

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Головченко Антон Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИИ
УДАРНО–ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННЫХ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 25.00.14 Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор,
член–корр. РАЕН
Нескоромных Вячеслав Васильевич

Москва 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Современное состояние техники и технологии при ударно-вращательном способе бурения скважин	10
1.1 Общие сведения об ударно–вращательном способе бурения	10
1.2 Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения	13
1.3 Современное состояние техники и технологии ударно–вращательного бурения	25
1.4 Отклоняющие комплексы для ударно–вращательного бурения.....	33
1.5 Методы повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения.....	46
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	50
ГЛАВА 2 Теоретические основы разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами. Методика экспериментальных исследований	52
2.1 Механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.....	52
2.3 Степень исследованности механизма внецентренного разрушения горных пород	62
2.4 Методика исследований и обработки результатов	65
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	70
ГЛАВА 3 Экспериментальное исследование механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами. Анализ полученных результатов	72

3.1 Анализ изменчивости механической скорости бурения как отклика системы в зависимости от факторов эксперимента	72
3.2 Анализ изменчивости углубления за один оборот как отклика системы в зависимости от факторов эксперимента	78
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	87
ГЛАВА 4 Разработка конструкций технических средств для повышения производительности процесса ударно–вращательного способа бурения и управления направлением скважин	89
4.1 Разработка породоразрушающего инструмента, реализующего передачу внецентренных ударных импульсов	89
4.2 Модернизация отклоняющего комплекса на базе забойной ударной машины	94
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Ударно–вращательное бурение погружными пневмоударниками – способ, широко используемый в горном деле, геологоразведке, бурении скважин на воду, строительстве дорог и других буровых работах, как в отечественной практике, так и за рубежом. В настоящее время ударно–вращательный способ является одним из наиболее перспективных способов бурения, в особенности горных пород твёрдых и очень твёрдых кристаллических и упруго–хрупких, благодаря высоким скоростям проходки скважин (механическая скорость бурения в идентичных горно-геологических условиях по сравнению с вращательным способом бурения выше до 4 раз) в сочетании с долговечностью и надёжностью применяемых при реализации способа конструкций, а сбалансированное сочетание шламового и кернового опробования позволяет значительно экономить материальные ресурсы и время на бурение при проведении геологоразведочных работ без ущерба для достоверности данных о месторождении и его рудах.

Несмотря на высокую по отношению к традиционному вращательному бурению производительность процесса разрушения горных пород на забое скважины, на данный момент она определяется главным образом давлением нагнетаемого компрессором высокого давления очистного агента. Очевидно, что бесконечное повышение этого параметра невозможно, к тому же по мере увеличения давления очистного агента его себестоимость возрастает, ввиду чего повышение производительности процесса разрушения горных пород на забое скважины при ударно-вращательном бурении скважин без повышения затрат энергии является актуальной и требующей решения задачей. Также к таковой относится и отсутствие серийно выпускаемого отклоняющего комплекса, способного с высокой механической скоростью производить корректировку направления проведения скважин без снижения механической скорости в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин.

Целью диссертационной работы является научное обоснование конструкций породоразрушающего инструмента для повышения производительности процесса бурения скважин и конструкции забойного отклоняющего комплекса для управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин приложением внецентренных ударных импульсов.

Идея работы заключается в рациональном, научно обоснованном применении внецентренной ударной нагрузки для повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин и управления их направлением.

Основные задачи исследований:

1. Обзор и анализ современной техники и технологии ударно–вращательного способа бурения скважин.

2. Обзор и анализ методов повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин.

3. Анализ современных технических средств управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин.

4. Разработка методики проведения экспериментальных работ по изучению механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.

5. Проведение экспериментальных работ по исследованию производительности процесса разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.

6. Обработка и анализ полученных в результате экспериментальных работ данных, установление основных зависимостей.

7. Разработка и совершенствование технических средств для повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения и управления направлением скважин.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования автор опирался на систему регулятивных принципов, приёмов и способов комплекса универсальных (анализ, синтез, обобщение, индукция,

дедукция), эмпирических (наблюдение, описание, измерение, эксперимент) и теоретических (мысленный эксперимент, идеализация, формализация) научных методов изучения механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.

Эмпирические исследования механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами проводились на стенде, выполненном на базе бурового станка СКБ–4 и бурового насоса НБ–3. Обработка результатов опытных исследований выполнялась в соответствии с методами математической статистики по плану полного факторного эксперимента.

Личный вклад автора состоит в обзоре, анализе и обобщении отечественного и зарубежного опыта применения и методов повышения производительности ударно–вращательного способа бурения скважин, постановке задач исследования, а также выполнении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и интерпретации их результатов.

Научная новизна:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость механической скорости бурения от величины эксцентриситета приложения удара, режимных параметров бурения и физико-механических свойств горных пород в диапазоне 0 – 2 миллиметра, определяющая изменение механизма разрушения и повышение объема разрушения горных пород.

2. Установлена зависимость погрешности ориентации ударника со смещённым центром масс поперечного сечения от его геометрических параметров и режима работы, определяющая точность выполнения работ по управлению направлением скважин в условиях ударно-вращательного бурения скважин с использованием внецентренных ударных импульсов.

Защищаемые научные положения.

1. Внецентренное приложение ударного импульса в сравнении с центральным меняет механизм разрушения горной породы с осевого дробления-скалывания к разрушению при осевом дроблении-скалывании с одновременным скалыванием в тангенциальном направлении, что позволяет при определённых

значениях эксцентриситета приложения удара обеспечивать повышение объёма разрушения горной породы и производительности бурения без увеличения энергии ударного импульса.

2. В зависимости от схемы приложения внецентренного ударного импульса – в фиксированной плоскости относительно забоя скважины или равномерно по его периметру возможна реализация технологии направленного бурения и изменения направления скважины или технология бурения без искривления ствола скважины с повышенной производительностью соответственно.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется современным уровнем теоретических исследований, используемым при экспериментальных исследованиях измерительным оборудованием, результатами специально проведённых экспериментальных работ и достаточной сходимостью результатов теоретических и стендовых исследований по изучению механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами, а также их воспроизводимостью и оценкой достоверности результатов с использованием методов математической статистики.

Практическая и теоретическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании и практической верификации возможности применения внецентренной ударной нагрузки при бурении ударно–вращательным способом с целью повышения производительности процесса бурения и управления направлением скважин, а также разработке соответствующих технических средств.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования представлены и обсуждены на XX, XXI, XXII, XXIII и XIV Международных научных симпозиумах имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, ТПУ, 2016, 2017, 2018, 2019 и 2020 гг.), XVI Всероссийской конференции–конкурсе студентов выпускного курса «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, СПГУ, 2018 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей и молодых ученых "Актуальные проблемы недропользования

2018" (г. Новочеркасск, ЮРГПУ, 2018 г.), XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективны – 2019» (г. Красноярск, СФУ, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 15 научных статей, из которых 1 – в журнале, индексируемом международными базами научного цитирования Web of Science/Scopus, 3 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ на изобретение, 2 патента РФ на полезную модель.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 101 наименования, содержит 118 страниц машинописного текста, 47 рисунков и 8 таблиц.

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяется цель, идея, задачи и методы их решения, излагаются научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость, приводятся сведения об апробации результатов работы и публикационной активности автора.

Первая глава посвящена обзору и анализу современной техники и технологии ударно–вращательного способа бурения скважин, включая обзор и анализ методов повышения производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин и рассмотрение современных технических средств управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин.

Во второй главе приведена методика решения эмпирических и теоретических задач диссертационного исследования, в частности методика изучения механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами для определения зависимости угла перекоса забоя от величины эксцентриситета приложения удара. Приведена методика обработки результатов эмпирических исследований.

В третьей главе представлены теоретические исследования механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами. Выявлены

основные факторы, влияющие на формирование величин объёма разрушения горных пород и угла перекоса забоя при внецентренном приложении ударной нагрузки.

Четвёртая глава посвящена обоснованию конструктивных особенностей технических средств, реализующих внецентренное приложение ударных импульсов, таких как породоразрушающий инструмент для повышения объёма разрушения горных пород и отклоняющий комплекс для управления направлением скважин с высокой механической скоростью на основе проведённых теоретических и практических исследований.

В заключении отражены основные выводы и рекомендации, обобщающие основные положения диссертационной работы.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору, члену–корреспонденту РАЕН **Нескоромных Вячеславу Васильевичу** за идейное вдохновение, ценные наставления и всеобъемлющую помощь при выполнении работы и её подготовке к защите, а также коллективу кафедры ТТР ИГДГиГ СФУ за поддержку и ценные замечания.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ СПОСОБЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

1.1 Общие сведения об ударно–вращательном способе бурения

Ударно-вращательное бурение – высокопроизводительный механический способ разрушения горных пород на забое скважины посредством ударных нагрузок, определяющих скалывание и дробление, в то время как величины осевой нагрузки и частоты вращения бурового снаряда играют вспомогательную роль. На данный момент ударно-вращательный способ бурения горных пород с применением пневмоударных машин является самым производительным способом разрушения горных пород высокой твёрдости [1–8]. При условии рационального сочетания шламового и кернового опробования при проведении геологоразведочных работ применение пневмоударного способа бурения позволяет значительно сократить затраты материальных ресурсов и времени на проведение работ без ущерба для достоверности данных о месторождении и его рудах.

Оптимальная область применения ударно-вращательного способа бурения скважин с применением забойных пневмоударных машин – скважины различного целевого назначения глубиной до 300 метров. Данное ограничение связано с невозможностью выноса шлама с забоя скважин большей глубины при использовании компрессоров высокого давления, используемых на данный момент. Оценка предельно возможной глубины бурения пневмоударниками может быть произведена в соответствии с фактическими геолого-гидрогеологическими условиями проведения работ и применяемого при этом оборудования. При этом в обводнённых скважинах одним из основных факторов будет являться гидростатическое давление, в скважинах без водопроявлений – суммарное сопротивление движению очистного агента [9–15].

Помимо пневмоударных, при практической реализации ударно-вращательного способа бурения скважин возможно использование гидроударных забойных механизмов. В то же время, на данный момент гидроударники применяются всё реже по причине того, что для их оптимального функционирования необходим значительный расход промывочной жидкости, что существенно удорожает производство работ и негативно сказывается на сохранности керна материала [16–22].

Технология бурения скважин погружными пневмоударниками имеет ряд специфических особенностей, определяемых характером разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении, конструкцией породоразрушающего инструмента, энергетическими параметрами пневматических машин ударного действия, свойствами очистного агента, геолого-техническими условиями бурения и другими факторами. За годы практического применения накоплен значительный опыт в области технологии пневмоударного бурения [20, 23–29].

Основные технологические факторы, влияющие на процесс ударно-вращательного бурения скважин:

1. *Поддержание высокой энергии ударов пневмоударника.* Данная необходимость связана с характером разрушения горных пород инструментом, имеющим притупленную или сферическую форму резцов, характерную для применяющихся при пневмоударном способе бурения штыревых долот. Исследованиями [27] установлено, что каждой разновидности горных пород соответствует оптимальная удельная энергия ударов, при которой процесс разрушения проходит с минимальной энергоёмкостью. Для пород IX – XII категорий по буримости минимальная энергоёмкость разрушения соответствует удельной энергии удара в пределах 30 – 40 Дж на 1 см длины породоразрушающего лезвия.

Основными способами поддержания высокой энергии ударов пневмоударника являются – использование компрессоров высокого давления, снижение противодавления на выхлопе пневмоударника путём подбора

оптимальных геометрических параметров системы; применение газожидкостных смесей.

2. Выбор и поддержание рациональной величины частоты вращения бурового снаряда. Частота вращения бурового снаряда оказывает большое влияние на энергоёмкость разрушения горных пород при пневмоударном бурении и связана со многими факторами:

- энергией и частотой ударов пневмоударника,
- физико-механическими свойствами разрушаемых горных пород,
- конструктивными характеристиками породоразрушающего инструмента.

Рациональная частота вращения может быть установлена только для конкретных условий бурения. При бурении скважин инструментом с радиальным расположением резцов зависимость механической скорости бурения от частоты вращения бурового снаряда имеет сложный характер, описываемый многоэкстремальной возрастающей функцией (рис.1.4).

3. Регулирование осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент. Осевая нагрузка в условиях ударно-вращательного бурения выполняет несколько функций:

- обеспечивает плотное прижатие резцов породоразрушающего инструмента к горной породе и её упругое сжатие в момент нанесения удара, приводящее к повышению эффективности разрушения горной породы;
- предотвращает отскок породоразрушающего инструмента после нанесения удара.

4. Регулирование расхода очистного агента. Расход воздуха или газожидкостной смеси при пневмоударном бурении – один из основных параметров, определяющих энергетические характеристики забойной ударной машины. Поэтому любые причины, приводящие к снижению расхода очистного агента, следует устранять или сводить их влияние к минимуму. В зависимости от количества подаваемого очистного агента на пневмоударнике устанавливается определённый перепад давления. Если в качестве энергоносителя для привода пневмоударника используют газожидкостные смеси, то при регулировании

подачи растворов ПАВ и концентрации в них поверхностно-активных веществ следует учитывать то обстоятельство, что при постоянном перепаде давления ударная мощность пневмоударника при работе на ГЖС ниже, чем при работе на сжатом воздухе ввиду повышенного аэрогидравлического сопротивления потоку газожидкостной смеси в каналах пневмоударника, приводящие к снижению объёмного расхода энергоносителя.

Энергетические параметры пневмоударника изменяются с увеличением расхода жидкой фазы смеси и концентрации в ней поверхностно-активного вещества. Повышение расхода раствора пенообразователя приводит к снижению энергии и частоты ударов пневмоударника, в связи с чем не рекомендуется увеличивать расход жидкой фазы свыше 10 – 15 л/мин. Увеличение концентрации поверхностно-активного вещества в растворе до определённого предела (1 – 2%) способствует росту ударной мощности пневмоударника, а при дальнейшем увеличении концентрации пенообразователя расходно-энергетические показатели снижаются. Поэтому при пневмоударном бурении в обводнённых скважинах концентрацию поверхностно-активных веществ в восходящем потоке пены лучше регулировать за счёт изменения концентрации вводимого раствора ПАВ, и только после достижения концентрации, равной 2%, увеличивать расход жидкой фазы смеси [27].

1.2 Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения

Механизм разрушения горных пород ударными импульсами исследовался многими учёными [30–53].

Анализ механизма разрушения горных пород при ударно-вращательном способе бурения скважин показывает его сложную зависимость от множества параметров. Основное разрушающее воздействие оказывает осевой удар высокой энергии. В то же время частота вращения снаряда имеет низкую величину (до 2 с^{-1}), обеспечивая оптимальную схему разрушения забоя перемещением

породоразрушающих элементов, а осевая нагрузка направлена на предотвращение отскока инструмента от забоя скважины.

Эффективность разрушения горных пород при ударно-вращательном способе бурения возможно оценить с помощью комплексных показателей, классическим из которых является механическая скорость – являющаяся произведение частоты вращения бурового снаряда и его углубления за один оборот [12]:

$$v_m = h_{об} \cdot \omega, \quad (1.1)$$

углубление забоя скважины при нанесении единичного удара породоразрушающим инструментом, исходя из геометрических параметров формирующихся лунок разрушения:

$$h_{об} = \frac{F_l \cdot Z}{F_{заб}}, \quad (1.2)$$

где F_l – объём лунки разрушения при нанесении единичного удара породоразрушающим инструментом, м³; $F_{заб}$ – площадь забоя скважины, м², Z – число радиальных рядов породоразрушающих элементов на торце породоразрушающего инструмента.

Механическая скорость бурения, путём объединения зависимостей (1.1) – (1.2) определяется:

$$v_m = \frac{F_l \cdot Z \cdot \omega}{F_{заб}}.$$

Соответственно, механическая скорость бурения при ударно-вращательном способе имеет прямую зависимость от величин частоты вращения инструмента, объёма формируемых лунок разрушения при нанесении единичного удара породоразрушающим инструментом и количества радиальных рядов породоразрушающих элементов на торце породоразрушающего инструмента, и обратную зависимость от площади забоя скважины.

Объём лунки разрушения при нанесении единичного удара породоразрушающим инструментом F_n совместно с удельной энергоёмкостью разрушения породы q формируют величину энергии единичного удара:

$$A \geq F_n \cdot q.$$

Также, объём лунки разрушения при нанесении единичного удара породоразрушающим инструментом возможно определить через соотношение геометрических параметров породоразрушающей вставки и формируемой ей лунки разрушения:

$$F_n = a^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot L \quad (1.3)$$

где α_1 – угол наклона борта лунки разрушения, град; L – длина породоразрушающего элемента, м.

В соответствии с зависимостью выше, принимая во внимание характеристику энергоёмкости разрушения породы, энергия удара для образования лунки разрушения равна:

$$A = a^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot L \cdot q \quad (1.4)$$

где a – ширина площадки притупления породоразрушающего элемента, м.

При бурении ударно-вращательным способом крайне важным обстоятельством оптимального проведения процесса является схема поражения забоя скважины инденторами породоразрушающего инструмента. Известны результаты экспериментальных исследований оптимальной схемы поражения забоя клиновидными (острым и притупленным) инденторами [4, 54]. Согласно теоретическим исследованиям, согласно критерию энергоёмкости разрушения горных пород оптимально нанесение последующих ударных импульсов при продвижении (повороте) коронки по выступам, оставшимся после предыдущего цикла разрушения.

Энергоёмкость разрушения гранита при различных схемах поражения забоя (рис.1.1 *а, б, в*) и различной геометрии резцов приведена в табл.1.1 [12].

Таблица 1.1 Энергоёмкость разрушения породы при различных схемах поражения забоя [12]

Форма торца индентора	Энергоёмкость разрушения, Дж/см ³		
	Схема поражения забоя на рис.1.1, <i>а</i>	Схема поражения забоя на рис.1.1, <i>б</i>	Схема поражения забоя на рис.1.1, <i>в</i>
Притупленный клин		1990	264
Острый клин		390	164
			376
			282

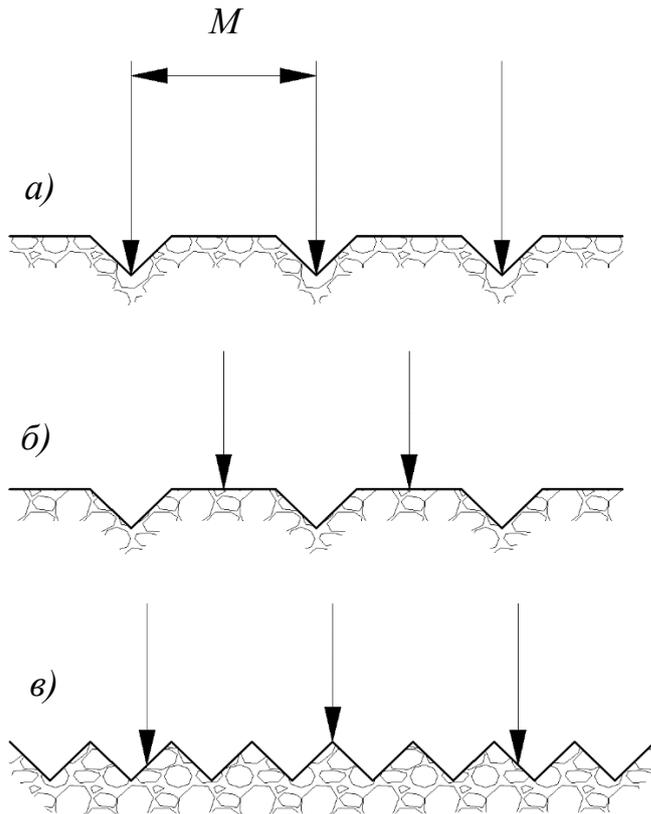


Рис. 1.1. Схемы нанесения ударов в плоскости забоя ($M = 16$ мм): а – лунки не взаимодействуют друг с другом; б – повторные удары наносятся между лунками; в – удары по нарушенному забою

удары – энергоёмкость разрушения относительно случая, когда удары наносятся по гладкой поверхности притупленным клином снижается в 5,3 раза, острым клином – всего в 1,4 раза [4, 54]. Таким образом, условием рациональности схемы поражения забоя является некоторое отставание ударов от предыдущих на расстояние K , численно равное 0,6 – 0,75 M (рис.1.1) [12].

Результаты опытного исследования показали, что энергоёмкость разрушения горных пород притупленным клином на ровной шлифованной поверхности снижается при нанесении ударов по трапециевидным выступам почти в 8 раз, аналогичный опыт с острым лезвием показывает снижение энергоёмкости лишь в 2,4 раза. Минимальная энергоёмкость разрушения зафиксирована при реализации второй схемы поражения забоя (рис.1.1 б) острым индентором. В то же время если рассмотреть условия, приближенные к забойным, когда поверхность породы, имитирующая забой скважины уже поражена

Также согласно вышеописанному исследованию, схема поражения забоя, изображённая на рисунке 1.1 б в случае радиального расположения породоразрушающих элементов является оптимальной для обоснования рациональной величины частоты вращения бурового снаряда как одного из основных управляющих параметров процесса бурения.

Исходя из схемы нанесения ударов в плоскости забоя на рис.1.1 оптимальная частота вращения бурового снаряда при некоторой величине частоты ударов $n_{уд}$ определяется как [12]:

$$\omega = \frac{n_{уд} \cdot M}{\pi \cdot D_n - K \cdot Z}, \quad (1.5)$$

где M – расстояние между соседними лунками разрушения породы на забое, м; D_n – диаметр бурового инструмента, м; K – расстояние равное $(0,6 - 0,75)M$, м; Z – число радиальных лезвий на торце бурового инструмента.

Также известно исследование геометрической оптимизации расположения резцов в программе *LabVIEW*, свидетельствующее о том, что правильное расположение породоразрушающих элементов способно повысить производительность бурения [55]. Для количественной оценки данного параметра в зависимости от расположения породоразрушающих вставок на торце породоразрушающего инструмента были определены и рассчитаны три показателя: наложенная площадь удара (площадь перекрытия зон воздействия инденторов), пустая область, и величина отклонения (поворота) породоразрушающего инструмента. Затем была реализована геометрическая оптимизация для одновременного уменьшения трех оценочных коэффициентов, поскольку минимальные значения показателей соответствуют равномерному распределению областей воздействия резцов и высокую эффективность бурения (рис. 1.2 – 1.3). В результате получена оптимальная компоновка резцов, которая может минимизировать все оценочные коэффициенты одновременно в конкретном оптимальном рабочем состоянии.

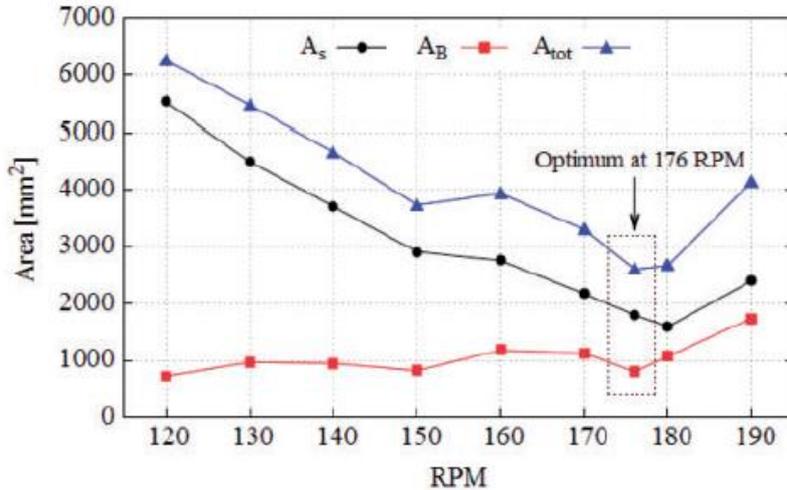


Рис.1.2. Наложенная площадь удара и пустая область в диапазоне 120–190 RPM (при 2300 BPM).
BPM – удары в минуту; RPM – обороты в минуту [55]

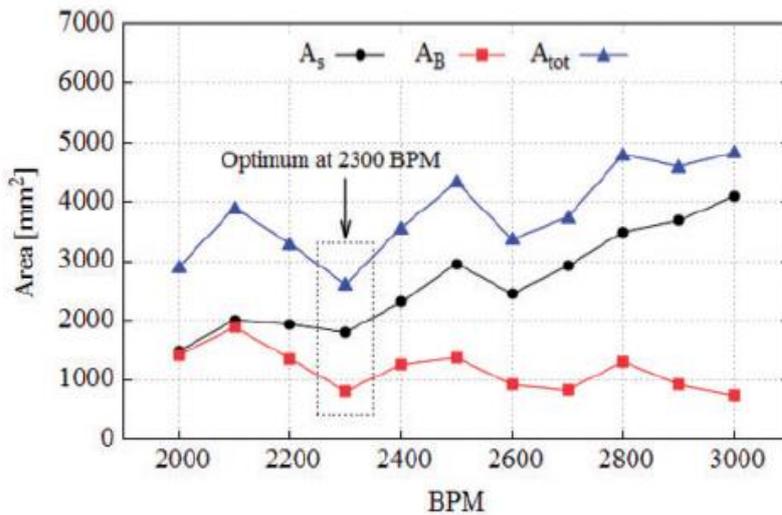


Рис.1.3. Наложенная площадь удара и пустая область в диапазоне 2000–3000 BPM (при 176 RPM).
BPM – удары в минуту; RPM – обороты в минуту [55]

бурения возможно при достижении определённых значений RPM и BPM в соответствии с их оптимальным соотношением [55]. Данное заключение также подтверждает факт существования оптимальной схемы поражения забоя, эффективной только при определённом соотношении частоты ударов забойного механизма и частоты его вращения (зависимость 1.5).

Используя полученные ранее зависимости, выражение для определения механической скорости при ударно-вращательном способе бурения можно определить как:

Также при исследовании влияния показателей режима работы RPM (*revolutions per minute* – обороты в минуту) и BPM (*blows per minute* – удары в минуту) на эффективность бурения обнаружено, что отклик системы чувствителен к отношению BPM/RPM – наилучшие результаты могут быть достигнуты при определенном рабочем состоянии, идентичном оптимальному соотношению BPM/RPM . Это значит, что повышение производительности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном способе

$$v_m = \frac{A \cdot Z \cdot M \cdot n_{уд}}{q \cdot F_{заб} \cdot (\pi \cdot D_n - K \cdot Z)} \quad (1.6)$$

Полученная зависимость для определения механической скорости бурения описывает основное соотношение влияющих факторов на процесс.

Также из зависимостей (1.4) и (1.6) следует, что повышение механической скорости бурения через уменьшение затрат энергии на разрушение горных пород инденторами возможно при увеличении количества радиальных породоразрушающих лезвий одновременно с уменьшением их размеров. Соответственно, данные выводы могут служить обоснованием применения породоразрушающих элементов сферической формы некоторого радиуса сферы при вооружении штыревых долот, используемых при ударно-вращательном способе бурения скважин.

Зависимость механической скорости ударно-вращательного бурения от частоты вращения бурового снаряда при радиальном расположении породоразрушающих лезвий отражена на рис.1.4. Представленные графики свидетельствуют о наличии в диапазоне изменения частоты вращения 0 – 100 мин⁻¹ двух – трёх экстремумов функции, что, безусловно, может являться

доказательством вышеизложенных теоретических положений о наличии оптимальной (для каждой совокупности геометрических характеристик породоразрушающего инструмента и физико-механических свойств

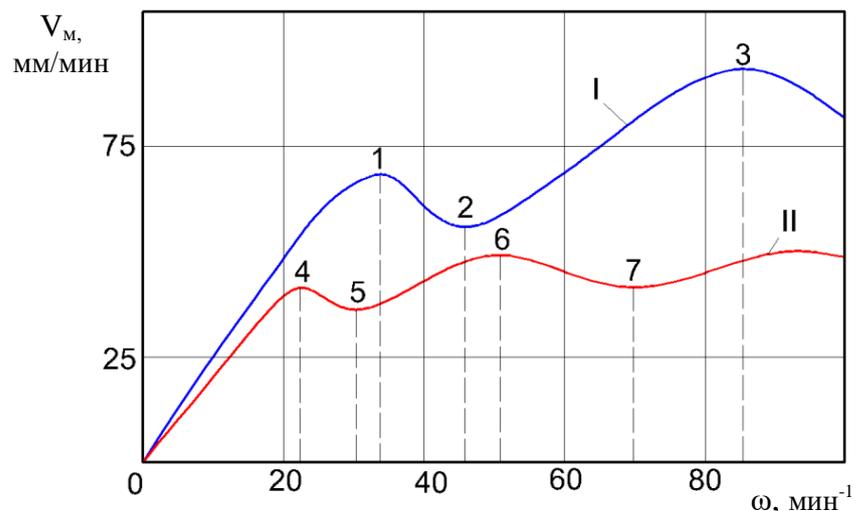


Рис. 1.4 Зависимость механической скорости бурения от частоты вращения: I (синий) – известняк VII категории по буримости; II (красный) – кварцит X категории по буримости.

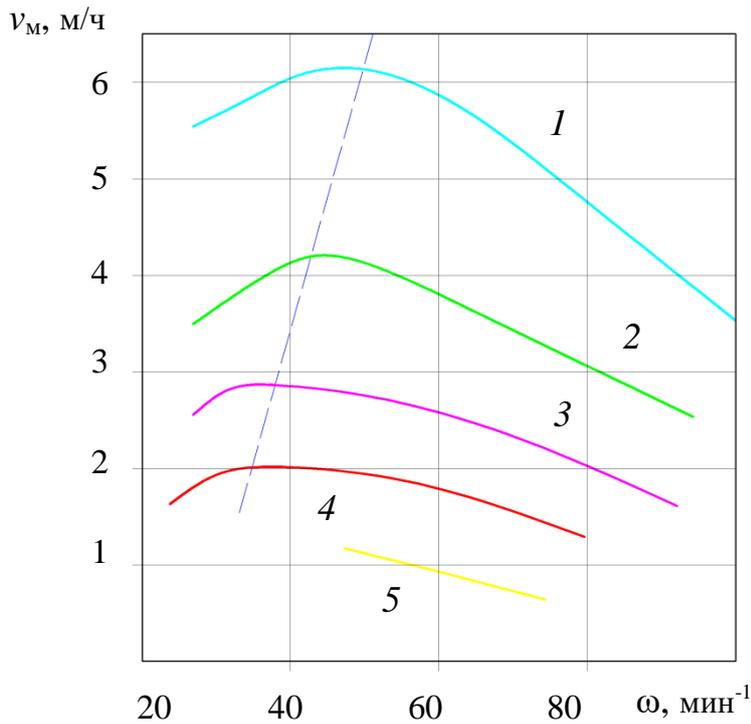


Рис. 1.5. Зависимость скорости бурения от частоты вращения снаряда при использовании долот с поперечно-радиальным расположением вставок на торце в породах различных категорий по буримости: 1 – VII; 2 – VIII; 3 – IX; 4 – X; 5 – XI

соответствуют случаю нанесения последующих ударов по трапециевидным выступам, расположенным между ранее сформированными лунками разрушения.

Однако если рассмотреть зависимость механической скорости бурения от частоты вращения бурового снаряда при расположении породоразрушающих элементов на торце долота не по радиальной схеме, то зависимость принимает вид, представленный на рис. 1.5. Поперечное расположение лезвий на торце, а также применение сферических породоразрушающих элементов приводит к тому, что зависимость механической скорости бурения от частоты вращения бурового снаряда для различных по категории по буримости горных пород получила форму, приближённую к параболе, имеющую один максимум (рис. 1.5) [12]. При этом характерным признаком является уменьшение величины частоты вращения бурового снаряда, при которой достигнута максимальная механическая скорость, при повышении прочностных характеристик горной породы (при увеличении

горных пород индивидуальной) схемы поражения забоя, зависящей от частоты вращения бурового снаряда.

Соответственно, минимальные значения механической скорости (рис.1.4, точки 2, 5, 7) соответствуют случаю повторного нанесения ударов при совпадении лунок разрушения. В то же время максимумы функций механической скорости от величины частоты вращения (рис.1.4, точки 1, 3, 4, 6)

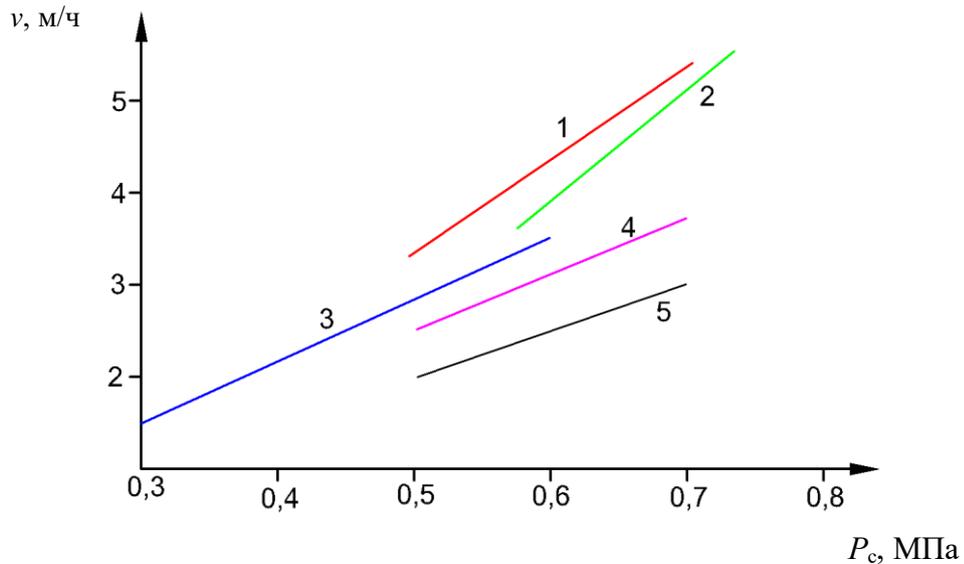


Рис.1.6. Зависимость механической скорости бурения от давления очистного агента в различных по категории буримости породах: 1 – VIII; 2 – IX; 3 – X; 4 – IX; 5 – X [13]

категории по буримости от VII до XI оптимальная величина частоты вращения изменилась от 50 мин^{-1} до 30 мин^{-1}).

Согласно экспериментальным данным [12], механическая скорость бурения пневмоударными забойными машинами растёт при увеличении давления используемого очистного агента с определённой интенсивностью (рис.1.6).

Интересны результаты экспериментального исследования зависимости энергоёмкости разрушения горных пород от величины энергии удара и статической нагрузки (рис.1.7). Установлено, что при малых

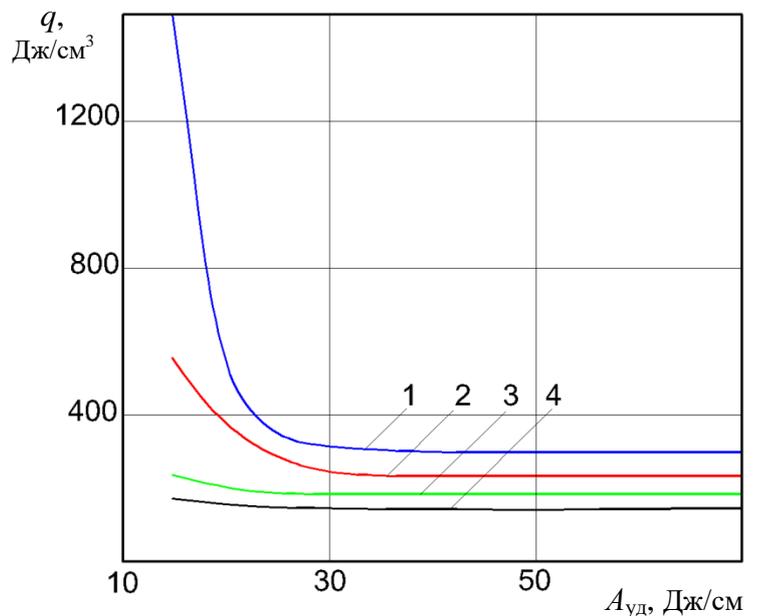


Рис. 1.7 Зависимости энергоёмкости разрушения q притуплённым клином от энергии удара $A_{уд}$ при различных значениях статической нагрузки: 1 – 0,1 кН/см; 2 – 1 кН/см; 3 – 3,3 кН/см; 6,7 кН/см [12]

значениях энергии удара (до 25 Дж/см) статическая осевая нагрузка способствует снижению энергоёмкости разрушения с определённой эффективностью, в то время как дальнейшее повышение энергии удара приводит к преобладающему влиянию на процесс разрушения динамической силы и влияние статической нагрузки становится несущественным.

Осевая нагрузка при ударно-вращательном бурении, предполагающем разрушение горных пород ударами высокой энергии, носит вспомогательный характер и обеспечивает постоянный контакт породоразрушающего инструмента с забоем скважины, в то время как, например, при вращательном бурении обеспечивает внедрение резцов в горную породу. Однако данный режимный параметр, безусловно, важен, так как очевидно, что при недостаточном осевом усилии в момент передачи ударного импульса произойдёт отскок долота, что

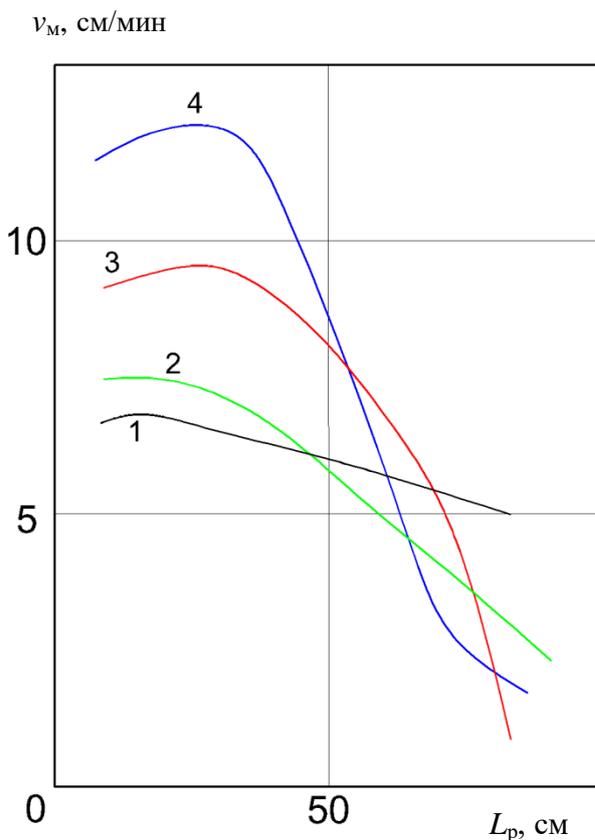


Рис.1.8. Зависимость скорости бурения от длины рейса при частоте вращения снаряда 40 мин^{-1} и различных осевых нагрузках: 1,2,3,4 – осевая нагрузка 5,10,15,20 кН соответственно

значительно снизит эффект от передачи ударного импульса на забой скважины. В то же время чрезмерно высокая осевая нагрузка приведёт к ситуации, когда резцы породоразрушающего инструмента будут находиться в постоянно заглубленном в породу положении, что не позволит обеспечить оптимальную схему поражения забоя скважины, а также приведёт к преждевременному выходу из строя породоразрушающих вставок.

Зависимость скорости ударно-вращательного бурения от осевой нагрузки и длины рейса была исследована в диапазоне 0 – 20 кН при

использовании породоразрушающего инструмента с радиальным расположением резцов. Результаты исследования, представленные на рис. 1.8, показывают, что с увеличением осевой нагрузки в начале рейса механическая скорость бурения возрастает, но в течение рейса снижается и тем интенсивнее, чем она выше. Эти данные могут быть свидетельством того обстоятельства, что чрезмерные осевые нагрузки при ударно-вращательном бурении приводят к более интенсивному разрушению породоразрушающих вставок.

Одним из ключевых параметров для оценки производительности процесса разрушения горных пород является энергоёмкость их разрушения. Исследованиями установлено [4, 54], что при разрушении горных пород ударом удельная энергоёмкость разрушения зависит от скорости приложения ударной нагрузки. График зависимости имеет параболический вид с одним экстремумом, что свидетельствует о том, что для каждого сочетания удельной энергии удара и физико-механических свойств горных пород будет индивидуальная величина оптимальной скорости приложения удара (рис.1.9).

Также с целью более полного исследования изменчивости удельной энергоёмкости разрушения горных пород было проведено исследование влияния удельной массы ударника (массы ударника, приходящейся на 1 см породоразрушающего лезвия), результаты которого представлены на рис.1.10. Полученные результаты позволили сформировать следующие основные выводы:

q , кгс·м/см

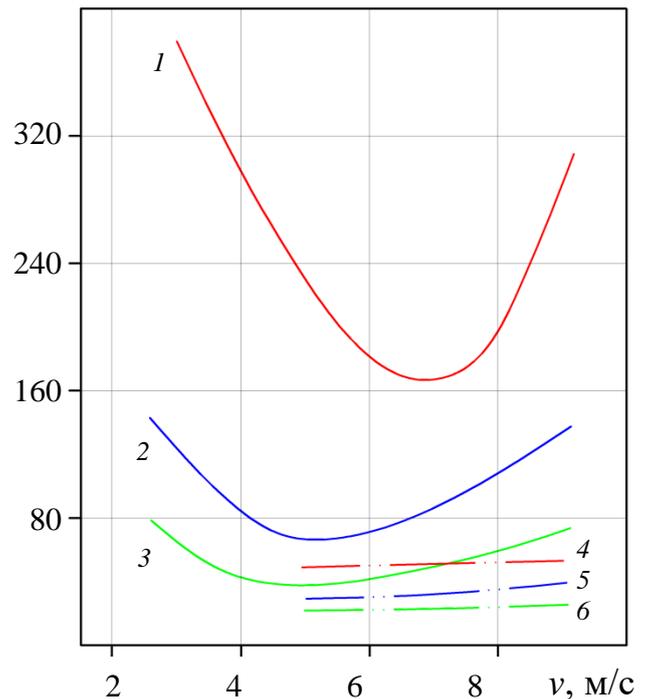


Рис.1.9. Зависимость удельной энергоёмкости разрушения породы притупленным лезвием от скорости удара: 1 – кварцит, $A_{уд}=2$ кгс·м/см; 2 – гранит, $A_{уд}=2$ кгс·м/см; 3 – мрамор, $A_{уд}=2$ кгс·м/см; 4 – кварцит, $A_{уд}=4$ кгс·м/см; 5 – гранит, $A_{уд}=4$ кгс·м/см; 6 – мрамор, $A_{уд}=4$ кгс·м/см

– кривые зависимости энергоёмкости разрушения горных пород от скорости воздействия ударниками, имеющими различную массу, имеют параболический вид с индивидуальным минимумом для каждой кривой. По мере уменьшения удельной массы ударника минимальные значения фиксировались при уменьшении оптимальной величины скорости удара и несколько росли по абсолютной величине, т.е. каждой массе ударника соответствует своя

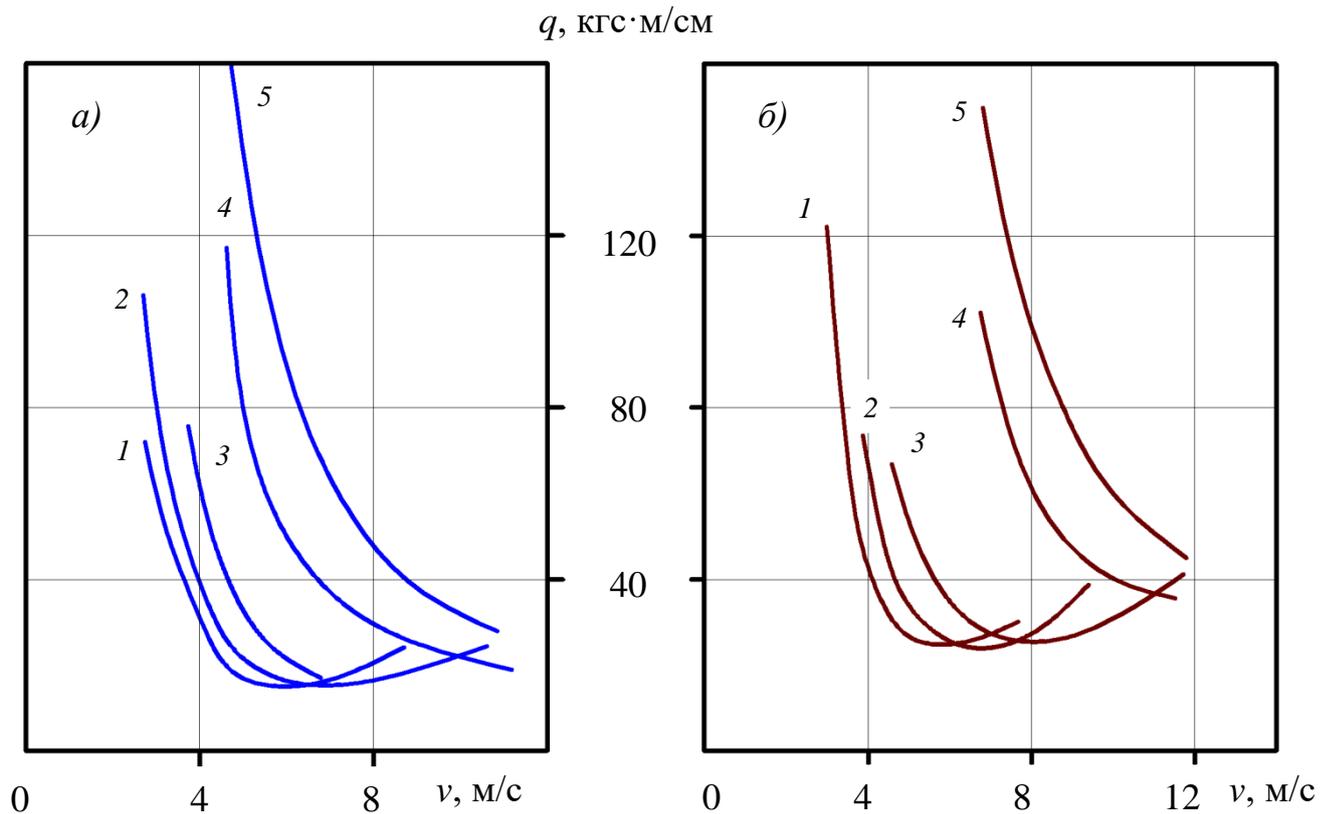


Рис.1.10. Зависимости удельной энергоёмкости разрушения мрамора (а) и гранита (б) от скорости удара при: 1 – $m_{уд}=0,443$; 2 – $m_{уд}=0,224$; 3 – $m_{уд}=0,164$; 4 – $m_{уд}=0,082$; 5 – оптимальная скорость соударения, при которой достигается максимальная эффективность разрушения;

– чем больше удельная масса ударника, тем меньше величина скорости соударения при неизменной энергоёмкости разрушения горных пород. Следовательно, при высоких скоростях соударения применение лёгких ударников может оказаться эффективнее применения тяжёлых.

1.3 Современное состояние техники и технологии ударно-вращательного бурения

Ударно-вращательный способ бурения скважин реализуется с помощью забойных ударных машин, приводимых в движение используемым при бурении очистным агентом – жидкостью, газо-жидкостной смесью или воздухом. При использовании в качестве очистного агента жидкости применяют гидроударные забойные машины, ГЖС и воздуха – пневмоударные. На сегодняшний день ввиду высокой производительности разрушения горных пород на забое скважины и большого ресурса применяемых технических средств в практике геологоразведочных работ всё чаще применяется ударно-вращательный способ бурения с применением пневмоударников.

В настоящее время существует множество технических средств для реализации пневмоударного способа бурения скважин, производимого как в России, так и за рубежом [17, 56–63]. Для осуществления пневмоударного бурения отечественными специалистами разработаны комплекты специальной техники пневмоударного бурения: РП – для разведки коренных месторождений и КНР – для разведки россыпей и бурения многолетнемерзлых пород [13]. На базе ОАО ТулНИГП разработаны пневмоударные буровые комплексы серии ПН диаметром 76, 93, 112, 132 мм. Область применения – сооружения скважин различного целевого назначения как с отбором керна, так и без. Диапазон изменения энергии ударного импульса – от 80 до 440 Дж. В СКБ «Геотехника» совместно с ИГД СО РАН разработаны кольцевые пневмоударники ПКР-130, ПКР-150, ПКР-190, с энергией единичного удара 150, 200, 300 Дж соответственно.

Зарубежные образцы забойных пневмоударных машин производятся такими компаниями, как:

- *Permon* (Чехия), серия *Permon VKP*;
- *Sandvik* (Швеция), серия *Mission*, серия *RH*, *Silverdrill SD*;
- *Atlas Copco* (Швеция), серия *Secoroc COP*, *Secoroc DHD*, *Secoroc RC*;



Рис.1.11. Пневмоударник компании *Atlas Copco Secoroc*

– *Rockmore International* (Австралия / США), серия *ROKS*;
 – пневмоударники компаний *Bolher* (Австрия), *Holman* (Великобритания) и др.

На сегодняшний день одним из наиболее технологичных и широко используемых технических средств для ударно–вращательного бурения являются погружные пневмоударные машины компании *Atlas Copco Secoroc* (рис.1.11),

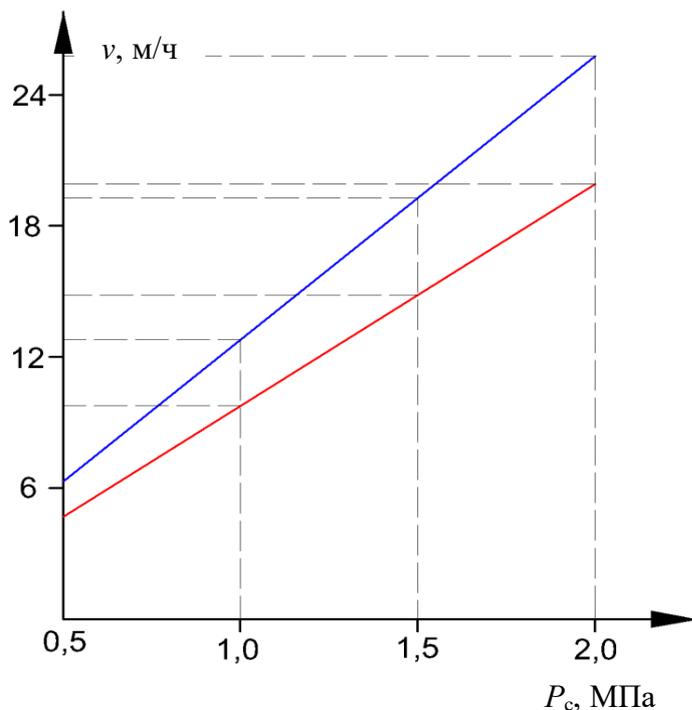


Рис. 1.12 Зависимость механической скорости бурения пневмоударниками высокого давления типа *COP* в граните (красный) и известняке (синий)

предлагая широкий диапазон пневмоударников, коронок и вспомогательного оборудования. Пневмоударники *Secoroc* предназначены для бурения скважин различного целевого назначения в горных породах любой категории по буримости.

В частности, компанией *Atlas Copco Secoroc* производятся эффективные пневмоударники бесклапанного типа высокого давления *COP 32*, *COP 42*, *COP 52*, *COP 62*, предназначенные для бурения скважин диаметрами от 85

до 165 мм, позволяющие достигать механическую скорость пород в 20 и более метров в час при бурении горных пород высокой твёрдости при рабочем давлении очистного агента 1,5 – 2,5 МПа и частоте ударов забойного механизма 1300 – 2000 ударов в минуту (рис.1.12). Забойные пневмоударные машины *COP 32* имеют рабочее давление воздуха 0,6–1,2 МПа и частоту 1300 – 1650 уд/мин, предназначены для бурения скважин диаметром от 85 до 100 мм. Соответственно пневмоударники *COP 42* работают при давлении от 0,6 до 2,5 МПа и частотой ударов 1300 – 2100 уд/мин и предназначены для бурения скважин диаметром 105 – 125 мм [12].

Пневмоударники *Atlas Copco Secoroc Cop*, предназначенные для бурения скважин диаметрами от 85 до 165 мм, позволяют в том числе работать по одним из самых прогрессивных технологий пневмоударного бурения – технологиям *OD*, *ODEX* и *DEPS*, оптимальной областью применения которых является проведение скважин в слабосвязных, трещиноватых, неустойчивых породах (в большинстве случаев к таковым относятся четвертичные отложения).

OD, *ODEX*, *DEPS* – системы ударно-вращательного бурения, разработанные компанией *Atlas Copco* для проходки валунно-галечниковых отложений с одновременным креплением ствола скважины обсадной колонной [12]:

– *OD (over drilling)* – система предполагает нанесение ударов погружной пневмоударной машиной и по обсадной колонне с закреплённым на её нижнем торце породоразрушающим башмаком, и по внутренней колонне.

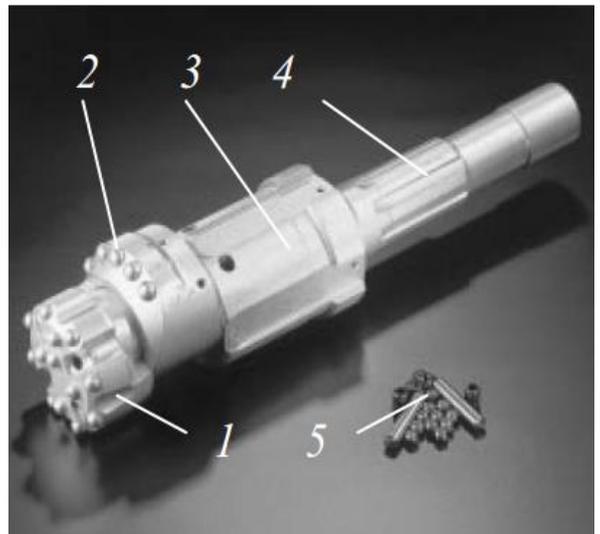


Рис. 1.13. Эксцентриковое долото: 1 – долото; 2 – расширитель; 3 – центратор; 4 – хвостовик долота; 5 – элементы поворота и фиксации расширителя

– *ODEX* (*over drilling excentrics*) – модификация системы *OD*, метод бурения с опережающим креплением ствола скважин. Предполагает использование специального эксцентричного долота (рис.1.13), позволяющего бурить расширенный ствол скважины, что освобождает обсадную колонну от необходимости разрушения горных пород на забое скважины и вращения, позволяет производить закрепление скважины обсадными трубами непосредственно в процессе бурения. Система эффективна при бурении осадочных горных пород, в том числе с включением крупных обломков, при бурении на россыпях и т.д.

Работа системы основана на принципе бурения погружными пневмоударными машинами с эксцентриковым расширителем, обеспечивающем формирование большего диаметра скважины по отношению к диаметру внешней обсадной колонны, что способствует снижению силы трения между ней и вмещающими горными породами, определяя практически беспрепятственное следование обсадной колонны за направляющим эксцентриковым долотом по мере бурения скважины. Обсадные трубы для работы с системой *ODEX* производят в двух исполнениях: свариваемые стальные обсадные трубы *ODEX W* (применяемые в случае если обсадные трубы после проведения работ не предполагается извлекать из скважины) и обсадные трубы с резьбовыми соединениями *ODEX T* (в случае если обсадные трубы необходимо извлечь после завершения работ по сооружению скважины).

Системообразующим элементом технологии *ODEX* является используемое эксцентриковое долото, позволяющее формировать забой скважины увеличенного диаметра для статического задавливания обсадной колонны без вращения. Эксцентриковый расширительный узел имеет два фиксированных положения:

- рабочее,
- транспортное.

Эксцентриковый расширительный узел приводится в рабочее положение (выходит за транспортные габариты долота, позволяя бурить скважину диаметром, достаточным для свободного прохождения обсадной колонны, двигающейся вслед за долотом под действием ударных импульсов, воспринимаемых от забойной пневмоударной машины) при правом вращении, а в транспортное (возвращается в исходное положение, не выступая за габариты долота) – при левом вращении (0,5 – 2 оборота). Компоновка для бурения по технологии *ODEX* приведена на рисунке 1.15. Для проведения процесса бурения с использованием системы *ODEX* требуются буровые установки с независимым

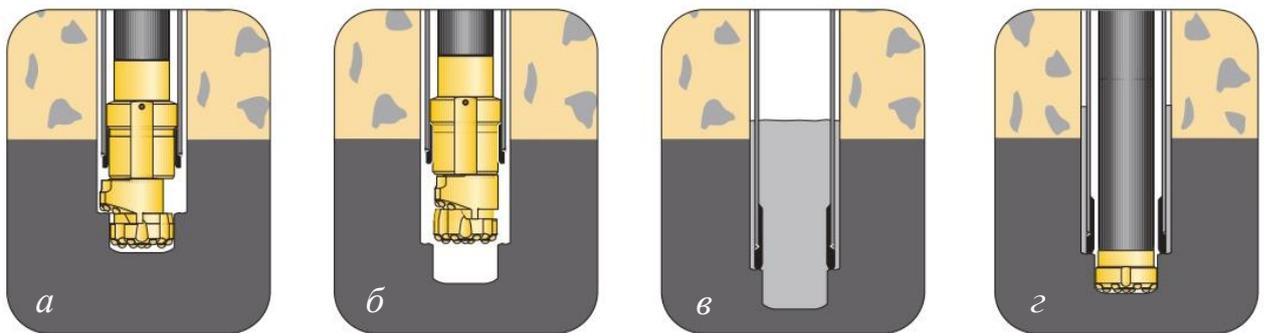


Рис.1.14. Схемы, поясняющие принцип бурения по технологии *ODEX*: *а* – бурение пневмоударником с расширением ствола скважины и одновременным проталкиванием обсадной колонны вслед за буровым инструментом; *б* – вращением влево эксцентриковый расширитель «закрывается», уменьшая внешний диаметр долота для последующего извлечения через обсадную колонну; *в* – цементирование (при необходимости) нижней части обсадной колонны; *г* – бурение в устойчивых породах любым другим инструментом, в том числе с промывкой скважины.

реверсивным вращением и с достаточным для соответствия диаметру скважины и требованиям, предъявляемым к мощности привода крутящим моментом (табл. 1.2). Минимально необходимые технические характеристики источника сжатого воздуха для оптимального использования системы – давление 14 бар, 150–200 л/с.

При достижении твёрдых устойчивых пород в процессе бурения скважины возможно цементирование призабойной зоны, и дальнейшее продолжение процесса бурения традиционным буровым инструментом с достижением проектной глубины (рисунок 1.14, *в*, *г*). При работе в сложных горно-

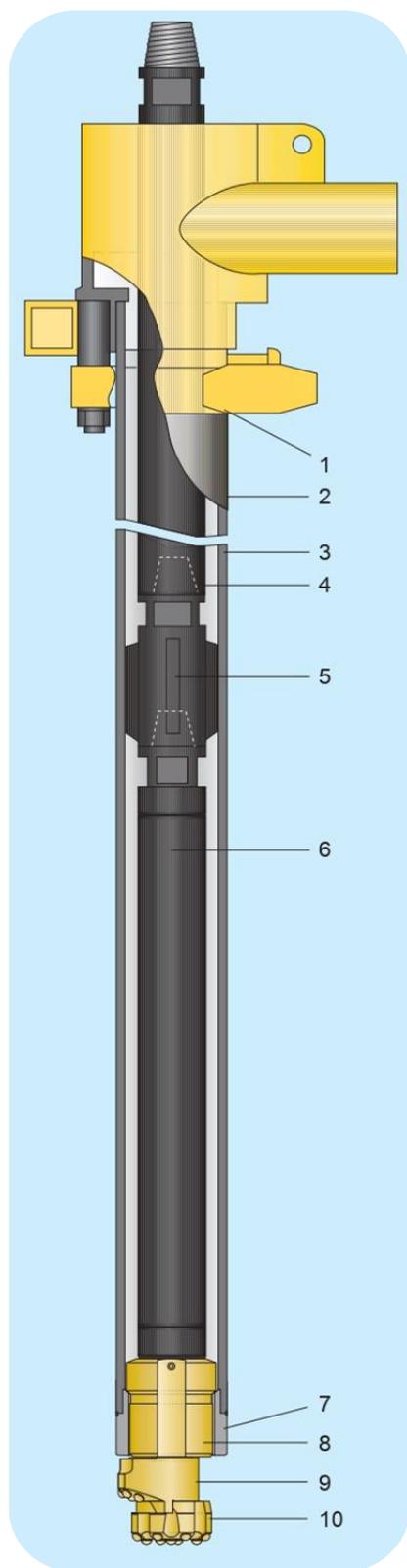


Рис.1.15. Компоненка для бурения по технологии *ODEX*: 1– превентор, 2– наружная труба, 3– обсадная труба, 4– бурильная труба, 5– центратор, 6– пневмоударник, 7– башмак, 8– центратор, 9– расширитель, 10 – долото

геологических условиях в применяемый в качестве очистного агента сжатый воздух вводят пенообразующие добавки и прочие полимеры для увеличения выносной способности.

Таблица 1.2 Характеристики буровых установок для работы с системой *ODEX*

Тип <i>ODEX</i>	90	115	140	165	190	240
Крутящий момент, кН·м	0,9	2	3	4	>5,5	>5,5
Частота вращения, об/мин	20–30	20–25	15–20	15–20	10–15	10–15
Диаметр бурения, мм	123	152	181	209	237	306,5
Внешний диаметр обсадных труб, мм	115	142	171	196	222	273
Внутренний диаметр обсадных труб, мм	102	128	157	183	205	260
Расчётная глубина бурения, м	60			80		

Аналогом системы *ODEX* от компании *Atlas Copco* является система *TUBEX* от компании *Sandvik*, имеющая схожие конструктивные особенности и технические характеристики.

– *DEPS* – также модификация системы *OD*, созданная в её развитие. В системе *DEPS* используется два независимых пневмоударника, по одному на обсадную и бурильную колонну. Данное техническое

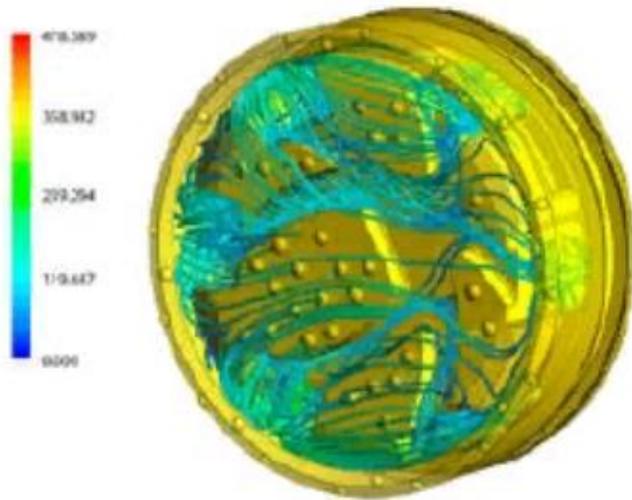


Рис.1.16. Моделирование потока сжатого воздуха под торцом долота *Elemex Atlas Copco*

решение позволяет до 2 раз увеличить ударную мощность системы, что положительно сказывается на производительности процесса разрушения горных пород на забое скважины.

В компоновке *Atlas Copco DEPS*, также как и *OD* и *ODEX* применяется двойная бурильная колонна, где внешняя колонна оснащена в торцевой части башмаком для бурения

периферийной части забоя скважины, а внутренняя – стандартным штыревым долотом, разрушающим центральную часть забоя.

В системе *DEPS* решена одна из главных проблем системы *OD* – недостаточность генерируемых одним забойным пневмударным механизмом ударных импульсов для разрушения горных пород как башмаком внешней, так и долотом внутренней колонн с высокой эффективностью. Недостаток минимизирован путём добавления второго, независимого забойного источника ударных импульсов (по одному генератору ударных импульсов на внутреннюю и внешнюю колонну), что позволило бурить более глубокие скважины с повышенной относительно системы *OD* производительностью.

При всех преимуществах представленных выше систем, в частности *ODEX*, как самой оптимальной и широко используемой в практике буровых работ, они имеют один значительный недостаток – это предельная глубина бурения, не превышающая сотни метров в самых благоприятных условиях применения.

Решение задачи проведения скважин в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах возможно с применением системы *Symmetrix*, позволяющей бурить скважины диаметром от 76 до 1220 мм и максимальной глубине 200 – 250 метров.

Также одной из передовых систем для бурения с одновременным обсаживанием стенок скважины является система *Elemex* от *Atlas Copco*. Данная система имеет модифицированный торец пилотного породоразрушающего инструмента со специальным образом расположенными продувочными каналами, позволяющими минимизировать воздействие сжатого воздуха, подаваемого на забой скважины с целью его очистки, повысить эффективность расходования воздуха. Потоки сжатого воздуха при выходе из тела долота направляются перпендикулярно оси скважины, что позволяет избежать излишних потерь воздуха, не участвующего в процессе выноса шлама, а только оказывающего дополнительное сопротивление разрушения горных пород на забое скважины (рис.1.16). Модернизированные каналы могут иметь разные конфигурации с целью оптимизации продувки забоя и параметров бурения в зависимости от размеров системы.

Одним из наиболее прогрессивных технико-технологических решений при пневмоударном бурении на данный момент является бурение с обратной циркуляцией очистного агента, воздуха или газо-жидкостной смеси – технология *RC (Reverse Circulation)*.

Преимущества применения обратной циркуляции:

- отсутствие заражения пробы бурового шлама – определяется отсутствием её контакта со стенками буримой скважины;
- стопроцентный сбор проб – обеспечивается конфигурацией применяемого снаряда и применяемого породоразрушающего инструмента;
- постоянство представительности отбираемых проб – обеспечивается с помощью отсутствия их заражения и 100% сбором;
- прямолинейность формируемого ствола скважины – значения искривления скважины минимальны ввиду реализуемого механизма разрушения горных пород, а также близости диаметра скважины и внешнего диаметра бурильной колонны;

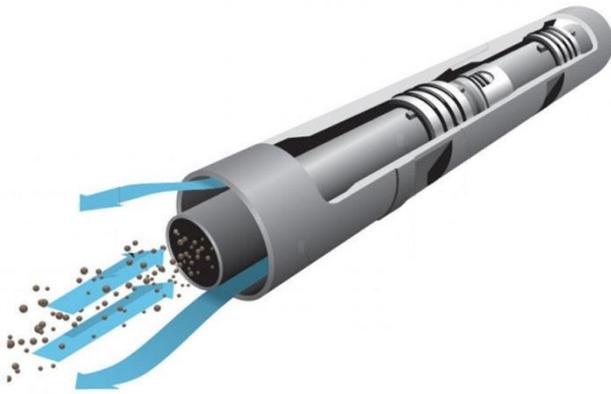


Рис.1.17. Схема, поясняющая процесс движения воздуха в двойной трубе при бурении по технологии *RC*

– постоянство циркуляции очистного агента – конструкция применяемого бурового снаряда обеспечивает циркуляцию воздуха и сбор пробы при бурении через пустоты, зоны трещиноватости, полости.

«При работе по технологии *RC* подача воздуха к забою осуществляется по межтрубному пространству, приводя в действие

пневмоударник и обеспечивая разрушение породы на забое. Затем буровой шлам по специальным продувочным каналам долота собирается под действием сжатого воздуха с периферийной части в центральную, попадая во внутреннюю трубу двустенной компоновки и транспортируется на поверхность (рис. 1.17). Разделение бурового шлама и воздуха производится в циклоне, в котором под действием центробежной силы буровой шлам оседает на стенки и выпадает через отверстие в нижней части циклона в сборные ёмкости. После – необходимый объём проб пакуется в мешки и маркируется. В случае если осуществляется отбор сухих проб – используется циклон, влажных проб – делитель, представляющий собой центрифугу с гидравлическим приводом».

1.4 Отклоняющие комплексы для ударно–вращательного бурения

На основании анализа литературных источников на предмет наличия информации о создании отклонителей, реализующих ударно–вращательный способ разрушения горных пород, составлена соответствующая классификация (табл. 1.3). В основу классификации положен механизм набора кривизны, который, как показывает анализ, определяет как конструктивное воплощение механизмов, так и их вероятную эффективность [64–65].

При применении гидроударных забойных машин отмечены следующие основные закономерности искривления скважин, которые используются при разработке неориентируемых технических средств управления направлением скважин [21]:

- скважины выполаживаются и выкручиваются примерно с одинаковой интенсивностью, мало изменяющейся с изменением глубины;
- при бурении твёрдых пород более вероятно выполаживание скважин;
- при бурении пород средних по твёрдости и мягких более вероятно выкручивание скважин;
- интенсивность азимутального искривления значительна и может составлять 1,3 – 2,8 град/10м;
- основные влияющие факторы на интенсивность и направление искривления: состав компоновки, соотношение размеров компоновки и скважины, состояние и степень износа шлицевой пары;
- влияние геологических факторов, как основных определяющих искривление скважин, не отмечено.

Таблица 1.3. Классификация отклонителей непрерывного действия ударно–вращательного способа бурения скважин

Реализуемый процесс набора кривизны		Схемы воплощения технических решений	Примеры использования технических решений
Ассиметричное разрушение забоя	Неориентируемый и нефиксированный перекус породоразрушающего инструмента на забое	И. Перекус компоновки с ударным забойным механизмом в наклонной скважине под действием веса компоновки. Возможно наличие одного (самоориентирование на выполаживание) или двух (самоориентирование на выкручивание) шарниров. Возможные разновидности схемы:	
		1. Вращение породоразрушающего инструмента с компоновкой буровой колонной приводом бурового станка.	Гидро- и пневмоударники при бурении с отбором или без отбора керна. В компоновке возможно наличие УБТ, 1 или 2 буровых шарниров
		2. Вращение породоразрушающего инструмента ударно–поворотным механизмом без вращения буровой колонны и компоновки.	Примеров практического использования нет

продолжение таблицы 1.3

Ориентируемый и фиксируемый перекоп ППР на забое	II. Перекоп забойной компоновки раскрепляющим механизмом механического или гидромеханического типов. Возможные разновидности схемы:	
	1. Вращение породоразрушающего инструмента с компоновкой бурильной колонной приводом бурового станка.	Отклонитель–гидроударник Карповского Э.Н. с механическим или гидромеханическим раскрепляющим устройством
	2. Вращение породоразрушающего инструмента ударно–поворотным механизмом без вращения бурильной колонны и компоновки.	Отклонители на базе гидроударника с ударно–поворотным механизмом. Конструкции разработаны Карповским Э.Н. и ВИТР.
Самоориентирующееся внецентренное приложение ударных импульсов к породоразрушающему инструменту	III. Внецентренное приложение ударных импульсов к породоразрушающему инструменту свободнодвижущимся ударником. Ударник выполнен со смещённым центром тяжести поперечного сечения и эксцентричным выступом на торце, последний установлен с возможностью установочного поворота относительно ударника. Возможные разновидности схемы:	
	1. Вращение породоразрушающего инструмента с компоновкой бурильной колонной приводом бурового станка.	Отклонитель–пневмоударник, разработанный в Иркутском политехническом ун-те и ПГО «Сосновгеология».
	2. Вращение породоразрушающего инструмента ударно–поворотным механизмом без вращения бурильной колонны и компоновки.	Примеров практического использования нет

Для увеличения зенитного угла возможно применение компоновки с гидроударником, короткой колонковой трубой и УБТ над гидроударником[21]. Результаты производственного испытания подобной компоновки показали, что выполаживание скважин достигается в 81,2% случаев, а интенсивность искривления возрастает по мере увеличения зенитного угла и максимальна при зенитном угле 25–30 град. Анализ результатов изменения азимутального угла показал, что с уменьшением азимута со средней интенсивностью 1,01 град/10м бурится 35% объёма, с увеличением со средней интенсивностью 1,12 град/10м –

54% объёма, а без изменения азимутального угла – 11% от общего объёма бурения.

При применении пневмоударников рядом авторов также отмечены вполне определённые закономерности искривления, которые позволяют использовать данные технические средства для управления направлением скважин. По данным исследования [66] при бурении пневмоударниками П-105 скважины выкручиваются с интенсивностью 10 град/100м. Установка центризатора между пневмоударником и УБТ диаметром 104,5 миллиметра позволила выположить или стабилизировать направление скважины. В работах [4, 54] отмечены следующие закономерности искривления скважин при бурении пневмоударниками с отбором керна:

- отмечается искривление наклонных скважин в сторону выкручивания, что определяется переломом колонковой трубы с пневмоударником, где имеется люфт, в направлении уменьшения зенитного угла;

- интенсивность искривления зависит от длины колонковой трубы и диаметров опорных выступов;

- большое влияние на интенсивность искривления скважин оказывают физико-механические свойства и структурные особенности залегания горных пород;

- на сохранение заданного направления скважины оказывают решающее влияние низкие осевые нагрузки и частоты вращения бурильной колонны, а также центрирующие элементы на переходниках пневмоударника.

Таким образом, отмечено, что искривление скважин при использовании пневмоударников подчиняется закону асимметричного разрушения забоя.

Шкурко А.К. отмечена меньшая склонность к искривлению скважин, буримых забойными ударными машинами [67]. При этом приводится, что по зенитному углу искривление меньше в 1,5–3, а по азимутальному в 1,5–2 раза. Причиной этого автор называет пониженные режимы бурения, лучшие условия центрирования и значительно меньшее влияние физико-механических свойств горных пород на скорость их разрушения, благодаря чему зависимость

интенсивности искривления скважин от горно–геологических факторов выражается менее явно.

Несколько иные результаты получены в ПГО «Сосновгеология» при значительном объёме направленного бурения различными методами и техническими средствами.

При проходке горных пород верхнего интервала месторождений Забайкалья (0–400 метров) на одном из участков работ, разрез которого представлен фельзитами, андезито–базальтами и трахидацитами VIII – IX категорий по буримости, при бурении шарошечными долотами, алмазными и твердосплавными коронками наблюдалось стабильное выкручивание скважин со средней интенсивностью 3 град/100м и с отклонением влево по азимуту с интенсивностью 2–8 град/100м. Данное обстоятельство значительно затрудняло проходку скважин по заданным траекториям. При внедрении пневмоударного способа бурения верхних слоёв геологического разреза с использованием в качестве очистного агента газожидкостной смеси было отмечено:

- при бурении пневмоударниками П–105К без керна с установкой над ним УБТ-89 скважина бурится или без изменения зенитного угла или выполаживается со средней интенсивностью 1,25 град/100 метров;

- при бурении П–105К с установкой над ним бурильных труб СБТМ–50 скважины выполаживаются с большей интенсивностью (средняя интенсивность набора зенитного угла составила 8,8 град/100м);

- во всех случаях, независимо от типа компоновки, происходило изменение азимутального угла вправо со средней интенсивностью 7 градусов на 100 метров. В результате появилась возможность в интервале работы пневмоударника (20–120 метров) производить упреждающий набор зенитного угла до 24–28 градусов с одновременным отклонением скважин вправо. При последующем переходе на вращательное бурение, при котором происходит выкручивание скважин с отклонением влево, удавалось подсекать рудную залежь в заданной точке, практически исключив искусственное искривление. Использование пневмоударника в качестве отклонителей позволило уменьшить число постановок

отклонителей на несколько десятков и не только сохранить производительность буровых работ на высоком уровне, но и повысить её и снизить стоимость метра бурения скважины. Особенностью искривления скважин при бурении пневмоударниками является наличие резких локальных искривлений стволов и их сужений, что отмечалось при спусках обсадных и бурильных колонн. Другая особенность закономерностей искривления скважин при бурении пневмоударниками на месторождении состоит в том, что в случае применения ГЖС скважины чаще искривляются с увеличением азимутального угла, а при бурении с применением в качестве очистного агента воздуха – с уменьшением азимутального угла. На основании этих результатов разработан способ управления азимутальным направлением скважин, в основе которого лежит смена очистных агентов [68–69].

Результаты опытного бурения и соответствующие аналитические исследования позволяют сформировать канву закономерностей искривления скважин при использовании пневмоударников в зависимости от применяемого очистного агента. В случае использования воздуха в качестве очистного агента компоновка накатывается на правую стенку скважины на угол φ_0 (рис. 1.18 б), что обуславливает её перекося на угол γ и приводит к уменьшению азимутального угла и выполаживанию (рис. 1.18 з). В свою очередь, при применении в качестве очистного агента ГЖС – сила трения пары буровая компоновка – стенки скважины снижается. Это приводит к случаю вращения компоновки в направлении, задаваемом буровым станком и соответствующем её накатыванию на левую стенку скважины (рис. 1.18 в). Поскольку пневмоударное бурение предполагает малые величины частоты вращения снаряда, центробежные силы малы и компоновка не совершает полного оборота вокруг оси скважины и возвращается в свою нижнюю точку (рис. 1.18 д). Результатом описанной схемы движения компоновки является выполаживание скважины с увеличением азимутального угла. Схема движения компоновки, близкая к описанной выше, предлагается К.Н. Абдильдиновым, получившим зависимости для расчёта координат траектории движения центра масс механической системы,

соответствующей буровому снаряду с шарниром [21]. Основные положения данных исследований состоят в следующем:

- частота вращения определяет величину угла накатывания компоновки на стенку скважины, при этом при малых частотах вращения верхний конец компоновки преимущественно прижат к правой стенке скважины с перекосом в сторону уменьшения азимутального угла, а при значительных частотах вращения компоновка вращается вокруг оси скважины в направлении, противоположном ходу часовой стрелки;

- после набора максимального угла компоновка падает под действием собственного веса по траектории, близкой к параболе, затем цикл повторяется.

Анализ производственных данных и аналитические исследования

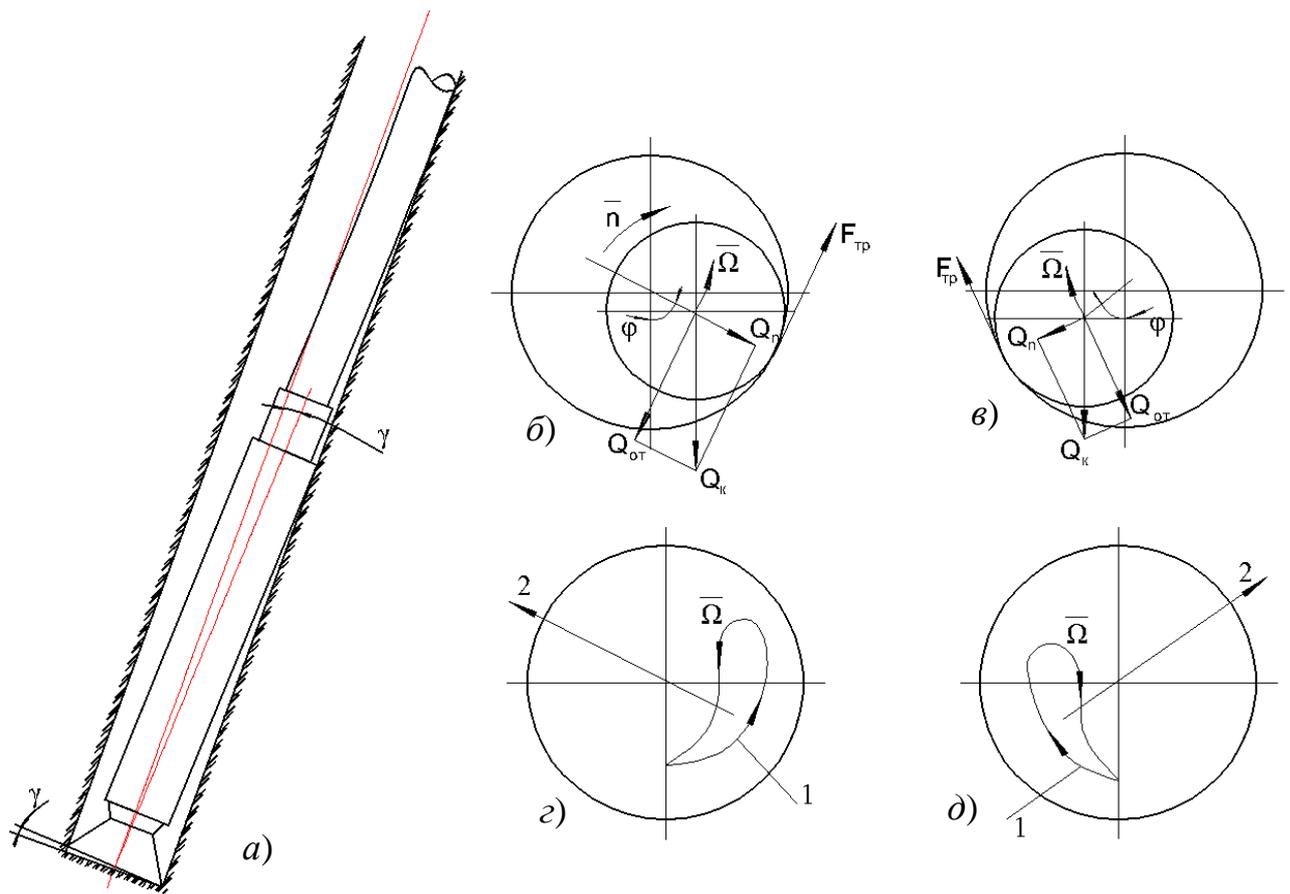


Рис.1.18 Схемы к анализу механизма работы компоновки с пневмоударником в наклонной скважине: а) – положение компоновки в скважине; б), в), з), д) – соответственно положения компоновки при накатывании на правую и левую стенки скважины и соответствующие этим видам движений траектории центров сечения компоновок 1 и направления набора кривизны 2

позволяют утверждать, что при работе пневмоударника реализуется механизм искривления скважин, который можно характеризовать как асимметричное разрушение забоя. Полученные значения интенсивности искривления, согласно производственным данным, удовлетворительно аппроксимируются зависимостью

$$i_{\Pi} = \frac{57,3 \cdot (D_{\text{скв}} - d_{\text{к}})}{l_{\Pi}^2 \cdot K_0} \cdot \cos \frac{\varphi_0}{2}$$

где $D_{\text{скв}}$, $d_{\text{к}}$ – соответственно диаметры скважины и корпуса пневмоударника, м; l_{Π} – длина нижней части компоновки с пневмоударником, получившей перекося в скважине, м; K_0 – отношение частоты вращения, задаваемой буровым станком (ω), к частоте Ω – обращения компоновки по траектории I (рис.1.18 ε , δ); φ_0 – угол накатывания компоновки на стенку скважины, град.

Коэффициент K_0 , согласно экспериментальным данным Г.А. Воробьёва, Б.А. Новожилова и др. (МГРИ), составляет $2 \div 6$.

Проведённые в ПГО «Сосновгеология» исследования показывают, что управлять кривизной и направлением разведочных скважин возможно, изменяя два параметра: угол перекося забоя γ и угол накатывания φ . Первый из них изменяется введением в компоновку центраторов различного диаметра, использованием УБТ и различных типов бурильных труб. Вторым параметром можно изменять следующими технико-технологическими мероприятиями:

- периодической заменой очистных агентов – воздуха и газо-жидкостной смеси, что существенно меняет коэффициент трения в скважине (от 0,7 до 0,18 согласно соответствующим лабораторным исследованиям);
- добавками в газо-жидкостную смесь веществ, понижающих коэффициент трения – графита, сульфида молибдена;
- изменением параметров газо-жидкостной смеси варьированием концентрации и типами пенообразующих веществ;
- использованием центраторов, жёстко закреплённых в компоновке с рифлёной поверхностью или покрытой абразивным материалом (для увеличения угла накатывания), и подвижного центратора на подшипнике (для создания

условий обращения в направлении вращения колонны или набора кривизны строго на выполаживание) – по опыту специалистов ТПИ с компоновками для вращательного бурения.

Следует отметить, что методика управления направлением скважин с применением серийных пневмоударников не позволяет получать гарантированного результата, т.к. включает значительное число влияющих, изменчивых и часто мало предсказуемых по своему действию факторов. Кроме того, как показывает практика применения указанной методики, существенное, а в ряде случаев решающее значение на направление скважин при бурении пневмоударниками оказывают геологические условия залегания горных пород и их анизотропность. Так, например, попытки внедрения методики управления направлением скважин с помощью пневмоударников оказались не особенно успешными – скважины при пересечении крутопадающих слоёв горных пород интенсивно выкручивались, что потребовало уже иных подходов к выбору рациональной технологии направленного бурения.

Конструкции отклонителей на базе гидроударников разрабатывались Э.Н. Карповским [21]. Ориентированный перекокс гидроударника с колонковой трубой в конструкциях Э.Н. Карповского обеспечивается выдвижным ползуном под действием давления промывочной жидкости. Этим специалистом предлагались конструкции гидроударников–отклонителей как с ударно–поворотным механизмом, так и без него. В дальнейшем работы по созданию более совершенных механических средств искривления скважин на базе гидроударников велись в ВИТР.

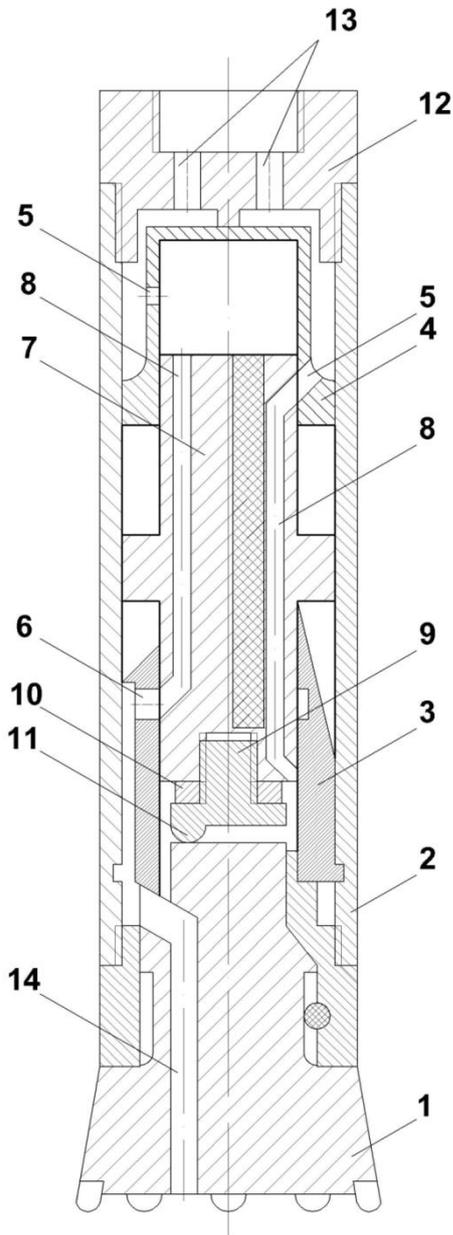
Иркутским политехническим университетом совместно с ПГО «Сосновгеология» велись работы по созданию пневмоударника-отклонителя, который позволит с высокой точностью и производительностью управлять направлением скважин [70]. «Данный забойный ударный механизм обеспечивает набор кривизны за счёт приложения к породоразрушающему инструменту внецентренных ударных импульсов. Сущность способа изменения направления скважины состоит в том, что внецентренное точечное приложение ударов со

стороны ударника по породоразрушающему инструменту обеспечивает неравномерное разрушение забоя. Неравномерность разрушения забоя, а именно различная глубина внедрения породоразрушающих вставок в породу создают угол перекоса забоя скважины, что и определяет направление искривления. Таким образом, способ направленного бурения приложением внецентренных ударных импульсов состоит в том, что для набора кривизны определённого направления удары следует наносить по породоразрушающему инструменту со стороны, противоположной направлению искривления. На породоразрушающий инструмент при этом передаётся опрокидывающий момент, равный произведению силы удара на расстояние от оси инструмента до точки приложения удара».

На рис. 1.19 дана схема описанной выше забойной ударной машины, предназначенной для управления направлением и кривизной скважины посредством приложения внецентренных ударных импульсов к породоразрушающему инструменту. Конструктивные элементы забойной ударной машины приведены на рисунке 1.19.

Конструкция, ввиду принципа работы пневмоударника, оснащена ударником, способным свободно перемещаться в вертикальной плоскости, при этом он выполнен со смещённым центром тяжести, что позволяет ему самоориентироваться в наклонных скважинах. Для нанесения ударов с эксцентриситетом на нижнем торце ударника с помощью резьбового соединения закреплена пята с эксцентричным выступом относительно оси конструкции. Для возможности изменения положения пяты относительно ударника и её закрепления в необходимом положении конструкция оснащена контргайкой.

Ориентация пяты с эксцентричным выступом производится по следующему принципу. Для формирования траектории искривления скважины с использованием внецентренных ударных импульсов необходимо обеспечить их нанесение с противоположной относительно оси скважины стороны. Соответственно, имея ударник со смещённым центром тяжести и зная, какое положение в наклонной скважине он занимает, пята на нём ориентируется таким



Фиг. 1

образом, чтобы между проектным направлением искривления скважины и положением эксцентричного выступа на пяте угол составлял 180^0 . Также, для корректного выполнения задачи по искривлению скважины необходимо обеспечить определённую величину интенсивности искривления. В представленной конструкции данный функционал реализован с помощью изменения величины эксцентриситета расположения выступа на пяте путём её замены.

Искривление скважины с помощью приведённой конструкции обеспечивается за счёт неравномерности разрушения забоя скважины.

Рис.1.19. Схема забойной ударной машины для управления направлением и кривизной скважин

- 1 – породоразрушающий инструмент;
- 2 – корпус;
- 3 – нижняя гильза;
- 4 – верхняя гильза;
- 5 – отверстия в гильзе 4;
- 6 – отверстия в гильзе – 3;
- 7 – ударник;
- 8 – каналы ударника;
- 9 – пята;
- 10 – контргайка;
- 11 – выступ;
- 12 – переходник;
- 13 – каналы переходника;
- 14 – канал породоразрушающего инструмента.

Напряжения в горной породе под породоразрушающими элементами, возникающие вследствие нанесения внецентренного удара, неравны ввиду разной их удалённости от точки приложения удара и обратно пропорциональны данному расстоянию.

Также к техническим средствам управления направлением скважин с генерированием ударных импульсов можно отнести управляемые пневмопробойники, применяемые для прокладки инженерных коммуникаций в горных породах с низкими прочностными показателями. В частности, конструкция управляемого пневмопробойника, позволяющего управлять траекторией прокладываемых скважин по команде оператора, что исключает влияние стихийных факторов, определяющих случайное отклонение устройства от заданной траектории.

Чешиным Д.О. обоснована принципиальная перспективность управляющего воздействия на пневмопробойник путём отклонения его хвостовой части, а также разработана конструктивная схема механизма управления траекторией пневмопробойника, защищённая патентом РФ ПМ № 156648 (рис. 1.20) [71]. Проведением теоретических и экспериментальных исследований установлены основные конструктивные зависимости. Прототип управляемого пневмопробойника разработан и испытан в лабораторных и естественных условиях.

«Механизм (рис. 1.20) представляет собой заднюю отклоняющуюся часть 4, которая шарнирно соединена с задней гайкой 1 пневмопробойника 8 посредством

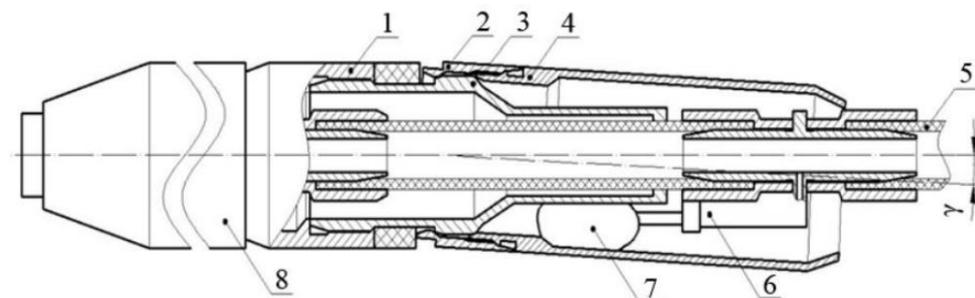


Рис.1.20. Схема механизма управления траекторией пневмопробойника (при отклонённой задней части) [71]

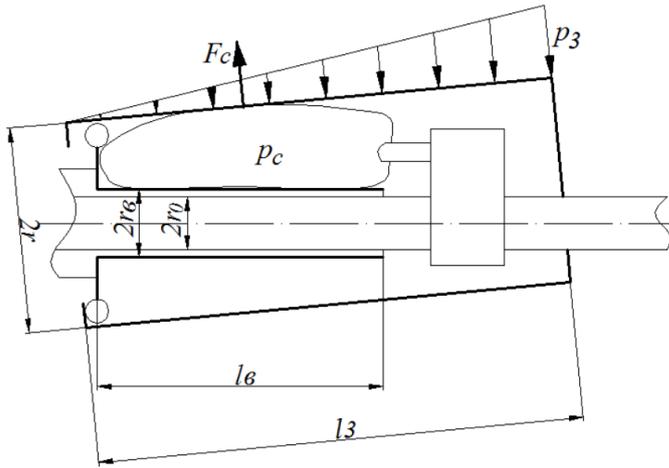


Рис.1.21. Схема работы механизма отклонения управляемого пневмопробойника [71]

гайки 2 и втулки 3. Отклоняющее усилие создаёт вмонтированная в устройство эластичная камера 7, управляемая с помощью механизма управления 6. Путём поворота механизма 7 с помощью воздухоподводящего рукава 5 возможно производить выбор необходимого направления отклонения трассы проводимой

скважины. Регулирование интенсивности набора кривизны производится путем изменения усилия воздействия хвостовой части пневмопробойника на вмещающие горные породы и как следствие изменение угла его отклонения γ .

Согласно представленной схеме работы механизма отклонения управляемого пневмопробойника (рис.1.21), увеличение давления p_c в эластичной камере ведёт к увеличению усилия F_c , действующего со стороны эластичной камеры на хвостовую отклоняющуюся часть механизма в радиальном направлении. При отклонении хвостовой части на некоторый угол γ под действием силы F_c , создаётся усилие, действующее на стенку скважины со стороны механизма, вызывая соответствующую реакцию породы p_3 .

Согласно проведённым исследованиям [71], зависимость для расчёта угла отклонения задней части пневмопробойника имеет вид:

$$\gamma = \arctg \left(\frac{3p_c \cdot r_b \cdot l_b^2 \cdot a_0}{2r \cdot l_3^3} \cdot \sqrt{3 \frac{p_c \cdot l_b^2 \cdot r_b}{\pi \cdot l_3 \cdot p_{стр}}} \right),$$

где p_c – сетевое давление в эластичной камере, Па; r_b – внешний радиус опорной втулки, м; l_b – длина опорной втулки, м; r – внешний радиус отклоняемой задней части, м; l_3 – длина отклоняемой задней части, м; $p_{стр}$ – структурная прочность грунта, Па; a_0 – коэффициент сжимаемости грунта, 1/Па.

По завершении корректировки направления проведения скважины, давление в эластичной камере сбрасывается, вследствие чего отклоненная задняя часть переходит в свободное положение и следует за корпусом пневмопробойника. Таким образом, задача управления направлением проведения скважин с применением пневмопробойников с сохранением удельной ударной мощности может быть решена применением устройства, корпус которого состоит из двух частей, имеющих одинаковый диаметр и соединённых шарнирно, где передняя часть является управляемой, а задняя – управляющей.

1.5 Методы повышения производительности процесса ударно– вращательного бурения

На сегодняшний день существует несколько направлений модернизации забойных ударных машин с целью повышения их производительности без дополнительных энергозатрат [72–75]:

- минимизация потерь энергии соударения при преобразовании энергии ударного импульса в энергию разрушения горных пород на забое скважины;
- совершенствование схемы воздухораспределения в забойной ударной машине и анализ её рабочего цикла;
- совершенствование геометрических параметров породоразрушающего инструмента по критерию снижения энергоёмкости разрушения горных пород.

Главным инструментом повышения производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин является увеличение затрат энергии на бурение скважины, что безусловно не является эффективной мерой воздействия на процесс, так как требует значительных дополнительных затрат материальных ресурсов.

Определяющим параметром режима бурения при приложении высокочастотных ударных импульсов малой, средней и высокой энергии является величина давления циркулирующего через забойную ударную машину очистного агента – воздуха, воды или газо-жидкостной смеси. В результате повышения

давления в системе увеличивается энергия удара по породоразрушающему инструменту, вследствие чего наблюдается рост скорости бурения. Но, данный способ не является производительным, к тому же возможности увеличения давления очистного агента ограничены уровнем известного на данный момент нагнетательного оборудования и его техническими характеристиками. Принимая во внимание данное обстоятельство, крайне важен поиск методов повышения «эффективной» производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин без увеличения затрат энергии на разрушение горных пород на забое скважин.

Одним из таковых является «способ бурения скважин, заключающийся во вращении бурового инструмента с частотой ω , передаче от бурового инструмента на забой скважины осевого усилия и внецентренных ударных импульсов, генерируемых забойной ударной машиной с частотой n , при том, что внецентренные ударные импульсы от бурового инструмента передаются равномерно по периметру забоя буримой скважины, а соотношение n/ω обеспечивается равным не менее 2» (рис. 1.22) [76]. Бурение с применением забойной ударной машины осуществляется под действием передаваемого на буровой инструмент осевого усилия $P_{ос}$ и крутящего момента $M_{кр}$ для вращения бурового снаряда, а так же за счет энергии ударного импульса Q . При центральном приложении удара ударник 1 забойной машины наносит центральный удар (эксцентриситет E приложения ударного импульса равен нулю) по верхнему торцу породоразрушающего инструмента 2. В результате нанесения центрального удара породоразрушающие элементы 3 внедряются в породу на равную глубину h , осуществляя углубку и формируя забой скважины, а при нанесении удара с некоторым эксцентриситетом породоразрушающие элементы внедряются в забой скважины на различную глубину, формируя тем самым некоторый угол перекоса забоя скважины.

При этом технический результат при использовании данного способа достигается тем, что «наряду с вращением бурового инструмента и созданием осевого усилия на инструмент внецентренные ударные импульсы передаются

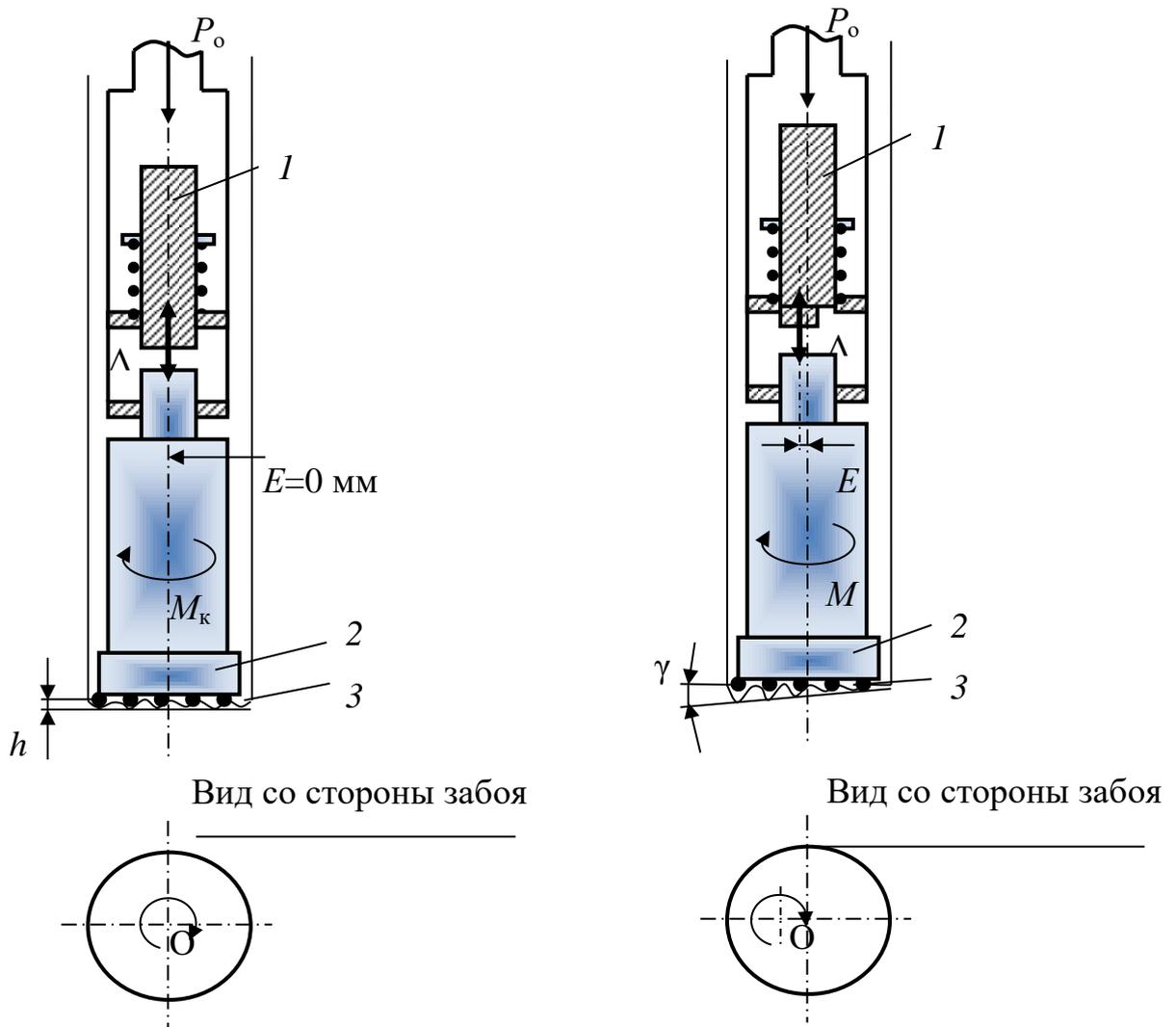


Рис.1.22. Способ бурения горных пород с помощью забойной ударной машины с реализацией центральных и внецентренных ударных импульсов со стороны ударника по породоразрушающему инструменту и схемы забоя скважин [76]

буровому инструменту в процессе его вращения равномерно по периметру забоя скважины, то есть удары наносятся по верхнему торцу инструмента в одной плоскости, но при вращении буровой колонны и породоразрушающего инструмента, передаются на забой скважины равномерно по периметру забоя (рис. 1.22). При этом для исключения искривления скважины предполагается нанесение внецентренных ударов равномерно по периметру забоя, что может быть обеспечено только в том случае, если соотношение частоты ударов по забою n и частоты вращения инструмента ω будет равно или более 2. Только при соотношении $n/\omega \geq 2$ могут быть нанесены два диаметрально противоположных внецентренных удара, компенсирующих перекося забоя скважины».

При этом увеличение производительности процесса бурения происходит за счет изменения механизма разрушения горных пород, что приводит к росту объема разрушенной горной породы, что способно обеспечить скорость бурения скважины без повышения энергии удара, т.е. без повышения затрат мощности на разрушение горной породы [76].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Проведённый анализ современного состояния техники и технологии ударно-вращательного бурения скважин в России и за рубежом позволил сформировать следующие основные выводы:

1. Ударно-вращательный способ бурения скважин – один из наиболее высокопроизводительных способов бурения в горных породах высокой твёрдости, объём производственного применения и темпы роста которого ограничены предельно возможной глубиной бурения.

2. Определяющими параметрами производительности процесса ударно-вращательного бурения являются:

- величина энергии удара забойного механизма;
- частота вращения породоразрушающего инструмента, определяющая оптимальность схемы поражения забоя скважины;
- осевая нагрузка на инструмент как критерий оптимальной передачи ударных импульсов;
- давление и расход очистного агента – определяющие основные энергетические характеристики процесса разрушения горных пород на забое скважины и их транспортировку на земную поверхность.

3. Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения скважин реализуется главным образом за счёт соосного центрального удара высокой энергии и чувствительно к параметру энергоёмкости разрушения горных пород, зависящему от формы инденторов, формирующих вооружения породоразрушающего инструмента и скорости его воздействия на горную породу.

4. На данный момент направления совершенствования техники и технологии ударно-вращательного способа бурения скважин по критерию повышения производительности заключаются в изменении конструкции забойного механизма и породоразрушающего инструмента без изменения механизма разрушения горных пород.

5. Управление направлением скважин с помощью технологических приёмов не является надёжной мерой воздействия ввиду большого количества влияющих факторов, зачастую трудно идентифицируемых, ввиду чего вопрос создания специального отклоняющего комплекса, применимого при ударно-вращательном бурении без снижения производительности процесса является актуальным.

Таким образом, на основании проведённого анализа литературных источников становится ясно, что обозначенная цель диссертационной работы, а именно научное обоснование конструкций породоразрушающего инструмента для повышения производительности процесса бурения скважин и конструкции забойного отклоняющего комплекса для управления направлением скважин в условиях ударно-вращательного способа бурения скважин является актуальной ввиду:

– необходимости поиска путей эффективного повышения производительности процесса ударно вращательного бурения скважин без увеличения затрат энергии на процесс;

– отсутствия специальных технических и технологических решений по проведению скважин ударно-вращательным способом с управляемым изменением их траектории без снижения механической скорости бурения и с достаточной точностью.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВНЕЦЕНТРЕННЫМИ УДАРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами

Применение внецентренной ударной нагрузки для разрушения горных пород при ударно-вращательном способе бурения с применением пневмоударников – один из новых нетривиальных способов увеличения производительности процесса без увеличения давления очистного агента, главным образом определяющего эффективность разрушения горных пород на забое через энергию и частоту наносимых ударных импульсов по забою скважины.

Внецентренный ударный импульс – ударный импульс, сообщённый при смещении точки приложения ударной нагрузки от соосного положения на некоторое расстояние. Повышение эффективности разрушения горных пород через нанесение ударных импульсов с эксцентриситетом является следствием неравенства осевых и тангенциальных напряжений, формируемых на отдельных породоразрушающих вставках. Данная модель приводит к тому, что тангенциальные сдвиговые усилия, являвшиеся в случае центрального удара равными и компенсировавшие друг друга, в совокупности формируют общий вектор тангенциального сдвигового усилия, направленного перпендикулярно оси инструмента и действующего в плоскости забоя скважины. Факт наличия указанного вектора предопределяет изменение механизма разрушения горных пород и оказывает влияние на объём разрушения горных пород. Также, расширяется оптимальная область применения ударно-вращательного способа бурения скважин, становясь актуальной для разрушения достаточно пластичных горных пород, где суммарная тангенциальная нагрузка реализуется наиболее

эффективно, обеспечивая резание-скалывание пород наряду с традиционным для ударно-вращательного способа бурения смятия-дробления [77–85].

Схема, описывающая механизм разрушения горных пород центральным и

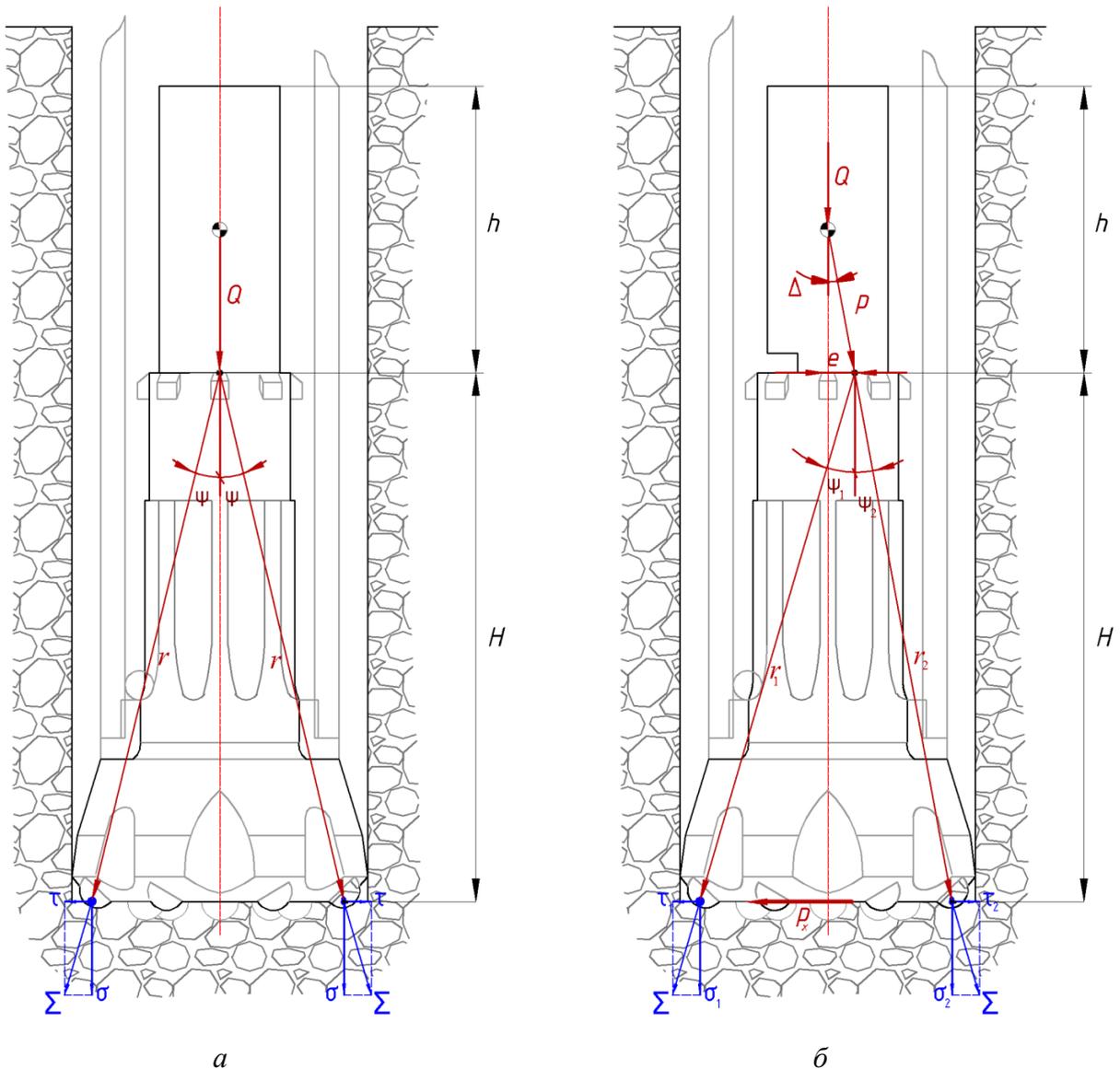


Рис. 2.1. Схема передачи ударных импульсов и создания напряжений под породоразрушающими вставками при точечном ударе: Q – вес ударника, Н; P – сила удара, Н; E – эксцентриситет приложения удара, м; Δ – угол между осью инструмента и направлением ударного импульса, передаваемого от ударника к породоразрушающему инструменту, градус; h – высота ударника, м; ψ – угол между осью инструмента и направлением движения ударного импульса от точки его приложения к породоразрушающему инструменту к вершине породоразрушающей вставки, градус; r – расстояние от точки приложения ударного импульса к породоразрушающему инструменту до вершины породоразрушающей вставки, м; H – высота породоразрушающего инструмента, м; P_x – суммарная составляющая тангенциального сдвигового усилия, Н; σ – нормальные напряжения, Па; τ – касательные напряжения, Па; Σ – суммарные напряжения, Па.

внецентренным ударным импульсом при использовании ударно-вращательного способа бурения представлена на рис. 2.1. В случае если горные породы разрушаются центральным ударом, в горной породе на контакте с породоразрушающими элементами возникают нормальные σ и тангенциальные сдвиговые τ напряжения, причём учитывая симметричность удара, тангенциальные напряжения компенсируют друг друга не оказывая влияния на объём разрушения (рис. 2.1 а).

При некотором смещении точки приложения ударного импульса, как показано на рис. 2.1 б, напряжения в горной породе распределяются неравномерно, что приводит к неравенству как нормальных, перпендикулярных к плоскости забоя напряжений, так и тангенциальных сдвиговых, вследствие разной удалённости породоразрушающих вставок от точки приложения удара. Это приводит к формированию результирующего тангенциального сдвигового усилия P_x , действующего перпендикулярно оси инструмента и определяющего сущность механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.

Нормальные и тангенциальные напряжения, возникающие в горной породе при нанесении точечного удара в общем виде можно охарактеризовать, опираясь на теорию Буссинеска о формировании напряжений в точке упругого полупространства от действия сосредоточенной силы:

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos^2 \Delta}{2 \cdot \pi \cdot r_i^2}, \quad (2.1)$$

$$\tau_i = \frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta \cdot \sin \Delta}{2 \cdot \pi \cdot r_i^2}, \quad (2.2)$$

где Q – сила удара, даН; ψ – угол между осью инструмента и направлением движения ударного импульса от точки его приложения к породоразрушающему инструменту к вершине породоразрушающей вставки, градус; Δ – угол между осью инструмента и направлением ударного импульса, передаваемого от ударника к породоразрушающему инструменту, градус; r – расстояние от точки приложения ударного импульса к породоразрушающему инструменту до

вершины породоразрушающей вставки, м; i – номер породоразрушающей вставки, определяющий значение r_i и ψ_i .

Согласно схеме на рис. 2.1 углы Δ и ψ_i определяются из следующих геометрических зависимостей:

$$\Delta = \operatorname{arctg} \frac{2E}{h},$$

$$\psi_i = \operatorname{arccos} \frac{H}{r_i},$$

где h – высота ударника, м; H – высота передающего ударный импульс породоразрушающего инструмента, м.

Присутствие в формуле определения нормальных и тангенциальных усилий параметра r_i является аналитическим доказательством их неравенства при нанесении удара с эксцентриситетом. Причём, максимальные величины передаваемых усилий, и, соответственно, создаваемых напряжений, формируются под породоразрушающими вставками, расположенными на породоразрушающем инструменте со стороны приложения удара, а минимальные, соответственно, в противоположной области.

Также важен вопрос соотношения нормальных усилий при центральном и внецентренном приложении удара. В случае нанесения удара без эксцентриситета напряжения, формируемые породоразрушающими вставками равны, образуя, в сущности, среднее значение. А при некотором смещении точки приложения удара, как уже было описано ранее, напряжения не равны, более того, расчёты показывают, что максимальный уровень формируемых напряжений много больше, в то время как минимальный значительно ниже уровня напряжений при соосном приложении удара ($\sigma_1 \gg \bar{\sigma} \gg \sigma_2$).

Формирование результирующего тангенциального усилия

Декомпенсация тангенциальных сдвиговых усилий на породоразрушающих элементах определяет их некоторое смещение в плоскости забоя скважины, реализуя тангенциальные напряжения, что приводит к сколу части горных пород, примыкающей к борту образованной лунки разрушения, оказывая

непосредственное влияние на её форму и объём. Данный механизм позволяет повышать эффективность процесса разрушения без дополнительных энергозатрат.

Исходя из формулы (2.1) и необходимого для разрушения горных пород усилия на сферической породоразрушающей вставке, которыми оснащаются буровые долота штыревого типа для применения в условиях пневмоударного бурения, формирующего лунку разрушения, справедливо соотношение:

$$\frac{4 \cdot P_i}{\pi \cdot d^2} = \frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos^2 \Delta}{2 \cdot r_i^2} \quad (2.3)$$

где P_i – нормальное усилие на породоразрушающей вставке, формирующей лунку разрушения, Н; d – диаметр пятна контакта сферической породоразрушающей вставки с породой, мм².

Параметр d может быть определён в соответствии с зависимостью Г. Герца:

$$d = 1,144 \cdot \sqrt[3]{P_i \cdot R \cdot \left(\frac{4}{E_1} (1 - \mu_1^2) + \frac{4}{E_2} (1 - \mu_2^2) \right)}$$

где R – радиус сферической породоразрушающей вставки, м; E_1, E_2 – модули упругости материала твердосплавной вставки и горной породы, Па; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для материала породоразрушающей вставки и горной породы.

Учитывая, что модуль упругости E_1 для твёрдого сплава величина во многом превышающая E_2 для горной породы, а также малость величины μ_2^2 выражение для d можно упростить:

$$d = 1,144 \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P_i \cdot R}{E'}} = 1,82 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_i \cdot R}{E'}} \quad (2.4)$$

где E' – модуль упругости горной породы, Па.

Исходя из соотношения (2.3) и зависимости (2.4) нормальные усилия на породоразрушающей вставке под действием точечного удара:

$$1,2 \cdot P_i^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{E'}{R} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta}{2 \cdot r_i^2},$$

тогда

$$P_i = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta}{2 \cdot r_i^2 \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{E'}{R}\right)^{\frac{2}{3}}}} = 1,95 \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}}}{r_i^2 \cdot E'^{\frac{2}{3}}}}.$$

Исходя из того, что глубина лунки разрушения горной породы индентором определяется как

$$h = \frac{2 \cdot P_i}{C},$$

то в соответствии с полученной зависимостью для определения P_i выражение имеет вид

$$h = \frac{3,9}{C} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos^2 \psi_i \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}}}{r_i^2 \cdot E'^{\frac{2}{3}}}},$$

где C – жесткость взаимодействующей породоразрушающей вставки и породы, даН/м.

Угол перекоса забоя скважины, сформированный при приложении удара с эксцентризмом, определяется как арктангенс отношения разности глубин внедрения в породу диаметрально противоположных, наибольшей и наименьшей, вставок к расстоянию между ними:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{\Delta h}{b},$$

где Δh – разность глубин внедрения в породу диаметрально противоположных, наибольшей и наименьшей, вставок, м; b – расстояние между диаметрально противоположными вставками на торце долота, м.

Считая что $b = D$, где D – диаметр породоразрушающего инструмента, приведённая зависимость справедлива для определения его угла перекоса при внецентричном ударе по горной породе.

Расстояние от точки приложения удара до вершин породоразрушающих вставок r_1 и r_2 , размещённых диаметрально противоположно в плоскости нанесения внецентренного ударного импульса и углы ψ_1 и ψ_2 определяются по формулам (рис. 2.1):

$$r_1 = \sqrt{H^2 + \left(\frac{D}{2} - E\right)^2},$$

$$r_2 = \sqrt{H^2 + \left(\frac{D}{2} + E\right)^2},$$

$$\psi_1 = \arccos \frac{H}{r_1},$$

$$\psi_2 = \arccos \frac{H}{r_2},$$

где H – расстояние от торца долота до поверхности наковальни, м; E – эксцентриситет приложения ударного импульса, м.

На основе вышеприведённых зависимостей получена зависимость для расчёта угла перекоса породоразрушающего инструмента при внецентренном ударе:

$$\begin{aligned} \gamma = \frac{h_1 - h_2}{D} &= \frac{1}{D} \cdot \left[\frac{3,9}{C} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{H^2}{H^2 + \left(\frac{D}{2} - E\right)^2}}{E^{\frac{2}{13}} \cdot \left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E\right)^2\right)}} - \frac{3,9}{C} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{H^2}{H^2 + \left(\frac{D}{2} + E\right)^2}}{E^{\frac{2}{13}} \cdot \left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E\right)^2\right)}} \right] = \\ &= \frac{3,9}{D \cdot C} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}}}{E^{\frac{2}{13}}} \cdot \left[\frac{H^2}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E\right)^2\right)^2} - \frac{H^2}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E\right)^2\right)^2} \right]} = \end{aligned}$$

$$= \frac{3,9}{D \cdot C} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \cos \Delta \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot H^2}{E^{\frac{2}{3}}}} \cdot \left[\frac{1}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E \right)^2 \right)^2} - \frac{1}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E \right)^2 \right)^2} \right]$$

Интенсивность искривления скважин определяется исходя из набора угла искривления γ на интервале углубления, равном средней глубине диаметрально противоположных лунок разрушения, наибольшей h_1 и наименьшей h_2 , определяющие перекося породоразрушающего инструмента и среднее углубление скважины:

$$i = \frac{2 \cdot \gamma}{h_1 + h_2}.$$

В результате интенсивность искривления скважины при разрушении горных пород внецентренным приложением ударных импульсов:

$$i = \frac{2 \left[\frac{1}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E \right)^2 \right)^2} - \frac{1}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E \right)^2 \right)^2} \right]}{D \left[\frac{1}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E \right)^2 \right)^2} + \frac{1}{\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E \right)^2 \right)^2} \right]} = \frac{2 \left(\frac{1}{r_1^4} - \frac{1}{r_2^4} \right)}{D \left(\frac{1}{r_1^4} + \frac{1}{r_2^4} \right)} = \frac{2(r_2^4 - r_1^4)}{D(r_1^4 + r_2^4)} =$$

$$= \frac{2 \left[\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E \right)^2 \right)^2 - \left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E \right)^2 \right)^2 \right]}{D \left[\left(H^2 + \left(\frac{D}{2} + E \right)^2 \right)^2 + \left(H^2 + \left(\frac{D}{2} - E \right)^2 \right)^2 \right]}.$$

Согласно вышеприведённым зависимостям, величина формируемого угла перекося забоя, при внецентренном разрушении горных пород, определяющего интенсивность искривления скважины, зависит от физико-механических свойств разрушаемых пород, а также от параметров ударной системы, таких как величина

эксцентриситета приложения удара и его энергия, расстояние от точки передачи внецентренного ударного импульса до забоя скважины, диаметр породоразрушающего инструмента. Варьирование интенсивности искривления скважин возможно в широком диапазоне значений, что предполагает возможность использования реализующих внецентренное приложение ударных импульсов технических средств как для стабилизации направления проведения скважин, так и с целью набора кривизны с относительно высокими значениями интенсивности искривления.

Исходя из того, что при применении механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами формируется угол перекоса забоя ввиду неравномерного распределения ударного усилия между породоразрушающими вставками, возможно два направления его реализации – это повышение производительности процесса бурения за счёт повышения суммарного объёма разрушения горных пород при определённых величинах эксцентриситета приложения удара, и технология направленного бурения скважин. Причём, в первом случае необходимо наносить удары дезориентировано, а во втором – со стороны, противоположной необходимому направлению искривления скважины.

Немаловажным фактом при внецентренном приложении ударных импульсов является снижение силы удара по отношению к центральному его приложению при росте величины эксцентриситета приложения удара (рис. 2.1 б):

$$P = Q \cdot \cos \Delta = \frac{Q \cdot h'}{2\sqrt{E^2 + \left(\frac{h'}{2}\right)^2}},$$

где Q – сила удара, Н; h' – высота ударника, м; E – эксцентриситет приложения удара, м.

Формируемая вследствие декомпенсации тангенциальных усилий результирующая величина P_x , являющаяся одной из основных характеристик механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами, и оказывающая влияние на объём разрушения имеет прямую зависимость от

величины эксцентриситета приложения удара и его силы, в то же время показывая обратную зависимость от высоты породоразрушающего инструмента:

$$P_x = \frac{2 \cdot P \cdot e}{\sqrt{4 \cdot e^2 + H^2}} = \frac{Q \cdot e}{\sqrt{(4 \cdot e^2 + H^2) \cdot \left(e^2 + \frac{h^2}{4}\right)}} \approx \frac{P \cdot e}{H}.$$

Приведённая зависимость показывает, что наибольший эффект от применения внецентренной ударной нагрузки возможно получить при пневмоударном бурении, характеризующемся высокими значениями энергии ударных импульсов и относительно небольшим расстоянием от точки его приложения до забоя скважины, по сравнению с ударно-вращательным бурением с использованием гидроударников.

Изменчивость силы удара и тангенциального усилия согласно вышеприведённым зависимостям в отношении к величине эксцентриситета приложения удара отражена на рис. 2.2.

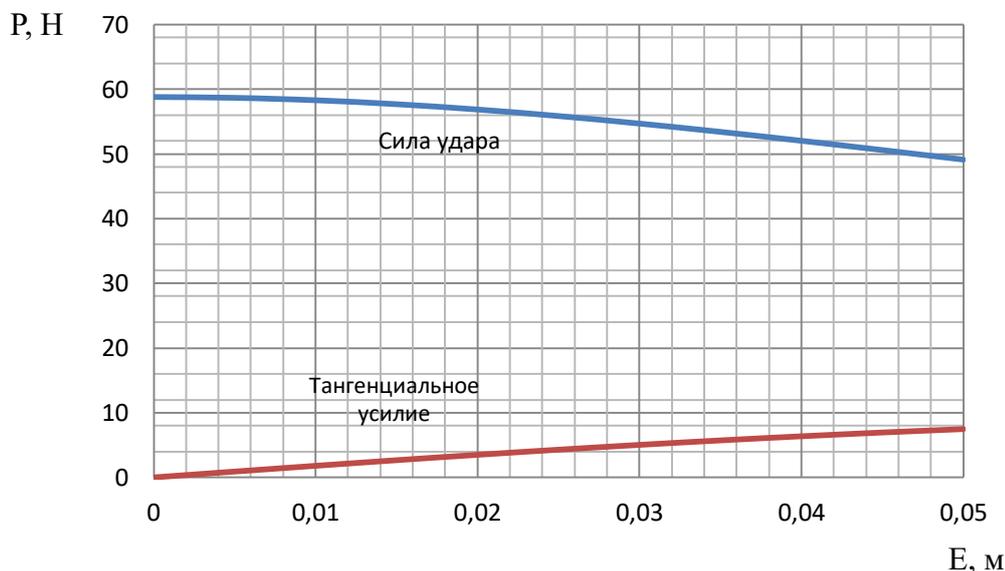


Рис.2.2. График изменчивости силы удара и формируемого при внецентренном приложении ударных импульсов суммарного тангенциального усилия на породоразрушающих вставках от величины эксцентриситета приложения удара при следующих параметрах ударной системы: вес ударника $Q=58,8$ Н, высота ударника $h=0,152$ м, высота породоразрушающего инструмента $H=0,65$ м [93]

Механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами является перспективным с точки зрения снижения энергоёмкости разрушения горных пород, что подтверждено проведёнными теоретическими и эмпирическими исследованиями. Данный механизм, по совокупности характерных признаков, является новым по отношению к механизму разрушения горных пород центральным ударом.

Реализация механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами потенциально позволяет расширить область оптимального применения ударно-вращательного способа бурения скважин за счёт изменения механизма разрушения горных пород. Как известно, при разрушении горных пород центральными ударными импульсами происходит смятие и раздавливание породы ударом высокой энергии, что, безусловно, эффективно в породах твёрдых и очень твёрдых хрупких, и совершенно неработоспособно в пластичных горных породах. Однако если наносить внецентренный удар, то поскольку механизм разрушения пород изменяется и возникает суммарное тангенциальное сдвиговое усилие, действующее в плоскости забоя скважины, наряду со смятием и дроблением реализуется скалывание пород тангенциально, в плоскости забоя скважины, смещающимися породоразрушающими вставками, что позволяет судить о применимости такого механизма для разрушения достаточно пластичных горных пород.

2.3 Степень исследованности механизма внецентренного разрушения горных пород

На сегодняшний день механизм разрушения горных пород при приложении эксцентричных ударов исследован слабо. Однако опыт известных исследований показывает прямую зависимость объёма разрушения горных пород от величины эксцентриситета приложения удара на некоторых интервалах её изменчивости. Также установлено, что физико-механические свойства горных пород и параметры ударной системы оказывают влияние на закон изменения объёма

разрушения, предопределяя оптимальную величину эксцентриситета, при которой суммарный объём разрушения будет максимальным.

«В частности, известны результаты стендовых испытаний разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами при нанесении единичных ударов (рис. 2.3). Испытанию подвергались мрамор (с твёрдостью 765 МПа и коэффициентом пластичности 3,3) и гранодиорит (твёрдость 2 489 МПа, коэффициент пластичности 1,1). Энергия ударного импульса имела два установочных уровня – 0,17 кДж и 0,2 кДж, величина эксцентриситета его приложения дискретно варьировалась в диапазоне от 0 до 4,2 мм. В качестве породоразрушающего инструмента использовалось долото, снабжённое восьмью породоразрушающими вставками с полусферической рабочей поверхностью из сплава ВК и имеющее диаметр, равный 90 миллиметров.

Относительное повышение объёма разрушения при увеличении эксцентриситета приложения удара от 0 до 2,2 мм при разрушении мрамора с энергией удара 0,2 кДж составило 28%. При той же энергии удара при увеличении

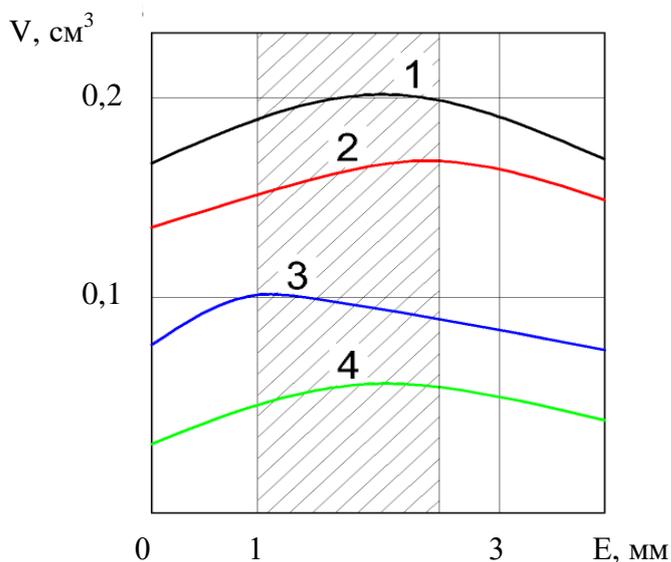


Рис. 2.3. Графики изменчивости объёма разрушения мрамора – линии 1,3 и гранодиорита – линии 2,4 от величины эксцентриситета приложения ударных импульсов при энергии удара 0,2 кДж (две верхние линии) и 0,17 кДж (две нижние линии) [12]

эксцентриситета его приложения в диапазоне от 0 до 2,5 мм относительное увеличение объёма разрушения гранодиорита составило 15%. В случае нанесения ударного импульса меньшей энергии (0,17 кДж), повышение объёма разрушения составило 33% (диапазон увеличения эксцентриситета 0–1 мм, порода – гранодиорит) и 45% (диапазон увеличения

эксцентриситета 0–2,2 мм, порода – мрамор)» [12].

Исходя из представленных графиков изменчивости объёма разрушения на рис 2.3, следует несколько основных выводов:

– необоснованное повышение величины эксцентриситета приложения удара может привести к ситуации, когда эффективность разрушения горных пород не только не увеличивается, но и способна дать отрицательный эффект;

– оптимальная величина эксцентриситета приложения удара, соответствующая максимальной величине объёма разрушения горных пород, индивидуальна и зависит от многих геологических и технико-технологических факторов;

Как следует из вышеприведённого, применение внецентренной ударной нагрузки при разрушении более пластичного мрамора имеет большую эффективность вне зависимости от величины энергии реализуемого ударного импульса.

Известны результаты диссертационного исследования Г.Р. Романова, посвящённого исследованию влияния ассиметричных статических и динамических ударных нагрузок на процесс разрушения горных пород, где был проведён эксперимент по внецентренному разрушению горных пород с применением гидроударника, колонковой трубы и алмазной коронки. Результаты исследования свидетельствуют о максимальном росте производительности процесса разрушения при величинах эксцентриситета приложения удара до 2,4 мм.

«Проведённые эмпирические испытания разрушения долерита показали, что максимальные значения механической скорости бурения при всех значениях эксцентриситета приложения удара (в эксперименте прилагались ударные импульсы с величиной эксцентриситета 0; 2,4; 6,8; 11 мм) были достигнуты при наибольшем значении частоты вращения породоразрушающего инструмента. При этом максимальная интенсивность роста механической скорости (принятой как комплексный показатель производительности процесса разрушения горных пород) зафиксирована при увеличении эксцентриситета приложения удара от 0

(центральный удар) до 2,4 мм. При аналогичном испытании мрамора, более пластичного и имеющего меньшую твёрдость, получены аналогичные результаты» [86].

Теоретическое изучение механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами показывает, что суммарная энергия разрушения при внецентренном приложении удара несколько снижена по отношению к энергии разрушения горных пород ударом с нулевым эксцентриситетом. Однако приложение эксцентричного ударного импульса приводит к образованию результирующего тангенциального усилия, действующего в плоскости забоя, способствующего увеличению объёма разрушения горных пород при некоторых величинах эксцентриситета приложения удара.

Теоретические положения подтверждаются известными экспериментальными исследованиями механизма разрушения пород внецентренными ударными импульсами, фиксирующими факт повышения объёма разрушения горных пород при увеличении эксцентриситета приложения удара в пределах 0,5 – 2,4 мм. Это происходит за счёт реализации результирующего тангенциального усилия, при этом при изменении величины эксцентриситета в таком диапазоне уменьшение силы удара незначительно и не оказывает существенного влияния на производительность процесса разрушения. Оптимальная величина эксцентриситета приложения ударного импульса, приводящая к наибольшему повышению объёма разрушения и соответственно производительности процесса бурения, зависит от многих факторов, прежде всего, таких как конструкция бурового долота и тип разрушаемой горной породы.

2.4 Методика исследований и обработки результатов

Диссертационное исследование основывается на аналитическом и экспериментальном исследовании механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами и способа управления направлением

скважин с использованием данного механизма, а также анализе полученных в результате проведённых экспериментальных работ данных. При выполнении исследования использовалась система регулятивных принципов, приёмов и способов комплекса универсальных (анализ, синтез, обобщение, индукция, дедукция), эмпирических (наблюдение, описание, измерение, эксперимент) и теоретических (мысленный эксперимент, идеализация, формализация) научных методов познания.

Проведение экспериментальных исследований по изучению внецентренного разрушения горных пород было произведено на буровом стенде (рис. 2.4), оснащённом:

- буровым станком СКБ–4, установленном на высоте 2 метра;
- прибором ИСБ, фиксируемом механическую скорость бурения;
- буровым насосом НБ–3 с характеристиками подачи очистного агента в интервале 15 – 120 л/мин;
- коробка, фиксирующего разрушаемую горную породу, размером 0,7×0,7×0,7 метра;

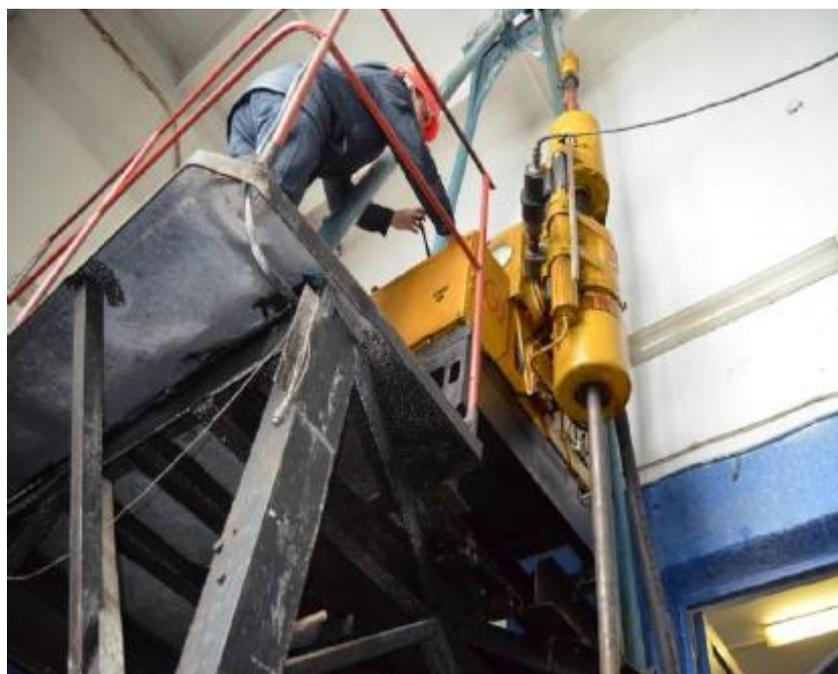


Рис. 2.4. Экспериментальный стенд для проведения эмпирических исследований на базе станка СКБ–4

- ёмкость для хранения очистного агента (зумпф).

Параметры

эксперимента:

- интервал бурения – 0,01 метра;
- расход очистного агента – 70 л/мин.

Время t на бурение заданного интервала фиксировалось с помощью секундомера [91–92].

В рамках эксперимента производилось бурение таких горных пород, как мрамор и долерит. Забойная компоновка для проведения эксперимента состояла из трёхшарошечного долота ЗШ–59-К-ЦА и высокочастотного гидроударника ГВ-6 (рис. 2.5). Изменение величины эксцентриситета приложения ударного импульса производилось с помощью удаления сектора определённой величины с нижнего торца ударника (рис. 2.6).



Рис. 2.5 Забойная компоновка для проведения эмпирических исследований

Результаты эксперимента обрабатывались по плану полного факторного эксперимента. Поскольку, в качестве влияющих на процесс разрушения факторов были выбраны величины осевой нагрузки P_{oc} и частоты вращения бурового инструмента ω , минимальное количество опытов равнялось четырём, так как:

$$N=2^k,$$

где N – минимальное число опытов для обеспечения всех комбинаций факторов на двух уровнях; k – число влияющих на процесс факторов.



Рис. 2.6. Модифицированный ударник для нанесения внецентренного ударного импульса

В результате проведения серии опытов были получены достоверные данные о скорости бурения с различными сочетаниями режимных параметров и величин эксцентриситета приложения удара. С целью достижения высокой точности сопоставления результатов исследования все этапы экспериментальных работ

выполнялись с использованием единых блоков горных пород.

В качестве параметров, наиболее ёмко характеризующих процесс разрушения горных пород взяты механическая скорость бурения v_m (2.5) и углубление за один оборот $h_{об}$ (2.6).

$$v_m = \frac{36 \cdot l_{\sigma}}{t}, \text{ м/ч}, \quad (2.5)$$

$$h_{об} = \frac{v_m}{60 \cdot \omega}, \text{ м}, \quad (2.6)$$

где l_{σ} – интервал бурения горной породы в рамках эксперимента, м; t – время бурения интервала в рамках эксперимента, ч.

Данные параметры приняты как отклики системы. План эксперимента приведён в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – План экспериментальных работ

Номер опыта	Значения факторов в кодовых обозначениях				Отклики	
	B_0	$P_{ос}$	ω	$\omega P_{ос}$	v_m	$h_{об}$
1	+	-	-	+	-	-
2	+	-	+	-	-	-
3	+	+	-	-	-	-
4	+	+	+	+	-	-

При проведении эксперимента факторы, влияющие на процесс разрушения, были зафиксированы на уровнях (табл. 2.2):

- 800 даН и 1200 даН для осевой нагрузки;
- 155 мин⁻¹ и 390 мин⁻¹.

Выбранные величины факторов позволили установить четыре режима бурения (табл. 2.3).

Таблица 2.2 – Интервалы и уровни варьирования факторов

Уровни факторов и интервал их варьирования	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевое усилие, даН
Основной уровень	272,5	1000
Нижний уровень	155	800
Верхний уровень	390	1200
Интервал варьирования	117,5	200

Таблица 2.3 – Сочетания выбранных величин факторов при различных режимах бурения

Фактор	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Осевая нагрузка, даН	800	1200	800	1200
Частота вращения, мин ⁻¹	155	155	390	390

Для обеспечения валидности полученных экспериментальным путём данных каждая серия эксперимента имела три повторения. В случае если полученные значения имели относительное отклонение от среднего значения до 7% (2.7) – результаты серии эксперимента считались достоверными и в виде среднего значения использовались при обработке результатов. В случае получения значения отклика в серии с превышаемым порог относительным отклонением – оно не принималось в качестве достоверного и не учитывалось.

$$\varepsilon = \frac{v_{mi} - \overline{v_m}}{\overline{v_m}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Математическая обработка и статистическая оценка результатов эксперимента проведены в соответствии с требованиями Международной системы единиц (СИ) [87–90].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Совокупность характерных признаков, присущих механизму разрушения горных пород эксцентричными ударами идентифицирует его как новый по отношению к механизму разрушения ударными импульсами без эксцентриситета.

2. В результате теоретических исследований установлено, что при реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами формируется, ввиду декомпенсации тангенциальных усилий на вершинах породоразрушающих вставок, суммарная тангенциальная составляющая ударного импульса, влияющая на геометрические характеристики и объёмы формируемых лунок разрушения, имеющая прямую зависимость от силы удара и эксцентриситета приложения удара, и обратную от кратчайшего расстояния от точки приложения удара до забоя скважины.

3. Получена теоретическая зависимость, отражающая факт уменьшения силы удара при росте величины эксцентриситета его приложения.

4. Согласно проведённым теоретическим исследованиям возможно два направления практической реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами – это повышение производительности процесса за счёт повышения суммарного объёма разрушения пород при некоторых, индивидуальных для каждой совокупности физико-механических свойств горных пород и параметров ударной системы, величинах эксцентриситета приложения ударного импульса, а также технология направленного бурения скважин за счёт формирования угла перекоса забоя при внецентренном приложении ударных импульсов, причём в первом случае удары необходимо наносить дезориентировано по периметру забоя, а во втором – со стороны, противоположной необходимому направлению искривления траектории скважины.

5. Разработана методика проведения экспериментальных исследований механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами,

позволяющая произвести практическую верификацию разработанных теоретических положений.

6. Достоверность полученных эмпирических результатов, а также построенных на их основании выводов и рекомендаций, обеспечивается применением методов математической статистики в соответствии с требованиями Международной системы единиц (СИ).

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВНЕЦЕНТРЕННЫМИ УДАРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Анализ изменчивости механической скорости бурения как отклика системы в зависимости от факторов эксперимента

Опытное исследование механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами выполнялось по плану полного факторного эксперимента, в качестве факторов приняты осевая нагрузка и частота вращения [93]. Обобщённые значения механической скорости по результатам серий опытов из 3 повторений при установленных режимах бурения долерита и мрамора представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Обобщённые значения откликов системы

Долерит				
Частота вращения	Осевая нагрузка	Механическая скорость при $E=0$ мм	Механическая скорость при $E=1$ мм	Механическая скорость при $E=2$ мм
155 об/мин	800 даН	0,403 м/ч	0,417 м/ч	0,445 м/ч
155 об/мин	1200 даН	0,790 м/ч	0,877 м/ч	0,997 м/ч
390 об/мин	800 даН	1,450 м/ч	1,735 м/ч	2,010 м/ч
390 об/мин	1200 даН	2,620 м/ч	3,480 м/ч	3,700 м/ч
Мрамор				
Частота вращения	Осевая нагрузка	Механическая скорость при $E=0$ мм	Механическая скорость при $E=1$ мм	Механическая скорость при $E=2$ мм
155 об/мин	800 даН	0,816 м/ч	0,923 м/ч	1,090 м/ч
155 об/мин	1200 даН	1,810 м/ч	1,940 м/ч	2,243 м/ч
390 об/мин	800 даН	2,070 м/ч	3,267 м/ч	3,665 м/ч
390 об/мин	1200 даН	3,460 м/ч	5,673 м/ч	6,690 м/ч

Математические модели механической скорости бурения долерита, полученные при обработке результатов по методу полного факторного эксперимента, имеют следующий вид:

эксцентриситет приложения ударного импульса 0 миллиметров

$$v_M = 1,316 + 0,719 \cdot P_{oc} + 0,389 \cdot \omega + 0,196 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

эксцентриситет приложения ударного импульса 1 миллиметр

$$v_M = 1,627 + 0,98 \cdot P_{oc} + 0,551 \cdot \omega + 0,321 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

эксцентриситет приложения ударного импульса 2 миллиметра

$$v_M = 1,788 + 1,067 \cdot P_{oc} + 0,561 \cdot \omega + 0,285 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Полученные математические модели в графическом виде представлены на рис. 3.1.

Анализ полученных результатов позволил выявить основные зависимости изменчивости механической скорости бурения долерита от величин осевой нагрузки, частоты вращения и величины эксцентриситета приложения ударных импульсов.

Математические модели их графическая интерпретация свидетельствуют о соответствии предельных значений механической скорости максимальным значениям режимных параметров. По результатам эксперимента получены следующие предельные значения v_M :

– 2,61 м/ч при эксцентриситете приложения ударного импульса 0 миллиметров;

– 3,47 м/ч при эксцентриситете приложения ударного импульса 1 миллиметр (на 33% больше чем в случае с центральным ударом);

– 3,72 м/ч при эксцентриситете приложения ударного импульса 2 миллиметра (на 41% больше чем при центральном ударе, на 6% больше величины механической скорости при эксцентриситете 1 миллиметр).

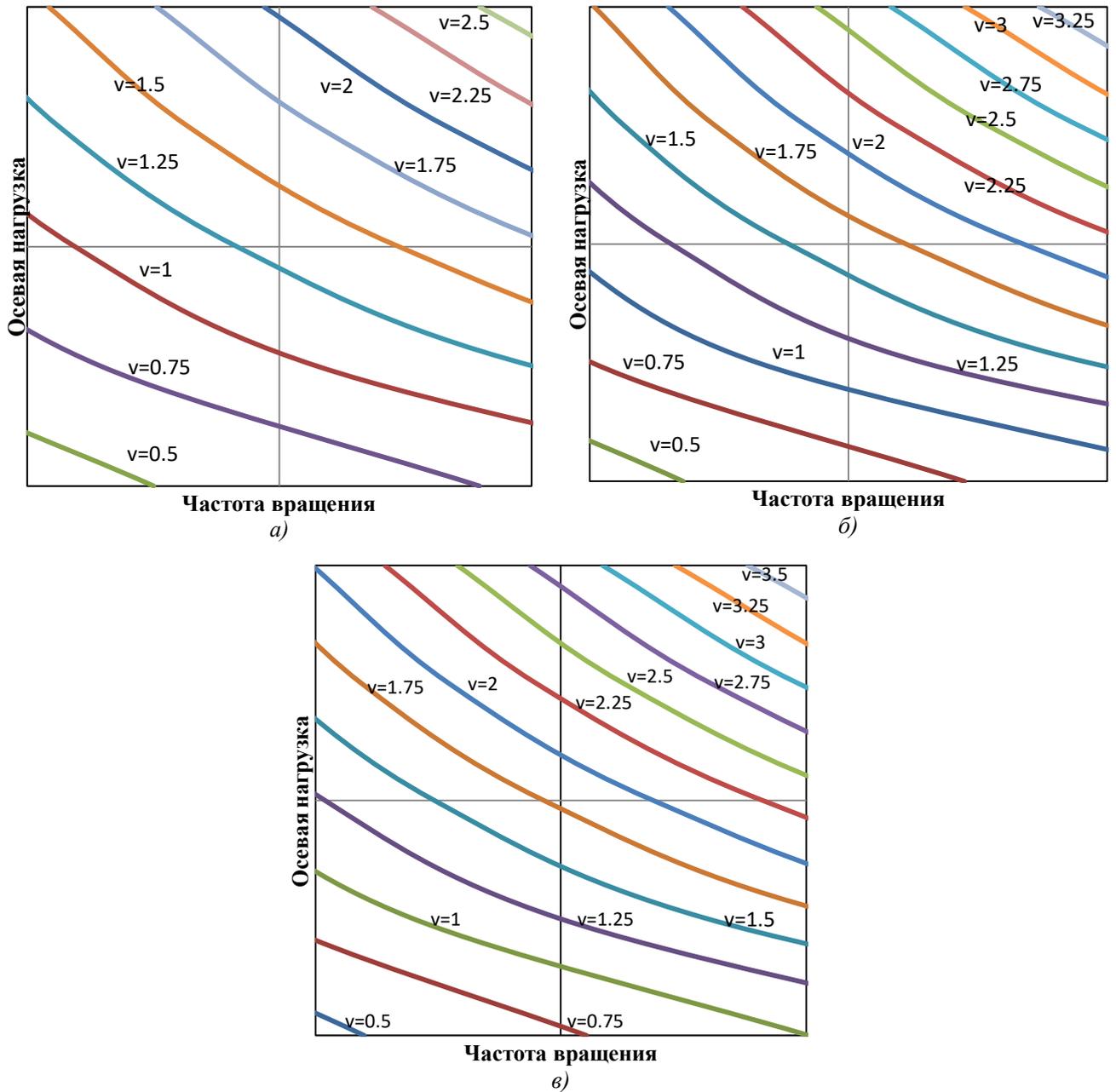


Рис. 3.1. Механическая скорость разрушения долерита при: а) эксцентриситете приложения ударного импульса 0 миллиметров; б) эксцентриситете приложения ударного импульса 1 миллиметр; в) эксцентриситете приложения ударного импульса 2 миллиметра

Основные выводы по результатам проведённого эксперимента с долеритом в качестве разрушаемой горной породы:

– максимальная величины механическая скорость бурения получена при максимальных величинах режимных параметров независимо от величины эксцентриситета приложения ударного импульса;

– отмечен поступательный рост механической скорости бурения при изменении эксцентриситета приложения удара от 0 до 2 мм без изменения осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента;

– влияние технологических параметров на процесс разрушения неодинаково: большая зависимость механической скорости отмечена от величины осевой нагрузки на снаряд.

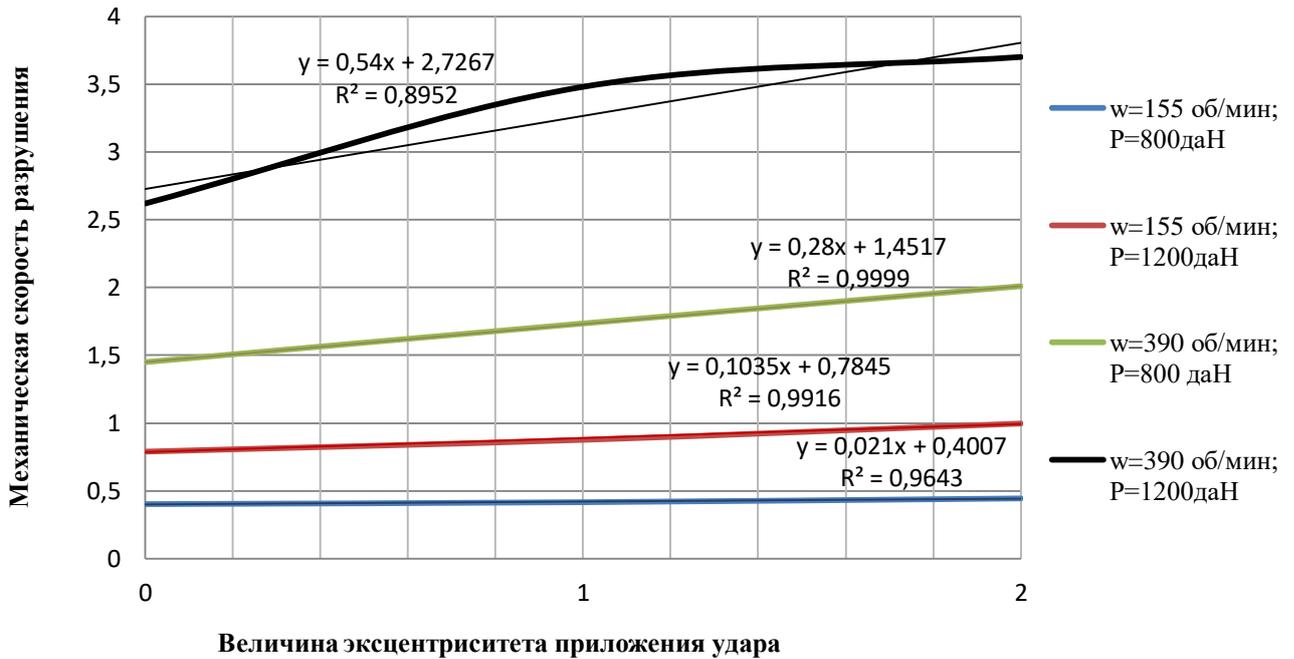


Рис. 3.2. Зависимость механической скорости бурения долерита от величины эксцентриситета приложения удара

Анализ данных диаграммы изменения механической скорости бурения долерита от величины эксцентриситета приложения удара при различных режимах бурения на рис. 3.2 позволяет сделать следующие основные выводы:

– интенсивность роста величины механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов увеличивается с интенсификацией режимных параметров;

– увеличение эксцентриситета приложения удара на всём диапазоне интервала от 0 до 2 мм при различных сочетаниях режимных параметров приводит к увеличению механической скорости бурения с определённой эффективностью.

Анализ результатов аналогичного экспериментального исследования разрушения мрамора согласно представленной выше методике полного факторного эксперимента позволил определить математические модели механической скорости бурения мрамора для величин эксцентриситета приложения удара, равных $E=0$ мм:

$$v_M = 2,039 + 0,726 \cdot P_{oc} + 0,596 \cdot \omega + 0,099 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$v_M = 2,951 + 1,519 \cdot P_{oc} + 0,855 \cdot \omega + 0,348 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$v_M = 3,422 + 1,756 \cdot P_{oc} + 1,045 \cdot \omega + 0,468 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Согласно полученным математическим моделям механической скорости бурения мрамора при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения снаряда получены следующие предельные значения v_M :

– 3,46 м/ч при центральном ударе ($E=0$ мм);

– 5,67 м/ч при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение механической скорости относительно соответствующей при центральном ударе равно 64%);

– 6,69 м/ч при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение механической скорости относительно соответствующей при центральном ударе равно 93%, относительно величины механической скорости при $E=1$ мм – 18%).

Основные выводы по полученным зависимостям механической скорости бурения мрамора от осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения удара, в общем, схожи с аналогичными выводами по разрушению долерита, несмотря на большую разницу этих двух горных пород по своим физико-механическим свойствам (рис. 3.3, рис. 3.4).

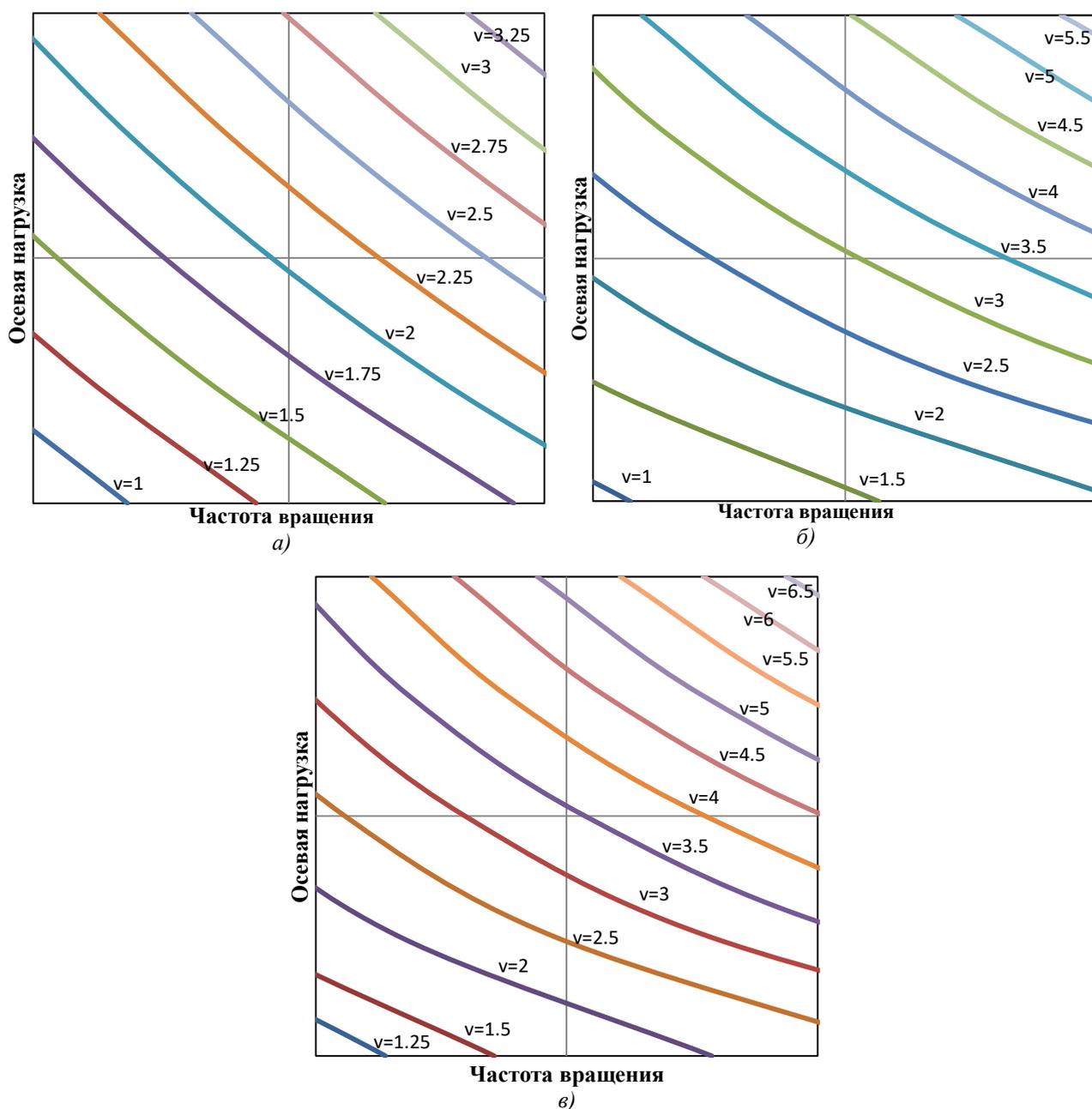


Рис. 3.3. Механическая скорость разрушения мрамора при: а) $E=0$ мм; б) $E=1$ мм; в) $E=2$ мм

В качестве обобщённого сравнения по внецентренному разрушению мрамора и долерита можно отметить следующую тенденцию – большая интенсивность роста механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения удара в интервале от 0 до 2 мм наблюдалась для имеющего более низкие прочностные характеристики относительно долерита мрамора, независимо от реализуемого сочетания режимных параметров (рис. 3.4). Данное обстоятельство можно считать косвенным доказательством предполагаемой трансформации механизма разрушения горных пород и

повышения эффективности применения ударно-вращательного способа бурения пластичных пород. Также, исходя из интенсивности роста механической скорости бурения представленных пород, можно предположить, что оптимальная величина эксцентриситета приложения внецентренного удара для мрамора несколько выше, чем для долерита.

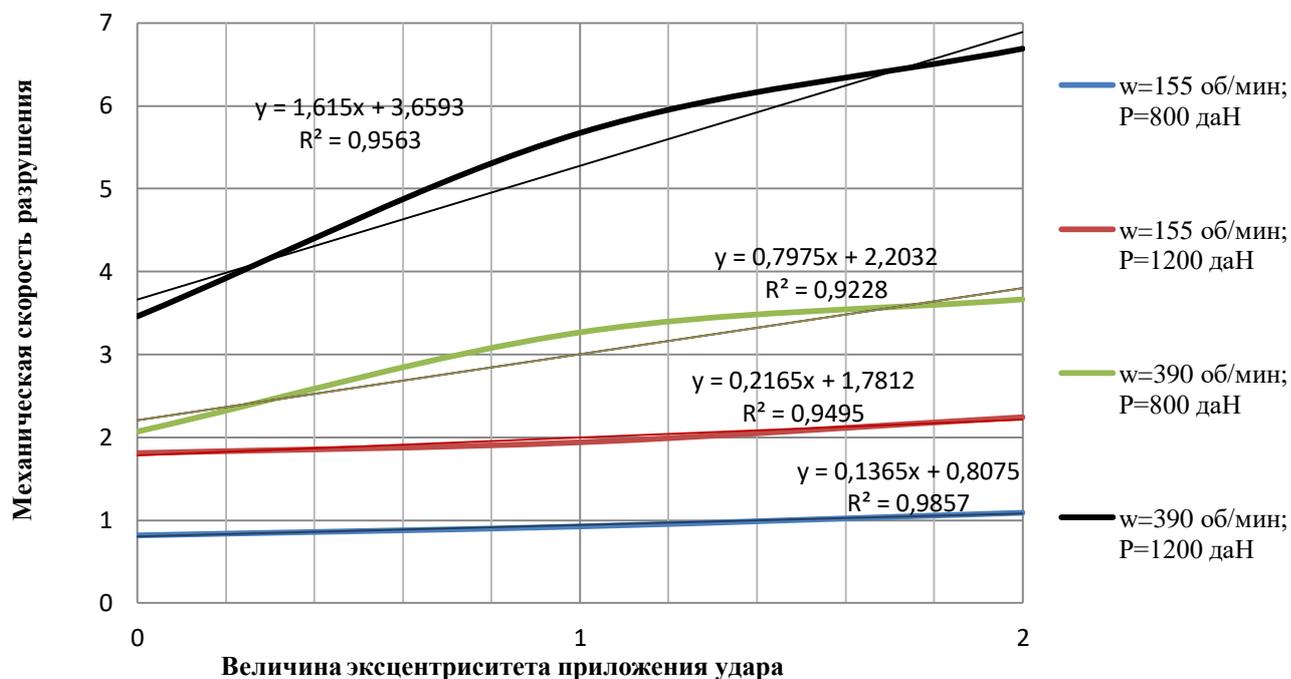


Рис. 3.4. Механическая скорость разрушения мрамора при различных величинах эксцентриситета приложения удара

3.2 Анализ изменчивости углубления за один оборот как отклика системы в зависимости от факторов эксперимента

Наряду с механической скоростью одним из главных откликов системы с точки зрения исследования механизма разрушения горных пород является углубление за один оборот, позволяющий судить о режиме (усталостно-поверхностное, объёмное) их разрушения. Обобщённые значения углубления за один оборот как отклика системы при различных режимах бурения долерита и мрамора представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Обобщённые значения откликов системы

Долерит				
Частота вращения	Осевая нагрузка	Углубление за оборот при $E=0$ мм	Углубление за оборот при $E=1$ мм	Углубление за оборот при $E=2$ мм
155 об/мин	800 даН	0,0433 мм/об	0,0447 мм/об	0,0475 мм/об
155 об/мин	1200 даН	0,085 мм/об	0,0943 мм/об	0,1073 мм/об
390 об/мин	800 даН	0,0623 мм/об	0,074 мм/об	0,086 мм/об
390 об/мин	1200 даН	0,112 мм/об	0,1485 мм/об	0,1583 мм/об
Мрамор				
Частота вращения	Осевая нагрузка	Углубление за оборот при $E=0$ мм	Углубление за оборот при $E=1$ мм	Углубление за оборот при $E=2$ мм
155 об/мин	800 даН	0,0877 мм/об	0,0995 мм/об	0,117 мм/об
155 об/мин	1200 даН	0,1912 мм/об	0,193 мм/об	0,2413 мм/об
390 об/мин	800 даН	0,0885 мм/об	0,1393 мм/об	0,1565 мм/об
390 об/мин	1200 даН	0,148 мм/об	0,2427 мм/об	0,2857 мм/об

На основании обработки результатов экспериментального исследования разрушения блока горной породы построены математические модели углубления за один оборот при бурении долерита в зависимости от величин осевой нагрузки и частоты вращения для величин эксцентриситета приложения удара, равных $E=0$ мм:

$$h_{об} = 0,07565 + 0,0115 \cdot P_{ос} + 0,02285 \cdot \omega + 0,002 \cdot P_{ос} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$h_{об} = 0,09038 + 0,02088 \cdot P_{ос} + 0,03103 \cdot \omega + 0,0249 \cdot P_{ос} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$h_{об} = 0,09978 + 0,02238 \cdot P_{ос} + 0,03303 \cdot \omega + 0,00313 \cdot P_{ос} \cdot \omega.$$

Максимальные расчётные величины углубления за один оборот при бурении долерита при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения снаряда составляют:

– 0,112 мм/об при центральном ударе ($E=0$ мм);

– 0,167 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение углубления за один оборот относительно соответствующего при центральном ударе равно 49%);

– 0,158 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение углубления за один оборот относительно соответствующего при центральном ударе равно 41%).

Графическая интерпретация полученных зависимостей углубления за один оборот при бурении долерита от величин осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения ударных импульсов, полученные при обработке эмпирических результатов по методу полного факторного эксперимента, представлены на рис. 3.5.

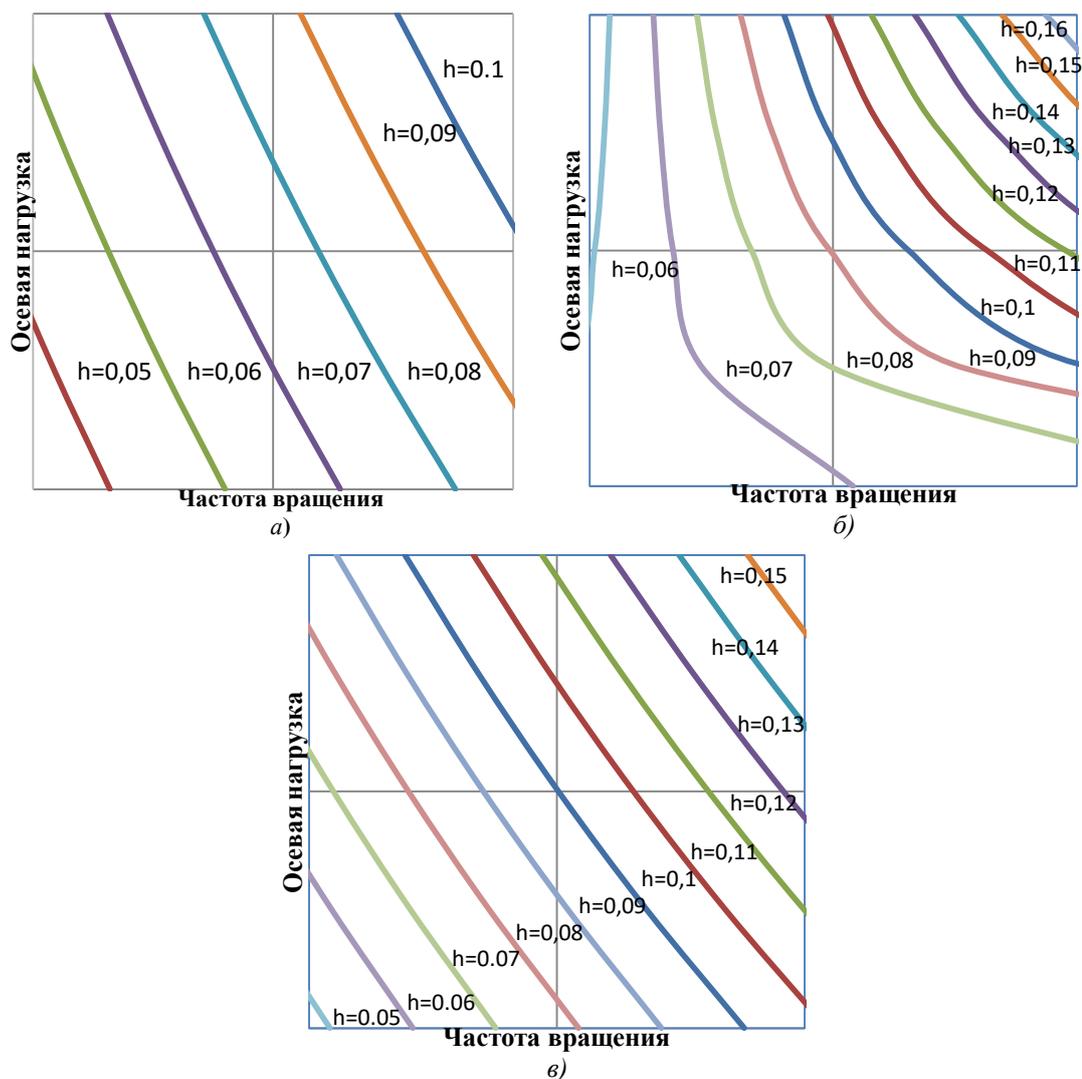


Рис. 3.5. Углубление за один оборот при разрушении долерита при: а) $E=0$ мм; б) $E=1$ мм; в) $E=2$ мм

Согласно полученным зависимостям углубления за один оборот при бурении долерита от осевой нагрузки, частоты вращения и величины эксцентриситета приложения удара сформулированы следующие выводы:

– максимальные величины углубления за один оборот при бурении долерита зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударных импульсов;

– при увеличении эксцентриситета приложения ударного импульса на интервале 0 – 1 мм наблюдается повышение углубления за один оборот на 49%, дальнейшее повышение эксцентриситета в интервале 1 – 2 мм привело к понижению углубки за один оборот на 5%;

– отмечено несколько большее влияние величины частоты вращения на формирование величины углубления за один оборот, нежели осевой нагрузки.

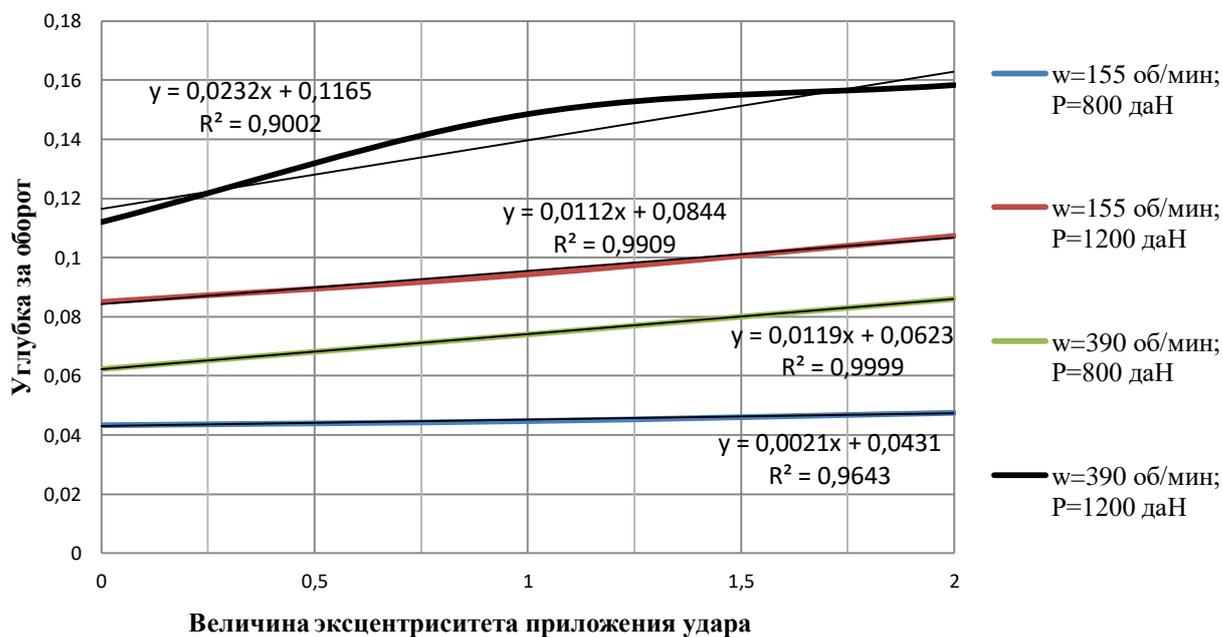


Рис. 3.6. Углубление за один оборот при разрушении долерита в зависимости от величины эксцентриситета приложения удара при различных сочетаниях режимных параметров

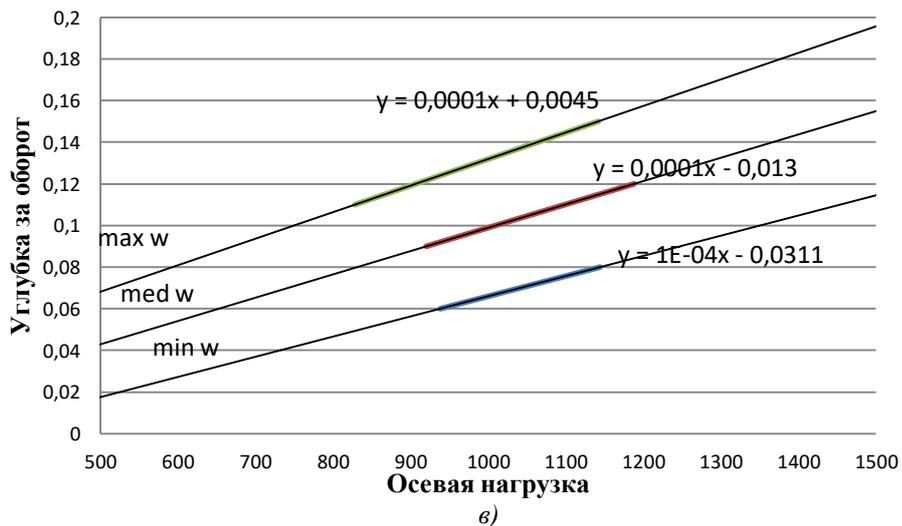
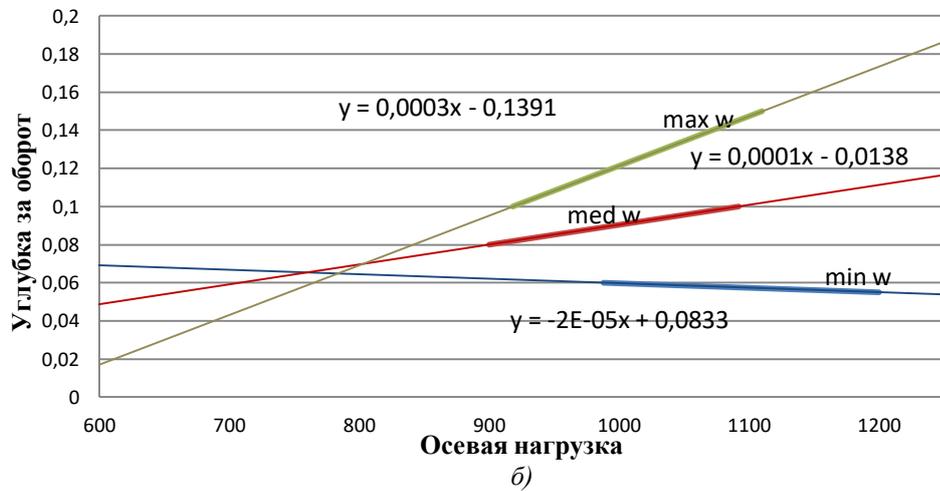
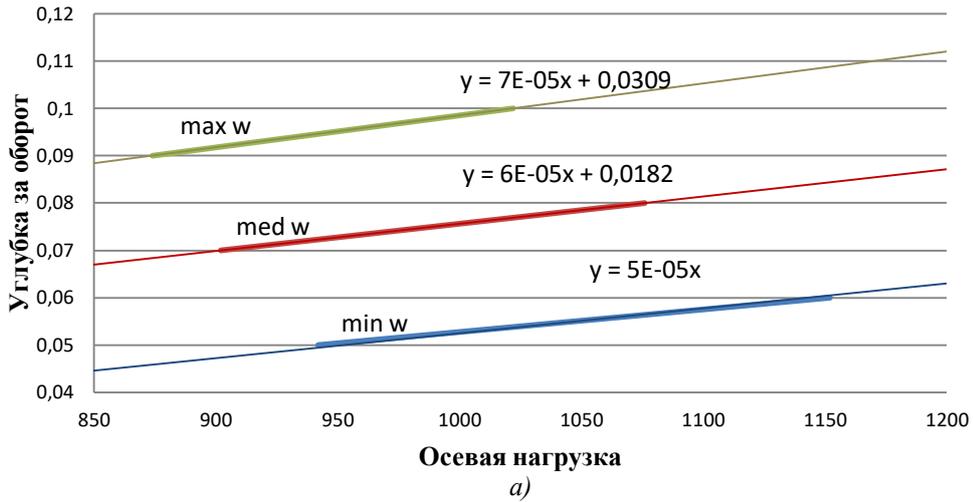


Рис. 3.7. Углубление за один оборот при разрушении долерита в зависимости от осевой нагрузки и частоты вращения при: а) $E=0$ мм; б) $E=1$ мм; в) $E=2$ мм

Согласно полученным графикам зависимости углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения при бурении долерита, представленным на

рис. 3.7, разрушение горных пород производится в зоне усталостно-поверхностного режима (так как большая величина углубления за один оборот при постоянной осевой нагрузке достигается при максимальной частоте вращения).

На основании результатов исследования разрушения блока горной породы были построены математические модели углубления за один оборот при бурении мрамора для величин эксцентриситета приложения удара, равных $E=0$ мм:

$$h_{об} = 0,12885 - 0,0106 \cdot P_{oc} + 0,04075 \cdot \omega - 0,011 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$h_{об} = 0,168625 + 0,022375 \cdot P_{oc} + 0,049225 \cdot \omega + 0,002475 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$h_{об} = 0,2 + 0,020975 \cdot P_{oc} + 0,06338 \cdot \omega + 0,00123 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Максимальные расчётные величины углубления за один оборот при бурении мрамора при максимальных режимных параметрах составляют:

- 0,0934 мм/об при центральном ударе ($E=0$ мм);
- 0,2427 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение углубления за один оборот относительно соответствующего при центральном ударе равно 160%);
- 0,2856 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение углубления за один оборот относительно соответствующего при центральном ударе равно 206%, относительно величины $h_{об}$ при $E=1$ мм – 18%).

Значение углубления за один оборот при разрушении мрамора с нанесением центральных ударных импульсов в сравнении с соответствующими значениями для долерита представляется аномально низким. Вероятно, данное обстоятельство связано с ненадлежащим выполнением эксперимента, так как при расчёте данного параметра было зафиксировано и не учтено в расчётах три аномальных значения.

Графическая интерпретация полученных зависимостей углубления за один оборот при бурении мрамора от величин осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения ударных импульсов представлены на рис. 3.8.

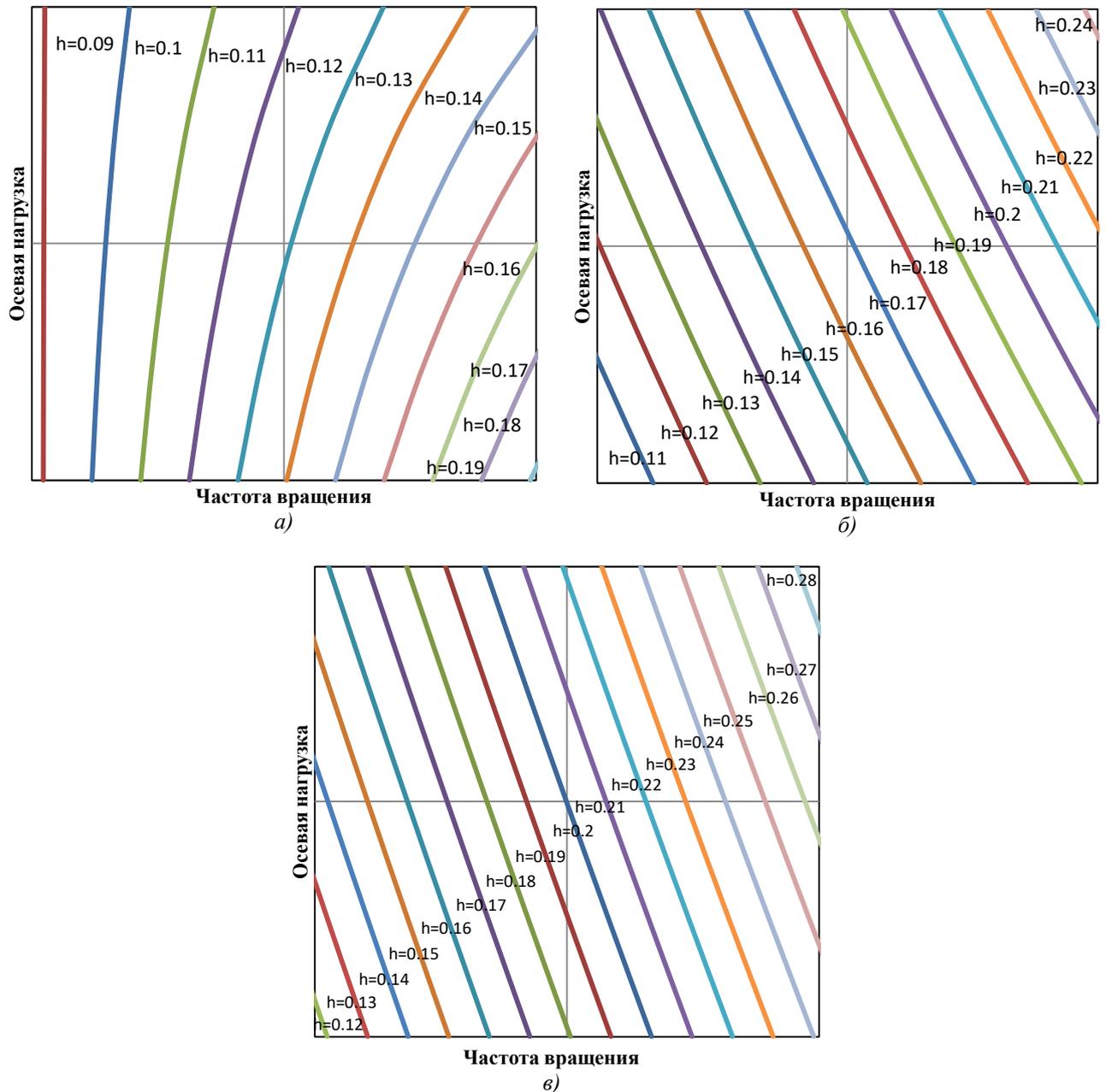


Рис. 3.8. Углубление за один оборот при разрушении мрамора при: а) $E=0$ мм; б) $E=1$ мм; в) $E=2$ мм

Результаты анализа зависимости параметра углубления за один оборот от величин осевой нагрузки, частоты вращения и эксцентриситета приложения удара (рис.3.8, рис.3.9), в общем, соответствуют результатам, полученным при

эксперименте с долеритом – максимальные величины углубления за один оборот при бурении мрамора зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударных импульсов, а также отмечено несколько большее влияние величины частоты вращения на формирование величины углубления за один оборот, нежели осевой нагрузки. Режим разрушения мрамора, сообразно режиму разрушения долерита, производится в усталостно–поверхностной зоне (рис. 3.10).

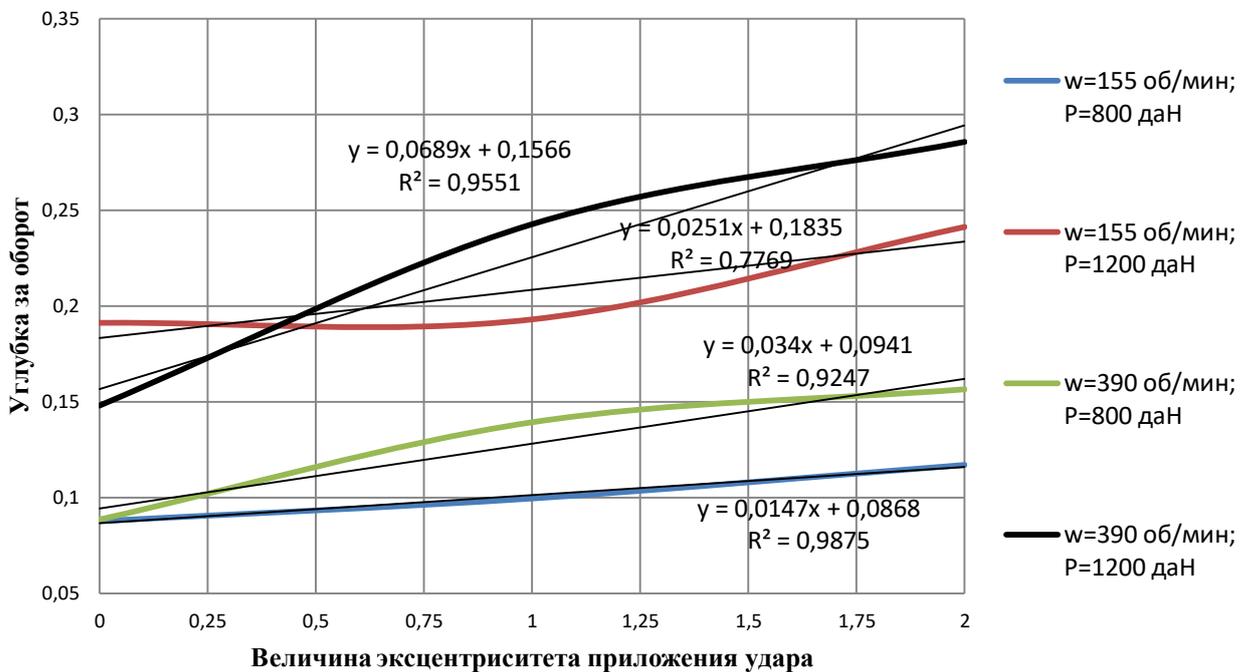


Рис. 3.9. Зависимость углубления за один оборот от величины эксцентриситета приложения удара при различных сочетаниях режимных параметров

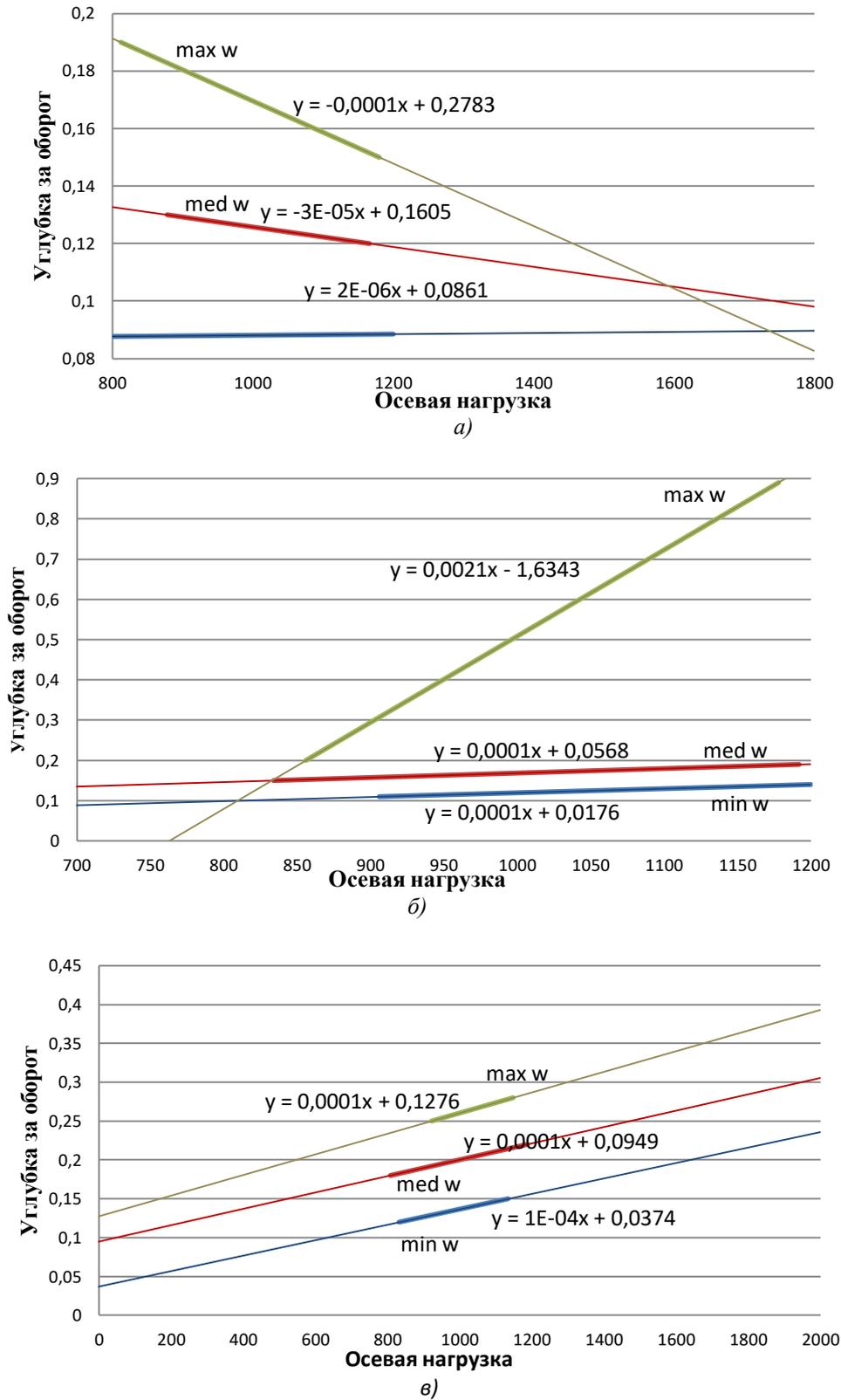


Рис. 3.10. Зависимость углубления за один оборот при разрушении мрамора от осевой нагрузки и частоты вращения при: а) $E=0$ мм; б) $E=1$ мм; в) $E=2$ мм

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Основные выводы по представленным эмпирическим данным их интерпретации и анализу, согласно проведённым исследованиям зависимости механической скорости бурения, как основного показателя производительности процесса разрушения горных пород, и углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения при различных величинах эксцентриситета приложения удара:

– максимальные величины механической скорости бурения и углубления за один оборот долерита и мрамора зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударного импульса;

– при увеличении эксцентриситета приложения ударного импульса на интервале от 0 до 2 мм без изменения технологических параметров бурения механическая скорость бурения долерита и мрамора перманентно возрастает;

– отмечено большее влияние величины осевой нагрузки на механическую скорость бурения долерита и мрамора, нежели частоты вращения снаряда, в то же время на величину углубления за один оборот несколько большее влияние оказывает частота вращения;

– интенсивность роста величины механической скорости бурения долерита и мрамора при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов увеличивается с интенсификацией режимных параметров;

– увеличение эксцентриситета приложения удара на всём диапазоне интервала от 0 до 2 мм при различных сочетаниях режимных параметров приводит к увеличению механической скорости бурения долерита и мрамора с определённой эффективностью;

– большая интенсивность роста механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения удара в интервале от 0 до 2 мм наблюдалась для имеющего более низкие прочностные характеристики

относительно долерита мрамора, независимо от реализуемого сочетания режимных параметров;

– на выбор оптимальной величины эксцентриситета приложения удара влияет тип разрушаемой горной породы – в породах твёрдых, оказывающих большое сопротивление тангенциальному смещению породоразрушающих элементов, будет более эффективно применение малых величин эксцентриситета, в то время как при разрушении пород более мягких, по тому же принципу, больший эффект будет достигнут при повышенном эксцентриситете приложения ударного импульса;

– отмечено, что и для долерита, и для мрамора, различных по физико-механическим свойствам горных пород, больший прирост механической скорости реализуется на интервале изменения эксцентриситета приложения удара от 0 до 1 мм. Также необходимо отметить, что нанесение внецентренного удара приводит к дестабилизации системы и появлению деструктивного изгибающего момента как проявлению деструктивной функции внецентренного удара, отрицательно влияющей на конструкцию. Ввиду этого, для систем с большим ударным импульсом оптимален малый эксцентриситет приложения удара, в то время как для систем с малым ударным импульсом оптимальной будет более значительная величина эксцентриситета приложения удара.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА УДАРНО– ВРАЩАТЕЛЬНОГО СПОСОБА БУРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЕМ СКВАЖИН

4.1 Разработка породоразрушающего инструмента, реализующего передачу внецентренных ударных импульсов

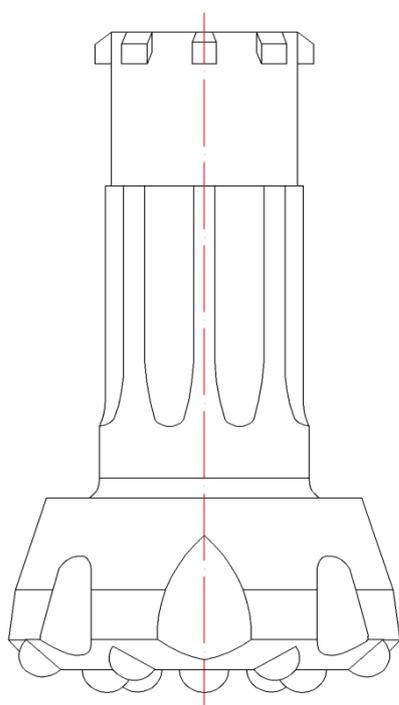


Рис.4.1 Типовое штыревое долото для ударно–вращательного бурения

На данный момент в практике буровых работ, осуществляемых ударно-вращательным способом, используются штыревые долота с различными конструкциями торцевой части. За основу для разработки породоразрушающего инструмента, реализующего механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами, взято стандартное типовое долото для ударно–вращательного бурения, используемое при работе с серийно выпускаемыми погружными пневмоударными машинами (рис. 4.1) .

Долото разрабатываемой конструкции, реализующее механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами, представлено на рис. 4.2 [94–96]. Оно оснащено торовой шайбой 1 с эксцентрично расположенным выступом 2 на своём нижнем торце, посредством которого осуществляется преобразование центрального ударного импульса, который шайба воспринимает своим верхним торцом, во внецентренный, передаваемый далее по хвостовику долота 5.

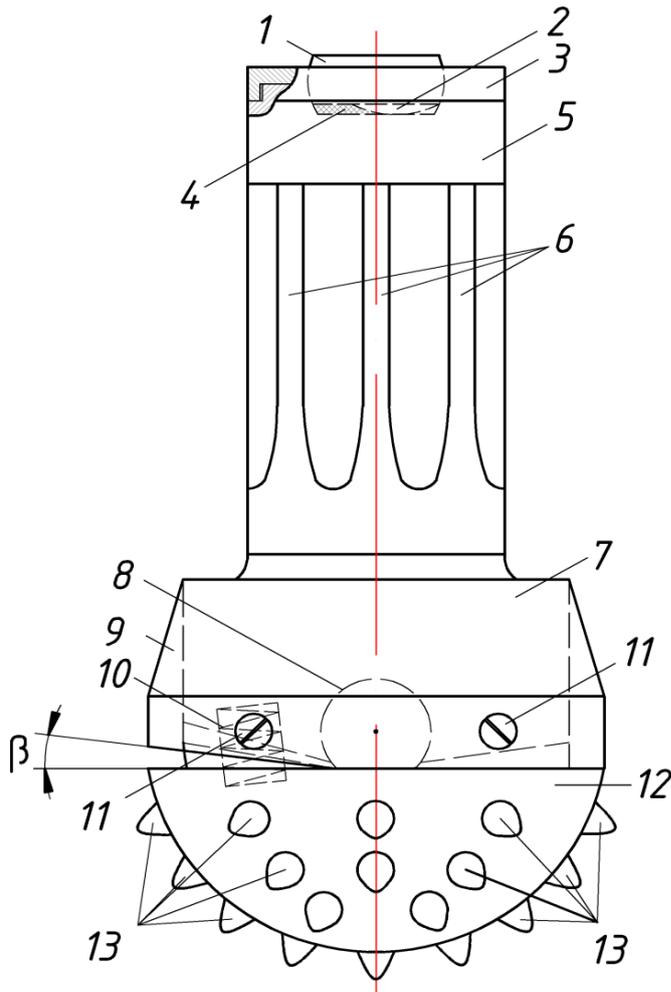


Рис. 4.2 Принципиальная схема долота для ударно-вращательного бурения разработанной конструкции

возможностью поворота относительно оси, перпендикулярной оси долота. Данное техническое решение позволит исключить деструктивное воздействие

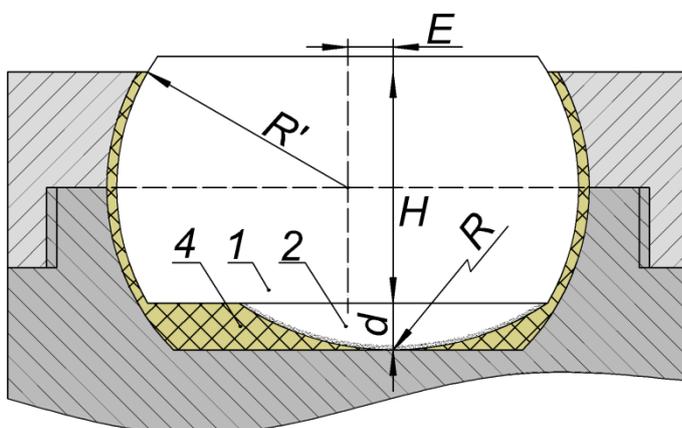


Рис.4.3 Торговая шайба бурового долота

В то же время необходимо отметить, что в вопросе внецентренной передачи ударных импульсов немаловажную роль играет деструктивный изгибающий момент, отрицательно влияющий на работоспособность и долговечность конструкции:

$$M = P \cdot E,$$

где P – сила удара, Н; E – эксцентриситет приложения удара (расположения выступа 2 на нижнем торце торовой шайбы 1), м.

С целью снятия деструктивного воздействия изгибающего момента на конструкцию разрабатываемого породоразрушающего инструмента торговая шайба выполнена с

возможностью поворота относительно оси, перпендикулярной оси долота. Данное техническое решение позволит исключить деструктивное воздействие внецентренного приложения ударных импульсов, при этом не препятствуя их передаче. Закрепление торовой шайбы на хвостовике долота производится навинчиванием фиксирующей шайбы 3 (рис. 4.2) [94].

Колебательное движение торовой шайбы вследствие передачи внецентренного ударного импульса и её отскока описывается следующим выражением:

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{r \cdot t}{2 \cdot m}} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (4.1)$$

где A , t – координаты пространства и времени, A_0 – начальная амплитуда колебаний шайбы, ω – циклическая частота колебаний, r – сопротивление среды, m – масса шайбы.

Согласно зависимости (4.1), при повышении сопротивления среды r уменьшение амплитуды собственных колебаний торовой шайбы 1 (рис. 4.3) с течением времени будет проходить интенсивнее. С целью увеличения эффективности гашения колебаний торовой шайбы долота для повышения её долговечности зазор между торовой шайбой и её посадочным местом в хвостовике долота следует заполнять упругим материалом 4 , предположительно резиной, не препятствующим отскоку шайбы при нанесении внецентренного удара [97]. Также представленное техническое решение уменьшит вероятность перекоса торовой шайбы бурового долота после некоторого числа циклов передачи ударного импульса.

Геометрическое обоснование параметров эксцентричного выступа произведено по критерию точности передачи внецентренного ударного импульса при износе выступа в ходе работы. Оптимально выполнение эксцентричного выступа на нижнем торце торовой шайбы долота в виде шарового сегмента радиусом (рис. 4.3):

$$R = \frac{\left(\sqrt{R'^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2} - E \right)^2 + d^2}{2d},$$

где R' – радиус шарового слоя торовой шайбы, м; H – высота торовой шайбы, м; E – эксцентриситет приложения удара, м; d – высота сегмента, м.

Выполнение эксцентричного выступа согласно представленной геометрической зависимости позволит добиться нанесения удара с заданной, неизменной при износе в ходе работы величиной эксцентриситета приложения точечного удара при различных величинах высоты и радиуса шарового слоя торовой шайбы и высоты сегмента.

Также с целью увеличения долговечности механизма рекомендуется повышение твёрдости поверхности выступа через поверхностное упрочнение эксцентричного выступа 2 на нижнем торце торовой шайбы 1 токами высокой частоты (рис. 4.3). При этом под твёрдой закалённой поверхностью выступа останутся вязкие незакалённые слои металла, что уменьшит хрупкость детали, повысит износостойкость и циклическую прочность.

Внецентренный ударный импульс, сообщаемый хвостовику торовой шайбой, передаётся головке долота, состоящей из подвижной 12 и неподвижной 7 частей. При этом благодаря наличию шарнирного элемента 8, связывающего подвижную и неподвижную части головки долота между собой, прохождение через конструкцию внецентренного ударного импульса вызывает поворот подвижной полусферической части головки долота в плоскости нанесения удара на некоторый, конструктивно подразумеваемый угол. Поддержание подвижной части головки долота в исходном положении и её возврат в исходное положение после окончания цикла разрушения производится с помощью упругого элемента 10.

Для разрушения пород на забое подвижная часть головки долота оснащена породоразрушающими элементами 13. Сборка подвижной и неподвижной частей головки бурового долота производится с помощью закрепления цилиндрической шайбы 9 на неподвижной части головки долота болтами 11.

Ключевым моментом реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами является тангенциальное смещение породоразрушающих элементов за счёт декомпенсации тангенциальных составляющих ударных усилий на вершинах породоразрушающих вставок. Конструкция долота на рис.4.2 за счёт шарнирного соединения частей головки

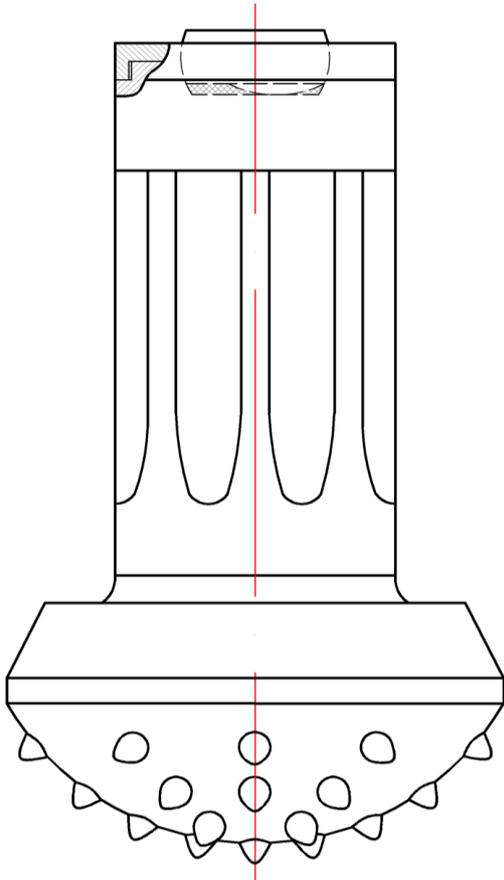


Рис. 4.4 Принципиальная схема долота разработанной конструкции для ударно-вращательного бурения горных пород высокой твёрдости

долота позволяет конструктивно увеличить тангенциальное смещение породоразрушающих элементов, что приведёт к изменению формы лунок разрушения, повышению их объёмов за счёт усиления механизма резания-скалывания при разрушении и обеспечит отделение от забоя части массива горной породы, которая испытала разрушающее действие и находится в зоне предразрушения.

Оптимальной областью применения долота для ударно-вращательного бурения разработанной конструкции, схема которого представлена на рис.4.2 – средне-твёрдые хрупкие породы, в том числе достаточно пластичные, что позволит расширить область применения ударно-вращательного способа бурения,

традиционно малоэффективного при бурении горных пород с высокой пластичностью.

В то же время если мы говорим о породах, имеющих несколько более высокие прочностные показатели, то, предположительно, при их разрушении нет необходимости в больших тангенциальных смещениях породоразрушающих элементов, в том числе ввиду их большей сопротивляемости разрушению. В таком случае конструкция долота, представленная на рис. 4.2 значительно упрощается, лишаясь шарнирного элемента, связывающего подвижную и неподвижную части головки долота, упругого элемента, цилиндрической шайбы, болтов (рис. 4.4). Головка долота становится монолитной, что положительно сказывается на её прочностных характеристиках, при этом тангенциальные

смещения породоразрушающих элементов сохраняются, имея значительно меньшую амплитуду.

4.2 Модернизация отклоняющего комплекса на базе забойной ударной машины

В ходе теоретических исследований установлено, что управление направлением скважин в условиях реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами при ударно-вращательном бурении возможно, причём с широким диапазоном величин интенсивности искривления и может производиться как с целью компенсации вызванных неоднородностью физико-механических свойств горных пород отклоняющих усилий, так и с целенаправленным набором кривизны скважины (прокладка инженерных коммуникаций под руслами рек, озёрами, различными техногенными образованиями, объединение подземных горных выработок).

С целью реализации технологии направленного бурения скважин в рамках диссертационного исследования проведена модернизация забойного ударного механизма, обеспечивающего набор кривизны за счёт приложения к породоразрушающему инструменту внецентренных ударных импульсов [98].

Сущность способа изменения направления скважины состоит в том, что внецентренное точечное приложение ударов со стороны ударника по породоразрушающему инструменту обеспечивает неравномерное разрушение забоя скважины. Неравномерность разрушения забоя, а именно различная глубина внедрения породоразрушающих элементов в горную породу создают угол перекоса забоя скважины, что и определяет направление её искривления. Таким образом, способ направленного бурения приложением внецентренных ударных импульсов состоит в том, что для набора кривизны определённого направления удары следует наносить по породоразрушающему инструменту со стороны, противоположной направлению искривления. На породоразрушающий инструмент при этом передаётся опрокидывающий момент, равный

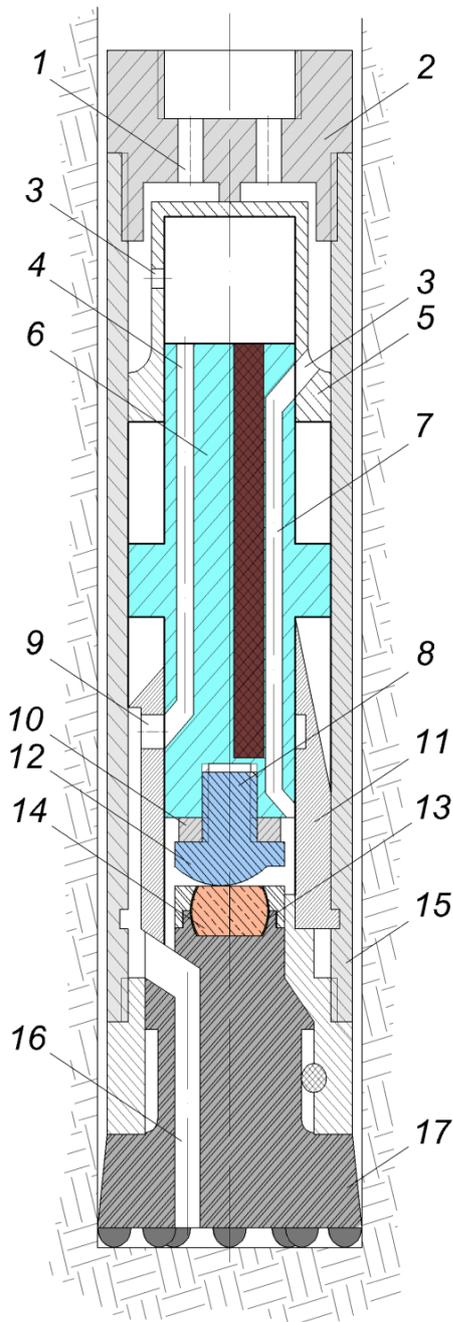


Рис.4.5 Схема конструкции отклоняющего комплекса для ударно-вращательного бурения

произведению силы удара на расстояние от оси инструмента до точки приложения удара.

Принцип работы забойного ударного механизма. Через бурильные трубы под давлением подаётся сжатый воздух, попадающий внутрь корпуса 15 через каналы 1 в переходнике 2, и затем по отверстиям 3 в гильзе 5 и каналу 7 в ударнике 6 попадает под торец пяты 8, поднимая ударник 6 в крайнее верхнее положение. Воздух, одновременно двигаясь по каналам 4 и 7, попадает через отверстие 9 в гильзе 11 и канал 16 под торец породоразрушающего инструмента 17, очищая забой скважины. Перекрытие канала 4 при перемещении ударника 6 в верхнее положение, обеспечивает рост давления воздуха над ним, вследствие чего ударник воздействует на породоразрушающий инструмент 17 посредством выступа 12, эксцентрично расположенного на нижнем торце пяты 8, зафиксированной на ударнике контргайкой 10, одновременно производя выхлоп воздуха на забой по каналу 4, отверстию 9 и каналу 16.

При этом с целью исключения деструктивного изгибающего момента передача удара осуществляется через торцовую шайбу 14, имеющую возможность поворота относительно оси, перпендикулярной оси механизма. Пространство между торцовой шайбой 14 и её посадочным местом заполнено упругим материалом 13, что позволит повысить эффективность гашения колебаний торцовой шайбы долота и уменьшит вероятность её перекоса после некоторого числа циклов передачи ударного импульса [97].

Ударник 6 размещён свободной посадкой в корпусе 15 и гильзах 5, 11 и выполнен со смещённым центром тяжести поперечного сечения для осуществления его самоориентирования относительно апсидальной плоскости скважины. На торце ударника установлена пята 8 с возможностью установочного поворота относительно оси механизма и центра тяжести ударника. На торце пяты выполнен эксцентричный выступ 12 относительно оси ударника и породоразрушающего инструмента 17 для нанесения внецентренного точечного удара. Поскольку выступ 12, расположен эксцентрично, то и удар по породоразрушающему инструменту 17 наносится эксцентричный, что способствует неравномерному разрушению забоя и обеспечивает набор кривизны.

Управление интенсивностью набора кривизны производится с помощью изменения величины эксцентриситета приложения удара, при этом интенсивность набора кривизны находится в линейной зависимости от величины эксцентриситета приложения удара. В то же время управление направлением скважины производится путём изменения точки приложения внецентренного ударного импульса относительно апсидальной плоскости (рис.4.6).

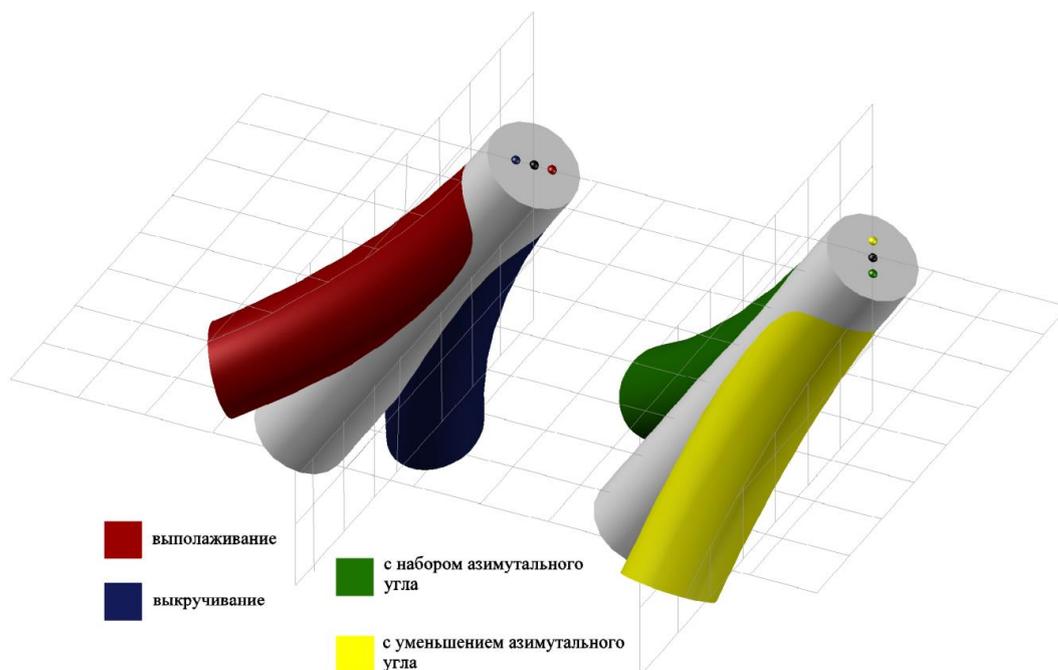


Рис. 4.6 Схема формирования нового направления скважины при реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами

С целью нанесения ударов с заданной, неизменной при износе в ходе работы величиной эксцентриситета приложения удара при различных величинах радиуса пяты и высоты сегмента радиус выступа на нижнем торце пяты описывается следующим выражением (рис.4.7):

$$R = \frac{(R - E)^2}{2d} + \frac{d}{2}$$

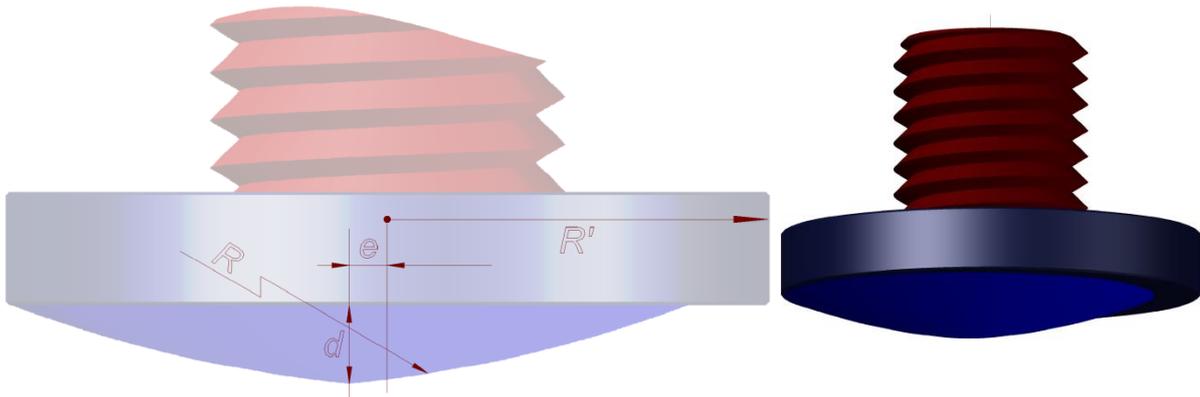


Рис. 4.7 Геометрические параметры пяты с внецентренно расположенным выступом

Вследствие точечного удара к породоразрушающему инструменту, вставкам и горной породе передаётся волна напряжений, величина которых определяется радиусом, равным удалению породоразрушающей вставки от точки приложения удара. Таким образом, при центральном ударе под породоразрушающими вставками, удалёнными от центра торца породоразрушающего инструмента на равное расстояние, напряжения равны, а при внецентренном ударе под этими же вставками напряжения соответственно не равны и обратно пропорциональны радиусам, что создаёт условия для получения лунок разрушения разного размера и создаёт условия для искривления скважины.

Ключевым аспектом работоспособности забойного механизма является самоориентация ударника со смещённым центром масс поперечного сечения в наклонных скважинах по принципу работы самоориентаторов типа ОП. К характерным особенностям работы ударника в забойной машине можно отнести отсутствие контакта со стенками скважины, вращение корпуса забойной машины

(с частотой вращения до 2 с^{-1}), а также необходимость ориентации в условиях ударно-вибрационного характера работы.

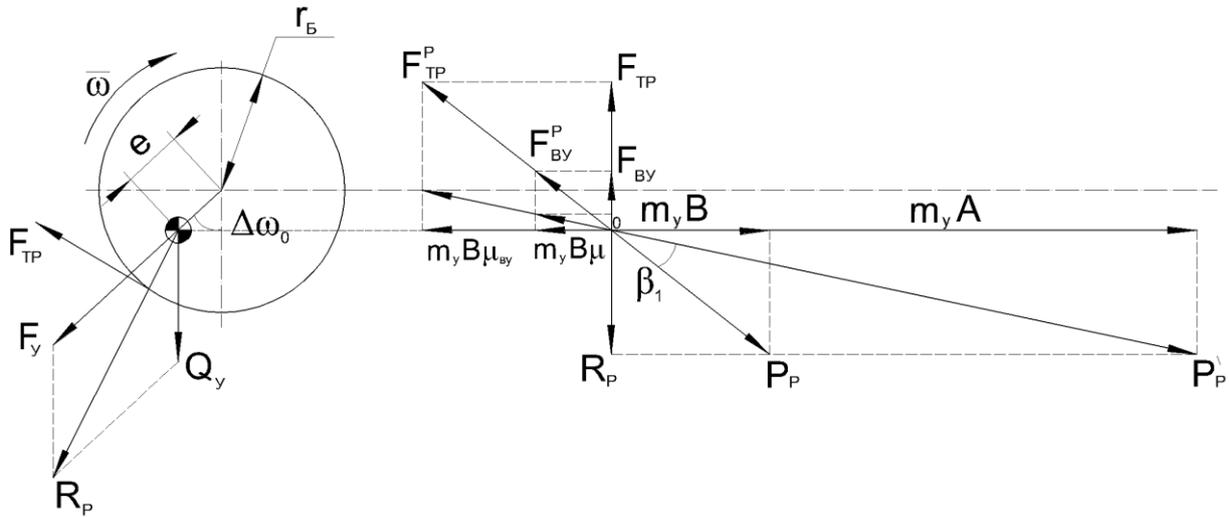


Рис.4.8 Схема для определения условий и погрешности ориентирования ударника со смещённым центром тяжести в ударной забойной машине

На рис.4.8 приведена схема для оценки соотношения сил, обеспечивающих ориентацию ударника и дестабилизирующих его. В процессе работы на ударник действуют момент смещения, ориентирующий его в процессе работы в положение, соответствующее нахождению центра масс поперечного сечения в апсидальной плоскости, и момент трения, препятствующий смещению и формирующий погрешность ориентирования ударника со смещённым центром масс. Момент смещения $M_{см}$, согласно схеме будет равен:

$$M_{см} = Q_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \Delta \omega_0, \quad (4.2)$$

где Q_y – вес ударника, даН; θ – зенитный угол скважины, градус; $\Delta \omega_0$ – угол отклонения центра тяжести от апсидальной плоскости, градус.

Момент трения $M_{тр}$ определяется как сумма моментов трения от действия веса ударника, центробежной силы и определяется зависимостью:

$$M_{тр} = Q_y \cdot R_B \cdot \mu^* \cdot \left(\sin \theta + \frac{E \cdot \omega^2}{g} \right), \quad (4.3)$$

где R_B – радиус ударника, м; ω – частота вращения забойной ударной машины, c^{-1} ; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; μ^* – коэффициент трения скольжения на контакте ударник – корпус забойной машины в условиях ударно–вибрационного характера работы.

Согласно зависимостям (4.2) – (4.3) погрешность ориентирования ударника:

$$\Delta\omega_0 = \arcsin \left(R_B \cdot \mu^* \cdot \left(\frac{1}{E} + \frac{\omega^2}{g \cdot \sin \theta} \right) \right).$$

Для оценки погрешности ориентирования ударника $\Delta\omega_0$ нужно определить μ^* , учитывая ударно–вибрационный характер работы забойной машины и ускоренное движение ударника, периодически разгоняющегося из положения, когда скорость его движения равна нулю, до максимальной скорости, предшествующей удару. Согласно схеме на рис.4.8 угол встречи вектора ударной нагрузки с породоразрушающим инструментом определяется углом $\vartheta = 180 - \beta_1$, где β_1 – угол между направлением движения ударника и направлением результирующего импульса. Согласно работам Я.Г. Пановко, И.И. Блехмана [99–101] коэффициент трения виброударной системы определяется зависимостью:

$$\mu_{BV} = \frac{u}{\sqrt{v^2 + u^2 + 2 \cdot v \cdot u \cdot \cos \vartheta}} \cdot \mu,$$

где v , u – скорости движения ударника и корпуса забойной машины, м/с; μ – коэффициент трения

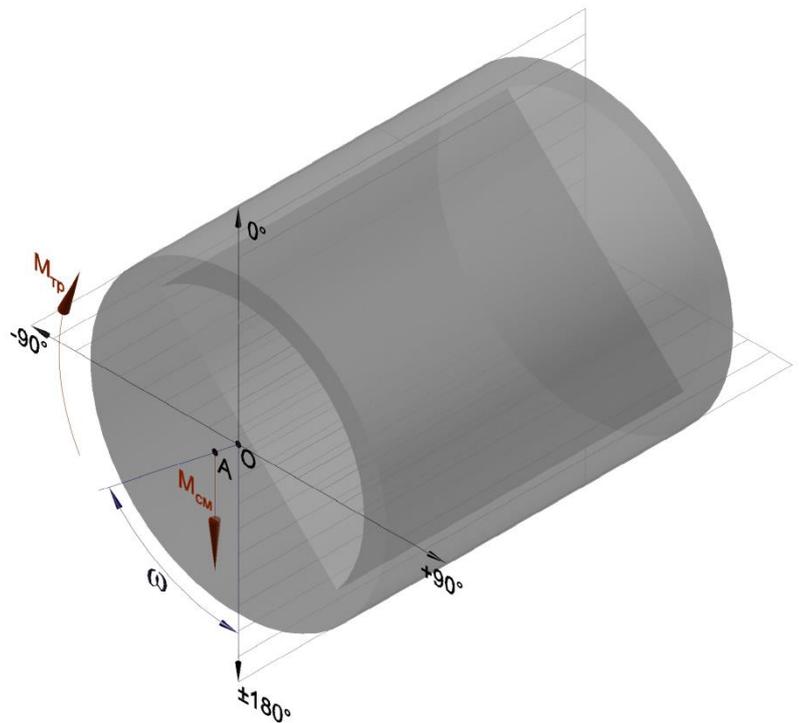


Рис.4.9 Схема, поясняющая процесс формирования погрешности ориентирования ударника со смещённым центром масс

скольжения между ударником и корпусом забойной машины в состоянии покоя.

Снижение коэффициента трения от μ до $\mu_{\text{вУ}}$ приводит к уменьшению силы трения $m_{\text{у}}V\mu$ до $m_{\text{у}}V\mu_{\text{вУ}}$ и, соответственно, $F_{\text{тр}}$ до $F_{\text{вУ}}$, а результирующей силы трения $F_{\text{тр}}^p$ до $F_{\text{вУ}}^c$ (рис.4.8). Скорость движения корпуса определяется зависимостью:

$$u = T_p \cdot \frac{P_p \cdot g}{m_k g + P_{\text{oc}}},$$

где T_p – время цикла работы забойной машины, с; P_p – давление рабочего хода ударника, Па; m_k – масса корпуса забойной машины, кг.

Вследствие удара ударник испытывает перегрузку, равную отношению ускорения при ударе к ускорению разгона ударника до скорости удара. Время удара – величина, определяемая размерами, формой соударяющихся частей ударника и породоразрушающего инструмента, скоростью прохождения волны ударного импульса в материале, а также скоростью деформации и разрушения горной породы. Время удара составляет предельные значения $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ с. Ускорение торможения, испытываемое ударником, определяется из соотношения скорости ударника перед ударом v , длительности удара $t_{\text{уд}}$ и скорости ударника после удара. Принимая во внимание малую величину скорости ударника при ударе, ускорение торможения:

$$A = \frac{v}{t_{\text{уд}}}.$$

Ускорение разгона ударника до скорости, предшествующей удару соответственно

$$B = \frac{v}{t_{\text{ц}}},$$

где $t_{\text{ц}}$ – время движения ударника из верхней точки рабочего хода в нижнюю, с.

Время $t_{\text{ц}}$ определяется частотой ударов $\omega_{\text{уд}}$, реализуемых забойной машиной, и составляет величину $\omega_{\text{уд}} / 120$ с. Для $\omega_{\text{уд}} = 1200$ ударов в минуту, $t_{\text{ц}}$ может составить 0,05–0,1 с.

Таким образом, коэффициент трения при ударе уменьшится пропорционально снижению силы трения и составит следующую величину:

$$\mu^* = \frac{\mu_{ey} \cdot t_{y\partial}}{t_{\text{ц}}},$$

а результирующий коэффициент трения равен

$$\mu^* = \frac{u \cdot \mu \cdot t_{y\partial}}{t_{\text{ц}} \cdot \sqrt{v^2 + u^2 + 2 \cdot v \cdot u \cdot \cos \vartheta}}.$$

Выражение для расчёта погрешности ориентирования ударника со смещённым центром масс в условиях ударно-вибрационного характера его работы получит окончательный вид:

$$\Delta\omega_0 = \arcsin \left(\frac{u \cdot \mu \cdot t_{\text{уд}} \cdot R_{\text{Б}}}{t_{\text{ц}} \cdot \sqrt{v^2 + u^2 + 2v \cdot u \cdot \cos \vartheta}} \cdot \left(\frac{1}{E} + \frac{\omega^2}{g \cdot \sin \theta} \right) \right).$$

Анализ полученной зависимости показывает, что при работе ударника достигается многократное снижение коэффициента трения. Учитывая, что и коэффициент трения покоя пары «ударник – корпус забойной машины» невелик (0,05 – 0,07), можно сделать вывод о возможности использования забойной ударной машины – отклонителя и при более высоких частотах вращения, в сравнении с частотой вращения современных пневмоударных машин.

Повышение точности ориентирования ударника со смещённым центром масс может осуществляться покрытием из твёрдого пористого металла наружной поверхности ударника и внутренней поверхности верхней и нижней гильз, а также внутренней поверхности корпуса [98]. Данное покрытие позволит дополнительно уменьшить момент трения между внутренней поверхностью корпуса, верхней и нижней гильз и наружной поверхностью ударника, а также позволит более эффективно применять смазывающие добавки, концентрирующиеся в порах на поверхности конструктивных элементов забойной машины–отклонителя.

Способ направленного бурения приложением внецентренных ударных импульсов может применяться при пневмоударном бурении, как с отбором керна,

так и без него. При этом возможно получение искривления с высокой механической скоростью и с плавным набором кривизны. Данный способ открывает возможность бурения скважин в анизотропных и перемежающихся по твёрдости горных породах с минимальной интенсивностью искривления с высокой производительностью, так как исключает применение технических средств корректировки направления скважины путём компенсации отклоняющих сил, изгибающего момента, действующих со стороны забоя и формирующих направление скважины. Компенсация названных сил и моментов может осуществляться ориентацией забойной ударной машины – отклонителя в направлении, противоположном направлению естественного искривления. Эксцентриситет приложения удара может определяться экспериментально, в том числе непосредственно при проходке скважин, а также путём проведения теоретических расчётов.

Область применения представленного отклоняющего комплекса – наклонные скважины различного целевого назначения с зенитным углом более 3° . Данное ограничение связано с принципом ориентации пяты с эксцентрично расположенным на её нижнем торце выступом, расположенной на ударнике со смещённым центром масс поперечного сечения и принимающим положение, соответствующее нахождению центра масс в апсидальной плоскости скважины под действием силы тяжести.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Разработаны принципиальные конструкции породоразрушающего инструмента для повышения производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин без увеличения затрат энергии, реализующие механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами, в том числе с конструктивно увеличенным тангенциальным смещением породоразрушающих элементов для разрушения пластичных горных пород средней твёрдости, что расширяет оптимальную область применения этого способа бурения скважин.

2. Повышение эффективности и ресурса инструмента возможно путём исключения деструктивного изгибающего момента, возникающего при передаче ударного импульса с эксцентриситетом с помощью использования в конструкции торовой шайбы, выполненной с возможностью поворота относительно оси, перпендикулярной оси долота.

3. Повышение ресурса торовой шайбы возможно посредством заполнения пространства между ней и корпусом долота упругим материалом, не препятствующим отскоку торовой шайбы при нанесении внецентренного ударного импульса благодаря улучшенному гашению собственных колебаний торовой шайбы и уменьшению вероятности её перекоса после некоторого количества циклов передачи ударного импульса.

4. Нанесение внецентренных ударных импульсов постоянной величины при износе в процессе работы механизма, а также при различных величинах высоты и радиуса шарового слоя торовой шайбы и высоты сегмента, возможно с помощью выполнения эксцентричного выступа на нижнем торце торовой шайбы в виде

шарового сегмента радиусом $R = \frac{\left(\sqrt{R'^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2} - E \right)^2 + d^2}{2d}$, где R' – радиус шарового слоя торовой шайбы, м; H – высота торовой шайбы, м; E – эксцентриситет приложения удара, м; d – высота сегмента, м (рис. 4.3).

5. Повышение точности ориентирования ударника со смещённым центром масс посредством уменьшения момента трения между внутренней поверхностью корпуса, верхней и нижней гильз и наружной поверхностью ударника возможно с помощью покрытия из твёрдого пористого металла наружной поверхности ударника и внутренней поверхности верхней и нижней гильз, а также внутренней поверхности корпуса, что также позволит более эффективно применять смазывающие добавки, концентрирующиеся в порах на поверхности конструктивных элементов забойной машины-отклонителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершённой научно–исследовательской работой, в которой на основании экспериментальных и теоретических исследований обоснованы конструкции породоразрушающего инструмента для повышения производительности процесса бурения и конструкции забойного отклоняющего комплекса для управления направлением скважин в условиях ударно–вращательного способа бурения скважин приложением внецентренных ударных импульсов.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключается в следующем:

1. По совокупности характерных признаков механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами является новым – декомпенсация тангенциальных усилий на вершинах породоразрушающих вставок приводит к формированию суммарной тангенциальной составляющей ударного импульса, оказывающей влияние на форму и объёмы лунок разрушения, прямо пропорциональной силе удара и эксцентриситету приложения ударного импульса, при этом обратно пропорциональная высоте породоразрушающего инструмента.

2. Установлено два возможных варианта реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами:

– повышение производительности процесса ударно–вращательного бурения скважин без увеличения энергозатрат путём дезориентированного приложения ударных импульсов с эксцентриситетом, причём для каждого сочетания физико–механических свойств горной породы и параметров ударной системы оптимальная величина эксцентриситета будет индивидуальна;

– изменение направления скважин в условиях ударно–вращательного бурения путём нанесения ориентированной внецентренной ударной нагрузки, с нанесением ударов со стороны, противоположной направлению искривления.

3. Теоретическими исследованиями установлена прямая зависимость величины тангенциального усилия, действующего в плоскости забоя от величины эксцентриситета приложения удара вследствие нанесения внецентренного ударного импульса и неравенства тангенциальных сдвиговых усилий на вершинах породоразрушающих вставок.

4. Увеличение эксцентриситета приложения ударного импульса в диапазоне 0 – 2 мм без изменения технологических параметров приводит к перманентному росту механической скорости бурения долерита и мрамора, причём интенсивность роста при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов увеличивается с интенсификацией режимных параметров.

5. При внецентренном разрушении долерита и мрамора увеличение эксцентриситета приложения удара от 0 до 2 мм при различных сочетаниях режимных параметров приводит к увеличению механической скорости бурения, причём большая интенсивность роста механической скорости, независимо от реализуемого сочетания режимных параметров, зафиксирована для мрамора, имеющего меньшую твёрдость и большую пластичность по отношению к долериту.

6. Экспериментальными исследованиями механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами установлено повышение механической скорости бурения долерита при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов в интервале 0 – 2 мм на 41%, мрамора при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов в том же интервале на 93%, при этом для различных по физико-механическим свойствам долерита и мрамора наибольший прирост механической скорости зафиксирован на интервале изменения эксцентриситета приложения удара от 0 до 1 мм.

7. Использование торовой шайбы, имеющей возможность поворота относительно оси, перпендикулярной оси породоразрушающего инструмента, позволяет исключить деструктивный изгибающий момент при передаче внецентренного ударного импульса, за счёт чего повысить эффективность и ресурс работы механизма.

8. Установлена оптимальная взаимосвязь геометрических характеристик торца ударных элементов, передающих внецентренные ударные импульсы, позволяющая осуществлять их нанесение с постоянной величиной эксцентриситета с учётом износа в процессе работы механизма.

9. Реализация механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами с целью повышения производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин без увеличения энергозатрат возможна применением породоразрушающего инструмента специальной конструкции, в том числе с конструктивно увеличенным тангенциальным смещением породоразрушающих элементов для разрушения пластичных горных пород средней твёрдости, что расширяет оптимальную область применения ударно-вращательного способа бурения скважин.

10. Применение покрытия внутренней поверхности корпуса, верхней и нижней гильз и наружной поверхности ударника забойного отклоняющего комплекса из твёрдого пористого металла позволит повысить точность проведения работ по изменению направления проведения скважин через уменьшение момента трения, а также позволит более эффективно применять смазывающие добавки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kahraman S. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999. – V. 36. – № 7. – P. 981–989.
2. Tatsuro M. Drilling rate of rotary percussion drill bits and rock characteristics // Journal of Terramechanics, 1988. – V. 25. – № 3. – P. 191–199.
3. Зварыгин В.И. Бурение геологоразведочных скважин. Ударно-вращательное бурение: Учеб. пособие / ГАЦМиЗ. – Красноярск, 2001. – 184 с.
4. Куликов И.В., Воронов В.Н., Николаев И.И. Пневмоударное бурение разведочных скважин. М.: Недра, 1977. 196 с.
5. Нескоромных В.В. Бурение скважин: учеб. пособие / В.В. Нескоромных. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 400 с.
6. Рябчиков С.Я., Храменков В.И., Брылин В.И. Технология и техника бурения геологоразведочных и геотехнологических скважин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 514 с.
7. Соловьев Н.В., Кривошеев В.В., Башкатов Д.Н. и др. Бурение разведочных скважин. М.: Высшая школа, 2007. — 904 с.
8. Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск: Изд во Томского политехнического университета, 2011. – 367 с.
9. Васильев А.Н., Шишляев В.В., Кирильченко А.В. Внедрение ударно-вращательного способа бурения и эффективных методов геолого-промысловых исследований при разведке метаноугольных месторождений // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 7. – С. 45–49.
10. Калинин, А. Г. Разведочное бурение: учебник для вузов / А. Г. Калинин, О. В. Ошкордин, В. М. Питерский, Н. В. Соловьев. – М.: Недра – Бизнесцентр, 2000. – 748 с.

11. Киселев А.Т., Крусир И.Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. М., Недра, 1982. 103 с.
12. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учебное пособие. – Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2015. – 396 с.
13. Нескоромных, В. В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: учеб. пособие / В. В. Нескоромных. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 294 с.
14. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: в 2 т. / Под ред. Е.А. Козловского. – Л.: Недра, 1984. – 950 с.
15. Сулакшин С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 129 с.
16. Sapińska-Śliwa A., Wiśniowski R., Korzec M. Rotary - percussion drilling method - historical review and current possibilities of application // AGH Drilling, oil, gas, – 2015. – V. 32. – № 2. – P. 313–323.
17. Zhang, X., Zhang, S., Luo Y., Wu D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer—an innovative rotary-percussion drilling tool // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019. – V. 173, – P. 362–370.
18. Граф, Л.Э. Техника и технология гидроударного бурения / Л.Э. Граф, А.Т. Киселев, Д.И. Коган. – М.: Недра. 1975. – 144 с.
19. Исследование процесса разрушения горных пород и производительности ударно-вращательного бурения при наложении высокочастотных ударов (с целью разработки рекомендаций по конструктивным и эксплуатационным параметрам высокочастотных гидроударных машин: Отчет о НИР: Тема 2–37/74 / руководители С.С. Сулакшин, В.П. Рожков. – Томск: ТПИ, 1976. – 99 с.
20. Климентов М.Н., Тиль В.И. Сооружение скважин ударно-вращательным способом бурения. – М.: Недра, 1986, 96с.
21. Лиманов Е.Л. Направленное бурение гидроударниками/ Е.Л. Лиманов, К.Н.. Абдильнов. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 120 с.

22. Танайно А. С. Состояние и перспективы ударно-вращательного бурения / А.С. Танайно, А.А. Липин // ФТПРПИ. 2004. № 2. С.82-93.
23. Depouhon A., Vincent D., Detournay E. Numerical simulation of percussive drilling // International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics, 2015. – V. 39. – № 8. – P. 889–912.
24. Kivade S.B., Murthy Ch.S., Vardhan H. Laboratory investigations on percussive drilling // Journal of The Institution of Engineers. – 2013. – V. 94. – № 2. – P. 81–87.
25. Yang Y., Liao H., Xu Y. Theoretical investigation of the energy transfer efficiency under percussive drilling loads // Arabian Journal of Geosciences, 2019. – V. 12. – № 5. – P. 1–8.
26. Ганджумян Р.А. Практические расчёты в разведочном бурении. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. 253 с.
27. Кудряшов, Б.Б. Бурение разведочных скважин с применением воздуха / Б.Б. Кудряшов. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
28. Опыт пневмоударного бурения с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) / В.П. Певзнер, И.И. Николаев, И.В. Куликов, В.Я. Климов. – Труды ЦНИГРИ, 1981, вып. 164. – С. 40-51.
29. Павлов Е.В., Павлова М.А. Анализ и выявление путей совершенствования процесса пневмоударного бурения // Качество в производственных и социально-экономических системах / сборник научных трудов 4-й Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет, 2016. – С. 271–274.
30. Aalizad S.A., Farshad R. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks – a case study // Archives of Mining Sciences. – 2012. – V. 57. – № 3. – P. 715–728.
31. Abu Bakar, M.Z., Butt, I.A., Majeed, Y. Penetration Rate and Specific Energy Prediction of Rotary–Percussive Drills Using Drill Cuttings and Engineering Properties of Selected Rock Units // Journal of Mining Science, 2018. – V. 54. – № 2. – P. 270–284.

32. Hoseinie S.H., Ataei M., Aghababaie A. A laboratory Study of Rock Properties Affecting the Penetration Rate of Pneumatic Top Hammer Drills, *J. Min. and Env.*, 2014, vol. 5, pp. 25–34.
33. Huang Z., Fan Y., We, Z., Tan L., Bu, Y. Emulation study on rock-breaking mechanism of percussion-rotary bit // *Journal of Southwest Petroleum University*, 2010. – V. 32. – № 1. – P. 148–150.
34. Kaihao W., Zhewei Y. The Numerical Research on Rock Breaking and Rising Mechanism of Rotary-Percussive Drilling // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2019. – V. 44. – №12. – P. 10561–10580.
35. Karasawa H., Suzuki K., Takahashi K. Rock Drillability in Rotary-Percussion Drilling // *Journal of MMIJ*, 2008. – V. 125. – № 1. – P. 13–20.
36. Liu W., Zhu X., Li B. The rock breaking mechanism analysis of rotary percussive cutting by single PDC cutter // *Arabian Journal of Geosciences*, 2018. – V. 11. – № 9.
37. Luiz F. P. Franca. A bit–rock interaction model for rotary–percussive drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011. – V. 48. – № 5. – 827–835.
38. Oparin, V.N., Timonin, V.V., Karpov, V.N. Quantitative estimate of rotary–percussion drilling efficiency in rocks // *Journal of Mining Science*, 2016. – V. 52. – № 6. – P. 1100–1111.
39. Saadati M. Granite rock fragmentation at percussive drilling – experimental and numerical investigation // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2014. – V. 38. – № 8. – P. 1–33.
40. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2013. – V. 37. – № 3. – P. 309–324.
41. Selmer-Olsen R., Blindheim O.T. On the Drillability of Rock by Percussive Drilling, *Proceedings of the 2nd Congress of the Int. Society for Rock Mechanics*, Belgrade, Yugoslavia, 1970, pp. 65–70.

42. Shadrina A., Kabanova T., Krets V., Saruev L. A Study of Specific Fracture Energy at Percussion Drilling // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2014. – V. 21. – № 1. – P. 1–6.

43. X. Xiaohua, Z. Haiyan, L. Qingyou, F. Yongtao, W. Degui and C. Bo, "A 3D FEM Methodology for Rock Breakage in Rotary-Percussive Drilling," 2010 International Conference on Computational and Information Sciences, Chengdu, 2010, P. 112–115.

44. Zhu H., Liu Q., Deng J. Rock-breaking mechanism of rotary-percussive drilling // Journal of Basic Science and Engineering, 2012. – V. 20. – № 4. – P. 622–631.

45. Куличихин Н.И., Радонов Н.С. Геометрические параметры ореола – поверхностного разрушения породы динамической нагрузкой. – Известия вузов. Геология и разведка. 1961, №1, с. 117 – 125.

46. Опарин В.Н., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 60–74.

47. Протасов Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю. И. Протасов. – М.: Недра, 1985. – 242 с.

48. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород: учебник для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

49. Соколинский В.Б. Исследование взаимодействия инструмента и горной породы при ударном разрушении. М., Изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1967, 61 с.

50. Спивак А. И. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / А. И. Спивак, А. Н. Попов. – М.: Недра, 1986. – 208 с.

51. Тимонин В.В., Карпов В.Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно–вращательном бурении скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 172–176.

52. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. М., Гостоптехиздат, 1950, 210 с.
53. Эйгелес Р. М. Разрушение горных пород при бурении / Р. М. Эйгелес. – М.: Недра, 1970. – 232 с.
54. Куликов И.В. Бурение геологоразведочных скважин погружными пневмоударниками. М., Недра, 1964. – 87 с.
55. H. Kang, J. Park, J. Cho, J. Jang, K. Kim, J. Lee Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency // *Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2018. – V. 232. – № 16. – P. 2887–2898.
56. Bu C.G. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling // *Journal of Earth Science*. –2009. – V. 20. – № 5. – P.868–878.
57. Bu C.G., Qu Y.G., Liu B.L. Dynamic modeling and simulation of DTH hammer // *Proc. of 16th CIRP International Design Seminar*. – Kananaskis, Canada, 2006. – P. 810–813.
58. Eremenko, V.A., Karpov, V.N., Timonin, V.V., Barnov, N.G., and Shakhtorin, I.O., Basic Trends in Development of Drilling Equipment for Ore Mining with Block Caving Method, *J. Min. Sci.*, 2015, vol., no. 6, pp. 1113–1125.
59. Kim D.J., Oh J.Y., Cho J.W. Design study of impact performance of a DTH hammer using PQRS and numerical simulation // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019. – V. 33. – № 6. – P. 5589-5602.
60. Kim, J., Myung, H. Embedded drilling system using rotary-percussion drilling // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019. – V. 751. – P. 213–219.
61. Липин А.А. , Тимонин В.В., Танайно С.А. Современные погружные ударные машины для бурения скважин // *Каталог-справочник. Горная техника*. – СПб, 2006. – С. 116-123.
62. Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.Е., Попелюх А.И., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 5. – С. 157-167.

63. Тимонин В.В. Погружные пневмоударники для подземных условий отработки месторождений // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 2 (111). – С. 13-17.

64. Klishin V.I., Timonin V., Kokoulin D.I. Enhancing down-the-hole air hammer capacity in directional drilling // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2017. – V. 84. – № 1. P. 1–6.

65. Данилов Б.Б., Воротников Д.А. Критерии выбора принципиальной схемы погружного пневмоударного механизма при направленном бурении скважин // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ / Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2014. – Т. 2. – №4. – С. 157–162.

66. Нор В.В. Опыт направленного бурения в Крамкенской ГРЭ / В.В. Нор. – Колыма. – №2. – с. 23–24.

67. Шкурко А.К. Бурение скважин забойными ударными машинами. – Л.: Недра, 1982. – 168 с.

68. Жерлов В.Д. Пневмоударное бурение в условиях объединения «Сосновгеология» // Техн. и технол. геол-развед. работ: орг. пр-ва. Отеч. произв. опыт: Экспресс информация ВНИИ экон. минер. сырья и геол-развед. работ. (ВИЭМС). – 1987. – Вып. 5. – С. 1–7.

69. Нескоромных В.В., Костин Ю.С., Захаров И.Б. Способ проводки наклонного ствола скважины с использованием пневмоударного механизма. Авторское свидетельство СССР № 1633074. Опубликовано 07.03.1991.

70. Устройство для направленного бурения ударно-вращательным способом [Текст] : пат. 2039185 Рос. Федерация : МПК⁷ E 21 B 7/00, E 21 B 7/06 / Федоров В.В., Липин А.А., Нескоромных В.В., Костин Ю.С. ; заявитель и патентообладатель Иркутский политехнический институт – № 92001971/03 ; заявл. 23.10.1992 ; опубл. 09.07.1995.

71. Чещин Д.О. Обоснование компоновки и параметров управляемого пневмопробойника : автореф. дис. на соискание учёной степени к.т.н : 05.05.06 / Чещин Дмитрий Олегович. – Новосибирск, 2018. – 24 с.

72. Жуков И.А., Смоляницкий Б.Н., Тимонин В.В., Примычкин А.Ю., Шахторин И.О. Повышение производительности погружных пневмоударных машин для бурения шпуров и скважин в горной породе // *Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы I международной научно-практической конференции / СПбФ НИЦ МС, 2018. – С. 27–31.*

73. Леонов С.О., Нескоромных В.В. Пути повышения эффективности ударно-вращательного бурения // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 397–403.*

74. C. Song, J. Chung, J. Cho, Y. Nam Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement // *Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 2018. – P. 1–13.*

75. Хруцкий А.А. Громадский А.С. Перспективы снижения износа штыревого бурового инструмента. Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – №2. – С.71–73.

76. Пат. 2528316 Российская Федерация, МПК E21B 6/00, E21B 4/06 Способ бурения скважин / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, П.Г. Петенев, А.В. Коротков : заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» – № 2013118829/03; заявл. 23.04.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл.№25.

77. Головченко А.Е. Использование внецентренной ударной нагрузки для повышения производительности процесса бурения и управления направлением скважины // *Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть II / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2018. С.262.*

78. Головченко А.Е. Исследование зависимости угла перекоса забоя от эксцентриситета приложения удара // *Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXII международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых учёных. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2018. Т. 2. С. 497–499.*

79. Головченко А.Е. Исследование области применения отклонителя ударно-вращательного типа для управления направлением скважин / А.Е.

Головченко // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Том II / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – Т. 2. – С. 469–471.

80. Головченко А.Е. Исследование эффективности разрушения горных пород инструментом со смещённым центром приложения силы / А.Е. Головченко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Том II; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – Т. 2. – С. 715–716.

81. Головченко А.Е. Разработка отклонителя для управления направлением скважин при ударно-вращательном бурении / А.Е. Головченко // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Том II / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – Т. 2. – С. 471–473.

82. Головченко А.Е. Разработка породоразрушающего инструмента для ударно-вращательного бурения / А.Е. Головченко, В.В. Нескоромных // Актуальные проблемы недропользования: материалы международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, декабрь, 2018 г / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2019. – С. 177–180.

83. Нескоромных В.В. Исследование влияния внецентренного приложения ударных импульсов на эффективность алмазного бурения / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Сибирского отд. секции наук о Земле РАЕН «Геология, поиски и разведка рудных месторождений», Иркутск, №6 (49), 2014 г.

84. Нескоромных В.В. Исследование возможности формирования ствола различной кривизны в скважинах внецентренными точечными ударами / В.В. Нескоромных, А.А. Фахрутдинов // Известия ВУЗов "Геология и разведка". 1995. № 2.

85. Нескоромных В.В. Результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами // Известия ВУЗов «Геология и разведка». – 1999. – № 6. – С. 115–120.

86. Романов Г.Р. Повышение эффективности алмазного бурения на основе результатов исследования влияния ассиметричных статических и динамических ударных нагрузок на процесс разрушения горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2018. – 20 с.

87. Баженова С.Г. Математико-статистические методы в горной промышленности – учеб. пособие — 2-е изд., исправл. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. — 99 с.

88. Ганджумян, Р. А. Математическая статистика в разведочном бурении / Р. А. Ганджумян. – М. : Недра, 1990. – 218 с.

89. Методы математической обработки статистического материала: метод. указания к лабораторным и практическим работам для студентов спец. 080700 «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых» / сост. В.П. Рожков; ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2004. – 48 с.

90. Основы математической статистики и некоторые методы оптимизации, применяемые в горном деле [Текст] : Учеб. пособие / П. М. Ковачевич, В. В. Ложкин, И. Л. Муромцев, Ю. Л. Муромцев ; [Под общ. ред. проф., д-ра техн. наук П. М. Ковачевича] ; Кузбас. политехн. ин-т. - Кемерово : КузПИ, 1975. - 175 с.

91. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

92. Башкатов, Д. Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении / Д. Н. Башкатов. – М.: Недра, 1985. – 181 с.

93. Neskromnykh, V.V., Golovchenko A.E. Experimental study of rock destruction by eccentric impact pulses during rotary-percussion drilling // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2020. – V. 331. – №1. – P. 135–147.

94. Нескоромных В.В., Головченко А.Е., Попова М.С. Модернизация породоразрушающего инструмента для ударно-вращательного бурения, реализующего внецентренное приложение ударных импульсов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2019. – №5. – С. 64-69.

95. Нескоромных В.В., Попова М.С., Головченко А.Е. Применение материалов нового поколения в качестве элементов современного породоразрушающего инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 10. – С. 15–20.

96. Патент № 2682824 Российская Федерация, МПК E21B 10/36 (2006.01). Буровое долото для ударно-вращательного бурения : № 2018118680 : заявл. 21.05.2018 : опубл. 21.03.2019 / Нескоромных В. В., Головченко А. Е. ; заявитель СФУ. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

97. Буровое долото для ударно–вращательного бурения [Текст] : пат. 191770 Рос. Федерация : МПК E21B 10/6 (2006.01) / Нескоромных В.В., Головченко А.Е. ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т – № 2019115771 ; заявл 22.05.2019 ; опубл. 21.08.2019, Бюл. №21.

98. Устройство для направленного ударно-вращательного бурения [Текст] : пат. 172743 Рос. Федерация : МПК 7 E 21 B 7/06, E 21 B 7/00, E 21 B 4/14 / Нескоромных В.В., Головченко А.Е. ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т – № 2017110940 ; заявл 31.03.2017 ; опубл. 21.07.2017, Бюл. №21

99. Блехман И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. – М.: Наука. 1994. 400с.

100. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика. Логика и особенности приложений математики. М: Наука, 1990, 2-ое изд., испр. и доп, 360 с.

101. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара/ Я.Г. Поновко. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 321 с.