Изд-во Центрлитнефтегаз, 2008. – 382 с.
- 50.Нескоромных, В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ : учеб. пособие / В.В. Нескоромных. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 300 с.
- 51.Нескоромных, В.В. Исследование влияния внецентренного приложения ударных импульсов на эффективность алмазного бурения / В.В. Нескоромных, 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.
52. Нескоромных, В.В. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах / В.В. Нескоромных, Г.Р. Романов, П.Г. Петенёв, А.Л. Неверов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 30-40.
53. Павлова, Н.Н. Разрушение горных пород при динамическом нагружении / Н.Н. Павлова, Л.А. Шрейнер. – М.: Недра, 1964. – 159 с.
54. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1991. – 410 с.
55. Парийский, Ю.М. Вопросы теории вращательно-ударного бурения / Ю.М. Парийский. – Изв. вузов. Горный журнал, 1961, № 9. – С. 106-115.
56. Пестриков, В.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
57. Питерский, В.М. Оптимальное управление процессом бурения / В.М. Питерский. – Обзор ВИЭМС. Техника и технология геологоразведочных работ, организация производства, 1980. – 65 с.
58. Протасов, Ю.И. Разрушение горных пород / Ю.И. Протасов. – М.: МГГУ, 2001. – 453 с.
59. Пушмин, П.С. Обоснование модели алмазной коронки на основе исследования механики разрушения твердых анизотропных пород: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.14 / Пушмин Павел Сергеевич. – Иркутск, 2006. – 131 с.
60. Пушмин, П.С. 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.
61. Пушмин, П.С. 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.
- 62.Пушмин, П.С. Возможные пути снижения нерациональных энергозатрат в бурении (на примере производственных данных ФГУП «Иркутскгеология») / П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб.науч.трудов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. Вып. 14. С. 79-84.
- 63.Пушмин, П.С. 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.
- 64.Пушмин, П.С. 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.
- 65.Пушмин, П.С. 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 ИРННТУ, 2016. [в печати].
- 66.Пушмин, П.С. 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 ИРННТУ, 2016. [в печати].
- 67.Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах: Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
- 68.Ребиндер, П.А. Физико-химия поверхностных явлений и дисперсных систем в СССР в применении к технике. В сб. Математика в естествознании за 20 лет / П.А. Ребиндер. – М.: 1938. – 126 с.

- 69.Ребрик, Б.М. Соотношение осевой нагрузки и частоты вращения снаряда при колонковом бурении / Б.М. Ребрик // Известия ВУЗов. Геология и разведка: сб. науч. тр. – 1998. – Вып. 2. – С. 132 – 137.
- 70.Рожков, В.П. Разработка метода определения микротвердости пород при бурении мелкоалмазным инструментом / В.П. Рожков // Известия ВУЗов. Геология и разведка: сб. науч. тр. – 1998. – Вып. 4. – С. 119 – 125.
- 71.Рожков, В.П. Разработка теоретических основ и совершенствование бурения геологоразведочных скважин алмазным породоразрушающим инструментом: дис. ... доктора тех. наук: 05.15.14 / Рожков Владимир Павлович. – Красноярск, 1999. – 408 с.
- 72.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.
- 73.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.
- 74.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.
- 75.Рябчиков, С.Я. Технология и техника бурения геологоразведочных и геотехнологических скважин: учеб. пособие / С.Я. Рябчиков, В.Г. Храменков, В.И. Брылин. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2010. – 514 с.
- 76.Сахаров, А.В. Определение числа активных алмазов при бурении твердых горных пород / А.В. Сахаров // Методика и техника разведки: сб. науч. тр. – 1995. – Вып. 4. – С. 33 – 37.

- 77.Свешников, И.А. Исследование процесса разрушения горных пород методом люминисцентной дефектоскопии. В сб. Разрушение горных пород инструментом из сверхтвердых материалов / И.А. Свешников, Э.М. Винник. – Киев: ИСМ АН УССР, 1980. – С. 12-18.
- 78.Сейд-Рза, М.К. Устойчивость стенок скважин / М.К. Сеид – Рза, Ш.И. Исмаилов, Л.М. Орман. – М.: Недра, 1981. – 175 с.
- 79.Сердюк, Н.И. Бурение скважин различного назначения / Н.И. Сердюк, В.В. Куликов, А.А. Тунгусов [и др.] – М.: Изд. РГГРУ, 2006. – 616 с.
- 80.Соловьев, Н.В. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьев, В.Ф. Чихоткин. – М.: ВНИИОЭНГ, 1997. – 147 с.
- 81.Спивак, А.И. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие / А.И. Спивак, А.Н. Попов. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
- 82.Справочник по бурению геологоразведочных скважин / И.С. Афанасьев [и др.] / гл. ред. Е.А. Козловский. – СПб.: Недра, 2000. – 712 с.
- 83.Сулакшин, С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие для вузов / С.С. Сулакшин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 136 с.
- 84.Сулакшин, С.С. Способы, средства и технология получения представительных образцов пород и полезных ископаемых при бурении геологоразведочных скважин: учебное пособие / С.С. Сулакшин. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 284 с.
- 85.Троллоп, Д.Х. Введение в механику скальных пород: пер. с англ./ Д.Х. Троллоп, Х. Бок, . Б.С. Бест [и др.]; под ред. Х. Бока. – М.: Мир, 1983. – 276 с.
- 86.Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т.1 / А.П. Филин. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
- 87.Шадрина, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в колонне труб при бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок: автореф. дис. ... доктора тех. наук: 25.00.14 / Шадрина Анастасия Викторовна. – Томск, 2014. – 44 с.
- 88.Шамшев, Ф.А. Технология и техника разведочного бурения / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов [и др.]. – М.: Недра, 1983. – 565 с.

- 89.Шелковников, И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения / И.Г. Шелковников. – Л.: Недра, 1977. – 159 с.
- 90.Шкурко, А.К. Бурение скважин забойными ударными машинами / А.К. Шкурко. – Л.: Недра, 1982. – 169 с.
- 91.Шолохов, Л.Г. Теоретические основы технологии и проектирования направленного бурения скважин / Л.Г. Шолохов. – Свердловск: СГИ, 1982. – 110 с.
- 92.Шрейнер, Л.А. Механические и абразивные свойства горных пород / Л.А. Шрейнер. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 256 с.
- 93.Эйгелес, Р.М. Разрушение горных пород при бурении / Р.М. Эйгелес. – М.: Недра, 1971. – 231с.
- 94.Эпштейн, Е.Ф. Теория бурения-резания горных пород твердыми сплавами / Е.Ф. Эпштейн. – М.: ГОНТИ, 1939. – 180 с.
- 95.Эпштейн, Е.Ф. Бурение скважин гидроударниками и пневмоударниками / Е.Ф. Эпштейн, В.Г. Ясов. М.: Недра, 1967. – 168 с.
- 96.Ясов, В.Г. Теория и расчет рабочих процессов гидроударных буровых машин / В.Г. Ясов. – М.: Недра, 1977. – 153 с.
- 97.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.
- 98.Буровой портал [электронный ресурс]: колонковые наборы СКН-48 (НК-76), СГ-48 (ССГ-76), СВ-48, СГН-48 Электрон.текстовые дан. 2000.- Режим доступа: <http://www.drillings.ru/naboruskn>