

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Алиева Лейла



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО
БЕЗЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Жуков И.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 БЕЗЛЕЗВИЙНЫЙ БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ: СТРУКТУРА, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИЙ.....	11
1.1 Горные машины, применяемые для бурения	11
1.2 Структура и строение безлезвийного бурового инструмента, производственные решения	20
1.3 Анализ известных запатентованных конструктивных решений безлезвийного бурового инструмента.....	26
1.4 Современные подходы к разработке и совершенствованию структуры безлезвийного бурового инструмента.....	44
1.5 Выводы по Главе 1	55
ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ УДАРОМ....	57
2.1 Механика разрушения горной породы безлезвийным инструментом. Эффект симультанности.....	57
2.2. Установление зависимости результативности разрушения горной породы от геометрических параметров индентора	60
2.2.1 Теоретические основы разрушения горной породы при одновременном воздействии группой инденторов.....	70
2.2.2 Закономерности разрушения горной породы инденторами различной геометрической формы.....	72
2.2.3 Сравнительный анализ результативности разрушения горной породы инденторами различной формы.....	75
2.3 Выводы по Главе 2	77
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА СИМУЛЬТАННОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ БЕЗЛЕЗВИЙНЫМ БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ.....	79

3.1. Компьютерное моделирование внедрения в горную породу группы инденторов	79
3.1.1 Разработка компьютерной модели	79
3.1.2 Результаты компьютерного моделирования внедрения в горную породу группы инденторов	84
3.2. Экспериментальное исследование эффекта simultанности при бурении горной породы ударными воздействиями	86
3.2.1. Экспериментальный стенд и опытные образцы	86
3.2.2. Разработка модели безлезвийного инструмента.....	89
3.2.3. Методика проведения экспериментального исследования	91
3.2.4. Результаты экспериментальных исследований и их обработка.....	92
3.3 Выводы по Главе 3	96
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ УДАРНО-ПОВОРОТНОМ БУРЕНИИ	98
4.1 Породоразрушающая твердосплавная вставка с рабочей поверхностью в виде тела вращения трактрисы	98
4.2 Буровая коронка с синусоидальной вогнуто-выпуклой поверхностью ..	102
4.3 Расчет механической скорости бурения новым инструментом	111
4.4 Выводы по Главе 4	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А Чертежная документация стенда.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты физического эксперимента	138
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патенты на буровую коронку и на породоразрушающую твердосплавную вставку.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о промышленном внедрении результатов диссертации	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Ударно-поворотное бурение является основным и перспективным способом образования скважин в крепких горных породах при проходке подземных горных выработок и тоннелей, а также на карьерах – для бурения взрывных скважин в массивах горных пород, предназначенных для отбойки. При таком способе бурения порода разрушается под воздействием многократных ударных нагрузений буровым инструментом. Затраты энергии, скорость бурения и производительность работ напрямую находятся в зависимости от геометрических параметров выбранного инструмента и физико-механических свойств материала, из которого он изготовлен.

Для разрушения горных пород с коэффициентом крепости 6-20 по М.М. Протодяконову наиболее эффективным считается инструмент штыревого типа – безлезвийный – буровые коронки с твердосплавными сферическими или полубаллистическими вставками (инденторами). Меняя их размеры и взаимное расположение, можно создавать неограниченное количество вариаций инструмента в зависимости от условий ведения буровых работ. Следует заметить, что совершенствование бурового инструмента идет преимущественно изобретательским путем, эмпирически. С момента описания первой конструкции коронки опубликовано более сотни патентов и авторских свидетельств, однако обобщенные методы проектирования безлезвийных коронок так и не были сформулированы. Для рационального проектирования безлезвийного инструмента необходимо теоретическое и экспериментальное обоснование рекомендаций выбора диаметра, формы, числа вставок, схемы их размещения.

В этой связи задача обоснования конструктивных параметров буровых коронок в строгой привязке к конкретным условиям эксплуатации, обеспечивающих снижение энергоемкости ударно-поворотного бурения скальных пород, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию и проектированию конструкций бурильных машин, их элементов и процессов взаимодействия с объектом разрушения посвящены работы ряда ученых. Особый вклад внесли ученые: О.Д. Алимов, А.И. Бажал, Л.И. Барон, И.А. Бегагоен, Е.Ф. Губанов, А.В. Гилев, С.Н. Гудимов, Л.Т. Дворников, С.В. Доронин, А.Г. Дядюра, А.Б. Жабин, И.А. Жуков, К.И. Иванов, В.В. Нескоромных, С.М. Никитенко, Ю.А. Прядко, А.С. Реготунов, Б.Н. Смоляницкий, Н.И. Сысоев, В.В. Тимонин, А.О. Шигин, Л.А. Шрейнер, Д.А. Юнгмейстер, Gang Cheng, Songyong Liu, Jialin Tian и др.

Полученные результаты названных ученых связаны с обоснованием напряженно-деформированного состояния, возникающего в горных породах при воздействии инструментом, оснащенным в том числе безлезвийными твердосплавными вставками, и раскрывают основные закономерности влияния конструктивных факторов применяемой машины и ее элементов на производительность механического способа бурения. Тем не менее, необходимо отметить достаточно существенное расхождение конкретных результатов теоретических и экспериментальных исследований, посвященных обоснованию эффекта симультанности, что в первую очередь связано с проведением опытов в статических условиях нагружения, которые сопоставимы с динамическими лишь в ограниченных условиях. Поиск и обоснование оптимальных параметров коронок, соответствующих современным тенденциям повышения производительности буровых работ, продолжается непрерывно, однако анализ серийно выпускаемого инструмента показывает его несоответствие результатам научных изысканий в силу отсутствия обобщенных практических рекомендаций.

Предмет – безлезвийный породоразрушающий инструмент бурильных машин ударно-поворотного действия.

Объект исследования – процесс динамического воздействия группой инденторов безлезвийного бурового инструмента на разрушаемую горную породу.

Цель работы – повышение эффективности ударно-поворотного

бурения машинами, оснащенными безлезвийным породоразрушающим инструментом.

Идея заключается в том, что повышение эффективности удар-но-поворотного бурения достигается установлением рациональных конструктивных параметров, схем и способов оснащения породоразрушающего инструмента твердосплавными вставками на основе применения эффекта simultанности.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Систематизировать результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Оценить влияние геометрических характеристик безлезвийного бурового инструмента и его элементов на эффективность разрушения горной породы.

3. Провести аналитическое исследование влияния полей напряжений при simultанном (одновременном) воздействии на горную породу группой инденторов.

4. Провести экспериментальные исследования по разрушению горных пород породоразрушающим инструментом, армированным инденторами по различным схемам.

5. Разработать рекомендации по совершенствованию, рациональному выбору конструкций, схем и способов армирования инденторами породоразрушающего инструмента.

Научная новизна

1. Развита теоретическая основа задачи вдавливания плоского штампа Ж. Буссинеска и контактной задачи Г. Герца применительно к задаче simultанного разрушения горной породы двумя инденторами с учетом кривизны их рабочих поверхностей.

2. Установлена функциональная взаимосвязь между геометрическими параметрами элементов безлезвийного бурового инструмента, механическими

свойствами разрушаемой горной породы, усилием ударного воздействия и глубиной внедрения инструмента.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость между показателями результативности ударного разрушения горной породы высокой крепости и соотношением расстояния между соседними инденторами и их диаметром, позволяющая определять оптимальную величину данного соотношения.

4. Предложен нетрадиционный подход к совершенствованию безлезвийного бурового инструмента, учитывающий влияние его геометрии и структуры на эффективность разрушения породы.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пунктам: 14 «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых» и 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика определения рационального рабочего профиля индентора, основанная на функциональных зависимостях, связывающих механические свойства разрушаемой горной породы, условия нагружения и глубину внедрения инструмента при ударе. Установлено, что размещение двух соседних инденторов на оптимальном расстоянии обеспечивает наложение полей напряжений в разрушаемой породе. Установлены условия расположения твердосплавных вставок на рабочей поверхности безлезвийного бурового инструмента, обеспечивающие учёт эффекта симультанности.

2. Разработано новое техническое решение породоразрушающей

твердосплавной вставки, применение которой позволяет повысить производительность ударно-поворотного бурения и увеличить ресурс инструмента, защищенное патентом РФ на полезную модель № 225501 от 23.04.2024 г.

3. Разработано новое техническое решение буровой коронки, применение которой позволяет уменьшить энергоемкость процесса бурения и улучшить очистку забоя скважины от буровой мелочи, защищенное патентом РФ на изобретение № 2801724 от 15.08.2023 г.

4. Разработанная методика по выбору геометрических параметров инденторов, рабочей поверхности бурового инструмента и схемы армирования инденторами в зависимости от размеров скважины или шпура использована в деятельности ООО «ММЗ» для повышения производительности и снижения затрат в буровой промышленности (акт внедрения от 10.12.2024 г., Приложение Г).

Методология и методы исследования. Работа проводилась с использованием методов научного обобщения и анализа литературных источников и патентных материалов. В рамках исследования были выполнены численные расчёты, компьютерное моделирование и экспериментальные испытания, направленные на оценку влияния геометрических параметров безлезвийного бурового инструмента на эффективность разрушения горной породы ударом. Экспериментальные и стендовые исследования выполнены на лабораторных установках с использованием современных приборов и аппаратуры.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные функциональные зависимости, связывающие геометрические параметры безлезвийного бурового инструмента, механические свойства разрушаемой горной породы, усилие ударного воздействия и глубину внедрения инструмента, позволяют определять рациональную форму индентора, обеспечивающую максимальную глубину внедрения инструмента при ударе.

2. Установка на безлезвийном буровом инструменте соседних инденторов на оптимальном расстоянии с учетом эффекта симультанности обеспечивает при ударе наложение полей напряжений в разрушаемой породе и, как следствие, увеличение объема разрушения породы более чем на 40% и увеличение глубины внедрения инденторов не менее чем на 10%.

3. Выполнение породоразрушающей поверхности буровой коронки синусоидальной формы с вогнутостью в центральной части при условии размещения инденторов в характерных точках синусоиды с расстоянием до соседнего индентора, не превышающим 1,5 от его диаметра, обеспечивает разрушение породы по всей поверхности забоя за один удар, улучшение качества очистки забоя и повышение механической скорости бурения не менее чем на 11%.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием известных контактных задач теории упругости и положений механики разрушения твердых тел, стандартных методов компьютерного моделирования, соответствием теоретических результатов экспериментальным данным, а также применением проверенных методов математической обработки и статистической проверки результатов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2022 г.); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2022 г.); III Всероссийская молодежная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и творчество: вклад молодежи» (Дагестан, 2022 г.); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2023 г.); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2023 г.); VII международная научно-

практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика» (Санкт-Петербург, 2024 г.); VIII международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (Санкт-Петербург, 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования, разработке методики исследования, теоретическом исследовании влияния различных форм инденторов на эффективность ударного разрешения горной породы, проведения экспериментальных исследований по разрушению горных пород инструментом с различными схемами армирования инденторами, обработке и интерпретации результатов исследований, участии в написании научных работ по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах (пункт из списка литературы № 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 106, 107), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель (Приложение В).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 38 рисунков и 9 таблиц.

ГЛАВА 1 БЕЗЛЕЗВИЙНЫЙ БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ: СТРУКТУРА, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИЙ

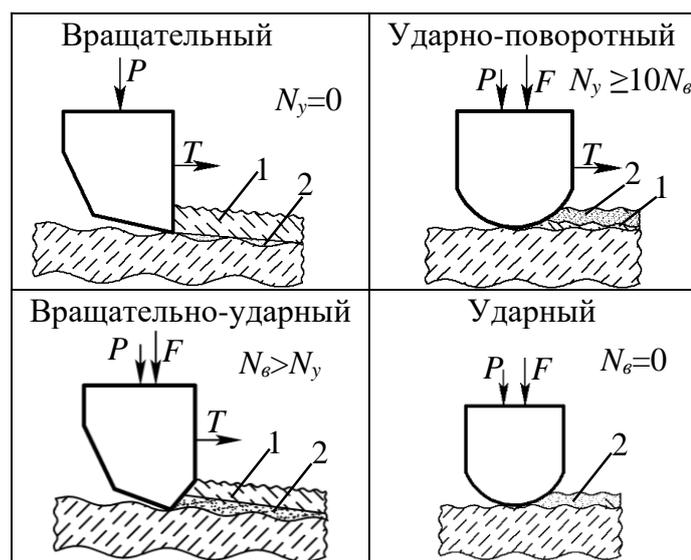
1.1 Горные машины, применяемые для бурения

Одним из распространённых методов бурения шпуров и скважин в горной породе является механический, при котором отделение частиц горных пород от массива происходит под действием механических усилий, создаваемых бурильной машиной и передаваемых породе посредством специальных инструментов. Механическое бурение по способу приложения силовых нагрузок к забою скважины или шпура и по способу разрушения породы можно разделить на четыре способа: вращательный, вращательно – ударный, ударно – поворотный и ударный (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1– Классификация способов бурения (составлено автором)

Вращательное бурение заключается в том, что разрушение породы на забое скважины происходит за счет вращательного движения инструмента вокруг оси скважины при одновременном поступательном перемещении его в сторону забоя. Таким образом, мощность N_e от вращателя полностью определяет процесс разрушения породы, в то время как ударная мощность N_y отсутствует (рисунок 1.2). Энергия расходуется только на вращение бурового инструмента. Вращательное бурение применяется для бурения сравнительно слабых пород с коэффициентом крепости не выше $f = 5 \div 6$ [21].



P – осевое усилие; T – крутящий момент;

1 – порода, разрушаемая срезом; 2 – порода, разрушаемая ударной нагрузкой

Рисунок 1.2 – Распределение мощности при разных способах бурения

(составлено автором)

Станки буровые резовые (СБР), относящиеся к типу станков вращательного бурения, применяются при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом и предназначены для бурения скважин диаметром 100 - 300 мм и глубиной до 32 м в породах с коэффициентом крепости $f < 6$. Большинство станков СБР имеют гидравлическую систему, которая обеспечивает точное управление буровым инструментом и позволяет регулировать скорость и глубину бурения.

Одним из распространённых способов вращательного бурения скважин является колонковое бурение [20]. К основным преимуществам колонкового бурения относятся его универсальность — возможность проходки скважин практически во всех типах горных пород, получение керна с минимальными нарушениями природного сложения грунта, а также достижение сравнительно больших глубин бурения.

Станки, использующие колонковый метод бурения вращательного типа, предназначены для сооружения скважин различной протяжённости — от нескольких метров до нескольких километров — под различными углами относительно горизонта. Диаметр получаемых скважин определяется

назначением бурения и конструкцией применяемого породоразрушающего инструмента. При алмазном способе скважины бурятся в основном коронками диаметром 76 мм, 59 мм и 46 мм. При твердосплавном бурении чаще применяют коронки диаметром 92 мм, 76 мм, 59 мм. При инженерно-геологических и гидрогеологических работах иногда проходят колонковым способом шурфо-скважины диаметром 500 - 1500 мм. Также существуют буровые установки, предназначенные для проходки вертикальных стволов круглого сечения диаметром более 5 метров.

Вращательное бурение широко применяется при проходке скважин в породах малой и средней крепости, поскольку данный способ характеризуется меньшими энергетическими затратами и большей производительностью по сравнению с ударным бурением. Породоразрушающий инструмент вращательного бурения включает различные типы коронок и долот, такие как твёрдосплавные, алмазные и шарошечные. Выбор инструмента зависит от категории буримости породы и типа бурения (колонковое или шарошечное). Большое распространение нашли трехшарошечные долота, используемые для бурения пород от мягких до очень крепких и оснащенные зубьями различной длины и конфигурации. Для бурения мягких пород предназначены режущие долота, которые оснащены восемью – десятью сменными резцами.

При вращательно-ударном способе бурения к непрерывно вращающемуся буровому инструменту периодически прикладывается ударная нагрузка и значительное осевое усилие, в результате чего происходит скалывание породы. Мощность N_e от вращателя превышает ударную мощность N_y (см. рисунок 1.2). Основной вклад в разрушение породы вносит вращение инструмента, тогда как удары обеспечивают дополнительное воздействие на забой. Для пород с коэффициентом крепости $f = 3 \div 7$ вращательно-ударное бурение весьма эффективно, но вызывает необходимость использования больших усилий [21].

При вращательно-ударном способе бурения применяют станки типа СБУ (самоходная буровая установка), предназначенные для разрушения

трудновзрывааемых горных пород с коэффициентом крепости $f = 6 \div 20$ по шкале М.М. Протодяконова. Данные установки эффективны при производстве буровых работ в сложных горно-геологических условиях, в том числе на стеснённых рабочих площадках открытых горных выработок и строительных объектов. Станки выпускаются в различных модификациях двух основных типоразмеров с номинальными диаметрами бурения 100 (125) мм и 125 (160) мм [56].

При вращательно-ударном бурении в качестве породоразрушающего инструмента применяются буровые коронки и долота различных типов. В зависимости от формы рабочей части долота классифицируются на лезвийные и штыревые. По числу твердосплавных элементов, осуществляющих разрушение породы, они подразделяются на долотчатые, трёх- и четырёхпёрые, а также Х-образные. Конструктивное исполнение рабочей части может быть одно- или двухступенчатым (в том числе с опережающим элементом), либо многоступенчатым. Кроме того, долота различаются по способу удаления буровой мелочи из забоя: с центральной, нецентральной или внешней продувкой [56].

Для разрушения горных пород с коэффициентом крепости $f = 6 \div 20$ применяют ударно – поворотный способ бурения, при котором рабочий инструмент разрушает породу преимущественно за счет ударной нагрузки F и периодически поворачивается для очистки забоя от разрушенных, но не отделившихся частиц (см. рисунок 1.2). К машинам, реализующим такой способ, относятся буровые станки (НКР-100М, БП-100Н), перфораторы, пневмоударники и др., у которых ударная забойная мощность N_y составляет 90% и более от общей мощности, расходуемой на забое, а 10% приходится на мощность N_e от вращателя.

Перфораторы предназначены для бурения шпуров диаметром 30–50 мм в забоях горизонтальных и наклонных (нисходящих) выработок глубиной до 3 м, а также скважин диаметром 40–85 мм и глубиной до 20 м в породах с коэффициентом крепости $f = 6 \div 20$ по шкале М.М.Протодяконова. В

настоящее время перфораторы классифицируются по конструктивным особенностям механизма поворота (с зависимым и независимым приводами), по способу применения (переносные, телескопные и колонковые) и по массе (лёгкие (до 18 кг), средние (20–25 кг) и тяжёлые (>30 кг)).

Пневматические переносные перфораторы (рисунок 1.3, а) предназначены для бурения шпуров диаметром до 46 мм и глубиной до 5 м в породах с коэффициентом крепости $f = 6 \div 20$, с пневматических поддержек или с рук при проведении горизонтальных и слабонаклонных горных выработок, а также при проходке шахтных стволов [23]. В соответствии с ГОСТ 10750-80 предусматривается выпуск четырех типов переносных перфораторов: ПП36В, ПП50В, ПП54ВБ, ПП63СВП.



Рисунок 1.3– Машины для ударно-поворотного бурения инструментом безлезвийного типа (составлено автором)

Обычно переносные перфораторы имеют мощность около 800-1000 Вт, что позволяет им справляться с бурением твердых материалов. Ударная энергия переносного перфоратора может достигать 3-4 Дж в зависимости от

модели и производить от 3000 до 4500 ударов в минуту, что дает большую эффективность при бурении высокой крепости пород [105].

Пневматический ударный механизм использует сжатый воздух для создания ударов. Когда поршень в камере сжатия удара двигается вперед, он создает давление, которое передается на рабочий инструмент. Это давление и производит ударное воздействие. Пневматические механизмы обеспечивают мощные удары при относительно малом энергопотреблении.

Для бурения шпуров и скважин диаметром до 85 мм и глубиной до 50 м произвольного направления в крепких горных породах ударно-поворотным способом применяются колонковые перфораторы. Согласно требованиям ГОСТ 18092–79, установлены шесть типоразмеров колонковых перфораторов: ПК-50, ПК-60А, ПК-75А, ПК-120, ПК-150 и ПК-175. Основной классификационный параметр оборудования — масса перфоратора.

Колонковый перфоратор работает по принципу вращения бурового инструмента. Вращение осуществляется с помощью ротора, который приводит буровую штангу или шнек в движение. Этот механизм позволяет разрушать породу в процессе бурения, создавая отверстие в грунте. В зависимости от типа бурового инструмента и характера породы может применяться разная скорость вращения. Помимо вращения, колонковый перфоратор также использует ударный механизм, который помогает разрушать более твердые слои породы. Удары могут быть пневматическими или механическими. В процессе ударного воздействия рабочий инструмент совершает движение вперед-назад, разрушая породу и обеспечивая более быстрое и эффективное бурение.

Телескопные перфораторы применяются для бурения восстающих шпуров и скважин с углом отклонения от вертикали до 45°, в породах различной крепости при выполнении очистных и проходческих работ. В соответствии с ГОСТ 18093-79 выпускаются два типа телескопных перфораторов - ПТ38 и ПТ 48А.

Электрический двигатель (или двигатель внутреннего сгорания) перфоратора приводит в движение вращающуюся головку, которая через патрон передает вращение на буровой инструмент. Ударный механизм перфоратора создает пневматические или механические удары, которые помогают разрушать породы высокой крепости.

При ведении буровых работ подземным или открытым способом в породах средней и высокой крепости, в том числе абразивных и трещиноватых, применяются погружные пневмоударники (см. рисунок 1.3, б) [71, 72, 102]. Диаметр скважин при пневмоударном бурении ударно-поворотным способом, как правило, составляет от 85 до 250 мм, а глубина бурения — от 30 до 80 метров и определяется характеристиками породоразрушающего инструмента, частотой вращения бурового снаряда и величиной ударной энергии [59]. Пневмоударник погружной в комплекте с буровой коронкой является рабочим органом буровой машины. Он представляет собой пневматический ударный механизм, который имеет клапанную или беззолотниковую систему воздухораспределения с центральным типом подвода сжатого воздуха в рабочие камеры цилиндра и выхлопом отработанного воздуха через каналы пневмоударника или каналы бурового инструмента [5]. Пневмоударники клапанного типа работают на воздушно-водяной смеси, а с золотниковым воздухораспределением могут работать как на воздушной, так и на воздушно-водяной смеси [90]. Опыт создания пневмоударников высокого давления, а также проблемы повышения их мощности и надёжности рассмотрены в работах [96, 97].

В горнодобывающей промышленности широкое распространение получили навесные колонковые разведочные станки (НКР), оборудованные вращательным и подающим механизмами и погружным пневмоударником. Главной особенностью таких машин является то, что ударное действие и вращение осуществляются двумя независимо работающими механизмами. Аббревиатура «НКР» в контексте буровых станков расшифровывается как «Низкооборотистые Компактные Роторные» буровые установки. Эти машины

(см. рисунок 1.3, в) характеризуются роторным способом бурения, который позволяет эффективно работать в условиях различных геологических пород.

Бурение с помощью вращающегося инструмента (ротора) является основным методом работы таких станков. Это позволяет обеспечить высокую производительность при бурении в твердых горных породах [103].

Станки типа НКР предназначены для бурения в подземных условиях скважин любого направления диаметром от 100 до 500 мм и глубиной до 1000 метров и более в породах с коэффициентом крепости $f = 6 \div 20$ по шкале М.М.Протоdjяконова [24].

В зависимости от модели и комплектации вес станка НКР может составлять до 1,6 тонн, что делает его достаточно мобильным и относительно компактным для такого типа оборудования.

Бурение осуществляется ударно-вращательным способом с помощью пневмоударника, навинченного на став штанг. Пневмоударник работает на воздушно-водяной смеси при давлении сжатого воздуха 0,5–0,7 МПа [91].

Станки НКР обычно оснащены дизельным или электрическим двигателем, который запускается для приведения в движение бурового ротора. Ротор начинает вращаться с определенной скоростью. При этом буровой инструмент воздействует на грунт, разрушая его. В процессе работы станок постепенно углубляется, преодолевая различные слои грунта. Важно, чтобы скорость вращения ротора была оптимальной для типа породы. В мягких грунтах обороты могут быть выше, а в твердых — ниже. Для предотвращения заклинивания и эффективного удаления шлама (выбываемого материала) в процессе бурения используется буровой раствор или жидкость, которая подается через канал в буровой трубе. Жидкость помогает вымывать породу, охлаждать буровой инструмент и предотвращать образование заторов.

Для ударно-поворотного бурения используют долотчатые коронки, трёхперые коронки, штыревые коронки, буровые долота и т.д.

Анализ литературных источников показывает, что ударное бурение не рассматривается как самостоятельный способ, поскольку в ряде работ

наблюдается смешение терминов и отсутствие чёткого разграничения между ударным и ударно-поворотным бурением. Следует учитывать, что на современном этапе реализация чисто ударного бурения без вращения возможна лишь теоретически. Даже при минимальной скорости вращения создаются условия, способствующие эффективному разрушению горной породы. Дополнительные затруднения в классификации обусловлены тем, что в обоих случаях применяется идентичный тип бурового инструмента.

Ударный способ широко используется для бурения как средних, так и самых крепких горных пород. При ударном бурении породоразрушающий инструмент внедряется в породу под действием кратковременной ударной нагрузки, направленной по оси скважины. Под действием удара происходит разрушение горной породы под буровым инструментом, а также скалывание ее в поверхностном слое. Ударная мощность N_y составляет 100 % от общей мощности, расходуемой на забое, при этом мощность N_e от вращателя отсутствует. Разрушение породы осуществляется исключительно за счёт ударных импульсов без участия вращения.

К оборудованию для ударного способа бурения относятся ручные, телескопные и колонковые молотки, буровые агрегаты с погружными пневмоударниками и бурильные машины с выносными ударниками и независимым вращением бурового инструмента [108]. Разрушение пород средней и высокой крепости при ударном бурении осуществляется исключительно за счет ударных нагрузок, что дает возможность получать в породе под породоразрушающим инструментом большие напряжения, тем самым повышая производительность процесса бурения [128]. В машинах для ударного бурения используют долота, буровые коронки и т.д.

В данной работе акцент делается непосредственно на машинах, в которых применяется штыревой – безлезвийный тип инструмента.

1.2 Структура и строение безлезвийного бурового инструмента, производственные решения

Согласно вышеописанной классификации, безлезвийный буровой инструмент применяется в машинах при ударно – поворотном способе бурения горных пород высокой и средней крепости.

Безлезвийный буровой инструмент представлен широким многообразием конструкций (рисунок 1.4), отличающихся типоразмером, применяемой машиной и областью назначения [7, 8].



Рисунок 1.4 – Безлезвийный буровой инструмент (фото автора)

Обобщенный вид штыревой коронки, включающий все основные элементы, представлен на рисунке 1.5.

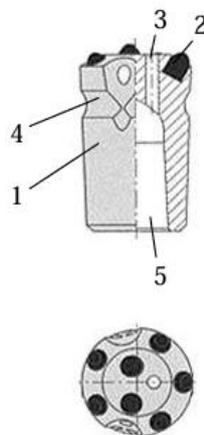


Рисунок 1.5 – Безлезвийный буровой инструмент [49]

Инструмент безлезвийного типа состоит из корпуса 1 с породоразрушающей поверхностью, на которой выполнены отверстия, в которые жестко установлены твердосплавные вставки (инденторы) 2. Для удаления буровой мелочи в коронке выполнены промывочные (продувочные) каналы 3 и шламоотводящие пазы 4. Для соединения с буровой штангой в нижней части коронки выполнено присоединительное отверстие 5 (конусное или резьбовое).

К основным параметрам, определяющим структуру буровой коронки, следует отнести её диаметр, профиль рабочей поверхности, диаметр, форму и количество твердосплавных вставок, а также схему их размещения на рабочей поверхности.

Представленный на рисунке 1.7 общий вид коронки с твердосплавными вставками не охватывает все возможные конструктивные варианты коронок штыревого типа, однако является наиболее близким по своим признакам к выпускаемому в настоящее время серийно буровому инструменту.

В конце 1960-х годов впервые были применены твердосплавные вставки с полусферической рабочей поверхностью для армирования породоразрушающего бурового инструмента ударного действия. Результаты многочисленных испытаний подтвердили существенные преимущества безлезвийного инструмента по сравнению с лезвийным: более высокая стойкость, увеличенная скорость бурения, снижение удельного расхода твердого сплава, а также уменьшение затрат на бурение шпуров и скважин и другие технико-экономические показатели [94].

В настоящее время штыревые коронки заняли важное место при производстве буровых инструментов и выпускаются рядом зарубежных фирм. Международная компания из Швеции «Sandvik» производит в зависимости от области применения и мощности пневмоударника породоразрушающий инструмент диаметром 95 – 254 мм. Форма рабочей поверхности коронки выполняется вогнутой, выпуклой и плоской, а рабочая поверхность инденторов выпускается в виде сферической и баллистической форм. Также

Sandvik выпускает коронки (рисунок 1.6) диаметром от 28 до 152 мм для бурения выносным перфоратором с различными формами вставок (сферические, полубаллистические и конические) [61].



Рисунок 1.6 – Коронки Sandvik для бурения с выносным перфоратором [61]

Китайский производитель «ROSCHEM Group» выпускает в зависимости от мощности бурильной машины и свойств горной породы буровые коронки диаметром 64 - 508 мм, в зависимости от диаметра коронки количество вставок варьируется от 8 до 16 штук.

«Litian Heavy Industry Machinery Co., Ltd» - производитель инструментов для бурения горных пород, предлагает высококачественные породоразрушающие буровые инструменты безлезвийного типа (рисунок 1.7) диаметром от 28 до 152 мм, а также инденторы разных форм (сферические, баллистические, конические и т.д.) [92].



Рисунок 1.7 – Коронки Litian Heavy Industry Machinery Co., Ltd [92]

Компания «Atlas Copco Secoroc» (Швеция) выпускает широкий диапазон буровых коронок (рисунок 1.8) диаметром 82 - 914 мм. Каждая коронка

изготавливается из качественной легированной стали, подвергается прецизионной механической обработке для получения идеальной формы корпуса, термообработке и поверхностному упрочнению сжатием для достижения требуемой твердости и сопротивления усталости, соответственно, и оснащается прецизионными штырями собственного производства. В зависимости от области применения буровые коронки изготавливаются с различной конструкцией фронтальной части: плоской, выпуклой, вогнутой, а также с баллистическими вставками. Кроме того, в практике бурения применяются специализированные типы коронок, такие как Rocket и Speed-Bit, отличающиеся высокой производительностью при работе в крепких горных породах [80].

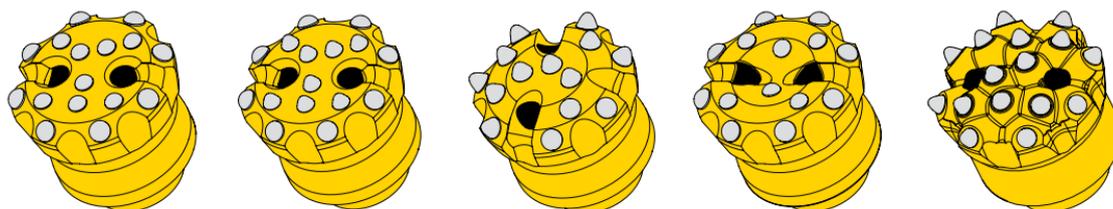


Рисунок 1.8 – Коронки «Atlas Copco Secoroc» [80]

Наряду с зарубежными производителями буровых коронок Россия также выпускает большое количество разновидностей бурового инструмента.

Общество с ограниченной ответственностью (ООО) «БИНУР» выпускает 12 типов коронок (рисунок 1.9) диаметром 28 – 130 мм. На основе базовых конструкций, изменяя диаметр, количество вставок и схему их расположения, а также систему промывочных каналов и шламоотводящих пазов, фирмой разработаны варианты конструкций коронок для бурения в различных горно-технических условиях [25].



Рисунок 1.9 – Коронки ООО БИНУР [25]

Компания «Юрел» выпускает штыревые буровые коронки диаметром от 43 до 110 мм (рисунок 1.10), предназначенные для бурения скважин в крепких и крепчайших монолитных, а также среднетрещиноватых горных породах средней абразивности с использованием колонковых перфораторов. Конструкция коронок обеспечивает высокую стойкость режущих элементов и надёжную работу в условиях интенсивного разрушения твёрдых пород. Продукция компании отличается адаптацией к различным геологическим условиям, а также совместимостью с отечественным и зарубежным буровым оборудованием [26].



Рисунок 1.10 – Коронки компании «Юрел» [26]

Компания «ГЕОМАШ» производит буровые коронки и долота, предназначенные для работы с погружными пневмоударниками. Конструктивной особенностью продукции является использование байонетного или шлицевого соединения коронки со штангой, что обеспечивает надёжную передачу крутящего момента и устойчивость к

перегрузкам. Выпускаемые коронки охватывают диапазон диаметров от 85 до 250 мм и адаптированы к различным горно-геологическим условиям, включая бурение в твёрдых и абразивных породах.

Широкую номенклатуру бурового инструмента диаметром 28 – 110 мм выпускает «Храпуновский инструментальный завод». Завод занимается изготовлением различных типов коронок штыревого типа (трехперые коронки КТШ, штыревые коронки типа – К), количество инденторов варьируется в зависимости от диаметра коронки от 5 до 14 штук. Представленные коронки применяются для бурения шпуров в горных породах средней крепости, крепких, крепчайших монолитных и среднетрещиноватых, средней абразивности с использованием переносных перфораторов [114].

Завод бурового инструмента «ГЕОБУРМАШ» выпускает штыревые коронки диаметром 110 – 160 мм специально для бурения скважин в крепких и сильно абразивных горных породах с использованием погружных пневмоударников.

Коронки армированы твердосплавными вставками различной формы, что позволяет адаптировать инструмент под конкретные условия бурения. Соединение корпуса коронки со штангой выполняется в шлицевом или байонетном исполнении, что обеспечивает надежную передачу крутящего момента и упрощает сборку-разборку бурового инструмента. [31].

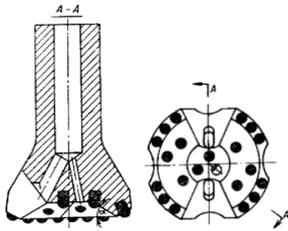
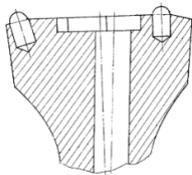
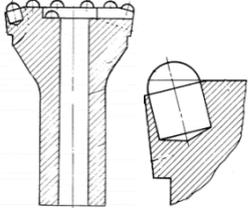
Кировградский завод твёрдых сплавов (АО «КЗТС») выпускает буровые коронки, которые предназначены для оснащения перфораторов, используемых при бурении взрывных скважин в хрупких, мягких, монолитных и трещиноватых породах с коэффициентом крепости до 20 по шкале М.М. Протоdjяконова. Современная номенклатура завода включает в себя более 50 типов буровых штыревых коронок диаметром 85 - 660 мм. Для изготовления твердосплавных вставок (штырей) используются специальные марки твердых сплавов. В зависимости от бурения пород различных крепостей для армирования бурового инструмента изготавливают разные формы твердосплавных вставок в виде сферы, трапеции и баллистики [55].

1.3 Анализ известных запатентованных конструктивных решений безлезвийного бурового инструмента

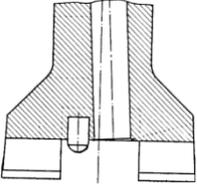
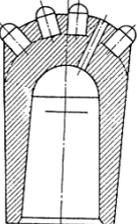
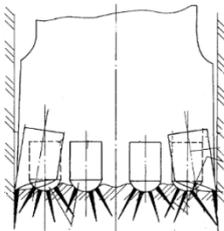
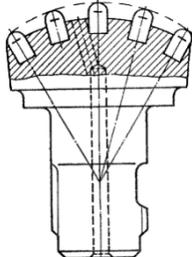
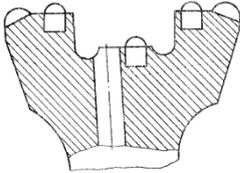
Основными параметрами, характеризующими конструкцию коронки, являются диаметр рабочей части, диаметр и форма инденторов, их количество и схема расположения. Изменяя эти параметры, можно создать практически неограниченное число вариантов безлезвийного бурового инструмента.

Обратимся к некоторым результатам патентного поиска конструкций безлезвийного породоразрушающего инструмента (таблица 1.1) и анализу подходов к их созданию с целью отыскания общих принципов и методик совершенствования, связанных с обоснованием рациональных или оптимальных параметров конструктивных элементов [6].

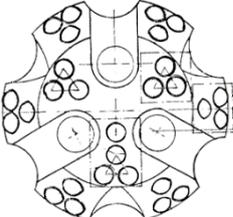
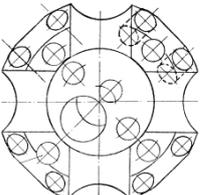
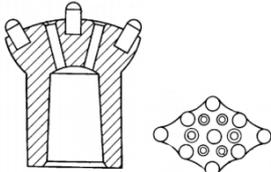
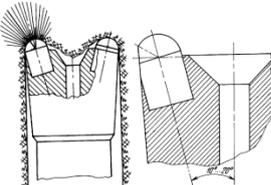
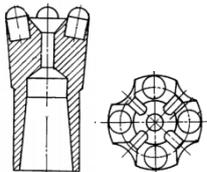
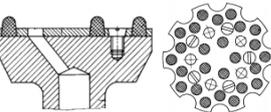
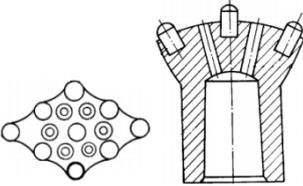
Таблица 1.1 – Избранные результаты патентного поиска породоразрушающего инструмента (составлено автором)

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
1	Буровая коронка, №276858	Кожевников Л.П., Белавин Л.В., Авдонин Ю.Ф., Глазков А.П., Моржаретто А.А., Зарубин М.С., Мхоткин М.В., Клочко Н.А.	08.05.1969; 22.08.1970	
2	Коронка для ударно-вращательного бурения, №1209821	Алферов В.А., Костин А.Ф., Курдюков А.С., Плеханов И.Д.	03.08.1984; 07.02.1986	
3	Коронка для ударно-вращательного бурения, №1266954	Рогач М.С., Курдюков А.С., Плеханов И.Д.	06.03.1985; 30.10.1986	

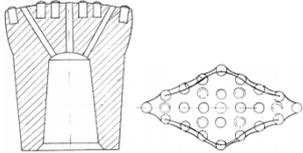
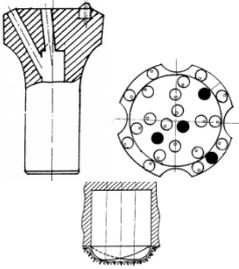
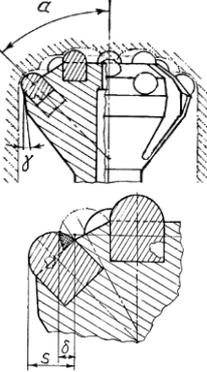
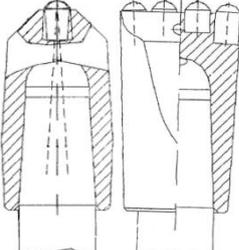
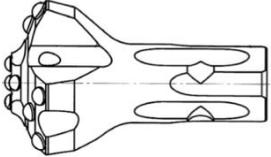
Продолжение таблицы 1.1

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
4	Буровая коронка для ударно-вращательного бурения, №1348489	Резник Л.А., Рогач М.С., Курдюков А.С., Плеханов И.Д.	28.03.1986; 30.10.1987	
5	Буровая коронка, №1355685	Рудерфер В.И., Медовый Ю.А., Гопен А.М., Шарапов В.И., Прядко Ю.А., Гудимов С.Н.	29.12.1984; 31.11.1987	
6	Буровая коронка, №1404631	Новиков Н.В., Линенко-Мельников Ю.П., Свешников И.А., Арцимович Г.В., Заболотный С.Д., Смекаленков С.В., Аптов Э.Г., Медовый Ю.А., Карасик И.Л., Гиренко В.Н., Третьяченко А.Н.	16.04.1985; 23.06.1988	
7	Долото для ударно-вращательного бурения, №1652503	Беляев Н.А., Гаун В.А., Зарубин М.С.	29.03.1988; 30.05.1991	
8	Буровая коронка для ударно-вращательного бурения, №1696667	Курдюков А.С., Плеханов И.Д., Глазков В.В., Костин А.Ф., Якимов В.П., Дайбов С.В., Галицков Г.А., Астахов Б.В.	19.06.1989; 07.12.1991	

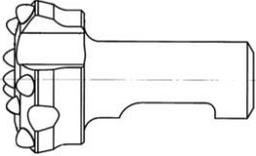
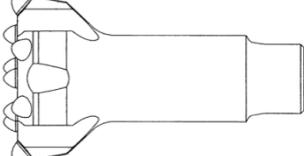
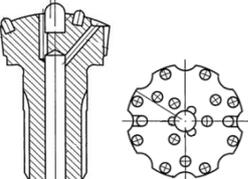
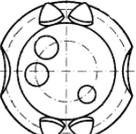
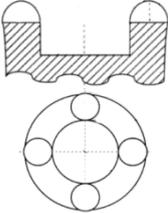
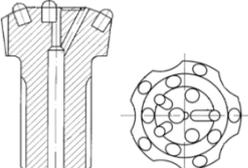
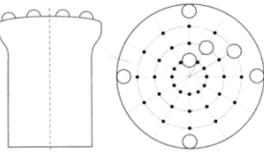
Продолжение таблицы 1.1

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
9	Буровая коронка, №1789645	Липин А.А., Костин Ю.С., Федоров В.В.	24.01.1991; 23.01.1993	
10	Долото для ударно-вращательного бурения, №1803517	Минеров Г.М., Галицков Г.А., Дайбов С.В., Авдонин Ю.Ф.	06.03.1990; 23.03.1993	
11	Буровая коронка для ударного бурения, №2065022	Дворников Л.Т., Прядко Ю.А., Губанов Е.Ф.	12.08.1993; 10.08.1996	
12	Буровая коронка для перфораторного бурения, №2067151	Линенко-Мельников Ю.П.	15.09.1994; 27.09.1996	
13	Буровая коронка для ударно-поворотного бурения, №2077650	Линенко-Мельников Ю.П., Лисовский А.Ф.	12.05.1994; 20.04.1997	
14	Буровая коронка, №2080447	Дворников Л.Т., Куклин С.А.	09.04.1992; 27.05.1997	
15	Способ отделения строительного камня от массива, №2083840	Дворников Л.Т., Губанов Е.Ф.	30.12.1993; 10.07.1997	

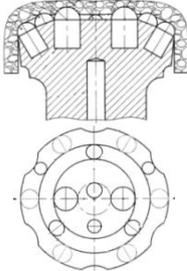
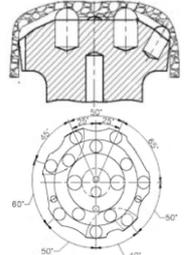
Продолжение таблицы 1.1

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
16	Буровая коронка, №2105123	Дворников Л.Т., Губанов Е.Ф.	01.02.1996; 20.02.1998	
17	Буровая коронка, №2164283	Павлов Ю.А., Соломахин А.В., Воробьев В.Н., Блинков О.Г., Поланский Г.А., Козлов О.А.	24.02.1999; 20.03.2001	
18	Коронка для ударно-вращательного бурения, №19082	Дашин И.А., Постников В.И., Шевчук С.П., Горбатов В.П.	04.01.2001; 10.08.2001	
19	Безлезвийная буровая коронка, №2212511	Дворников Л.Т., Прокушенко С.И., Куклин С.А., Вечужанин Д.С., Полынцев Н.А.	06.12.2001; 20.09.2003	
20	Буровая коронка, №79609	Канцуров А.Н., Глазков В.В., Быков С.П., Фоминых А.В., Попов А.В., Сомов К.В.	19.09.2008; 10.01.2009	

Продолжение таблицы 1.1

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
21	Буровая коронка, №79925	Канцуров А.Н., Глазков В.В., Быков С.П., Попов А.В., Фоминых А.В., Сомов К.В.	19.09.2008; 20.01.2009	
22	Буровая коронка, №107268	Горбатов В.Г.	01.04.2011; 10.08.2011	
23	Буровая коронка, №2535314	Белоусов А.В., Тимонин В.В.	16.07.2013; 10.12.2014	
24	Буровая коронка штыревого типа, №169571	Реготунов А.С., Зарубин В.А.	08.11.2016; 23.03.2017	
25	Буровая коронка №2646637	Дворников Л.Т., Никитенко С.М., Жуков И.А., Корнеев В.А.	16.11.2016; 06.03.2018	
26	Буровая коронка №2649210	Тимонин В.В., Белоусов А.В.	24.01.2017; 30.03.2018	
27	Буровая коронка №2655455	Дворников Л.Т., Никитенко С.М., Жуков И.А., Корнеев В.А.	24.08.2017; 28.05.2018	

Продолжение таблицы 1.1

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
28	Буровая коронка №2666386	Тимонин В.В., Белоусов А.В.	09.11.2017; 07.09.2018	
29	Буровая коронка, №2759137	Белоусов А.В., Примычкин А.Ю., Заболоцкая Н.Н.	06.04.2021; 09.11.2021	

Такое разнообразие конструктивных решений свидетельствует о весьма широком поиске методов совершенствования безлезвийного инструмента для бурения ударными воздействиями и о стремлении максимально расширить область применения этого бесспорно перспективного способа. Естественно, это выдвигает задачу поиска объективной методики оценки нововведений и отбора лучших решений.

Одной из первых в результатах патентного поиска представлена буровая коронка (№1, см. таблицу 1.1) с твердосплавными вставками, имеющая вогнутую породоразрушающую полость, выполненную в форме усеченного конуса с углом между образующей и торцом коронки, равным $11 - 45^\circ$. При этом с целью равномерного распределения нагрузки по вставкам устанавливается условие, заключающееся в том, что на единицу площади количество периферийных вставок должно превышать количество вставок, расположенных в вогнутой части. Принятые конструктивные требования позволяют повысить производительность бурения и улучшить процесс очистки забоя скважины от разрушенной породы.

Следующей в результатах патентного поиска представлена буровая коронка для ударно-вращательного бурения (№2, см. таблицу 1.1), рабочая часть которой содержит перья с размещенными в них твердосплавными вставками. При этом вставки посажены в отверстия, глубина которых больше высоты перьев, что позволяет снизить вибрацию и деформацию перьев в процессе бурения.

В очередной буровой коронке (№3, см. таблицу 1.1) штыревые твердосплавные вставки закреплены на рабочей части таким образом, что по периферии вставки расположены под углом к продольной оси коронки на участке с конической поверхностью и уступом. Предложенный вариант исполнения коронки обеспечивает повышение скорости бурения и увеличение стойкости коронки за счет уменьшения изнашивания периферийности части ее корпуса.

Примечательной особенностью буровой коронки, приведенной под №4 в таблице 1.1, является то, что наряду с лезвийными режущими пластинами коронка оснащена твердосплавной вставкой, установленной в углубленной по отношению к торцу центральной части. Такое решение повышает эффективность удаления продуктов разрушения из скважины.

С целью повышения циклической прочности твердосплавных вставок и корпуса бурового инструмента была предложена конструкция буровой коронки (№5, см. таблицу 1.1), отличающаяся тем, что концевая часть отверстия для соединения со штангой выполнена в форме полусферы и торцы инденторов также расположены на поверхности полусферы, эквидистантной полусфере отверстия. Описанный способ размещения вставок позволяет оптимально распределить ударные контактные напряжения в рабочей части коронки.

Особенность буровой коронки, показанной в таблице 1.1 под №6, заключается в ее оснащении не только цилиндросферическими вставками, но и цилиндрическими хвостовиками с рабочими частями, выполненными в виде выпуклой криволинейной поверхности вращения. При этом хвостовики

расположены по периферии коронки, что позволяет при нанесении удара образовать кольцевую зону предразрушения, являющуюся продолжением стенок скважины. Такой способ воздействия на разрушаемую породу ведет к совместному образованию и развитию трещин от удара каждой вставкой, что позволяет направить всю подводимую энергию удара на разрушение, обеспечивая тем самым увеличение скорости бурения.

С целью повышения эффективности и надежности работы инструмента за счет обеспечения равнопрочности инденторов было предложено вылет твердосплавных вставок над рабочим торцом коронки увеличивать от периферии к центру, располагая их так, чтобы вершины лежали на сферической поверхности, радиус которой меньше радиуса сферы рабочего торца коронки (№7, см. таблицу 1.1).

Буровая коронка, приведенная под №8 в таблице 1.1, имеет технический признак, схожий с буровым инструментом, показанным под №4, но отличающаяся тем, что все породоразрушающие элементы выполнены в виде цилиндросферических инденторов, причем периферийные вставки расположены под углом к торцу коронки. Применение такой коронки позволяет не только повысить скорость бурения, но и облегчить процесс удаления буровой мелочи из скважины.

Показанная под №9 в таблице 1.1 коронка, предназначенная для ударно-вращательного бурения, армирована группами твердосплавных вставок преимущественно из трех штук, расположенных в вершинах равностороннего треугольника с длиной сторон, определяемой в интервале от 1 до 1,3 от диаметра вставки. Применение такой схемы расположения инденторов позволяет за счет взаимного влияния полей напряжений от каждой вставки снизить энергоемкость разрушения породы.

Отличительной особенностью буровой коронки, приведенной в таблице 1.1 под №10, является тот факт, что периферийные вставки расположены попарно, причем оси этих вставок в каждой паре между собой параллельны, а следующий ряд и диаметр вставок задаются таким образом, чтобы обеспечить

перекрытие неразрушенной части породы. Благодаря таким условиям стойкость коронки повышается на 10 – 15 %.

Весьма уникальной является коронка (№11, см. таблицу 1.1), запатентованная в 1996 году, выделяющаяся тем, что периферийные вставки расположены по геометрическим фигурам с прямолинейными сторонами типа ромб, треугольник. Инструмент такого типа обеспечивает возможность бурения шпуров некруглого поперечного сечения, создавая при этом концентрацию напряжений в острых углах поперечного сечения пробуренного шпура, облегчающую отделение блоков горных пород от массива. Продолжением работ авторского коллектива в поиске конструкций инструмента, позволяющего бурить некруглые шпуры, являются коронки, приведенные в таблице 1.1 под № 15 и №16.

Следующее изобретение (№12, см. таблицу 1.1) демонстрирует буровую коронку с конической боковой поверхностью головной части с твердосплавными вставками, установленными по периферии под углом 10-20° к продольной оси коронки, причем на каждой из вставок выполнен участок, являющийся продолжением конической боковой поверхности коронки. Наличие конической поверхности и малая площадь зоны контакта коронки с породой снижают износ вставок и уменьшают вероятность заклинивания коронки.

Очередное изобретение (№13, см. таблицу 1.1) основано на введении соотношения между диаметром коронки и диаметром инденторов. Исходя из условия обеспечения снижения расхода твердого сплава и уменьшения энергоемкости процесса разрушения, авторы устанавливают, что диаметр вставок должен быть в 3 - 4 раза меньше диаметра коронки. Кроме этого, в процессе бурения горной породы такой коронкой принимать участие в воздействии на породу будут не только инденторы, но и корпус коронки, что приведет к снижению переизмельчения разрушаемой породы.

Задачей изобретения коронки, показанной в таблице 1.1 под №14, является обеспечение возможности легкой замены изношенных

твердосплавных вставок, повышение надежности и технологичности изготовления бурового инструмента. Достигается это благодаря установке инденторов через сепаратор, жестко и достаточно просто закрепляемый на корпусе коронки.

В 2001 году была запатентована буровая коронка (№17, см. таблицу 1.1), в которой применены твердосплавные вставки со смещенными вершинами рабочих участков. Причем в пределах кольцевой зоны разрушения вставки расположены поочередно с противоположной ориентацией вершин. По заявлению авторов такой способ армирования коронки позволяет повысить эффективность бурения.

Следующим оригинальным буровым инструментом (№18, см. таблицу 1.1) является коронка с твердосплавными вставками, расположенными концентрическими рядами. Согласно полезной модели, периферийные инденторы наклонены от геометрической оси коронки на угол $30 - 50^\circ$, а инденторы следующего ряда смещены так, чтобы перекрывать траекторию контуров периферийных вставок, причем ширина δ зоны перекрытия устанавливается в пределах от 1,5 до 0,45 от ширины S в радиальном направлении проекции рабочей части периферийной вставки в плоскости, перпендикулярной оси коронки. А оси вставок ряда, следующего за периферийным, наклонены к оси коронки под углом $0 - 30^\circ$. Применение такой коронки при ударно-вращательном бурении позволяет повысить ее ресурс за счет увеличения размеров корпуса в зоне установки периферийных инденторов, а также увеличить время их изнашивания.

Эффект от смещения вершин вставок также был применен при разработке коронки согласно патенту №2212511 (№19, см. таблицу 1.1). В ней цилиндросферические вставки установлены под углом, равным углу конусности соединения коронки с буровой штангой, причем наклон выполнен противоположно направлению вращения инструмента. Наклон вставок обеспечивает разрушение породы как непосредственно под вставкой, так и

путем скола за счет появления тангенциальной составляющей ударного усилия.

В буровой коронке, показанной в таблице 1.1 под №20, реализован технический эффект, заключающийся в том, что рабочая часть коронки содержит выступающую центральную часть, которая при забуривании первой контактирует с породой. Похожим вариантом усовершенствования конструкции коронки является расположение инденторов на конических ступенях рабочей части коронки с разным углом конусности, выбираемым из условия подъема вершин вставок от периферии к центру коронки (№21, см. таблицу 1.1). Такой способ размещения инденторов упрощает процесс забуривания, уменьшает отклонение скважины от необходимого направления, а также позволяет увеличить срок службы инструмента и скорость бурения. В следующем патенте (№22, см. таблицу 1.1) представлена буровая коронка, периферийные вставки которой также расположены на конической поверхности. Причем установлено, что угол между осью вставки и торцом коронки должен быть в интервале $36 - 40^\circ$, что облегчает процесс забуривания и снижает нагрузку на инденторы.

С целью повышения эффективности бурения скважин в крепких горных породах была разработана коронка (№23, см. таблицу 1.1), оснащенная цилиндросферическими вставками разного размера. Диаметр центральной вставки существенно преобладает над диаметрами остальных вставок. Причем в средней части между периферийными и центральным индентором добавлены дополнительные вставки, названные авторами врубковыми. В продолжение идеи совершенствования данной коронки авторами была предложена и запатентована новая конструкция (№26, см. таблицу 1.1), отличающаяся от предыдущей тем, что в ней центральный индентор смещен относительно центральной оси коронки.

По заявлению авторов полезной модели под №24 в таблице 1.1 интенсификация процесса бурения может быть достигнута при установке на инструменте инденторов с расстоянием между ними, равным 1,06 от диаметра

индентора, а соседний ряд вставок размещается на расстоянии 1,02 от диаметра индентора.

С целью снижения энергоемкости процесса бурения и уменьшения трудоемкости при изготовлении буровой коронки было предложено новое техническое решение безлезвийного бурового инструмента (№25, см. таблицу 1.1), заключающееся в выполнении на ударной поверхности корпуса буровой коронки концентрического углубления, глубина которого не менее величины рабочего выступа индентора, а диаметр – не менее двух диаметров индентора. При таких геометрических соотношениях не только упрощается конструкция коронки, но и устраняется переизмельчение разрушенной горной породы. Для достижения аналогичных целей авторами была предложена еще одна конструкция бурового инструмента (№27, см. таблицу 1.1), в которой на ударной поверхности не являющиеся периферийными инденторы размещены на разных радиусах от центра ударной поверхности корпуса по лучам, проведенным из этого центра через заданный угол.

Предпоследней в результатах патентного поиска представлена буровая коронка (№28, см. таблицу 1.1), в центральной части которой симметрично установлены два врубовых индентора, а перпендикулярно вблизи оси коронки добавлена керновая вставка, при этом врубовые инденторы выступают выше остальных относительно торца коронки. Конструкция следующей коронки (№29, см. таблицу 1.1) повторяет предыдущую с тем отличием, что все вставки, расположенные за пределами врубовых, устанавливаются неравномерно с изменением каждого очередного угла установки на 5°.

Стоит отметить, что в таблице 1.1 приведены только российские разработки [6].

Многообразие конструктивных исполнений безлезвийных буровых коронок (рисунок 1.6) обусловлено их областью назначения – машиной и свойствами горной породы. Однако в любом случае рабочий элемент такого инструмента представлен вставкой (штырем, индентором), выполненным из высокопрочного твердого сплава (например, ВК-15), которая также обладает различной геометрической формой (рисунок 1.11).



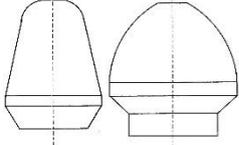
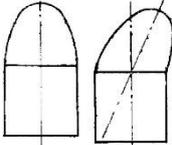
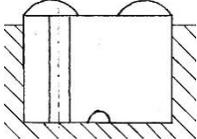
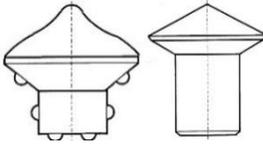
Рисунок 1.11 – Инденторы различной формы: а – сферический, б – баллистическая, в – полубаллистическая, г – параболическая (катенид), д – сферическая выпукло-вогнутая [9]

Производительность и энергоёмкость процесса бурения шпуров и скважин зависят от формы рабочей поверхности коронки, формы твердосплавных вставок, их количества и схемы размещения [6]. Однако замечено, что при проведении буровых работ наибольшее распространение получил инструмент со вставками сферической или полубаллистической формы. Тем не менее, анализ литературных источников и открытых реестров результатов интеллектуальной деятельности показывает наличие более двух десятков уникальных технических решений (таблица 1.2), которые могут обрести практическое применение в ближайшей перспективе.

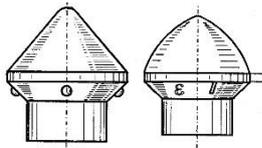
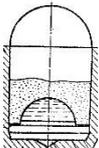
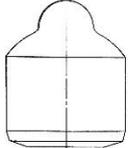
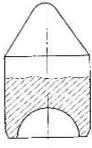
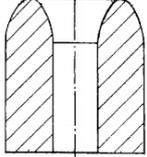
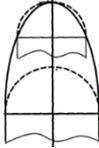
Таблица 1.2 – Избранные результаты патентного поиска твердосплавной вставки (составлено авторами)

Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№1		№12	
№99401, Зубок из твердого сплава для буровых шарошек/ Клубничкин К.Ф., Ривкин Г.М., 01.01.1954.		№2090735, Твердосплавная вставка Дворникова-Вечужанина для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Вечужанин Д.С., 20.09.1997.	

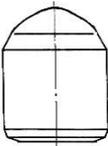
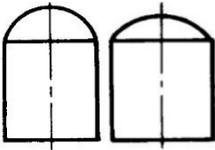
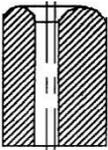
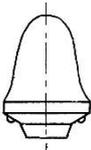
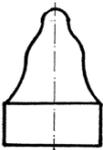
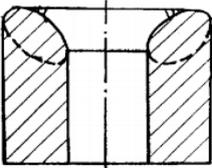
Продолжение таблицы 1.2

Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№2		№13	
<p>№205743 Зуб шарошки к установке для бурения стволовых шахт/ Швец В.В. 02.12.1967.</p>		<p>№2098624 Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента/ Бешенков Г.И., Глатман Л.Б., Гриневецкий Ю.А., Козлов Ю.Н., Леванковский И.А., Мультанов С.И., Средняков Г.П., Толстов А.В. 10.12.1997.</p>	
№3		№14	
<p>№327326, Породоразрушающая цилиндрическая вставка/ Зыкин В. Т., Вольхин Э.А., Боярских Г.А., Суслов А.А., Нем В.Ф., Рейман Н.Н., Золотарев Г.Д., 26.01.1972.</p>		<p>№2105124, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента и способ ее крепления/ Прядко Ю.А., Тон В. В., Прокушенко С.И., Мельников Б.В., 20.02.1998.</p>	
№4		№15	
<p>№723118, Породоразрушающая цилиндрическая вставка/ Авдонин Ю.Ф., 25.03.1980</p>		<p>№2124126, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента горной машины/ Леванковский И.А., Козлов Ю.Н., Глатман Л.Б., Мультанов С.И., Шульц В.Д., 27.12.1998</p>	

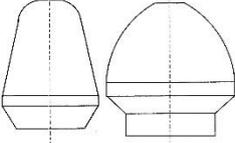
Продолжение таблицы 1.2

Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№5		№16	
№77681, Породоразрушающая твердосплавная вставка / Зубарев А.В., Саркисянц Т.Х., Матвеев Г.И., Линдо Г.В., Рыжиков Ю.В., 30.11.1982		№2120034, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента/ Леванковский И.А., Мультианов С.И., Шульц В.Д., Толстов А.В., Глатман Л.Б., Козлов Ю.Н., 10.10.1998	
№6		№17	
№1174553, Твердосплавный зубок для бурового инструмента/ Богомолов Р.М., Михайлин Ю.Г., Чувиллин А.М., Злобин Г.П., Бутаков Л.Г., Заварухин В.И., Волков Б.Н., 23.08.1985		№2161685, Породоразрушающий зубок бурового долота/ Богомолов Р.М., Микроусов В.П., 10.01.2001.	
№7		№18	
№1353885, Породоразрушающая вставка/ Евсеев П.П., Иванов Р.А., Якимчук У.Н., 23.11.1987		№2202030, Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Вечужанин Д.С., 10.04.2003	
№8		№19	
№1778265 Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Куклин С.А., Дворников Л.Т., 30.11.1992		№2347885, Твердосплавная вставка-катенид / Дворников Л.Т., Жуков И.А., 27.02.2009	

Продолжение таблицы 1.2

Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№9		№20	
№1765349, Породоразрушающий инструмент/ Леванковский И.А., Глатман Л.Б., Трубицын Е.Д., Яшина Л.С., Евстешин М.П., Кантор С.И., Мелько Б.М., Осадчий В.А., Билозир Р.М., 30.09.1992		№2166609, Твердосплавный породоразрушающий зубок бурового шарошечного долота / Богомолов Р.М., Мокроусов В.П., 10.05.2001	
№10		№21	
№2039192, Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Береснев А.Н., Куклин С.А., 09.07.1995		№2160816, Твердосплавная вставка/ Бойков В.В., Дворников Л.Т., Куклин С.А., 20.12.2000	
№11		№22	
№2055189, Твердосплавная вставка для режущего инструмента/ Леванковский И.А., Гриневицкий Ю.А., Шульц В.Д., Александров Ю.А., 27.02.1996		№2167993, Твердосплавная вставка для буровых коронок / Дворников Л.Т., Губанов Е.Ф., 27.05.2001	
№12		№23	
№2090735, Твердосплавная вставка Дворникова-Вечужанина для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Вечужанин Д.С., 20.09.1997		№2200819, Вставка для породоразрушающего инструмента/ Котерев И.А., Бычков А.А., Зотов В.Е., Лузан Ю.В., Аленин Р.А., 20.03.2003	

Продолжение таблицы 1.2

Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№13		№24	
№2098624, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента/ Бешенков Г.И., Глатман Л.Б., Гриневицкий Ю.А., Козлов Ю.Н., Леванковский И.А., Мультанов С.И., Середняков Г.П., Толстов А.В., 10.12.1997		№2462581, Породоразрушающий зубок/ Будюков Ю.Е., Кремлев В.И., Чувилин А.М., Панин Н.М., Комаров Е.И., 27.09.2012	

Анализ приведенных запатентованных технических решений позволяет ввести градацию (классификацию) геометрических параметров твердосплавных вставок, предназначенных для армирования безлезвийного бурового инструмента, по признакам, приведенным на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 -- Классификация по результатам патентного поиска [9]

Каждая из представленных в таблице 1.2 вставок по существу имеет две составляющие – это посадочный участок и рабочий участок. Посадочный участок предназначен для того, чтобы непосредственно соединить вставку с корпусом коронки. В связи этим во всех вставках, как правило, этот участок имеет цилиндрическую форму. Но в некоторых патентах она коническая, это обусловлено тем, что вставка прижимается к коронке соединительным

элементом без применения операции пайки. Такая вставка применяется в коронках, обеспечивающих оперативный ремонт в результате поломки отдельных вставок, а не всей коронки.

Рабочий участок вставки, как правило, представляет собой тело вращения какой-либо плоской кривой. По результатам анализа представленных конструкций установлено, что в качестве такой кривой используют дугу окружности, цепную линию, синусоиду, параболу, эллипсоид и др. Целесообразность применения различных кривых обуславливается тем, что при воздействии рабочим участком на породу площадь контакта непосредственно зависит от радиуса кривизны боковой поверхности этого участка в каждой точке [9].

Среди представленных в таблице 1.2 имеются такие вставки, у которых рабочий участок снабжен приливом, расположенным на боковой поверхности рабочего участка. Использование таких вставок позволяет увеличить износостойкость инструмента при калибровании стенок скважины. При этом следует отметить, что такое исполнение влечет за собой необходимость контроля ориентации установки каждой вставки в корпус коронки, что естественным образом усложняет процесс технологической сборки.

Отдельно необходимо выделить вставки, которые являются полыми. Они имеют тороидальную рабочую поверхность. Однако при воздействии такой вставкой на породу площадь контакта оказывается достаточно большая. Тем не менее особым преимуществом такого конструктивного исполнения является улучшение качества удаления буровой мелочи из шпуров, так как воздух или жидкость можно подавать в том числе и через сквозное отверстие вставки.

Следующий вид твердосплавных вставок, используемых для армирования бурового инструмента, – это инденторы с отклонением геометрической оси рабочего участка. Такие вставки чаще всего используются для оснащения периферийной части буровой коронки. Однако такое

исполнение требует контролирования ориентации вставки во время сборки инструмента.

Несмотря на представленное широкое многообразие технических решений безлезвийных инденторов, повторим, что самым распространенным в реальной практике бурения вариантом вставки является цилиндросферический (Г26, ГОСТ 880-75), в котором рабочая поверхность выполнена по участку сферы. Обладая простотой исполнения и изготовления, такие вставки имеют существенный недостаток – притуплённость рабочей поверхности. Постоянная кривизна дуги окружности в продольном сечении вставки приводит к необходимости приложения значительных контактных нагрузок для внедрения инструмента в горную породу. Это напрямую сказывается на эффективности процесса бурения и сроке службы инструмента. В связи с этим в технологии ударного бурения распространены также твердосплавные вставки с полубаллистической рабочей поверхностью – более острой по сравнению со сферической. Однако из-за абразивного износа и ударных нагрузок рабочий участок такой вставки неизбежно приобретает полусферическую форму, что резко снижает скорость бурения и увеличивает энергозатраты.

Таким образом, оптимизация геометрии твердосплавных вставок играет ключевую роль в повышении эффективности буровых инструментов и снижении затрат на их эксплуатацию.

1.4 Современные подходы к разработке и совершенствованию структуры безлезвийного бурового инструмента

Эффективность разрушения горных пород различными по типам буровыми инструментами отличается в зависимости от их физико-механических свойств и параметров взаимодействия инструмента и породы. В связи с этим изучение процесса разрушения горных пород имеет большое значение для создания научно-теоретических основ исследования и проектирования структуры безлезвийного бурового инструмента.

Первые исследования по разрушению горной породы долотчатым инструментом проводились в 1865 г. Шпарре Дж. и в 1889 Долежалекком Д.Т. По результатам исследования авторы пришли к выводу о том, что разрушение горной породы соответствует форме внедряющегося бурового инструмента.

Взаимодействие породоразрушающего инструмента с породой описывается теорией упругости, в частности контактными задачами. Первые исследования, посвященные задачам пространственного контакта, были проведены Я. Буссинеском и Г. Герцем.

В дальнейшем их работы стали основой для последующих исследований, направленных на развитие методов анализа контактного взаимодействия. Значимые результаты были получены Л.А. Галиным, А.И. Лурье, И.Я. Штаерманом [30, 73, 122], которые существенно расширили теоретические и практические представления о поведении упругих и пластических тел при контактном взаимодействии. Некоторые из этих результатов впоследствии были использованы для оценки напряженного состояния горных пород при внедрении породоразрушающего инструмента.

Л.А. Шрейнер [120, 121], основываясь на известной задаче Буссинеска о действии сосредоточенной силы на плоскость в области упругих деформаций, вывел расчетные формулы для определения нормальных и касательных напряжений по оси симметрии, предложил определять прочностные характеристики пород методом внедрения штампов, а сама характеристика получила наименование «агрегатная твердость». Это объясняется тем, что для решения вопросов, связанных с процессами разрушения пород при бурении, основные характеристики пород следует определять методами, по своей физической сути наиболее близкими к процессам разрушения поверхностного слоя породы. Подход, основанный на динамическом нагружении, изложен и экспериментально обоснован в работе [83].

Опираясь на основные выводы в работах Л.А. Шрейнера о предельных состояниях поверхностного слоя породы, Л.И. Барон и Л.Б. Глатман [18] проводили испытания горных пород, заключающиеся во вдавливании

твердосплавных вставок с цилиндрической и конической боковой поверхностью в естественную (необработанную) поверхность природного образца. В результате была определена критическая контактная прочность, при достижении которой происходит объемное разрушение породы с образованием лунки выкола.

О.Д. Алимов [13, 14], основываясь на теорию Л.А. Шрейнера, утверждает, что разрушение горной породы средней и высокой крепости под действием породоразрушающего инструмента происходит вследствие упруго-пластической деформации скачкообразно. Для увеличения скорости бурения рекомендуется повышать энергию единичного удара до 250- 300 Дж.

Работа Р.М. Эйгелеса [123] детально описывает механизмы разрушения горных пород, анализируя зоны максимальных напряжений. Он показал, что в зависимости от свойств породы (прочности, трещиноватости, пористости) и параметров воздействия (геометрии штампа, величины нагрузки, скорости приложения нагрузки) преобладает либо сдвиговое, либо нормальное разрушение.

Б.Н. Кутузов и Г.М. Крюков [63-65] значительно продвинули понимание процесса, используя основные уравнения гидродинамики для описания внедрения инструмента. Их модель учитывает волновые процессы, возникающие при ударном взаимодействии, распространение упругих волн в породе и их влияние на образование и развитие трещин [67]. Эта модель позволяет более точно предсказывать размеры зоны разрушения и характер фрагментации породы. Принципы взаимодействия импульсных волн с технологическими средами, а также анализ технологий разрушения твёрдых тел рассматривались в работах [16,17].

Развитие этого направления было продолжено в работе А.И. Авдеевой, А.В. Шадринной и Л.А. Саруева [1], где предложена методика расчёта распространения продольных волн деформаций по буровому инструменту, что позволяет учитывать влияние динамических факторов на характеристики передачи ударной энергии и уточнять расчет прочностных и деформационных

параметров конструкции. В работе [36] было проведено исследование прохождения ударного импульса через буровой инструмент, которое привело к разработке новой конструкции штыревой коронки. Конструкция устроена таким образом, что обеспечивает максимальную передачу импульса от поршня ударника к породоразрушающим штырям, а также равномерное распределение напряжений по корпусу коронки, при этом обеспечивается повышенное продольное внедрение коронки, необходимое для разрушения породы.

В различных исследованиях неоднократно подтверждается зависимость эффективности бурения от геометрических параметров буровой коронки и твердосплавных вставок [22, 68], их материала [66, 70, 69], количества и схемы размещения вставок на поверхности породоразрушающего инструмента. Как показано в работах [58, 57, 62], оптимизация конструкции и параметров породоразрушающего инструмента оказывает существенное влияние на эффективность ударного бурения.

В работе [100] рассматривается взаимодействие клиновых инденторов и штампов с горными породами. Эти исследования фокусируются на влиянии геометрии инструмента на характер разрушения. Например, остроконечные инденторы создают более концентрированные поля напряжений, что приводит к образованию трещин меньшего размера, но большей плотности. Тупые штампы генерируют более обширную зону разрушения с крупными фрагментами породы.

Экспериментальные работы [4], проведенные на образцах из оптического стекла, позволили наглядно продемонстрировать образование трещин и зоны разрушения. Использование оптически прозрачных материалов дало возможность прямого наблюдения за развитием напряжений и трещин и сделать выводы. Одним из основных выводов является то, что объем лунки выкола существенно больше внедрившейся части сферы. В ряде исследований [70–72] рассматриваются различные аспекты взаимодействия бурового инструмента с анизотропной горной породой. Особое внимание уделяется

конструктивным особенностям инструмента, характеру силового воздействия и влиянию поверхностно-активных веществ на траекторию бурения.

Значительный интерес представляет изучение эффекта совместности, так называемого эффекта симультанности, возникающего при использовании нескольких инденторов. Этот эффект, описанный в работах Л.И. Барона, Л.Б. Глатмана и Ю.Н. Козлова [18, 19], проявляется в снижении усилия вдавливания при одновременном применении нескольких инденторов по сравнению с одиночным. Физическая основа этого явления заключается в суперпозиции полей напряжений, возникающих в породе между инденторами, вдавливаемыми в породу. Установлено, что для каждой породы существует постоянное значение отношения шага вдавливания, при котором исключается влияние соседней лунки, к диаметру индентора, при этом данное отношение не зависит от абсолютного размера индентора.

Значимость эффекта совместности при разрушении поверхностного слоя породы подтверждается также в работе [15] и ряде других исследований. Более глубокое понимание этих процессов было получено в рамках аналитического исследования поля напряжений, проведенного под руководством Р.М. Эйгелеса [123]. Авторы обосновали, что в центральной части массива порода между инденторами должна выкалываться непредразрушенной, а глубина общей лунки будет практически не зависеть от расстояния между инденторами, пока сохраняется условие общего выкола. Экспериментальная проверка этих предположений на образцах мрамора и известняка подтвердила предположения.

Значительный вклад в изучение механизма разрушения горных пород при одновременном динамическом вдавливании множественных штампов внес коллектив Уфимского нефтяного института под руководством проф. М.Р. Мавлютова [75]. В экспериментах использовалась установка с тремя цилиндрическими штампами, размещёнными в вершинах равностороннего треугольника. Установлено, что при синхронном внедрении объём разрушенной породы в среднем на 40 % превышает результаты при

последовательном вдавливании, что свидетельствует о наличии выраженного синергетического эффекта. В дальнейшем Ю.Н. Козлов [19] и М.Р. Мавлютов [74] исследовали распределение касательных напряжений с применением оптически чувствительных материалов и численного моделирования, подтвердив выкалывание блока породы между инденторами при определённых условиях.

Наиболее значимые исследования по применению безлезвийного (штыревого) бурового инструмента были проведены под руководством профессора Л.Т. Дворникова [40, 41, 39]. Первые образцы такого инструмента были испытаны на граните с коэффициентом крепости $f = 16 \dots 18$ по шкале М.М. Протоdjяконова. В ходе экспериментов Л.Т. Дворников доказал, что применение безлезвийного инструмента позволяет минимизировать угол поворота между ударами, что, в свою очередь, снижает скорость вращения инструмента вокруг его продольной оси. Данный эффект приводит к существенному сокращению износа [89] твердосплавных вставок, так как степень их износа в основном определяется длиной пути трения. На этом этапе возник важный вопрос о возможности полного отказа от вращения инструмента, при котором порода на всей площади забоя разрушалась бы за один удар. Однако исследования показали, что при ударном разрушении хрупких сред без вращения инструмента производительность процесса и его энергоэффективность пока уступают традиционному ударно-поворотному способу бурения [112, 111, 113].

В работе Л.Т. Дворникова и Е.Ф. Губанова [40] рассмотрена возможность бурения шпуров без вращения инструмента за счёт рационального размещения инденторов. Экспериментальные исследования показали, что глубина внедрения инденторов зависит от угла поворота между ударами и энергии удара. Уменьшение угла поворота позволяет повысить глубину разрушения и снизить энергоёмкость процесса. Установлено, что правильно расположенные инденторы обеспечивают эффективную передачу ударной нагрузки и разрушение породы по всей площади забоя за один удар.

В работе [135] рассмотрена возможность формирования отверстий некруглого сечения, что открывает перспективы для направленного разрушения горных пород. Результаты, подтверждающие эффективность такого подхода, а также данные по ресурсу инструмента и энергетическим затратам при использовании комбинированных вставок, приведены в работе [126]. Дополнительное внимание к особенностям формирования крутящего момента на буровом инструменте в условиях образования скважин с угловыми концентраторами напряжений уделено в исследовании Г.Д. Буялича [27], где обоснована необходимость учёта неравномерного распределения напряжений при проектировании инструмента для сложнопрофильных выработок.

В исследованиях Е.Ф. Губанова [38, 41] рассмотрены вопросы размещения инденторов на породоразрушающей части бурового инструмента с учётом эффекта симультанности, влияющего на эффективность разрушения горной породы. Кроме того, автор рассмотрел возможность формирования отверстий сложной геометрии, что может применяться для создания шпуров и скважин с некруглым поперечным сечением. Это достигается за счёт размещения инденторов таким образом, что в острых углах пробуренного отверстия создаются зоны концентраторов напряжений, что позволяет направленно воздействовать на горный массив, снижая общий объём бурения при проведении взрывных работ или формировании конструктивных элементов горных выработок.

В ряде работ И.А. Жукова и соавторов [48, 47, 50] обоснована концепция безвращательного ударного бурения, основанная на рациональном размещении инденторов на породоразрушающей части инструмента. В частности, в работе [51] показано, что при размещении инденторов в вершинах равностороннего треугольника разрушение породы между ними происходит за один удар, что делает возможным формирование шпуров без вращения инструмента вокруг своей оси. Экспериментальные исследования [48] показали, что взаимное расположение инденторов определяет не только характер разрушения, но и оптимальные геометрические параметры

инструмента, которые должны подбираться в соответствии с конкретными горно-геологическими условиями. В работе [52] описан эффект симультанности — взаимного усиления разрушения породы при одновременном внедрении близко расположенных инденторов. Результаты, представленные в работе [47], подтверждают эффективность использования схем треугольного и квадратного расположения инденторов. В более поздней публикации [50] предложены новые виды бурового инструмента, ориентированные на разрушение высокопрочных горных пород.

Сейчас принято считать, что в области совершенствования породоразрушающего инструмента основным направлением является развитие машиностроительных технологий и материалов [37, 42]. Анализ исследований [115], посвященных современным конструкциям породоразрушающего инструмента отечественного и зарубежного производства, а также результаты выполненных работ, позволяют заявить о возможности создания новых конструкций буровых инструментов повышенной эффективности [43, 110].

В работах В.Н. Опарина, В.В. Тимонина, В.Н. Карпова и Б.Н. Смоляницкого [81, 82, 101] исследуется совершенствование бурового инструмента на основе применения энергетического критерия объемного разрушения горных пород в технологии ударно-вращательного бурения. Разработаны методы адаптации энергетического критерия к различным типам буровых установок, введены эмпирические коэффициенты трансформации энергозатрат, а также предложена математическая модель минимизации расхода энергии в зависимости от параметров бурового инструмента. Авторы ввели понятие «фактор топологической связности горных пород», позволяющее учитывать физико-механические свойства пород и их влияние на процесс разрушения.

Современные исследования, проведенные рядом ученых [46, 95], направлены на изучение закономерностей разрушения горных пород с акцентом на совершенствование бурового инструмента. В рамках этих работ

проводится комплексный анализ процессов взаимодействия инденторов с породой, выявляются ключевые факторы, влияющие на энергоёмкость бурения, и разрабатываются методы повышения эффективности бурового процесса. Вопросы геометрической точности и параметров конструкции бурового инструмента освещаются в ряде исследований, включая [99].

В работе А.В. Гилева, А.О. Шигина, С. В. Доронина, В. Т. Чеснокова [34] были изучены различные формы вставок бурового безлезвийного оборудования и их влияние на напряжённое состояние бурового инструмента. В ходе лабораторных исследований установлено, что срок службы инденторов и эффективность разрушения породы зависят от их геометрических параметров, таких как угол заострения, степень затупления и форма рабочей поверхности. Перспективы совершенствования конструкции буровых инструментов, в том числе их разборных вариантов для открытых горных работ, рассмотрены в работе А.В. Гилёва [32]. Важность оптимизации конструкции оборудования также подчёркивается в сравнительном анализе отечественных и зарубежных буровых станков, проведённом А.В. Гилёвым и А.О. Шигиным [33]. Дополнительные аспекты, касающиеся нагрузки на породоразрушающий инструмент при бурении сложноструктурных пород, рассмотрены в исследовании А.О.Шигина и А.В.Гилёва [117], а вопросы повышения эффективности разрушения горных пород с применением шарошечных долот и сравнительного анализа их работы освещены в публикациях А.О. Шигина [118, 119].

При анализе механизмов разрушения горной породы под действием ударно-поворотных нагрузок особое внимание уделяется процессу сколообразования как одному из ключевых факторов повышения эффективности бурения [35]. Дополнительно рассматриваются особенности внедрения клиновидных элементов различной формы в породный массив при различных схемах нагружения, что позволяет уточнить характер взаимодействия инструмента с породой [104].

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность разрушения породы, является оптимальное соотношение расстояния между осями инденторов (l_{II}) и их диаметром (d_{II}). Анализ известных технических решений буровых коронок штыревого типа показывает, что на практике отношение расстояния между осями соседних твердосплавных вставок к их диаметру l_{II}/d_{II} принимается в интервале от 1 до 3 (рисунок 1.15).

Представленные на рисунке 1.13 схемы размещения твердосплавных вставок отражают реальные геометрические параметры буровых коронок штыревого типа (см. рисунок 1.4), используемых в производственных условиях при бурении скважин в крепких горных породах. В результате проведенного анализа установлено, что значение отношения l_{II}/d_{II} изменяется в диапазоне от 1,60 до 3,20 в зависимости от конкретной схемы размещения вставок на рабочей поверхности бурового инструмента.

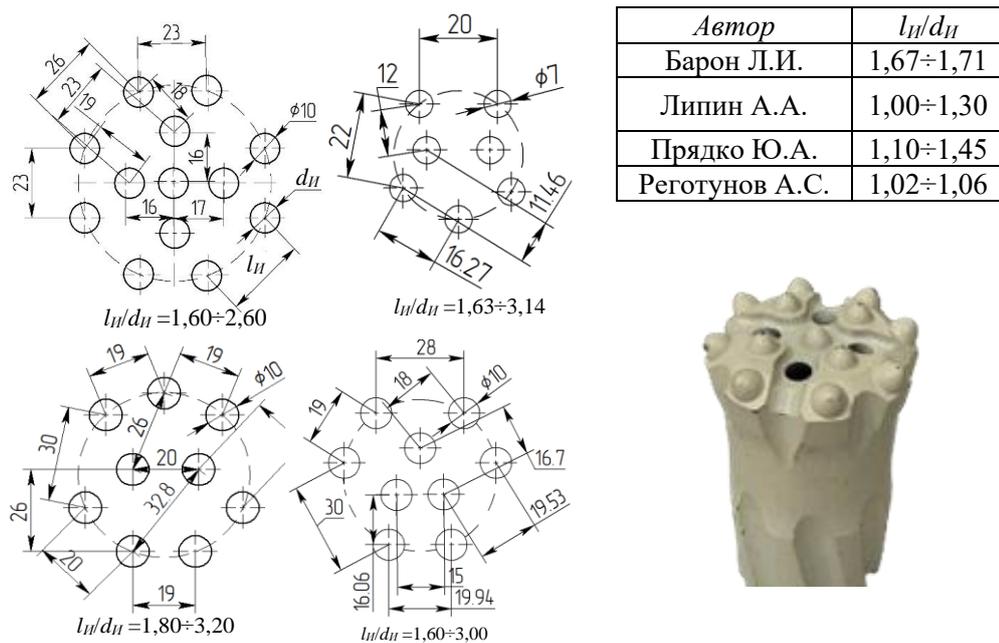


Рисунок 1.13 – Реализация эффекта simultанности на практике
(составлено автором)

Критериями оптимальности величины отношения l_{II}/d_{II} выступают объем и глубина разрушения породы при ударном воздействии и удельное количество инденторов в единицу площади рабочей поверхности корпуса бурового инструмента. Превышение оптимальной величины l_{II}/d_{II} приводит к тому, что за один удар разрушается не вся площадь забоя, и коронка войдет в

контакт с породой корпусом, что приведет к его повреждению и приостановке процесса бурения для замены инструмента.

Зарубежные исследователи отмечают, что на эффективность разрушения горной породы при бурении существенное влияние оказывают такие параметры [129, 132], как скорость вращения, энергия и частота ударов, а также тип буровой коронки [127, 130, 131]. В частности, в работе [125] показано, что энергия удара оказывает значительное влияние на скорость бурения, тогда как скорость вращения и давление подачи имеют умеренное воздействие, а частота ударов не оказывает статистически значимого влияния. Это подтверждается и другими исследованиями, в которых подчеркивается важность рационального подбора бурового инструмента, режимов подачи и промывки от бурового шлама [124, 133, 134]. В отечественных исследованиях также подчеркивается значимость параметров промывки: установлено, что конструкция промывочного узла и режимы циркуляции промывочной жидкости оказывают прямое влияние на механическую скорость проходки и эффективность удаления выбуренной породы [28, 98].

Буровая техника и инструмент постоянно совершенствуются: применяются новые технические решения [60, 76], улучшается качество твердого сплава, возрастает энергия единичного удара [107, 116]. Однако анализ применения современного отечественного бурового инструмента в скальных горных породах свидетельствует о его недостаточной эффективности. Создание условий, при которых повышается доля породы, разрушенной ударом, гарантирует уменьшение энергоемкости бурения, так как предел прочности породы при скалывании на порядок меньше предела прочности породы при сжатии [45, 44]. В связи с этим исследования закономерностей процесса разрушения скальных горных пород буровыми коронками штыревого типа являются актуальными.

Все вышеизложенное подтверждает необходимость повышения эксплуатационных характеристик бурового оборудования путем

рационализации конструкций, схем и способов армирования породоразрушающего инструмента.

1.5 Выводы по Главе 1

Анализ современного состояния вопроса проектирования безлезвийного бурового инструмента позволил сформулировать следующие выводы:

1. Безлезвийный буровой инструмент штыревого типа представляет собой перспективное направление развития бурового оборудования, применение которого позволяет повысить эффективность бурения горных.

2. Проведённый обзор существующих запатентованных конструктивных решений безлезвийного бурового инструмента, свидетельствует о наличии большого количества конструктивных вариаций инструмента. Однако при этом отсутствует обоснование геометрических параметров бурового инструмента, обеспечивающих уменьшение энергоёмкости процесса бурения.

3. Эффект симультанного разрушения горной породы, возникающий при одновременном внедрении нескольких инденторов, имеет существенное значение для дальнейшего совершенствования бурового инструмента. Однако необходимо отметить существенное расхождение конкретных результатов теоретических и экспериментальных исследований, посвященных обоснованию эффекта симультанности. Это в первую очередь связано с проведением опытов в статических условиях нагружения, которые сопоставимы с динамическими лишь в ограниченных условиях.

По результатам проведенного анализа сформулированы задачи диссертационной работы.

1. Систематизировать результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Оценить влияние геометрических характеристик безлезвийного бурового инструмента и его элементов на эффективность разрушения горной породы.

3. Провести аналитическое исследование влияния полей напряжений при симультанном (одновременном) воздействии на горную породу группой инденторов.

4. Провести экспериментальные исследования по разрушению горных пород породоразрушающим инструментом, армированным инденторами по различным схемам.

5. Разработать рекомендации по совершенствованию, рациональному выбору конструкций, схем и способов армирования инденторами породоразрушающего инструмента.

ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ УДАРОМ

2.1 Механика разрушения горной породы безлезвийным инструментом.

Эффект simultанности

Энергоемкость процесса бурения скважин ударно-поворотным способом определяется и зависит от геометрических параметров твердосплавных вставок, которыми оснащается буровой инструмент, от расстояния между двумя соседними вставками, а также от общей схемы размещения вставок на рабочей поверхности инструмента.

Взаимодействие индентора с поверхностью горной породы представляет собой сложный механический процесс, который можно разделить на несколько последовательных этапов.

На первом этапе происходит начальный контакт индентора с поверхностью породы. В этот момент нагрузка сосредоточена на небольшой площади, что приводит к локальному напряжению в точке контакта. Однако реальная поверхность породы, даже при кажущейся гладкости на макроуровне содержит микронеровности, трещины и поры.

С увеличением нагрузки начинается вдавливание индентора в породу, сопровождающееся деформацией контактной зоны. В результате формируется площадка контакта, размеры которой увеличиваются по мере углубления индентора. Напряжения в породе распределяются неравномерно – их максимум приходится на область непосредственно под индентором и убывает по мере удаления.

При достижении предела прочности порода в наиболее напряженной зоне начинает разрушаться. Разрушение происходит сначала на микроуровне, когда отдельные зерна и кристаллы теряют связь между собой, образуя локальные зоны дробления. Затем процесс переходит на макроуровень – формируется основная лунка разрушения. В зависимости от физико-

механических свойств породы, ее структуры и наличия внутренних дефектов процесс может сопровождаться образованием трещин, распространяющихся радиально от индентора или под углом к поверхности.

Процесс одновременного (симультанного) внедрения твердосплавных вставок (инденторов) в горную породу при ударном воздействии можно разделить на несколько ключевых стадий (рисунок 2.1).

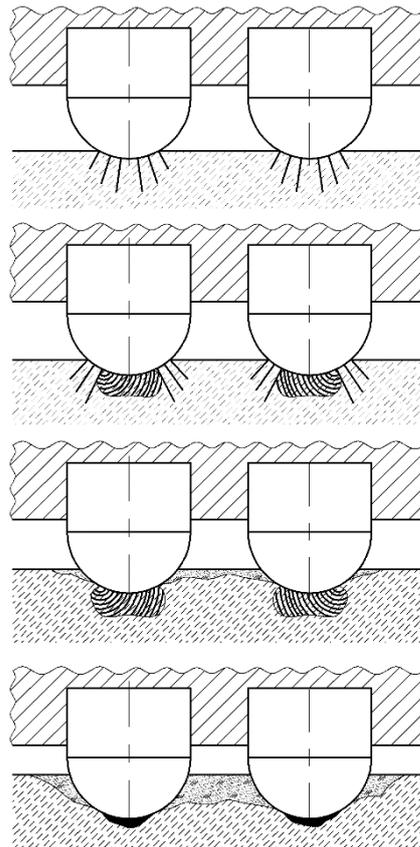


Рисунок 2.1 - Симультанное внедрение инденторов в горную породу
(составлено автором)

На начальной стадии происходит точечный контакт инденторов с породой. Однако это лишь мгновенное состояние. Под воздействием силы, приложенной к инденторам, происходит деформация поверхности породы, и зона контакта расширяется, образуя площадку контакта конечных размеров. Важно отметить, что поверхность породы на микроуровне представляет собой сложный рельеф, состоящий из микронеровностей, трещин и пор различного размера. Первоначальный контакт происходит именно по этим выступам, что приводит к их мгновенному смятию и разрушению, формируя

микроскопические зоны фрагментации еще до образования макроскопической площадки контакта. Это начальное разрушение может быть значительным, особенно в породах с низкой прочностью.

Далее на площадке контакта возникает сложное напряженное состояние. Напряжения распределяются неравномерно, достигая максимальных значений непосредственно под точкой приложения силы и экспоненциально убывая с удалением от нее. Характер этого распределения напряжений зависит от многих факторов, включая геометрию индентора, величину приложенной силы, физико-механические свойства породы, наличие предварительных трещин и текстурных особенностей. Например, анизотропность породы, обусловленная ориентировкой минеральных частиц или слоистостью, может привести к существенному изменению напряженного состояния, что может приводить к образованию трещин по определенным направлениям.

При достижении предела прочности породы в наиболее напряженной зоне, происходит хрупкое разрушение, проявляющееся в образовании лунки выкола. Этот процесс не является мгновенным, а происходит постепенно, распространяясь от точки максимального напряжения. Важно отметить, что разрушение происходит не по строго определенной плоскости, а по сложной, непредсказуемой траектории, проходящей по зонам наименьшей прочности породы, обусловленным наличием микротрещин, пор и других дефектов структуры. При определенном соотношении расстояния между соседними инденторами и их диаметра происходит наложение полей напряжений в породном массиве, что приводит к сколу породы относительно крупными частицами в пространстве между инденторами. После образования общей лунки выкола давление на площадке контакта снижается, и процесс может остановиться либо повториться, если приложенная сила достаточна для дальнейшего разрушения.

2.2. Установление зависимости результативности разрушения горной породы от геометрических параметров индентора

Рассмотрим процесс деформирования горной породы при воздействии индентором, в основе которого лежат закономерности упругопластического контакта, которые описывают взаимодействие жёсткого тела (индентора) с упругим или хрупким материалом (горной породой). Геометрическая форма, размеры и нагрузка индентора определяют характер распределения контактных напряжений и зону пластических деформаций.

Для более детального анализа необходимо рассмотреть задачу о воздействии давления инденторов на горную породу, занимающую полупространство, при условии отсутствия силы трения между индентором и поверхностью упругопластического тела.

Предположим, что на границе полупространства при $z=0$ приложена заданная нагрузка $p(x, y)$. Для определения напряжённого состояния и перемещений внутри упругого тела (горной породы) целесообразно использовать подход, предложенный А. И. Лурье. Этот метод опирается на функции, разработанные П. Ф. Папковичем и Нейбером для решения трёхмерных задач [30]. В рамках данного подхода перемещения u, v и w описываются через систему уравнений через гармонические функции Φ_0, Φ_1, Φ_2 и Φ_3 (2.1):

$$\left. \begin{aligned} u &= \Phi_1 - \frac{1}{4(1-\mu)} \frac{\partial}{\partial x} (\Phi_0 + x\Phi_1 + y\Phi_2 + z\Phi_3), \\ v &= \Phi_2 - \frac{1}{4(1-\mu)} \frac{\partial}{\partial y} (\Phi_0 + x\Phi_1 + y\Phi_2 + z\Phi_3), \\ w &= \Phi_3 - \frac{1}{4(1-\mu)} \frac{\partial}{\partial z} (\Phi_0 + x\Phi_1 + y\Phi_2 + z\Phi_3). \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Согласно методу Папковича-Нейбера, потенциалы Φ_1, Φ_2, Φ_3 можно связать с гармонической функцией $\varphi(x, y, z)$ (2.2):

$$\Phi_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \Phi_2 = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \Phi_3 = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (2.2)$$

Функция Φ_0 выражается через φ (2.3):

$$\Phi_0 = -2(1 - \mu)\varphi. \quad (2.3)$$

Используя уравнения механики сплошных сред, связывающие напряжения и перемещения (2.4):

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right). \quad (2.4)$$

Подставляя выражения для перемещений, получаем систему уравнений с функцией $\varphi(x, y, z)$, в которой все компоненты напряжений и перемещений в полупространстве, подвергнутому воздействию штампа, определяются следующей системой уравнений (2.5):

$$\left. \begin{aligned} u &= (1 - 2\mu) \int_z^{\infty} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} dz - z \frac{\partial \varphi_1}{\partial x}, \\ v &= (1 - 2\mu) \int_z^{\infty} \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} dz - z \frac{\partial \varphi_1}{\partial y}, \\ w &= (1 - 2\mu) \varphi_1 - z \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \\ \sigma_x &= \frac{E}{1 + \mu} \left(2\mu \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + (1 - 2\mu) \int_z^{\infty} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} dz - z \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} \right), \\ \tau_{yz} &= -\frac{E}{1 + \mu} z \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y \partial z}, \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 + \mu} \left(2\mu \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + (1 - 2\mu) \int_z^{\infty} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} dz - z \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} \right), \\ \tau_{zx} &= -\frac{E}{1 + \mu} z \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z \partial x}, \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{1 + \mu} (1 - 2\mu) \int_z^{\infty} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x \partial y} dz - z \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x \partial y}, \\ \sigma_z &= \frac{E}{1 + \mu} \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - z \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

В системе уравнений (2.5) приняты обозначения:

u, v, w – проекции смещения точки на неподвижные координаты осей x, y, z , м;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – составляющие тензора напряжений в прямоугольных координатах (нормальные), Па;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – составляющие тензора напряжений в прямоугольных координатах (касательные), Па;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости, Па;

φ_1 – функция, характеризующая перемещение штампа, причем $\varphi = -2(1 - \mu)\varphi_1$.

Рассмотрев напряжённое состояние полупространства при взаимодействии с внедряющимся индентором, сформулируем граничные условия, определяющие нормальное давление на поверхности $z = 0$.

Введём область контакта Ω , в пределах которой происходит передача нагрузки. Полупространство в точках этой области испытывает сжимающее воздействие распределённой нагрузки $p(x, y)$. Вне области контакта Ω нормальная компонента напряжения σ_z обращается в ноль. Это условие записывается следующим образом (2.6):

$$\sigma_z = \begin{cases} -p(x, y) & \text{внутри } \Omega, \\ 0 & \text{вне } \Omega. \end{cases} \quad (2.6)$$

Для решения системы уравнений (2.5), к (2.6) необходимо добавить два условия:

1. Касательные напряжения τ_{yz}, τ_{zx} обращаются в ноль по всей поверхности $z = 0$, так как сила трения между индентором и поверхностью полупространства отсутствует.

2. Нормальные перемещения w задаются в точках области контакта Ω , определяя взаимодействие индентора с породой.

При $z = 0$ значение гармонической функции φ совпадает с величиной нормального перемещения $w(x, y, 0)$. Обратимся к классической задаче Буссинеска [109], описывающей поведение упругого полупространства при точечном воздействии нагрузки. Рассматривается случай, когда упругое полупространство занимает область $z \geq 0$, а в начальной точке координат действует сосредоточенная сила F , направленная вдоль оси z .

Перемещения w вдоль оси z в точках, которые до деформации находились на поверхности полупространства (в плоскости xOy), определяются следующим выражением (2.7):

$$w(x, y, 0) = \frac{(1 - \mu^2)F}{\pi E \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) позволяет перейти к случаю, когда нагрузка $p(x, y)$ является распределённой по области контакта Ω , а не сосредоточенной в одной точке. Для этого рассмотрим элементарную силу $p(\xi, \eta)d\xi d\eta$, действующую в точке (ξ, η) . Согласно принципу суперпозиции, полное перемещение поверхности в плоскости x, y получается суммированием (интегрированием) всех элементарных перемещений, вызванных каждой такой силой. Тогда для вертикального перемещения на поверхности полупространства можно записать (2.8):

$$dw = \frac{(1 - \mu^2)p(\xi, \eta)}{\pi E \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} d\xi d\eta. \quad (2.8)$$

Из уравнения (2.8) следует, что нормальное перемещение $w(x, y, 0)$ в области контакта Ω можно выразить в интегральной форме (2.9):

$$w(x, y, 0) = \frac{1 - \mu^2}{\pi E} \iint_{\Omega} \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}. \quad (2.9)$$

Данная зависимость описывает влияние распределённой нагрузки (ξ, η) на перемещение поверхности полупространства в точке $(x, y, 0)$.

Введённая ранее связь между гармонической функцией $\varphi(x, y, z)$ и перемещением $w(x, y, 0)$ позволяет обобщить уравнение (2.9), представив его в следующем виде (2.10):

$$\varphi = \frac{1-\mu^2}{\pi E} \iint_{\Omega} \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}. \quad (2.10)$$

Из полученного выражения (2.10) следует, что напряжённо-деформированное состояние изотропного, однородного, линейно-упругого полупространства под действием поверхностного давления $p(x, y)$, приложенного к ограниченной области на его границе, может быть выражено через одну гармоническую функцию φ . Это позволяет формализовать контактную задачу о внедрении индентора в горную породу, учитывая особенности распределения напряжений и деформаций в полупространстве.

Система уравнений (2.5) включает в себя две упругие постоянные материала полупространства: модуль продольной упругости E и коэффициент Пуассона μ . Однако, если учитывать специфику горных пород, можно использовать приближённую модель, основанную на эмпирическом коэффициенте крепости f , введённом М.М. Протодьяконовым. Коэффициент крепости отражает прочностные характеристики породы и может быть использован для приближённого определения эффективного модуля упругости. Возникающее при разрушении нормальное напряжение σ связывается с коэффициентом крепости f линейной связью вида (2.11):

$$f = k_f \cdot \sigma, \quad (2.11)$$

где k_f – эмпирический коэффициент пропорциональности, зависящий от вида горной породы.

Ранее проведённые экспериментальные исследования показали, что модуль упругости пород E_p связан с коэффициентом крепости f линейной зависимостью (2.12):

$$E_p = k_f \cdot f. \quad (2.12)$$

В свою очередь, для горных пород в пределах действия закона Гука можно записать (2.13):

$$\sigma = E_p \cdot \varepsilon. \quad (2.13)$$

Для магматических пород (граниты, диориты, базальты) эмпирический коэффициент пропорциональности составляет (3,5–5,5) ГПа на единицу коэффициента крепости f . Например для гранита: $k_f \approx 4,5 \cdot 10^4$ МПа, $f = 12 - 15$ (по Протодьяконову).

$$\text{Соответственно } E_p = 4,5 \cdot 10^4 \cdot f \approx (54 - 67,5)10^3 \text{ МПа.}$$

Таким образом, подставляя данное выражение в основное уравнение упругости, можно записать (2.14):

$$\sigma = E_p \cdot \varepsilon = (4,5 \cdot 10^4 f) \cdot \varepsilon. \quad (2.14)$$

Коэффициент Пуассона (μ) является одним из ключевых параметров, характеризующих механические свойства горных пород. Он определяет способность материала изменять свои поперечные размеры при осевом сжатии или растяжении и оказывает значительное влияние на распределение напряжений в зоне контакта индентора с породой. На основании данных [93] можно принять его среднее значение для гранита следующим образом (2.15):

$$\mu = 0,25 \pm 0,03. \quad (2.15)$$

Преобразованная система уравнений с учетом уравнения (2.14) и коэффициента Пуассона (2.16):

$$\begin{aligned}
u &= \frac{1}{2} \int_z^{\infty} \frac{\partial \varphi}{\partial x} dz + \frac{z}{2(1-\mu)} \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \\
v &= -\frac{1}{2} \int_z^{\infty} \frac{\partial \varphi}{\partial y} dz + \frac{z}{2(1-\mu)} \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \\
w &= -\varphi + \frac{z}{2(1-\mu)} \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \\
\sigma_x &= 2 \cdot 10^9 f \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \int_z^{\infty} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} dz + 2z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right), \\
\tau_{yz} &= 4 \cdot 10^9 f z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z}, \\
\sigma_y &= 2 \cdot 10^9 f \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \int_z^{\infty} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} dz + 2z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right), \\
\tau_{zx} &= 4 \cdot 10^9 f \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial x}, \\
\tau_{xy} &= 2 \cdot 10^9 f \left(-\int_z^{\infty} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} dz + 2z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right), \\
\sigma_z &= -7 \cdot 10^9 f \frac{\partial \varphi}{\partial z} + 4 \cdot 10^9 f \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Гармоническая функция с учетом f (2.17):

$$\varphi_1 = 4 \cdot 10^9 f \iint_{\Omega} \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}. \tag{2.17}$$

Таким образом, для любой горной породы с известным коэффициентом крепости по М.М. Протодяконову, используя усреднённые значения механических характеристик, можно с точностью определить все компоненты напряжённо-деформированного состояния под штампом. Анализ контактного взаимодействия индентора с горной породой показал, что распределение напряжений и деформаций в полупространстве зависит не только от приложенной нагрузки, но и от физических свойств породы, таких как модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент крепости.

Ранее полученное выражение для гармонической функции ϕ_1 с учетом коэффициента крепости f позволило определить основные закономерности распределения напряжений и деформаций в упругом полупространстве. Однако для дальнейшего описания механики внедрения индентора необходимо установить соотношения между осевой силой P , нормальным давлением $p(x, y)$ и соответствующим перемещением $w(x, y, 0)$.

В классической теории контактных задач упругости внедрение индентора (штампа) моделируется путем приложения осевой нагрузки P к телу осесимметричной формы (рисунок 2.2).

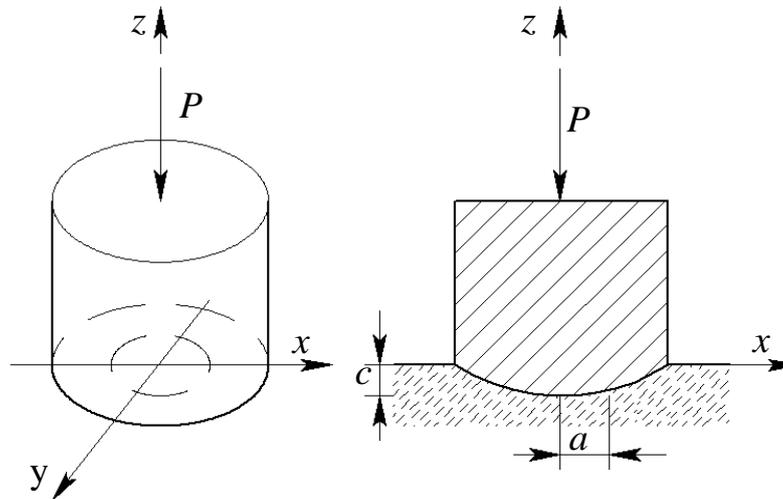


Рисунок 2.2 - Внедрение индентора в горную породу (составлено автором)

При этом поверхность контакта обладает конечными производными, но в краевых точках давление может возрастать до неопределенных значений. Граничные условия для такого взаимодействия предполагают нулевые касательные напряжения на контактной площадке и отсутствие нормальных напряжений вне зоны контакта.

Граничные условия для рассматриваемой задачи формулируются следующим образом. На контактной площадке S , которая представляет собой круг радиуса a , деформация поверхности определяется выражением $w = f(\rho) + c$. При этом касательные напряжения в контактной области равны нулю: $\tau_{\theta z} = 0$ и $\tau_{\rho z} = 0$.

На свободной поверхности, расположенной вне зоны контакта S , выполняются условия отсутствия нормальных и касательных напряжений: $\sigma_z = 0$, $\tau_{\theta z} = 0$ и $\tau_{\rho z} = 0$.

Для удобства описания радиальная координата определяется как $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. Уравнение ограничивающей поверхности штампа задается в виде $z = f(\rho)$, при этом в центре контактной зоны выполняется условие $f(0) = 0$, что соответствует внедрению гладкого штампа в поверхность упругого полупространства.

Поскольку штамп является осесимметричным телом, его контакт с поверхностью полупространства можно описать через интегральные соотношения, связывающие распределение напряжений с функцией формы поверхности штампа.

Для количественного описания контактного взаимодействия вводится оператор Лапласа $\Delta f(\rho)$, который позволяет связать геометрию штампа с распределением напряжений в упругом теле. Данный оператор определяет искривление поверхности и, соответственно, влияет на распределение давления в зоне контакта.

С учетом этих условий интегральное выражение для силы P , действующей на штамп, согласно [30] определяется в виде (2.18):

$$P = \frac{2E}{1-\mu^2} \int_0^a \Delta f(\rho_1) \rho_1 \sqrt{a^2 - \rho_1^2} d\rho_1. \quad (2.18)$$

В связи с изменением контактного давления по радиусу необходимо ввести ядро интегрального преобразования, которое позволяет связать влияние всех точек контактной поверхности с распределением нагрузки в произвольной точке контакта. В качестве такого ядра используется функция $H(\rho, \rho_1)$, которая учитывает вклад различных радиальных координат ρ_1 в формировании контактного давления в точке ρ . Подстановка этого ядра в выражение для силы приводит к интегральному представлению нормального

давления $p^*(\rho)$, где каждое значение напряжения определяется суммированием влияния всех точек внутри контактной области (2.19 - 2.20).

$$p^*(\rho) = -\frac{E}{4\pi(1-\mu^2)} \int_0^a \Delta f(\rho_1) H(\rho, \rho_1) d\rho_1, \quad (2.19)$$

где $\Delta f(\rho) = \frac{\partial^2}{\partial \rho_1^2} + \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial}{\partial \rho_1}$ - оператор Лапласа по ρ_1 ;

$$H(\rho_1, \rho) = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \rho_1 (\rho^2 - 2\rho_1 \cos \theta_1 + \rho_1^2)^{-\frac{1}{2}} \times \\ \times \arctg \left[a^{-1} (a^2 - \rho^2)^{\frac{1}{2}} (a^2 - \rho_1^2)^{\frac{1}{2}} (\rho^2 - 2\rho\rho_1 \cos \theta_1 + \rho_1^2)^{-\frac{1}{2}} \right] d\theta \quad (2.20)$$

В работах [73, 122] рассмотрен осесимметричный штамп в виде параболоида, описанный с помощью уравнения $z = A\rho^\lambda$. С помощью примененного здесь метода может быть установлено в конечном виде соотношение между силой и перемещением (2.21):

$$f(\rho) = A\rho^\lambda. \quad (2.21)$$

Отсюда оператор Лапласа даёт (2.22):

$$\Delta f(\rho) = A\lambda(\lambda - 1)\rho^{\lambda-2}. \quad (2.22)$$

Постановка (верхней этой функции) позволяет получить интеграл (2.23):

$$F = \frac{E}{1-\mu^2} A a^{\lambda+1} 2^{\lambda-1} \frac{\lambda^2}{\lambda+1} \frac{\Gamma^2(\lambda/2)}{\Gamma(\lambda)}, \quad (2.23)$$

а выражение для перемещения, как (2.24):

$$c = -A\lambda^2 a^\lambda \frac{1}{\lambda} 2^{\lambda-2} \frac{\Gamma^2(\lambda/2)}{\Gamma(\lambda)}. \quad (2.24)$$

На основании (2.23) и (2.24) может быть установлена зависимость между силой и перемещением (2.25)

$$F = \frac{E}{1-\nu^2} \chi(\lambda) A^\lambda |c|^{\frac{\lambda+1}{\lambda}},$$

$$\text{где } \chi(\lambda) = 2^{\frac{2}{\lambda}} \frac{\lambda^{\frac{\lambda-1}{\lambda}}}{\lambda+1} \Gamma^{\frac{1}{\lambda}}(\lambda) \Gamma^{-\frac{2}{\lambda}}\left(\frac{\lambda}{2}\right). \quad (2.25)$$

Таким образом, подставляя зависимости, получаем (2.26):

$$C = \int_0^a \Delta f(\rho_1) \rho_1 \operatorname{Arth} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\rho_1}{a}\right)^2} \right] d\rho_1. \quad (2.26)$$

2.2.1 Теоретические основы разрушения горной породы при одновременном воздействии группой инденторов

Для более точного описания процесса разрушения породы при внедрении группы инденторов необходимо учитывать взаимное влияние соседних точек приложения нагрузки. В классической контактной механике взаимодействие нескольких сил с упругим полупространством может быть представлено в виде суперпозиции решений одиночных контактных задач.

Рассмотрим задачу о внедрении осесимметричного штампа круговой формы в упругое полупространство. При отсутствии сил трения контактное давление распределяется согласно гармонической функции $\varphi(x, y, z)$, которая определяется граничными условиями на контактной площадке радиуса a и свободной поверхности вне контакта. Если вне области контакта на расстоянии $l > a$ от центра штампа действует M сосредоточенных сил Q_l , то напряжённое состояние изменяется, и контактное давление приобретает дополнительное слагаемое.

Граничные условия для данной системы записываются в следующем виде (2.27):

$$\left. \begin{aligned} \varphi = c, x^2 + y^2 \leq a^2, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 2(1 - \mu^2) Q_l \delta(x - \xi_m, y - \eta_m) / E, \\ m = 1, 2, \dots, M, x^2 + y^2 > a^2. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Используя метод гармонических функций, можно определить распределение нормального давления под штампом (2.28):

$$p(r, \varphi) = \frac{Ec}{\pi(1-\mu^2)\sqrt{a^2-r^2}} - \frac{Q_l\sqrt{l^2-a^2}}{\pi^2\sqrt{a^2-r^2}} \sum_{m=1}^M \frac{1}{(r\cos\varphi - l\cos\theta_m)^2 + (r\sin\varphi - l\sin\theta_m)^2}. \quad (2.28)$$

Переходя к рассмотрению системы штампов, представленной в виде множества цилиндрических элементов радиуса a (рисунок 2.3), закреплённых в жёсткой плите таким образом, что их оси проходят через узлы гексагональной решётки с межузловым расстоянием s , а основания штампов находятся в одной плоскости, можно записать зависимость глубины внедрения c от радиуса l и интенсивности нагрузки MQ в виде (2.29):

$$c = \frac{P(1-\mu^2)}{2aE} + \frac{MQ_l(1-\mu^2)}{\pi aE} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{l^2-a^2}}. \quad (2.29)$$

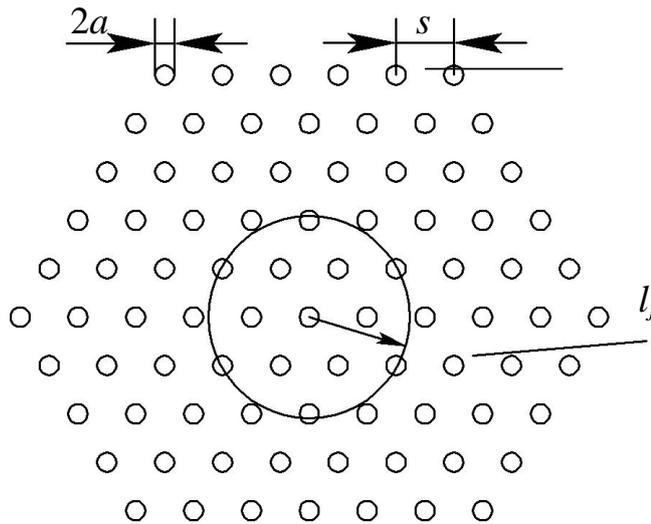


Рисунок 2.3 - Симультанное внедрение инденторов в горную породу
(составлено автором)

Таким образом, глубина внедрения определяется не только приложенной силой P , но и дополнительными сосредоточенными силами, расположенными вне основной контактной зоны. Это приводит к необходимости учёта взаимодействия элементов системы при моделировании контактного взаимодействия группы инденторов.

При приложении нормальной силы Q ко всей системе каждый штамп вдавливаются в упругое полупространство на одинаковую глубину c .

Благодаря осевой симметрии конструкции, штампы, находящиеся в j -м слое модели, воспринимают одинаковые нагрузки Q_j . Рассматривая один выбранный штамп в j -м слое, влияние всех остальных штампов на полупространство можно заменить действием эквивалентных сосредоточенных сил. В результате глубина внедрения этого штампа определяется выражением (2.30):

$$c = \frac{Q_j(1-\mu^2)}{2aE} + \frac{(1-\mu^2)}{\pi aE} \sum_{i=1}^{k_j} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{l_i^2 - a^2}} \sum_{j=1}^k M_{ij} Q_j, \quad (2.30)$$

где M_{ij} — количество штампов, одновременно находящихся в слоях i и j , а l_i — радиус i -го слоя.

Подставляя это выражение в уравнение равновесия системы, можно определить зависимость между нагрузкой Q и внедрением системы (2.31):

$$Q = j_0 RC, \quad (2.31)$$

где $j_0 = \frac{2aE}{1-\mu^2}$ — жёсткость одиночного штампа, а R выражается через сумму

сил во всех слоях модели.

Таким образом, совместное внедрение группы инденторов зависит как от упругих свойств материала, так и от взаимного расположения элементов системы, что необходимо учитывать при расчётах процессов деформации горной породы и проектировании контактных взаимодействий.

2.2.2 Закономерности разрушения горной породы инденторами различной геометрической формы

Решение задачи оценки эффективности симульного разрушения горной породы двумя инденторами базируется на теоретических основах задачи вдавливания плоского штампа Ж. Буссинеска и контактной задачи Г. Герца.

Поставленная задача решается в следующем порядке. Рабочая поверхность индентора разделяется на элементарные участки малой длины (рисунок 2.4, а). Благодаря этому внедрение каждого отдельного участка в

поруду, происходящее под действием внешней силы, рассматривается с позиции задачи вдавливания кольцевого штампа (рисунок 2.4, б), что по сути соответствует задаче давления штампа круговой формы в плане с плоским основанием на полупространство (рисунок 2.4, в), площадь контакта которого с породой равна площади боковой поверхности элементарного участка индентора. При таких условиях глубина внедрения индентора определяется согласно принципу суперпозиции поитерационным вычислением глубины внедрения в породу каждого участка и последующим суммированием полученных величин.

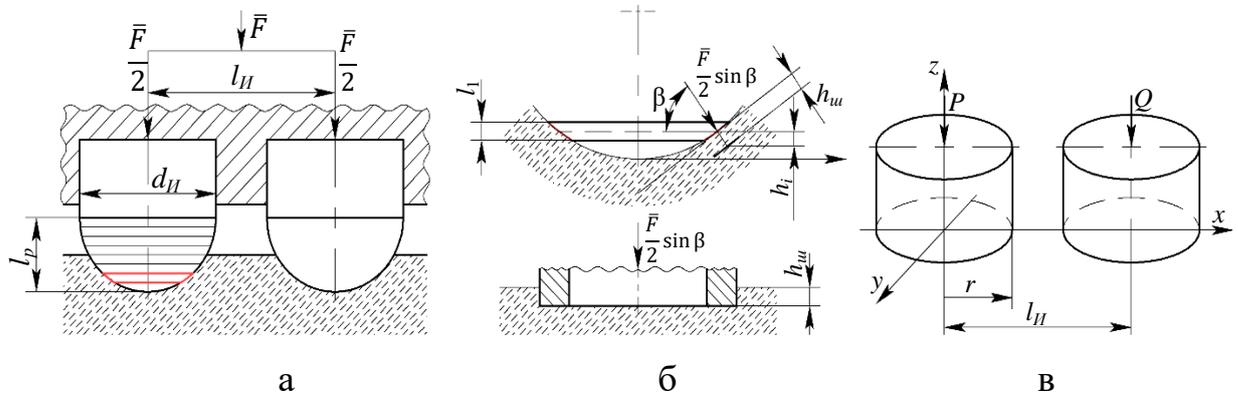


Рисунок 2.4 - Симультанное внедрение инденторов в горную породу (составлено автором)

Напряженно-деформированное состояние породного массива, вызванное давлением штампа, описывается известными соотношениями механики деформируемого твердого тела. Напряжение по оси z (давление штампа) и перемещение вдоль оси z определяются выражениями (2.32):

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} \right); \quad w = 2(1-\mu)\varphi_1 - z \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad (2.32)$$

где φ_1 – функция, характеризующая перемещение штампа, причем $\varphi = -2(1-\mu)\varphi_1$.

Если на штамп действует сила P вне его на расстоянии l_H от центра площадки контакта ($l_H > r$, r – радиус основания штампа) действует сосредоточенная сила Q , то гармоническая функция φ запишется в общем виде (2.33):

$$\varphi(x, y, z) = \frac{2}{\pi} h_{uu} \cdot \operatorname{arctg} \theta^{-1} - \frac{4(1-\mu^2)Q}{\pi E \sqrt{(x-x_Q)^2 + (y-y_Q)^2 + z^2}} \operatorname{arctg} \frac{\theta \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2 - r^2}}{\sqrt{(x-x_Q)^2 + (y-y_Q)^2 + z^2}}, \quad (2.33)$$

где h_{uu} – глубина внедрения штампа, мм;

$$\theta = \frac{1}{r\sqrt{2}} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - r^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - r^2)^2 + 4r^2 z^2}}; \quad x_Q, y_Q - \text{координаты}$$

точки приложения силы Q .

Глубина внедрения штампа вычисляется по формуле (2.34):

$$h_{uu} = \frac{1-\mu^2}{E} \cdot F \cdot \sin \beta \left[\frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{S}} + \frac{1}{\sqrt{\pi S}} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\frac{\pi l^2}{S} - 1}} \right]. \quad (2.34)$$

На границе контакта штампа и породы ($z = 0$) $\varphi = h_{uu}$. При равенстве приложенных к инденторам сил $P = Q$ оба индентора будут внедряться на одинаковую глубину (2.35):

$$h_{uu} = \frac{P(1-\mu^2)}{2rE} + \frac{Q(1-\mu^2)}{\pi rE} \cdot \operatorname{arctg} \frac{r}{\sqrt{l_{II}^2 - r^2}}. \quad (2.35)$$

В поставленной задаче усилие $P = Q = \frac{F}{2} \sin \beta_i$; β_i – угол наклона нормали к боковой поверхности i -го элементарного участка индентора; радиус основания штампа $r = \sqrt{S_i / \pi}$; S_i – площадь боковой поверхности i -го элементарного участка индентора, которая при задании функции, описывающей образующую, в параметрическом виде $\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \end{cases}$ вычисляется

по формуле (2.36):

$$S_i = 2\pi \int_{t_{i-1}}^{t_i} \left(x \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} \right) dt; \quad (2.36)$$

глубина внедрения индентора $h = \sum_{i=1}^j h_i$; $h_i = h_{uu} \cdot \sin \beta_i$ – глубина внедрения i -го элементарного участка; j – количество элементарных участков, на которые разделяется рабочая поверхность индентора.

С учетом приведенных зависимостей получено выражение для нахождения коэффициента, позволяющего оценить эффективность формы рабочей поверхности индентора с точки зрения глубины его внедрения в горную породу с заданными механическими свойствами E , μ под действием силы F , названного коэффициентом влияния формы индентора (2.37):

$$k_{\varphi} = \sum_{i=1}^j \left[\left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{S_i}} + \frac{1}{\sqrt{\pi S_i}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\pi l_H^2 / S_i - 1}} \right) \sin^2 \beta_i \right], \quad (2.37)$$

причем количество элементарных участков j подбирается таким образом, чтобы для сравниваемых инденторов длина элементарного участка l_1 была одинаковой.

Чем больше значение коэффициента влияния формы индентора, тем на большую глубину он будет внедряться в горную породу при прочих равных условиях.

2.2.3 Сравнительный анализ результативности разрушения горной породы инденторами различной формы

Для сравнения эффективности симультанного разрушения горной породы двумя инденторами были взяты инденторы, рабочие поверхности которых выполнены по 4 вариантам. При этом расчет коэффициента влияния формы индентора проводился при одинаковых следующих условиях: диаметр инденторов $d_H=8$ мм, расстояние между осями индентора $l_H=10$ мм, длина единичного участка рабочей поверхности $l_1=0,097$ мм.

1-й вариант: сферическая форма. Выбрана как одна из наиболее распространенных. В прямоугольной системе координат с началом в вершине рабочего участка образующая его боковой поверхности описывается

уравнением $y = 4,5 - 0,5\sqrt{81 - 4 \cdot x^2}$. В соответствии с заданной длиной единичного участка количество итерации принято $j = 25$.

2-й вариант: баллистика. Выбрана как одна из перспективных, согласно результатам анализа современных производств бурового инструмента. Образующая боковой поверхности рабочего участка описывается уравнением $y = 0,5x^2$. Количество итерации $j = 82$, длина рабочего участка составляет 8 мм.

3-й вариант: индентор-катенид. Выбран как один из последних запатентованных решений, согласно результатам патентного поиска. Форма рабочего участка в прямоугольной системе координат описывается уравнением $y = 1,622 \cdot ch(0,617 \cdot x) - 1,622$. Количество итерации $j = 82$, длина рабочего участка 8 мм.

4-й вариант: рабочий участок индентора выполнен в форме тела вращения трактрисы вокруг оси, которая проходит через вершину трактрисы параллельно ее асимптоте. Известно, что длина касательной к трактрисе постоянна, следовательно, величина нагрузки, направленной по касательной к трактрисе в любой ее точке, приводящей к изнашиванию рабочего участка, является величиной постоянной, что позволит обеспечить эквидистантное изменение формы рабочего участка индентора при его изнашивании в процессе бурения. Форма рабочего участка в прямоугольной системе координат описывается в параметрическом виде системой уравнений

$$\begin{cases} x = -4,595 \sin(t) + 4,595; \\ y = -4,595 \cos(t) - 4,595 \ln\left(\frac{1}{2}t\right). \end{cases}$$

Количество итераций $j = 82$, длина рабочего участка 8 мм.

На основании формул, представленных в п.2.2.2, вычислялись площадь единичного участка поверхности, в зависимости от кривизны поверхности вычислялся угол наклона, а в дальнейшем и коэффициент влияния формы инденторов.

Получены следующие результаты расчета коэффициента влияния формы инденторов, выполненных по 4 выбранным вариантам: 1 – 4,158; 2 – 6,376; 3 – 5,600; 4 – 6,712. Очевидно, согласно утверждению, что чем больше коэффициент, тем на большую глубину индентор внедряется, из четырех вариантов максимальный коэффициент влияния формы дает вставка, выполненная по трактрисе.

Таким образом, применение трактрисы в качестве образующей боковой поверхности рабочего участка индентора обеспечит увеличение глубины внедрения в сравнении с традиционно применяемыми инденторами.

2.3 Выводы по Главе 2

На основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. При ударно-поворотном бурении разрушение породы осуществляется преимущественно за счет ударного воздействия, при этом вращение инструмента обеспечивает очистку забоя. Эффективность процесса определяется механической скоростью бурения, объемом разрушенной за один удар породы и глубиной внедрения инструмента.

2. Геометрия твердосплавных вставок, расстояние между ними и их схема размещения на рабочей поверхности бурового инструмента оказывают существенное влияние на энергоемкость разрушения породы. Оптимальное расположение инденторов способствует наложению полей напряжений, что приводит к более крупному сколу породы и снижению затрат энергии.

3. Выведено выражение для коэффициента влияния формы индентора, позволяющее оценить его эффективность с точки зрения глубины внедрения в породу. Чем выше значение коэффициента, тем глубже проникает индентор при одинаковых условиях нагружения.

4. Проведено исследование инденторов с разными геометрическими профилями: сферическим, баллистическим (парабола), катенидом (цепная линия) и трактрисой. Наибольшая глубина внедрения достигнута при

использовании инденторов с рабочей поверхностью в форме трактрисы, что делает её наиболее рациональной с точки зрения энергоэффективности процесса бурения ударно-поворотным способом.

ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА СИМУЛЬТАННОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ БЕЗЛЕЗВИЙНЫМ БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

3.1. Компьютерное моделирование внедрения в горную породу группы инденторов

3.1.1 Разработка компьютерной модели

Большинство экспериментальных исследований, посвященных изучению влияния расстояния между соседними инденторами на эффективность разрушения горной породы при ударном воздействии, проводилось в условиях статического давления [106]. Такие условия выбираются для упрощения постановки эксперимента и обеспечения высокой воспроизводимости результатов. В частности, такие условия экспериментов хорошо сопоставимы с динамическими воздействиями, однако они имеют ограничение по скорости удара, которая не превышает 10 м/с.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих при воздействии твердосплавных вставок на горные породы, было проведено компьютерное моделирование в программе автоматизированного проектирования T-Flex. Вычислительные экспериментальные исследования позволили установить картину распределения напряжений в горной породе при одновременном нагружении двумя инденторами, расположенными на различном расстоянии друг от друга.

В рамках вычислительного исследования была смоделирована работа двух инденторов диаметром 12,3 мм со сферическими рабочими поверхностями, изготовленных из твердого сплава ВК-15, который известен своей высокой прочностью и износостойкостью.

В качестве моделируемой горной породы был выбран гранит, физико-механические свойства которого задавались в соответствии со свойствами конкретного типа гранита.

Разработанная трехмерная модель позволяет изменять расстояние между геометрическими осями инденторами. В частности при выполнении расчетов это расстояние менялось с шагом в 1 мм. Интервал указанного расстояния был взят от 14 мм до 22 мм.

Для выполнения статического анализа трехмерной модели твердосплавной вставки в системе T-FLEX необходимо было создать объемную твердотельную модель, которая точно отражала бы геометрию вставки. На первом этапе вычислительного эксперимента была разработана трехмерная модель как самой вставки, так и образца горной породы (гранит) с размерами 200x200x150 мм (рисунок 3.1), что позволило перейти к следующему этапу — подготовке конечно-элементной модели.

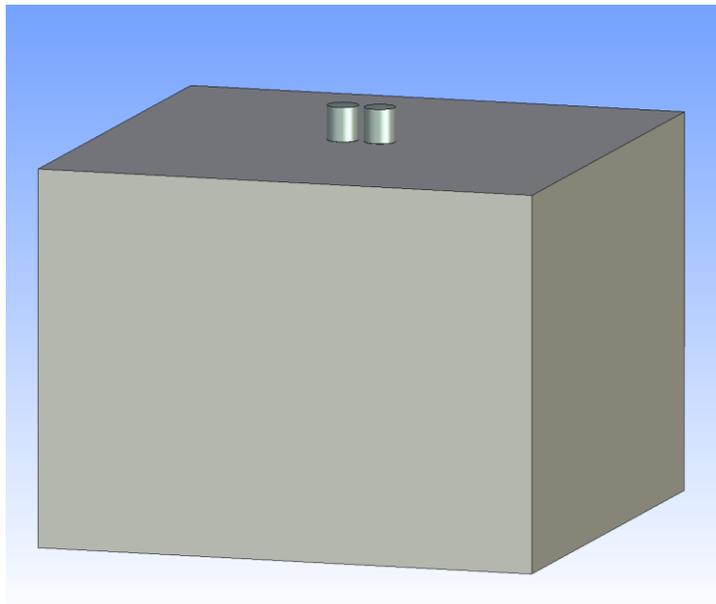


Рисунок 3.1 – Трехмерная модель (составлено автором)

С помощью команды «Конечно-элементный анализ» была выбрана опция статического анализа, что подразумевает исследование поведения конструкции под действием постоянных нагрузок. На этом этапе система предложила диалоговое окно для настройки параметров генерации конечно-элементной сетки, был выбран размер, равный 0,016. Выбранный размер сетки конечно-элементной модели был установлен на основе предварительных исследований, такой выбор обеспечил достаточную точность расчётов при приемлемых вычислительных временных затратах. В результате был

сформирован сеточный модельный элемент, состоящий из десятиузловых тетраэдров, который точно аппроксимировал твердотельные модели твердосплавных вставок и образца гранита (рисунок 3.2), обеспечивая более точное распределение напряжений и повышение точности вычислений в зонах концентрации нагрузок.

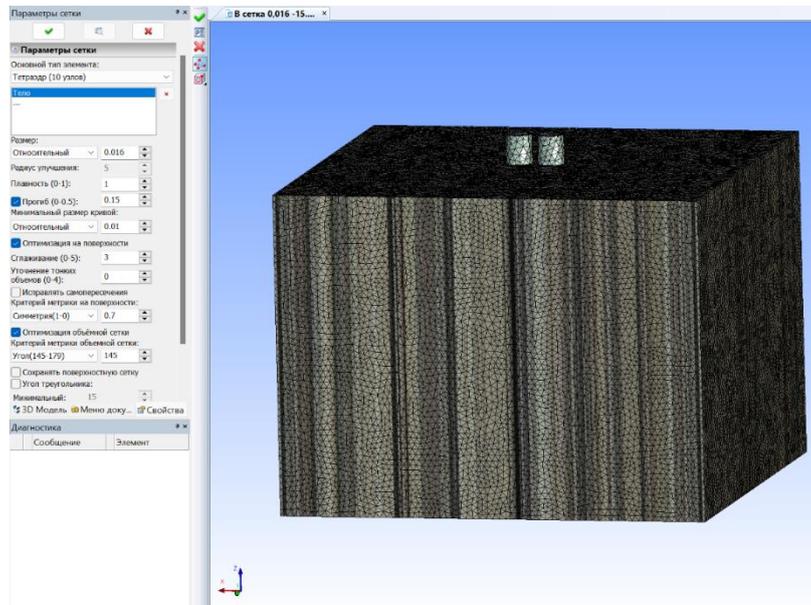


Рисунок 3.2 – Конечно – элементная сетка трехмерной модели
(составлено автором)

Следующим важным шагом было задание материала, что осуществлялось на основе физико-механических свойств, соответствующих характеристикам сплава ВК-15 и конкретного типа гранита. Эти параметры были заданы с использованием команды «Анализ|Материал» (рисунок 3.3), что обеспечивало корректное моделирование механических свойств материалов.

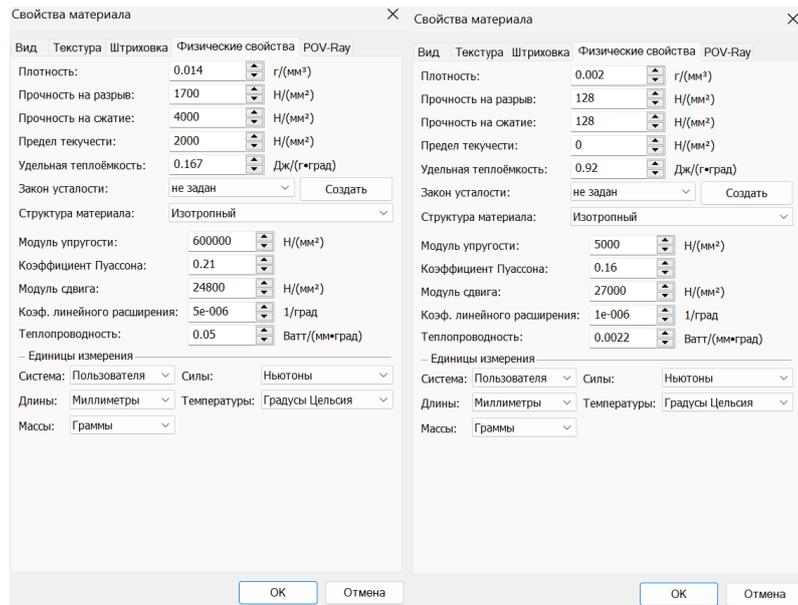


Рисунок 3.3— Задание свойств материала (составлено автором)

Твердосплавные вставки были предварительно погружены на глубину, соответствующую рабочему участку. В качестве мест для закрепления были выбраны грани рабочей поверхности твердосплавной вставки и поверхности образца из гранита, что позволяло обеспечить необходимую жесткость модели и избежать нежелательных перемещений в процессе анализа. Нагрузка на модель накладывалась с использованием специализированных команд задания нагрузок. В качестве мест приложения силы были выбраны торцы твердосплавных вставок (рисунок 3.4), на которые одновременно прикладывалась нагрузка в 140 кН, имитирующая воздействие ударной волны. Выбор распределенной нагрузки более реалистично отражает условия работы бурового инструмента, где нагрузка распределяется по всей поверхности контакта твердосплавной вставки с породой. Это позволяет более точно учесть влияние различных факторов, таких как шероховатость поверхности индентора и неоднородность горной породы.

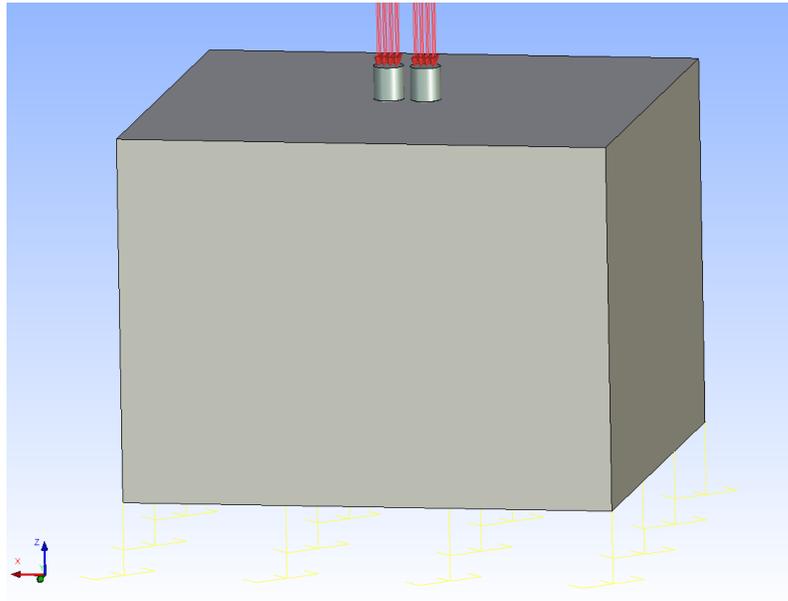


Рисунок 3.4 – Приложение активных сил (составлено автором)

После завершения этапа построения конечно-элементной сетки и наложения граничных условий (закрепления и нагружения) был запущен процесс формирования и решения линейных алгебраических уравнений, связанных со статическим анализом (рисунок 3.5).

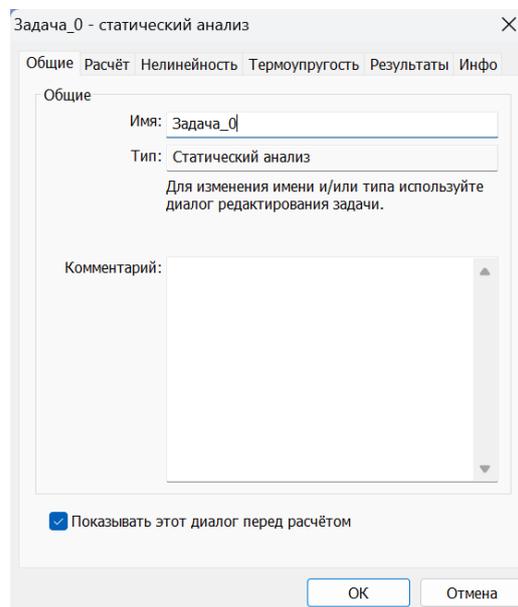


Рисунок 3.5 – Диалог «Параметры задачи» (составлено автором)

Этапы решения уравнений и дополнительная справочная информация отображаются в специальном информационном окне, как на рисунке 3.6, в котором выводятся справочные данные, а также относительная погрешность аппроксимации модели конечными элементами, количество узлов и элементов

расчетной конечно-элементной сетки, количество уравнений линейной статики и метод расчета.

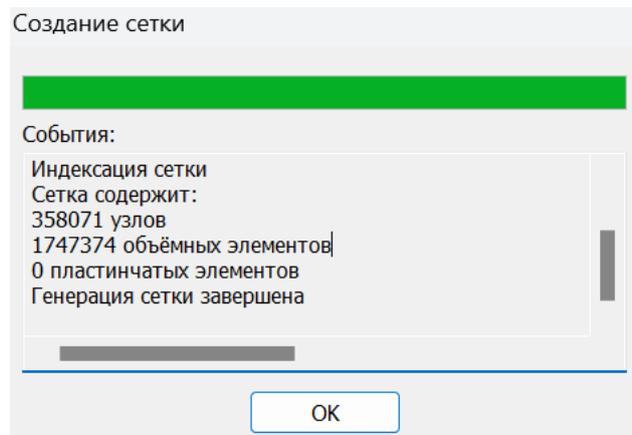


Рисунок 3.6 – Информационное окно (составлено автором)

3.1.2 Результаты компьютерного моделирования внедрения в горную породу группы инденторов

По результатам статического расчета прочности твердосплавных вставок и образца из гранита в среде T-FLEX Анализ получили 32 результата, объединенные в 8 групп, в том числе перемещения, напряжения и коэффициент запаса прочности. В дереве 3D-модели появляется вкладка с результатами (рисунок 3.7), где выбираем коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям.

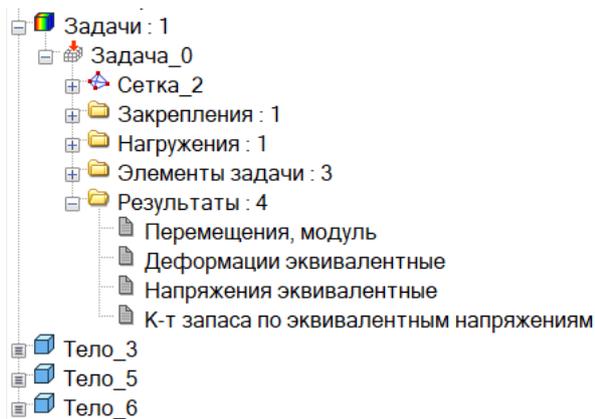


Рисунок 3.7 – Результаты расчета (составлено автором)

В ходе моделирования был проведён анализ восьми пар твердосплавных вставок. На основе исследования максимальных напряжений, возникавших под инденторами, определено оптимальное расстояние между вставками, при котором обеспечивается наибольшая эффективность разрушения породы.

Результаты численного моделирования представлены в виде градиентной диаграммы напряженно-деформированного состояния (рисунок 3.8), обеспечивающей возможность детального анализа напряженного состояния в любой точке модели, что позволяет оптимизировать геометрические параметры вставок и расстояние между ними для достижения максимальной эффективности бурения. Основным критерием оценки влияния расстояния между геометрическими осями двух одновременно внедряемых вставок определялась величина расчетного напряжения $\sigma_{ми}$ в пространстве между этими вставками в сравнении с напряжением контактного разрушения ($\sigma_{кр}$) для заданного типа гранита [11].

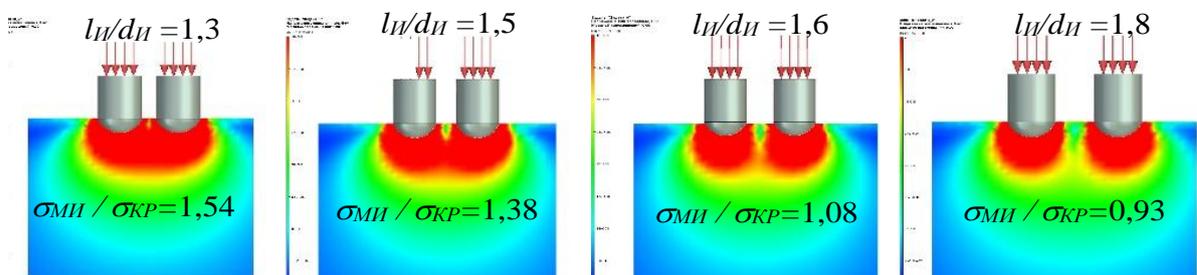


Рисунок 3.8 – Избранные результаты вычислительного эксперимента
(составлено автором)

Анализ численного моделирования показывает, что оптимальное значение соотношения расстояния между инденторами l_H и диаметром инденторов d_H (обозначаемое как l_H/d_H) варьируется от 1,67 до 1,71. Это значение подтверждает гипотезу Барона Л.И. [19] о существовании оптимального диапазона для эффективного разрушения горной породы.

Результаты испытаний сведены в таблицу 3.1. Проводимые исследования выявили, что при $l_H/d_H \leq 1,71$ происходит интенсивное разрушение не только под каждым индентором, но и в пространстве между ними. Это явление указывает на взаимное влияние соседних зон разрушения, что, в свою очередь, приводит к более эффективному дроблению породы и увеличению скорости бурения. Значение 1,71 выступает как пороговое: при меньших значениях увеличивается количество инденторов в единицу площади

рабочей поверхности коронки, а при больших – эффективность разрушения снижается из-за недостаточного взаимодействия зон разрушения.

Таблица 3.1 – Результаты вычислительных испытаний(составлено автором)

Отношение расстояния l_{II} между точками контакта соседних твердосплавных инденторов с горной породой к диаметру d твердосплавного индентора	Отношение напряжения $\sigma_{МИ}$ горной породы в пространстве между соседними инденторами к напряжению $\sigma_{КР}$, при котором происходит контактное разрушение горной породы
l_{II} / d_{II}	$\sigma_{МИ} / \sigma_{КР}$
1,22	1,87
1,30	1,54
1,38	1,49
1,46	1,38
1,54	1,25
1,63	1,08
1,71	1,03
1,79	0,93

3.2. Экспериментальное исследование эффекта симультанности при бурении горной породы ударными воздействиями

3.2.1. Экспериментальный стенд и опытные образцы

С целью подтверждения полученных результатов, а также уточнения оптимального значения отношения l_{II}/d_{II} и оценки выявления особенностей ударного воздействия на горную породу высокой крепости одновременно группой твердосплавных вставок был спроектирован стенд по принципу ударного вертикального копра, на котором проведено экспериментальное исследование.

В задачи экспериментальных исследований входило:

- Определение параметров лунок выкола при одновременном внедрении сферических вставок.
- Определение параметров лунок выкола при одновременном внедрении твердосплавных вставок с рабочим участком по трактрисе.

Экспериментальными исследованиями предусматривается установить следующее:

- зависимость параметров лунок выкола от формы внедряемых инденторов;

– зависимость глубины и объема разрушения при одновременном вдавливании ударом двух инденторов.

Стенд для экспериментальных исследований (рисунок 3.9) был изготовлен на базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

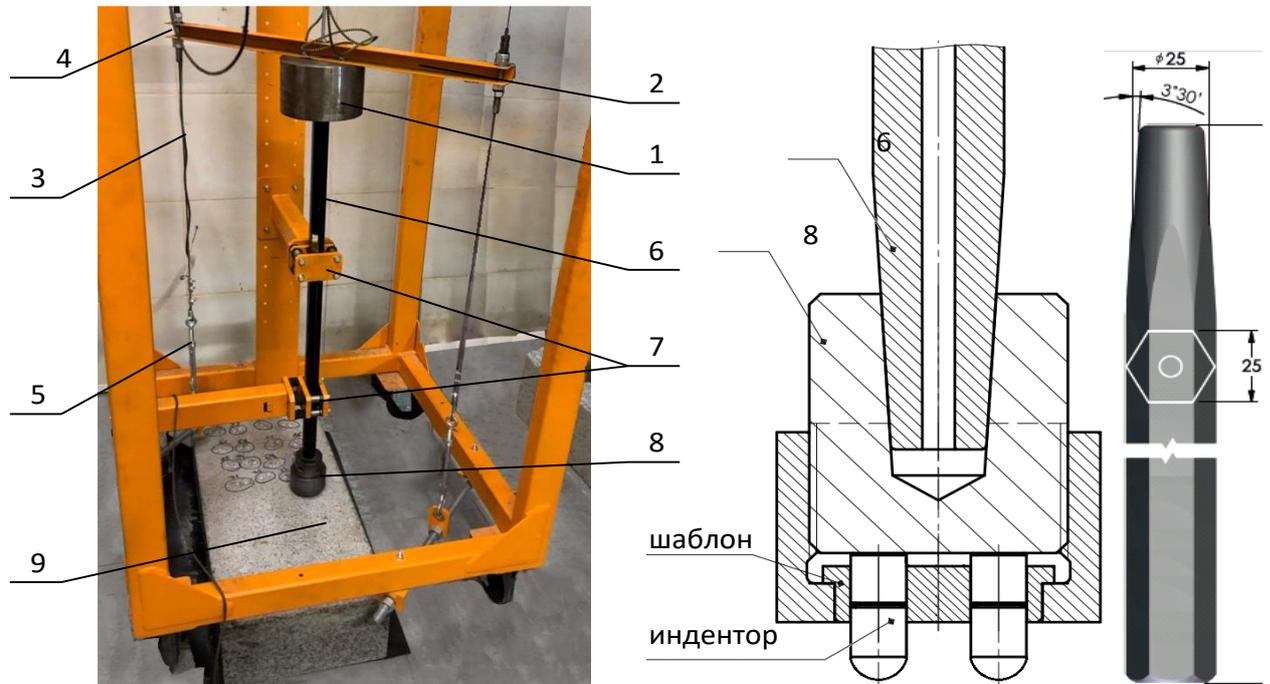


Рисунок 3.9– Стенд экспериментальный (составлено автором)

За основу экспериментального стенда принят копёр ударный вертикальный, конструкция которого позволяет производить бурение практически с любой энергией удара с предударной скоростью, достигающей бм/с. Стенд представляет реализацию ударной системы, которая включает в себя следующие элементы боек- штанга-инструмент.

Рассмотрим подробнее конструктивные особенности и принципы работы каждой составляющей (рисунок 3.9). Боек 1, выполненный из высокопрочной стали, закреплён винтами к подъемной планке 2, перемещающейся по направляющим 4, обеспечивающим вертикальное движение бойка. В качестве направляющих используется стальной трос 3 диаметром 3 мм. Трос натянут с помощью талрепа 5, обеспечивающего регулировку натяжения и предотвращение провисания. Подъём бойка

осуществляется с помощью троса, перекинутого через блок, что позволяет использовать меньшее усилие для поднятия бойка на заданную высоту. При падении боек наносит удар по штанге 6, изготовленной из шестигранного проката ШБП Т-25-800. Штанга установлена вертикально с помощью люнетов 7, которые предотвращают её вращение и обеспечивают свободное возвратно-поступательное движение. На конце штанги закреплен с помощью конусного соединения инструмент 8, опирающийся на гранитный блок горной породы 9 размерами 72x30x17 см со средним значением коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 18$. В качестве инструмента используется физическая модель коронки, оснащенная шаблоном, позволяющим устанавливать два индентора на разном расстоянии друг от друга. Разработанная модель инструмента позволяет изучать влияние расстояния между точками приложения нагрузки от инденторов на характер разрушения [12].

С помощью соответствующей настройки стенда устанавливается высота падения бойка, которая позволяет вычислить предударную скорость. Предударная скорость бойка определяется формулой (3.1):

$$V_0 = \sqrt{2gh}, \quad (3.1)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$,

h – высота сброса бойка, $h \leq 1,85 \text{ м}$.

Масса бойка 4 кг, высота сброса $h = 1,85 \text{ м}$, предударная скорость $V_0 = 6 \text{ м/с}$. Аналитическое решение бойка получено с применением компьютерной программы «Ударный импульс v2.0» и приведено на рисунке 3.10.

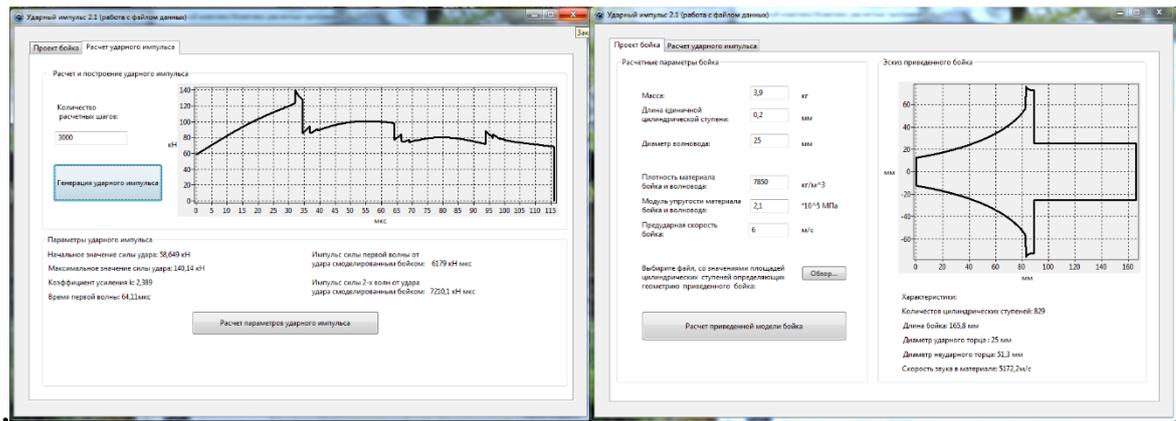


Рисунок 3.10 – Компьютерной программы «Ударный импульс v2.0» (фото автора)

3.2.2. Разработка модели безлезвийного инструмента

В качестве породоразрушающего безлезвийного инструмента используется штанга и физическая модель коронки, изготовленная в мастерских Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Штанга изготовлена из шестигранного проката ШБП Т-25-800 длиной 800 мм и диаметром 25 мм (см. рисунок 3.9). Штанга с физической моделью коронки соединяется конусным соединением с углом конуса 330° .

Физическая модель коронки включает в себя корпус, гайку и шаблон с отверстиями для твердосплавных вставок. Твердосплавные вставки могут быть размещены на поверхности шаблонов в вершинах ромба на разном расстоянии друг от друга (Приложение А). В экспериментальных опытах были исследованы 13 шаблонов с разным расстоянием между инденторами.

Для опытов были взяты цилиндросферические инденторы (Г26, ГОСТ 880-75) диаметром 10,4 мм, как наиболее распространенные в практике, и инденторы диаметром 12,3 мм с рабочей поверхностью в форме тела вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через вершину трактрисы параллельно ее асимптоте (рисунок 3.11).

Твердосплавные вставки изготовлены из вольфрамкобальтового сплава ВК-15 (модуль упругости сплава $E=5,98 \cdot 10^5$ МПа).



Рисунок 3.11– Инденторы (фото автора)

Порода представлена гранитом «Возрождение» размерами 72x30x17 см, мелкозернистым, плотным, со средним значением коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f=18$, физические свойства и минералогический состав гранита представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Физические свойства и минералогический состав гранита Возрождение

Порода	Физические свойства	Минералогический состав и структура, %
Гранит месторождения «Возрождение» 	Плотность – 2650 кг/м ³ Прочность на сжатие в сухом состоянии – 122,8 Мпа Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии – 117,9 Мпа Коэффициент Пуассона – 0,16 Теплопроводность – 2,4 Вт/(м·К) Удельная теплоемкость: при 273 К – 0,65 кДж/(кг·К) при 1073 К – 0,92 кДж/(кг·К) средняя – 1,30 кДж/(кг·К) Водопоглощение – 0,22 % Пористость – 1,7 % Истираемость – 0,27 г/см ² Морозостойкость – 100 циклов	микроклин – 54,5 плагиоклаз – 14 кварц – 20,67 биотит – 9,17 амфибол – 1,5 акцессорные минералы (апатит, циркон, турмалин, гранат) – 0,5 второстепенные (хлорит) – 0,5 рудные – 0,5

Блок горной породы был подобран таким образом, чтобы поверхность основания и рабочие поверхности были параллельны.

3.2.3. Методика проведения экспериментального исследования

Порядок проведения экспериментальных исследований принимался следующим. В основании стенда устанавливался образец горной породы. Сверху устанавливалась физическая модель буровой коронки, соединенная со штангой. Перед нанесением удара породоразрушающий инструмент находился в контакте с породой без какого-либо осевого прижатия. Боек поднимался на высоту 1,85 см с помощью троса, затем сбрасывался. При падении боек наносит удар по штанге, энергия удара передается буровому инструменту, тем самым происходило внедрение инденторов в горную породу. Далее боек поднимался в начальное положение (на высоту 1,85 см) и образец горной породы перемещался в горизонтальной плоскости для введения в контакт с индентором неразрушенного участка образца. Такой порядок повторялся для каждого опытного образца с разным расстоянием между инденторами и формой индентора.

При исследовании взаимодействия инденторов с породой измерялись: глубина внедрения $h_в$; объем разрушения $V_л$. Однозначные опыты повторялись по 6 раз.

В качестве критерия эффективности использовался суммарный объем разрушенной породы, включающий в себя объемы лунок выкола под каждым индентором и объем разрушенной породы в пространстве между инденторами.

Эксперимент проводился в несколько этапов:

- Динамическое внедрение двух инденторов сферической формой диаметром 10,4 мм с разным расстоянием друг от друга.
- Динамическое внедрение двух инденторов с рабочей поверхностью в виде трактрисы диаметром 12,3 мм с разным расстоянием друг от друга.

Экспериментальные исследования буровых породоразрушающих инструментов проводились при следующих условиях: высота свободного сброса составляла $h = 1,85$ м, при этом предударная скорость достигала

$V_0=6$ м/с; после каждого одиночного удара осуществлялась очистка образовавшейся лунки выкола от шлама под буровой коронкой; для каждого типа инструмента проводилось по шесть ударов, после чего фиксировался объём разрушенной породы; в сумме в ходе эксперимента было нанесено 52 удара.

3.2.4. Результаты экспериментальных исследований и их обработка

В ходе экспериментальных исследований были получены следующие результаты, приведенные в таблицу в приложении Б.

Экспериментальные исследования показали, что существует оптимальное расстояние между двумя геометрическими осями твердосплавных вставок, при котором объём удаляемой породы максимально превышает сумму объемов, удаляемых под каждой вставкой по отдельности. Это оптимальное расстояние зависит от размера инденторов, свойств горной породы и приложенной нагрузки.

Наблюдение в ходе физического эксперимента за характером разрушения породы показывают, что при внедрении индентора непосредственно под ним образуется спрессованный чашеобразный слой породы несколько меньшего диаметра, чем диаметр лунки выкола (рисунок 3.12). Это указывает на сложное сочетание процессов пластической деформации и хрупкого разрушения породы под воздействием ударной нагрузки. Остальная часть разрушенной породы представляет собой раздробленные частички породы, удаляемые без значительных усилий.

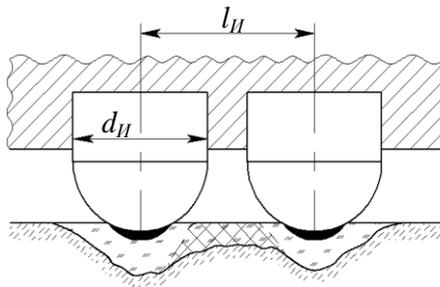


Рисунок 3.12 – Схема лунки выкола в породе при ударном воздействии двумя инденторами (составлено автором)

По результатам эксперимента при оценке среднего объема разрушения породы (V_{cp}) при одновременном ударном воздействии двумя цилиндросферическими инденторами (рисунок 3.13, а), расположенными на разном расстоянии между их геометрическими осями, выявлено, что отношение l_{II}/d_{II} имеет два оптимальных значения: 1,2 и 1,5. Полученные данные свидетельствуют о том, что при увеличении расстояния между инденторами ширина общей лунки выкола уменьшается (рисунок 3.14), т.е. при $l_{II}/d_{II} = 1,2$ зона концентрации контактных напряжений располагается ближе к поверхностному слою породы, а при $l_{II}/d_{II} = 1,5$ эта зона уходит вглубь, обеспечивая этим увеличение глубины внедрения инденторов за один удар в среднем на 13 %, а также сокращение на 20 % удельного количества инденторов на единицу площади рабочей поверхности коронки.

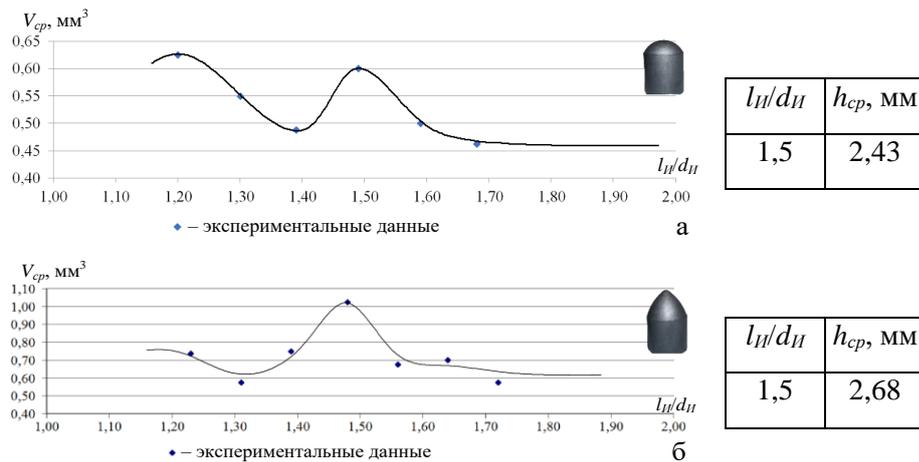


Рисунок 3.13 – Усредненные результаты эксперимента (составлено автором)

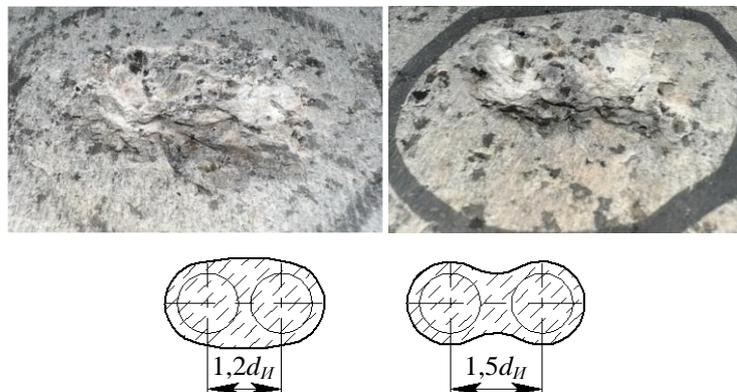


Рисунок 3.14 – Лунки выкола при разном расстоянии между инденторами (составлено автором)

Очевидно, что результаты физического и вычислительного эксперимента расходятся. Это означает, что исследование буровых коронок штыревого типа должно проводиться не в статических условиях, а в динамических – при непосредственном моделировании ударного воздействия на породу. Статические методы моделирования, хотя и позволяют изучить основные закономерности взаимодействия инденторов с породой, не учитывают сложную динамику ударного воздействия, распространение волновых эффектов и реальное поведение породы при ударных нагрузках.

Оценка среднего объема разрушения породы (V_{cp}) при одновременном ударном воздействии двумя инденторами, выполненных по трактрисе (рисунок 3.13, б), расположенными на разном расстоянии между их геометрическими осями, показала, что оптимальной величиной отношения $l_{и}/d_{и}$ является 1,5. Можно сделать вывод, что оптимальное расстояние между соседними инденторами является величиной, не зависящей от формы рабочего участка индентора. Применение вставок, выполненных по трактрисе, обеспечивает увеличение объема разрушения породы в среднем на 40 % в сравнении с традиционными полусферическими, а глубина внедрения за один удар при этом увеличивается на 10 %. Это означает, что форма лунки выкола соответствует левой части рисунка 3.14.

Стабильное внедрение инструмента в породу при ударном воздействии возможно при условии разрушения площади забоя шпура близкой к 100 %. В таком случае поворотное движение инструмента будет необходимо для среза оставшейся части забоя, выравнивания поверхности забоя для последующей серии ударов, а также для очистки от шлама. Независимыми исследованиями различных ученых было установлено, что этим условиям соответствует схема взаимного расположения инденторов на инструменте, при которой вершины трех соседних инденторов образуют равносторонний треугольник [12].

Характер лунки выкола при одновременном внедрении двух инденторов, выполненных по трактрисе, также подтверждает это правило.

Но при использовании полусферических инденторов необходимо контролировать размещение не трех, а четырех соседних инденторов. Они должны устанавливаться по схеме ромба с соотношением длин диагоналей равным 1,25, что соответствует двум оптимальным значениям расстояний между полусферическими инденторами $l_{II} = 1,5d_{II}$ и $l_{II} = 1,2d_{II}$.

Для более точной оценки выявленных закономерностей и количественной интерпретации полученных данных была проведена их статистическая обработка.

Среднее арифметическое отклонений результатов расчетов формы ударного импульса определяется по формуле (3.1):

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta_i}{k}, \quad (3.1)$$

где Δ_i – отклонение результатов на i -ом шаге,

k – количество опытов.

Среднее квадратическое отклонение найдется как (3.2)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{k-1}}, \quad (3.2)$$

Выборочная дисперсия составляет (3.3)

$$S = \sigma^2, \quad (3.3)$$

Коэффициент вариации (3.4)

$$v = \frac{\sigma}{\bar{\Delta}}, \quad (3.4)$$

Ошибка среднего арифметического (3.5)

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{k-1}}, \quad (3.5)$$

Результаты статистической обработки данных (таблица 3.3) свидетельствуют о том, что экспериментальные исследования имеют удовлетворительную погрешность для инденторов цилиндросферической формы $4,34 \pm 0,08$ % и инденторов с рабочей поверхностью в виде трактрисы $5,26 \pm 0,12$ %. Анализ данных проводился с использованием статистических

методов, позволяющих минимизировать влияние случайных факторов и повысить достоверность полученных результатов.

Таблица 3.3 – Результаты статистической обработки данных(составлено автором)

№	d_{II} , мм	l_{II} , мм	V_{cp} , мм ³	$\bar{\Delta}$	σ	S	v	m
1	10,4	12,5	0,55	4,66	0,10	0,01	0,18	0,06
2		13,5	0,58	4,39	0,07	0,00	0,12	0,04
3		14,5	0,58	4,39	0,16	0,02	0,27	0,09
4		15,5	0,66	3,84	0,08	0,01	0,12	0,04
5		16,5	0,58	4,39	0,22	0,05	0,38	0,13
6		17,5	0,59	4,33	0,18	0,03	0,30	0,10
Среднее значение:				4,34				0,08
1	12,3	15	0,71	4,37	0,18	0,03	0,26	0,11
2		16	0,65	4,76	0,10	0,01	0,15	0,06
3		17	0,73	4,22	0,17	0,03	0,24	0,10
4		18	0,88	3,50	0,26	0,07	0,30	0,15
5		19	0,58	5,30	0,30	0,09	0,51	0,17
6		20	0,70	4,42	0,14	0,02	0,20	0,08
7		21	0,62	5,02	0,24	0,06	0,39	0,14
Среднее значение:				5,26				0,12

В инженерных расчетах машин ударного действия оптимальной считается погрешность в пределах, однако в ряде случаев допускаются отклонения в результатах до 10 %. Таким образом, погрешность, выявленная в ходе обработки данных, находится в допустимых пределах, что подтверждает надежность и воспроизводимость проведенных экспериментов.

3.3 Выводы по Главе 3

1. Результаты вычислительного эксперимента, проведённого в среде T-Flex, позволили установить оптимальное значение отношения l_{II}/d_{II} . Полученные данные подтверждает гипотезу Барона Л.И. о существовании оптимального диапазона значений соотношения расстояния между осями

соседних инденторов к их диаметру l_H/d_H от 1,67 до 1,71 для эффективного разрушения горной породы.

2. Вычислительные исследования показали, что при $l_H/d_H \leq 1,7$ происходит наложение полей напряжений между соседними вставками, что приводит к более интенсивному разрушению породы. Это явление способствует увеличению зоны разрушения, формированию крупных сколов и повышению скорости бурения.

3. Для подтверждения полученных результатов, а также уточнения оптимального значения отношения l_H/d_H и оценке влияния особенностей одновременного внедрения групп твердосплавных вставок был проведён физический эксперимент в условиях динамического воздействия на горную породу. Результаты физического эксперимента показали, что оптимальные значения отношения l_H/d_H имеют два значения: 1,2 и 1,5. При $l_H/d_H=1,2$ зона концентрации напряжений располагается ближе к поверхности породы, что способствует формированию разрушенной области в верхних слоях, а при $l_H/d_H=1,5$ напряжения распространяются глубже в породу, что увеличивает глубину внедрения инденторов на 13 % и снижает удельное количество вставок на 20% по сравнению с более плотным их расположением.

4. Сравнение данных вычислительного и физического экспериментов выявило расхождения в оптимальном значении l_H/d_H . Это указывает на необходимость проведения исследований в динамических условиях, которые более точно моделируют реальные процессы разрушения породы при бурении.

5. Результаты физического эксперимента показали, что применение вставок, выполненных по трактрисе, обеспечивает увеличение объема разрушения породы в среднем на 40 % в сравнении с полусферическими, а глубина внедрения за один удар при этом увеличивается на 10 %.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ УДАРНО-ПОВОРОТНОМ БУРЕНИИ

4.1 Породоразрушающая твердосплавная вставка с рабочей поверхностью в виде тела вращения трактрисы

Из практики известны несколько форм твердосплавных вставок при этом практика производства ограничена, но по результатам патентного поиска их больше. В большей степени форма индентора влияет на глубину проникновения, что приводит к увеличению производительности бурения, исходя из этого форма должна быть острой, но для формирования такой формы с точки зрения геометрии можно использовать разные кривые парабола, катенид, цепная линия и т.д.

Но, помимо остроты, необходимо учитывать процесс изнашивания, т.к. в результате изнашивания рабочая поверхность индентора, образованная вращением кривой показательной функцией (парабола, эллипс, цепная линия и т.д.), приобретает сферическую форму.

Полученный сферический участок оказывается «тупым», он имеет большой радиус кривизны. Внедрять такую вставку в забой весьма сложно, требуются значительные контактные воздействия. Существует потребность в проектировании инденторов такой формы, при которой изнашивание рабочего участка будет происходить эквидистантно. Эквидистантное изменение формы рабочего участка обеспечивает сохранение малого радиуса кривизны, что в совокупности позволяет сохранить повышенную производительность инструмента при одновременном увеличении его ресурса.

В связи с этим было предложено новое техническое решение породоразрушающей твердосплавной вставки, защищенное патентом РФ на полезную модель № 225501 [85], результатом которой является повышение производительности и увеличение ресурса инструмента (Приложение В).

Породоразрушающая твердосплавная вставка (рисунок 4.1) состоит из цилиндрического участка 1 и рабочего участка 2. Рабочий участок выполнен в виде тела вращения трактрисы 3 вокруг оси 4, проходящей через вершину 5 трактрисы параллельно ее асимптоте. Тело вращения трактрисы 3 при одних и тех же размерах известных вставок более «острое», т.е. имеет участки со значительно меньшими радиусами кривизны.

В вершине 5 выполнено скругление по дуге окружности 6, радиус R , которой выбирается в пределах от 2,9 до 4,5 раз меньше диаметра вставки d . Интервал радиуса дуги окружности 6 скругления выбран потому, что при $R < d/4,5$ рабочий участок 2 вставки на ранней стадии изнашивания принимает критическую форму 8, при которой в вершине вставки появляется острая кромка, которая приводит к возникновению концентрации напряжений и разрушению твердосплавной вставки, что не позволяет увеличить ресурс инструмента. При $R > d/2,9$ при изнашивании до критической формы 8 диаметр вставки уменьшается в несколько раз, что приводит к возникновению концентрации напряжений и разрушению твердосплавной вставки и не позволяет увеличить ресурс инструмента.

Известно, что длина касательной к трактрисе постоянна, следовательно, величина нагрузки, направленной по касательной к трактрисе в любой ее точке, приводящей к изнашиванию рабочего участка 2 вставки, является величиной постоянной, что обеспечивает в процессе бурения равномерное изнашивание рабочего участка 2 вставки, выполненного в виде тела вращения трактрисы. Форма рабочего участка 2, при этом в процессе изнашивания изменяется эквидистантно к промежуточной форме 8 до критической формы 7, при которой в вершине вставки появляется острая кромка, которая приводит к возникновению концентрации напряжений и разрушению твердосплавной вставки. Эквидистантное изменение формы рабочего участка 2 обеспечивает сохранение малого радиуса кривизны, что в совокупности позволяет сохранить повышенную производительность инструмента и при одновременном увеличении его ресурса.

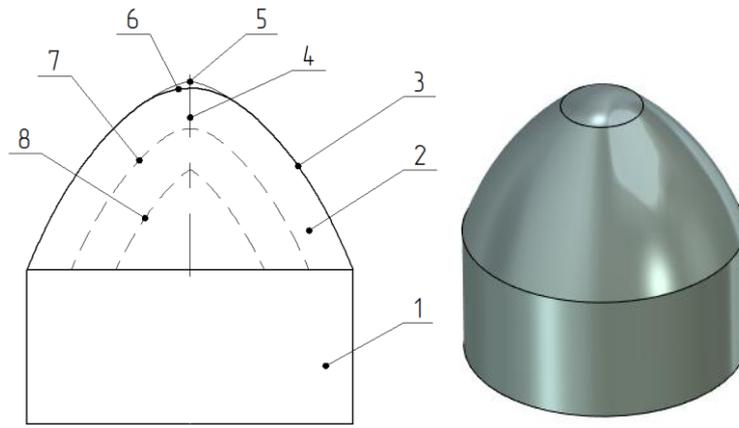


Рисунок 4.1 - Общий вид твердосплавной вставки (составлено автором)

На рисунке 4.2 изображена вставка, содержащая цилиндрический участок и рабочий участок, выполненный в виде тела вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через вершину трактрисы параллельно её асимптоте. Геометрические параметры рабочего участка вставки задаются величинами диаметра d_H , длины рабочего участка l_p и высоты трактрисы a .

Вершина трактрисы имеет координаты $(0; a)$, точка пересечения образующих рабочего и посадочного цилиндрического участков вставки имеет координаты $(l_p; a - d_H/2)$.

С учетом этих координат в зависимости от исходных данных геометрические параметры вставки могут быть найдены по результатам решения трех задач.

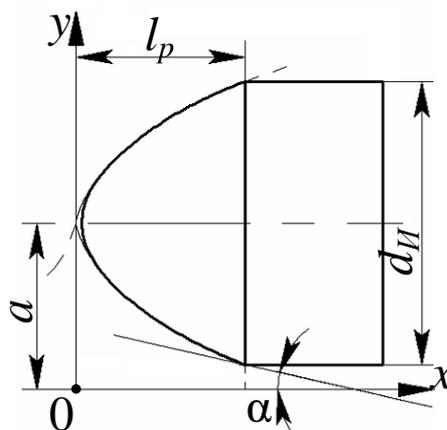


Рисунок 4.2 – Индентор с рабочим участком, выполненным по трактрисе (составлено автором)

Известно уравнение трактрисы (4.1) [29]:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos \alpha + a \cdot \ln \tan \frac{\alpha}{2}, \\ y = a \cdot \sin \alpha; \end{cases} \quad (4.1)$$

где α – угол между касательной к трактрисе и положительным направлением оси абсцисс ($0 < \alpha < \pi$).

В зависимости от исходных данных геометрические параметры вставки могут быть найдены по результатам решения трех задач.

1. Заданы диаметр d_H и высота трактрисы a . Необходимо определить длину рабочего участка l_p .

С учетом координат точки пересечения образующих рабочего и посадочного цилиндрического участков вставки ($l_p; a-d_H/2$) система уравнений (4.1) приобретает следующий вид

$$\begin{cases} l_p = a \cdot \cos \alpha + a \cdot \ln \tan \frac{\alpha}{2}, \\ a - \frac{d_H}{2} = a \cdot \sin \alpha; \end{cases} \quad (4.2)$$

из второго уравнения которой:

$$\alpha = \arcsin\left(1 - \frac{d_H}{2a}\right). \quad (4.3)$$

Тогда

$$l_p = a \cdot \arcsin\left(1 - \frac{d_H}{2a}\right) \cdot \ln \operatorname{tg}\left(\arcsin\left(1 - \frac{d_H}{2a}\right) / 2\right). \quad (4.4)$$

2. Заданы длина рабочего участка l_p и высота трактрисы a . Необходимо определить диаметр d_H .

Из второго уравнения системы (4.2) выражаем

$$d_H = 2a \cdot (1 - \sin \alpha), \quad (4.5)$$

где расчетное значение угла α (угол наклона касательной к трактрисе) определяется из уравнения $l_p = a \cdot \cos \alpha + a \cdot \ln \operatorname{tg}(\alpha / 2)$.

При этом необходимо отметить, что поставленная задача может быть решена только в численном виде посредством применения программ математических пакетов, например, Maple.

3. Заданы диаметр d_H и длина рабочего участка l_p . Необходимо определить высоту трактрисы a .

Из второго уравнения системы (4.2) имеем

$$a = \frac{d_H}{2(1 - \sin \alpha)}. \quad (4.6)$$

подставляя которое в первое уравнение системы (4.2) получаем

$$l_p = \frac{d_H}{2(1 - \sin \alpha)} (\cos \alpha + \ln \operatorname{tg} \alpha). \quad (4.7)$$

Из уравнения (4.7) в численном виде определяется расчетная величина угла α , подставляемая в уравнение (4.6).

Таким образом, новая вставка может быть сконструирована из трех различных исходных условий.

4.2 Буровая коронка с синусоидальной вогнуто-выпуклой поверхностью

Современные конструкции буровых коронок постоянно совершенствуются для достижения большей эффективности и долговечности в процессе бурения. Новые виды породоразрушающего инструмента безлезвийного типа должны обеспечивать уменьшение энергоемкости процесса бурения и улучшение очистки забоя скважины от буровой мелочи. Известен ряд форм буровых коронок [3, 2, 84, 86, 87], оснащенных твердосплавными инденторами, не имеющими острых краев. Недостатком большинства конструкций современных буровых коронок является выпуклая форма рабочей поверхности и недостаточное расстояние между соседними вставками, расположенными на поверхности буровой коронки, что приводит к увеличению энергоемкости процесса бурения, а выполнение ударной поверхности выпуклой формы не способствует повышению качества очистки забоя от буровой мелочи при осуществлении ударно-поворотного бурения.

С целью уменьшения энергоемкости процесса бурения, повышения эффективности разрушения породы и улучшения очистки забоя скважины от буровой мелочи предложено новое техническое решение безлезвийного бурового инструмента, защищенное патентом РФ на изобретение № 2801724 [88] (Приложение В).

Сущность разработки заключается в том, что породоразрушающая поверхность буровой коронки, содержащей корпус и твердосплавные инденторы, выполнена в виде тела вращения синусоиды вокруг продольной геометрической оси коронки.

Слово «синусоидальная» используется для обозначения ключевой особенности поверхности – её образование основано на вращении гармонической функции (синусоиды), описанной в системе координат относительно оси симметрии, что отличает её от традиционных вогнутых или выпуклых поверхностей.

Применение такой породоразрушающей поверхности в буровой коронке позволяет эффективно решить несколько ключевых задач. Во-первых, такая конструкция обеспечивает направленное бурение, способствуя более точному разрушению породы в заданной траектории. Во-вторых, достигается равномерное разрушение породы за счёт взаимовлияния зон воздействия соседних инденторов, что исключает необработанные участки породы между соседними инденторами и повышает производительность бурения. В-третьих, геометрия синусоидальной поверхности и рациональное расположение инденторов совместно с потоками воздуха улучшают очистку забоя скважины от буровой мелочи, обеспечивая стабильную и эффективную работу коронки.

Буровая коронка состоит из корпуса 1 (рисунок 4.3) с породоразрушающей поверхностью 2, на которой выполнены отверстия, в которые жестко установлены твердосплавные инденторы 3. В корпусе 1 выполнено центральное сквозное отверстие 4. Породоразрушающая поверхность 2 образована вращением относительно продольной

геометрической оси коронки синусоиды 5, описываемой в прямоугольной системе координат уравнением (4.8):

$$y = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{3\pi}{D}x - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.8)$$

где D – диаметр коронки; H – глубина вогнутой части, которая составляет от 0,15 до 0,20 от диаметра коронки D . Такой интервал размера глубины вогнутой части H выбран потому, что при $H=0,2D$ и больше угол наклона геометрической оси твердосплавных инденторов к оси коронки составляет больше 45° , что приводит к изгибающим нагрузкам и нарушению жесткой установки твердосплавных инденторов в отверстия. При $H=0,15D$ и менее невозможно обеспечить жесткую установку в отверстия периферийных твердосплавных инденторов [10].

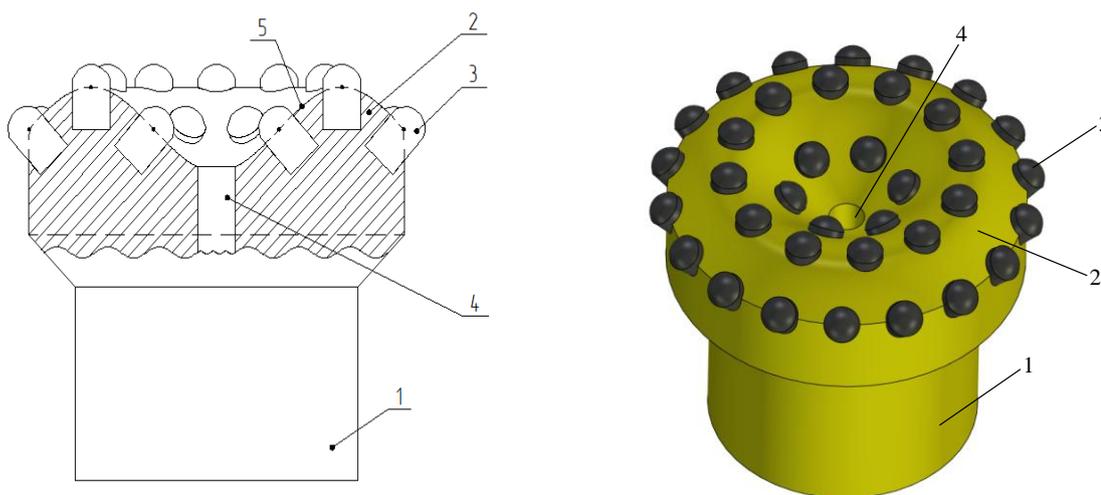


Рисунок 4.3 – Общий вид и 3D-модель буровой коронки (составлено автором)

Нумерации на рисунках 4.3-4.5: 1 – корпус; 2 – породоразрушающая поверхность; 3 – твердосплавные инденторы; 4 – центральное сквозное отверстие; 5 – синусоида; 6 – концентрические окружности; 7 – пространство между соседними твердосплавными инденторами; 8 – зона разрушения горной породы под твердосплавным индентором.

Любая схема размещения инденторов на рабочей поверхности буровой коронки может быть представлена в виде набора групп инденторов, расположенных в вершинах треугольника. Согласно условию разрушения

горной породы не только под индентором, но и в пространстве между ними, длина сторон треугольника должна соответствовать величине оптимального соотношения l_{II}/d_{II} , т.е. должна быть равна 1,2-1,5 от диаметра индентора. Углы между сторонами треугольника при этом должны задаваться в диапазоне $47 - 77^\circ$.

Твердосплавные инденторы 3 жестко закреплены в отверстия, которые выполнены на породоразрушающей поверхности 2 равномерно по трем concentрическим окружностям 6 (рисунок 4.4), которые проходят через вершины и точки перегиба синусоиды 5. Количество твердосплавных инденторов 3 на каждой окружности 6 выбирается из соотношения (4.9):

$$z = (6 - z_y)k, \quad (4.9)$$

где k – порядковый номер concentрической окружности при отсчете от центра коронки; z_y – количество инденторов в центре коронки (0 или 1) (рисунок 4.4).

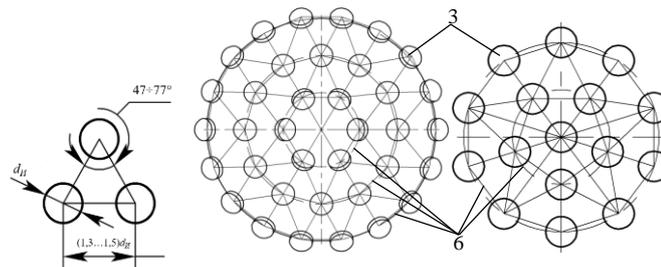


Рисунок 4.4 – Схема размещения инденторов (составлено автором)

Количество инденторов, определяемое формулой (4.9), выбрано потому, что при меньшем количестве не обеспечивается разрушение породы в пространстве 7 (рисунок 4.5) между соседними твердосплавными инденторами, так как образуемое расстояние между точками контакта соседних твердосплавных инденторов с горной породой не обеспечивает взаимного влияния зон разрушения, а при большем происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов. Твердосплавные вставки в данной конструкции буровой коронки могут быть выполнены различной формы в зависимости от области назначения. На рисунке 4.3 и 4.5 форма твердосплавных вставок представлена в общем виде.

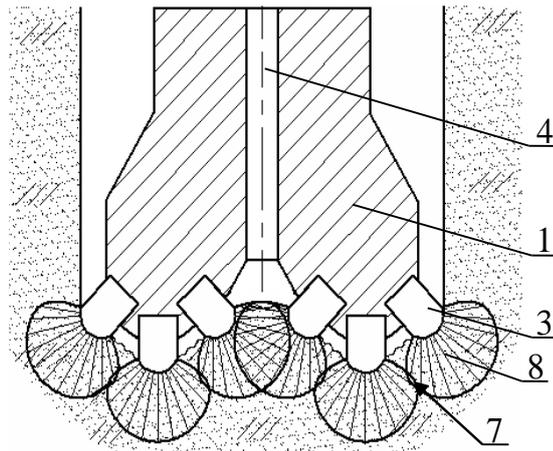


Рисунок 4.5 – Схема разрушения забоя скважины буровой коронкой
(составлено автором)

Диаметр твердосплавных инденторов 3 выбирается в пределах от 6,58 до 9,12 раз меньше диаметра коронки D , а геометрическая ось каждого твердосплавного индентора является нормалью синусоиды. Интервал диаметра d твердосплавных инденторов выбран потому, что при $d > D/6,58$ происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов. При $d < D/9,12$ разрушение горной породы в пространстве между соседними твердосплавными инденторами не происходит, так как образуемое расстояние между точками контакта соседних твердосплавных инденторов с горной породой не обеспечивает взаимного влияния зон разрушения.

Предлагаемые соотношения размеров и параметров буровой коронки были подобраны конструктивно. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.1.

По результатам видно, что при отношении расстояния l_H между точками контакта соседних твердосплавных инденторов с горной породой к диаметру d твердосплавного индентора больше 1,5 разрушение горной породы в пространстве между твердосплавными инденторами не происходит, что подтверждает выводы по результатам эксперимента об оптимальном диапазоне значений соотношения расстояния от 1,2 до 1,5.

В таблице 4.1 представлены расчеты размеров и параметров буровой коронки при различных значениях диаметра буровой коронки и диаметра твердосплавных инденторов согласно заявленным признакам.

Таблица 4.1 – Избранные результаты расчетов размеров и параметров буровой коронки (составлено автором)

Диаметр коронки, D , мм	Диаметр индентора, d , мм	D/d	Расстояние между точками контакта соседних инденторов с горной породой, l_{II} , мм	l_{II}/d	Проверка условия $l_{II}/d \leq 1,71$	Примечание
32	4,2	7,619	6,73	1,6	Выполняется	
	5,2	6,154	происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов			
34	3,2	10,625	7,12	2,2	Не выполняется	
	4,2	8,095	6,75	1,6	Выполняется	
	5,2	6,538	происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов			
36	5,2	6,923	7,14	1,4	Выполняется	
40	4,2	9,524	7,92	1,9	Не выполняется	
	5,2	7,692	8,28	1,6	Выполняется	
	6,2	6,452	происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов			
43	4,2	10,238	8,50	2,0	Не выполняется	
	6,2	6,935	8,43	1,4	Выполняется	
48	5,2	9,231	9,84	1,9	Не выполняется	
	6,2	7,742	9,40	1,5	Выполняется	
	7,2	6,667	9,04	1,2		
50	5,2	9,615	10,23	2,0	Не выполняется	
	6,2	8,065	9,79	1,6	Выполняется	
	7,2	6,944	9,43	1,3		
54	5,2	10,385	11,02	2,1	Не выполняется	
	7,2	7,500	10,20	1,4	Выполняется	$(D/d)_{\min}=6,58$
	8,2	6,585	10,50	1,2		
57	6,2	9,194	11,15	1,8	Не выполняется	
	7,2	7,917	10,79	1,5	Выполняется	
	8,2	6,951	11,02	1,3		
64	8,2	7,805	12,80	1,6	Выполняется	
	9,2	6,957	12,80	1,4		
		10,2	6,27	происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов		

Продолжение таблицы 4.1

Диаметр коронки, D, мм	Диаметр индентора, d, мм	D/d	Расстояние между точками контакта соседних инденторов с горной породой, И, мм	И/d	Проверка условия $И/d \leq 1,71$	Примечание
70	7,2	9,722	13,31	1,8	Не выполняется	
	9,2	7,609	13,97	1,5	Выполняется	
	10,2	6,863	13,97	1,4		
	11,2	6,250	происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов			
76	8,2	9,268	14,19	1,7	Не выполняется	
	9,2	8,261	14,19	1,5	Выполняется	
	10,2	7,451	14,19	1,4		
	11,2	6,786	15,14	1,3		
83	8,2	10,122	16,20	2,0	Не выполняется	
	10,2	8,137	16,50	1,6	Выполняется	
	11,2	7,411	16,50	1,5		
	12,3	6,748	16,50	1,3		
89	11,2	7,946	17,66	1,6	Выполняется	
	12,3	7,236	17,66	1,4		
	13,3	6,692	17,66	1,3		
93	10,2	9,118	17,24	1,7	Выполняется	$(D/d)_{\max}=9,12$
	11,2	8,304	18,44	1,6		
	12,3	7,561	19,90	1,6		
	13,3	6,992	18,44	1,4		
	14,3	6,503	происходит пересечение отверстий, предназначенных для жесткой установки твердосплавных инденторов			
102	12,3	8,293	20,19	1,6	Выполняется	
	13,3	7,669	20,19	1,5		
	14,3	7,133	20,92	1,4		
	15,3	6,667	20,19	1,3		
115	12,3	9,350	22,72	1,847	Не выполняется	
	14,3	8,042	23,44	1,6	Выполняется	
	15,3	7,516	23,81	1,5		
	16,3	7,055	24,71	1,5		
127	13,3	9,549	25,05	1,883	Не выполняется	
	16,3	7,791	26,51	1,626	Выполняется	
140	14,3	9,790	28,30	1,979	Не выполняется	
	15,3	9,150	28,67	1,874		
	16,3	8,589	27,09	1,662	Выполняется	

Из приведенных в таблице 4.1 данных видно, что условие, когда отношение расстояния l_{II} между точками контакта соседних твердосплавных инденторов с горной породой к диаметру d твердосплавного индентора меньше или равно значению 1,2-1,5, при котором происходит разрушение горной породы в пространстве между соседними инденторами, выполняется при диаметре d твердосплавных инденторов от 6,58 до 9,12 раз меньше диаметра коронки D .

Работает буровая коронка в совокупности с бурильной машиной ударно-поворотного действия. Буровая коронка вставляется в корпус машины до соприкосновения со штангой-волноводом. Энергия привода машины преобразуется в энергию удара, которая через штангу-волновод передается на буровую коронку. Далее энергия удара передается через породоразрушающую поверхность 2 (рисунок 4.3) корпуса 1 (рисунок 4.5) твердосплавным инденторам 3. Под действием ударной нагрузки твердосплавные инденторы 3 забуриваются в забой скважины, и происходит разрушение горной породы не только под каждым твердосплавным индентором 3, но и в пространстве между соседними твердосплавными инденторами 7, так как обеспечивается взаимное влияние зон разрушения горной породы под твердосплавным индентором 8, то есть за один удар происходит разрушение по всей поверхности забоя. После чего буровая коронка поворачивается на любой угол. Через центральное сквозное отверстие 4 подается сжатый воздух или промывочная жидкость, и через вогнутую часть породоразрушающей поверхности 2 во всех направлениях между твердосплавными инденторами 3 происходит очистка забоя скважины от разрушенной буровой мелочи, находящейся не только в пространстве между твердосплавными инденторами, но и под ними.

Моделирование распределения потока промывочного агента в буровой коронке осуществлялось с использованием программного комплекса SolidWorks, модуль Flow Simulation. Для проведения численного моделирования была построена трехмерная геометрическая модель буровой коронки, погруженная в горную породу на глубину корпуса коронки. В

качестве исходных данных для моделирования использовались параметры, характерные для пневмоударников, применяемых при ударно-поворотном способе бурения. Согласно техническим характеристикам пневмоударников, скорость воздушной струи, выходящей из центрального отверстия, принималась равной до 30 м/с, что и было заложено в качестве максимального значения при задании граничных условий. Температура воздуха — 20 °С, давление на входе — 0,1 МПа, плотность — 1,2 кг/м³.

На рисунке 4.6 представлена визуализация траекторий движения потока промывочного агента. Благодаря тому, что породоразрушающая поверхность выполнена по синусоиде, поток промывочного агента направляется через вогнутую часть во всех направлениях не только между твердосплавными инденторами, но и под ними, и далее по касательной к синусоиде выносит шлам вдоль стенок скважины, не препятствуя процессу бурения.

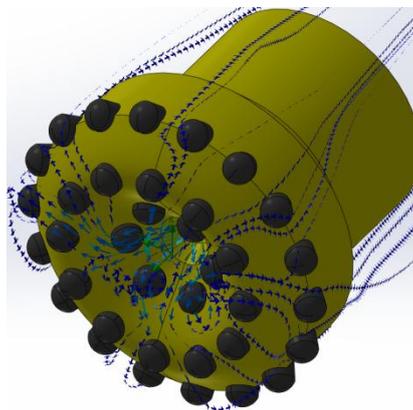


Рисунок 4.6 – Распределение потока промывочного агента (составлено автором)

В результате уменьшается энергоёмкость процесса бурения и улучшается очистка забоя скважины от буровой мелочи за счет наличия в конструкции буровой коронки вогнутой части породоразрушающей поверхности, на которой в отверстия жестко установлены твердосплавные инденторы с расстоянием, гарантированно обеспечивающим взаимное влияние зон разрушения от соседних твердосплавных инденторов.

4.3 Расчет механической скорости бурения новым инструментом

При проведении буровых работ важным фактором является эффективность разрушения горной породы, определяемая механической скоростью бурения.

Механическая скорость бурения пневмоударником, оснащенным предложенной буровой коронкой с инденторами, выполненными по трактрисе, оценивалась в сравнении со скоростью бурения традиционно применяемой в пневмоударниках штыревой коронкой с полусферическими инденторами по формуле (4.3) [53]:

$$V = V_0 - \zeta L, \quad (4.3)$$

где V_0 - начальная механическая скорость бурения; ζ - коэффициент падения скорости бурения с глубиной скважины; L - глубина скважины.

Расчет производился для условий бурения скважины длиной $L = 25$ м пневмоударником ПП-105 с параметрами, приведенными в книге [54] на 216 странице, на рисунке 146: $V_0 = 65$ мм/мин, $\zeta = 0,0004$ мин⁻¹, число ударов в минуту $n = 2000$, коэффициент крепости породы был взят $f = 16$ по М.М.Протождяконова.

Подставив исходные данные в формулу (4.3), получаем:

$$V = 65 - 0,0004 \cdot 25000 = 55 \text{ мм/мин.}$$

Глубина внедрения инструмента за один удар зависит от начальной скорости V_0 и количество ударов n . Она определяется как:

$$h_1 = \frac{V_0}{n} = \frac{65}{20000} = 0,0325 \text{ мм.}$$

Сравнительный анализ двух коронок выполнялся при одинаковых условиях. По результатам эксперимента было установлено, что применение нового инструмента обеспечивает увеличение глубины на 10 %. Согласно этому, была пересчитана глубина внедрения инструмента при одном ударе:

$$h_{1*} = h_1 \cdot 1,1 = 0,0325 \cdot 1,1 = 0,03575 \text{ мм.}$$

Тогда начальная механическая скорость бурения составит:

$$V_{0*} = h_{1*} \cdot n = 0,03575 \cdot 2000 = 71,5 \text{ мм/мин.}$$

Механическая скорость бурения:

$$V_* = 71,5 - 0,0004 \cdot 25000 = 61,5 \text{ мм/мин.}$$

$$\Delta V = \frac{V_* - V}{V} \cdot 100\% = \frac{61,5 - 55}{55} \cdot 100\% = 11,8\% .$$

т.е. происходит увеличение скорости бурения ΔV примерно на 12 %.

Была проанализирована механическая скорость бурения при различных значениях коэффициента крепости породы. Рассчитаны значения механической скорости бурения пневмоударником, оснащённым предложенной буровой коронкой с инденторами, выполненными по форме трактрисы. Полученные результаты сопоставлены с механической скоростью бурения пневмоударником с традиционно применяемой штыревой коронкой, оснащённой полусферическими инденторами. Результаты расчётов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов механической скорости бурения (составлено автором)

Расчетные параметры бурения	Коэффициент крепости, f					
	20	18	16	14	12	10
Начальная скорость, V_0 , мм/мин	52	55	65	80	98	120
ζ , 1/мин	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Количество ударов в минуту, n	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Механическая скорость, V , мм/мин	42	45	55	70	88	110
Длина, L , мм	25000	25000	25000	25000	25000	25000
Внедрение за 1 удар	0,026	0,0275	0,0325	0,04	0,049	0,06
Внедрение +10% за 1 удар	0,0286	0,03025	0,03575	0,044	0,0539	0,066
Начальная скорость, V_{0*} , мм/мин	57,2	60,5	71,5	88	107,8	132
Механическая скорость, V_* , мм/мин	47,2	50,5	61,5	78	97,8	122
Увеличение скорости, %	12,38	12,22	11,82	11,43	11,14	10,91

Для наглядного представления различий в эффективности бурения были построены графики зависимости механической скорости бурения от коэффициента крепости породы для обоих типов буровых коронок (рисунок 4.7).

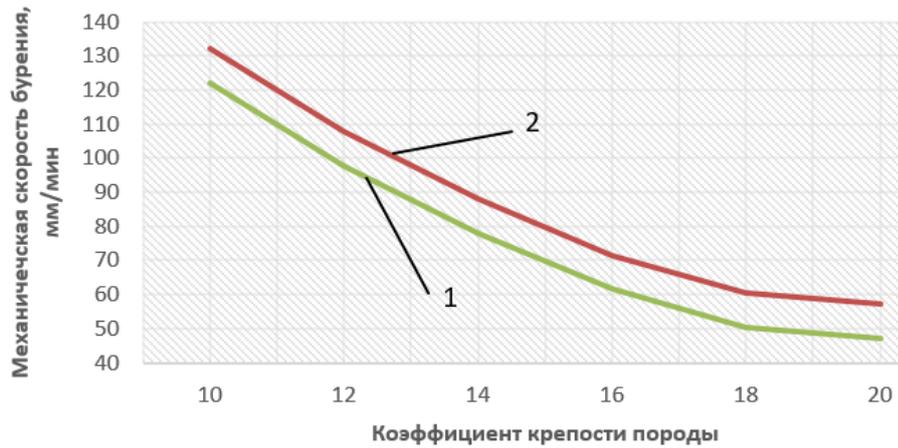


Рисунок 4.7 – Сравнение механической скорости бурения при использовании традиционного (1) и авторского инструмента (2) (составлено автором)

Таким образом, по результатам расчета механическая скорость бурения при применении нового инструмента увеличивается в среднем на 12 %.

4.4 Выводы по Главе 4

1. Любая схема размещения твердосплавных вставок на рабочей поверхности может быть представлена в виде групп инденторов, расположенных в вершинах треугольника. Для эффективного разрушения породы соотношение l_H/d_H должно находиться в диапазоне 1,2–1,5, а углы между сторонами треугольника составлять от 47° до 77° . Наилучший вариант размещения инденторов на рабочей поверхности породоразрушающего бещлезвийного инструмента — по концентрическим окружностям, где их количество определяется формулой $z = (6 - z_H)k$. диаметр инденторов должен составлять 6,58 – 9,12 раз меньше диаметра коронки, что обеспечивает равномерное распределение нагрузок и эффективное разрушение породы.

2. Для оптимизации процесса бурения ударно-поворотным способом, предотвращения отклонения скважины от заданного направления и повышения эффективности очистки забоя, конструкция буровой коронки должна иметь выпукло-вогнутый профиль. Предложенная конструкция, защищенная патентом РФ №2801724, позволяет уменьшить энергоемкость

процесса бурения, повысить эффективность разрушения породы и улучшить очистку забоя скважины от буровой мелочи.

3. Очистка забоя от разрушенной породы обеспечивается подачей сжатого воздуха или промывочной жидкости через центральное отверстие бурового инструмента. Благодаря синусоидальной форме рабочей поверхности, промывочный поток направляется не только между инденторов, но и под ними, что улучшает вынос шлама вдоль стенок скважины и предотвращает его накопление.

4. Использование предложенной буровой коронки с инденторами, выполненными по трактрисе, позволяет увеличить глубину внедрения инструмента за один удар на 10 %. В сравнении с традиционными штыревыми коронками с полусферическими инденторами, расчёты показали, что механическая скорость бурения возрастает в среднем на 12 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для решения проблемы повышения эффективности ударно-поворотного бурения машинами, оснащенными безлезвийным породоразрушающим инструментом.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основе задачи вдавливания плоского штампа Ж. Буссинеска и контактной задачи Г. Герца найдено решение задачи симультанного разрушения горной породы двумя инденторами с установлением зависимости между геометрическими параметрами элементов безлезвийного бурового инструмента, механическими свойствами разрушаемой горной породы, усилием ударного воздействия и глубиной внедрения инструмента в виде коэффициента влияния формы индентора, позволяющего устанавливать рациональную форму индентора, обеспечивающую максимальную глубину внедрения инструмента.

2. Новое техническое решение твердосплавной вставки с рабочим участком, выполненным в форме тела вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через вершину трактрисы параллельно ее асимптоте, обеспечивает большее проникание инструмента внутрь забоя при одних и тех же нагрузках, что позволяет повысить производительность бурового инструмента, а эквидистантное изменение формы рабочего участка обеспечивает увеличение ресурса инструмента.

3. Доказано, что армирование безлезвийного бурового инструмента твердосплавными вставками с учётом эффекта симультанности, согласно которому два соседних индентора устанавливаются на расстоянии, не превышающем 1,5 от их диаметра, обеспечивает наложение полей напряжений в разрушаемой породе, что приводит к увеличению объёма разрушения на 40 % и глубины внедрения на 10 %.

4. Новое техническое решение буровой коронки с породразрушающей поверхностью синусоидальной формы с вогнутостью в центральной части при равномерном размещении инденторов в характерных точках синусоиды обеспечивает разрушение породы по всей поверхности забоя за один удар, улучшение качества очистки забоя, увеличение механической скорости бурения в среднем на 12 %, повышая тем самым эффективность разрушения горной породы высокой крепости при ударно-поворотном способе бурения.

5. Разработанная методика выбора геометрических параметров инденторов и схем их размещения на рабочей поверхности бурового инструмента внедрена в деятельность ООО «ММЗ», что позволило повысить производительность буровых работ и снизить эксплуатационные затраты.

6. Дальнейшим развитием исследований по теме диссертации является применение полученных результатов при разработке иных типов породоразрушающих инструментов, оснащённых твердосплавными вставками, а также для создания программного обеспечения для оптимизации геометрии буровых коронок с учётом механики разрушения породы и конкретных условий бурения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева, А.И., Разработка методики расчета распространения продольных волн деформаций по буровому инструменту / А.И. Авдеева, А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 5. – С. 328–333.
2. Авторское свидетельство № 1789645 СССР, МПК E21B 10/36 (2006.01). Буровая коронка : №4905085/03 : заявл. 24.01.1991; опубл. 23.01.1993 / Липин А.А., Костин Ю.С., Федоров В.В. – 7 с.
3. Авторское свидетельство № 276858 СССР, МПК E21B 10/46 (1995.01). Буровая коронка : №1330721/22-3 : заявл. 08.05.1969; опубл. 22.07.1970 / Кожевников Л.П., Белавин Л.В., Авдонин Ю.Ф., Глазков А.П., Моржаретто А.А., Зарубин М.С., Мхоткин М.В., Ключко Н.А. – 2 с..
4. Александров, Е.В. Исследование взаимодействия инструмента и горной породы при ударном разрушении / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский, Г.М. Захариков. – М.: ЛИГД им. А.А. Скочинского, 1967. – 62 с.
5. Алексеев, С.Е. Пути повышения ресурса деталей погружного пневмоударника / С.Е. Алексеев, Б. Кубанычбек // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 2, № 3. – С. 26–33.
6. **Алиева, Л.** Анализ конструкций безлезвийного бурового инструмента и постановка проблем его совершенствования / **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 157-170.
7. **Алиева, Л.** Анализ современных подходов к проектированию безлезвийного бурового инструмента // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – Т. 3. – С. 6-8.
8. **Алиева, Л.** К вопросу разработки породоразрушающего инструмента для оснащения адаптивных бурильных машин / **Л. Алиева, А.В.**

Теплякова, И.А. Жуков // Наука и творчество: вклад молодежи. Сборник материалов всероссийской молодежной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Махачкала: ФОРМАТ, 2022. – С. 212-215.

9. **Алиева, Л.** К разработке нового технического решения индентора безлезвийного бурового инструмента / **Л. Алиева, А.В. Удальцова** // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы VII международной научно-практической конференции. Том 7. – СПб.: НИЦ МС, 2024. – С. 158-165.

10. **Алиева, Л.** Новое техническое решение безлезвийного инструмента для бурения скважин ударно-поворотным способом / **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы VIII международная научно-практическая конференция. – СПб.: НИЦ МС, 2025. – №8. – С. 34-37.

11. **Алиева, Л.** Обоснование рациональных параметров породоразрушающего инструмента для бурения ударно-поворотным способом // Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. Том 2. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 81-83.

12. **Алиева, Л.** Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента / **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, №4. – С. 1681-1694.

13. **Алимов, О.Д.** Бурильные машины / **О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников** – М.: Машиностроение, 1976. – 295 с.

14. **Алимов, О.Д.** Расчет динамического внедрения инструмента в обрабатываемую среду / **О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц** и др. – Фрунзе: Илим, 1980. – 43 с.

15. **Арцимович, Г.В.** Механофизические основы создания породоразрушающего инструмента. – Новосибирск: Наука, 1985. – 268 с.

16. Бажал, А.И. Взаимодействие импульсной волны с технологическими средами / А.И. Бажал, В.М. Кучеровский, А.М. Барак и др. // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ-ХПИ, 2011. – Вип. 1 (21). – С. 14-20.

17. Бажал, А.И. Сущностный анализ технологий разрушения твердых тел / А.И. Бажал, В.М. Кучеровский, А.М. Барак и др. // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ-ХПИ, 2011. – Вип. 1 (21). – С. 21-28.

18. Барон, Л.И. и др. Об эффекте совместности при разрушении горных пород групповым инструментом. /Барон Л.И., Глатман Л.Б., Козлов Ю.Н. -кн.: Физика горных пород и процессов. -М.: Недра, 1971, с.215-216.

19. Барон, Л.И. и др. Экспериментальное исследование эффекта совместности на образцах различных горных пород. / Барон Л.И., Глатман Л.Б., Козлов Ю.Н. -кн.: Разрушение горных пород проходческими комбайнами. -М.: Наука, 1977, с.29-41.

20. Бегагоен, И.А. Повышение точности и долговечности бурильных машин / И.А. Бегагоен, А.И. Бойко. – М.: Недра, 1986. – 213 с.

21. Бегагоен, И.А., Дядюра А.Г., Бажал А.И. Бурильные машины / Под ред. И.А. Бегагоена. – М.: Недра, 1972. – 368 с.

22. Борисович, В.Т., Чуносков В.В. Исследование процесса динамического разрушения породы инденторами со сферической головкой. Тр. Произв. и НИИ по инж. изысканиям в строительстве Госстроя СССР, – 1974, Вып.28, с.127-138.

23. Бурак, А.Я. Стендовые исследования ручного перфоратора с ударной системой «поршень-боек-штанга» / А.Я. Бурак, Д.А. Юнгмейстер, А.Ю. Васильев, Ю.В. Судьенков // Записки горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 175–180.

24. Буровое оборудование и инструмент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.promglobal.ru/gorno-shahtnoe->

oborudovanie/burovoe-oborudovanie-instrument/burovoj-standok-nkr-100m.html

(дата обращения: 11.03.2025).

25. Буровой инструмент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://binur.ru/bur_instr.php (дата обращения: 11.03.2025).

26. Буровой инструмент и оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://yrel77.ru/?page_id=572 (дата обращения: 11.03.2025).

27. Буялич, Г.Д. Формирование крутящего момента на шарошечном инструменте при образовании скважин с угловыми концентраторами напряжений / Г.Д. Буялич, М.К. Хуснутдинов, А.А. Хорешок, Ю.А. Лагунова, К.Г. Буялич // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 5 (175). – С. 78–85.

28. Васильев, А.А. Исследование влияния параметров процесса промывки на механическую скорость проходки долота / Васильев А.А., Сериков Д.Ю., Васильев А.В. // Инженер-нефтяник. 2019. № 3. С. 10-13.

29. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель, 2005. – 991 с.

30. Галин, Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости.-М.:Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980.-304 с.

31. Геобурмаш [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spb.gbm.ru/product/pnevmodarnoe-burenie/> (дата обращения: 11.03.2025).

32. Гилёв, А.В. Перспективы создания разборных буровых инструментов для открытых горных работ / А.В. Гилёв, Р.А. Гилёв, А.А. Хромов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 10. – С. 209–217.

33. Гилёв, А.В. Сравнительный анализ эффективности отечественных и зарубежных буровых станков / А.В. Гилёв, А.О. Шигин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 2 (85). – С. 43–49.

34. Гилев, А.В., Шигин А.О., Доронин С.В., Чесноков В.Т. Влияние

формы вооружения на напряженное состояние бурового инструмента / А.В. Гилев, А.О. Шигин, С.В. Доронин, В.Т. Чесноков // *Фундаментальные исследования*. – 2010. – № 12. – С. 80–87.

35. Гринько, А.А. Повышение эффективности процесса сколообразования при ударно-поворотном воздействии долота на горную породу / А.А. Гринько, Н.И. Сысоев, Д.А. Гринько // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 9. – С. 102- 115.

36. Громадский, А.С. Исследование прохождения ударного импульса через буровой инструмент / А.С. Громадский, В.Д. Афанасьев, Д.И. Кузьменко // *Горный вестник*. – 2013. – Т. 1. – № 1(96). – С. 267–270.

37. Губайдуллин, Р.И. Инновационный подход к анализу работы бурильного инструмента // *Бурение и нефть*. – 2022. – № 7–8. – С. 28–37.

38. Губанов, Е.Ф. Ударное разрушение хрупких сред при образовании в них отверстий без поворота инструмента: дис. ... канд. техн. наук / Евгений Фёдорович Губанов. – Новокузнецк, 2003. – 147 с.

39. Дворников, Л.Т. Бурение шпуров без вращения инструмента с рациональным размещением твердосплавных вставок / Л.Т. Дворников, Ю.А. Прядко, С.Н. Гудимов // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 1987. – № 11. – С. 95–100.

40. Дворников, Л.Т. О бурении шпуров без вращения бурового инструмента / Л.Т. Дворников, Е.Ф. Губанов // *Известия вузов. Горный журнал*. – 1997. – № 1.

41. Дворников, Л.Т. О новом направлении в создании безлезвийного бурового инструмента / Л.Т. Дворников, Е.Ф. Губанов // *Инструмент Сибири*. – 2000. – № 1.

42. Доронин, С.В. Сравнительный анализ альтернативных конструктивных решений при проектировании и модернизации деталей машин импульсного действия / С.В. Доронин, Д.В. Косолапов // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2012. – № 3 (39). – С. 30–37.

43. Ефременков, А.Б. Повышение эффективности бурильных работ на угольных шахтах при осуществлении анкерного крепления горных выработок / А.Б. Ефременков, П.А. Корнеев, В.А. Корнеев, А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев // Техника и технология горного дела. – 2022. – № 4 (19). – С. 62–72.

44. Жабин, А.Б. влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 8. – С. 5–13.

45. Жабин, А.Б., Математическая модель разрушения горных пород ударным инструментом / А.Б. Жабин, И.М. Лавит, А.В. Поляков, З.Э. Керимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 11. – С. 140–150.

46. Жариков, С.Н. Современные научные исследования лаборатории разрушения горных пород ИГД уро РАН и перспективы их развития / С.Н. Жариков, А.С. Реготунов, В.А. Кутуев // Проблемы недропользования. – 2022. – № 3(34). – С. 73-90.

47. Жуков, И. А. К разработке безлезвийного бурового инструмента для разрушения горных пород высокой крепости // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 39-41.

48. Жуков, И. А. Механика разрушения горных пород ударом при одновременном внедрении нескольких инденторов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 1(125). – С. 93-99.

49. Жуков, И. А. Развитие научных основ повышения эффективности ударных машин для бурения скважин в горных породах: дис. ... д-ра техн. наук / Иван Алексеевич Жуков. — Новосибирск, 2017. — 371 с.

50. Жуков, И.А. Новые виды бурового инструмента для разрушения горных пород // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – № 11. – С. 35–39.

51. Жуков, И.А. О результатах экспериментального исследования

разрушения горной породы ударными воздействиями / И.А. Жуков, В.Н. Цвигун // Машиностроение. – 2009. – № 19. – С. 125–137.

52. Жуков, И.А. Эффект simultанности при ударном разрушении горной породы безлезвийным инструментом / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников, В.Н. Цвигун // Вестник КузГТУ. – 2009. – № 3. – С. 13–16.

53. Иванов, К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К.И. Иванов, М.С. Варич, В.И. Дусев, В.Д. Андреев. – М.: Недра, 1974. – 408 с.

54. Иванов, К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К.И. Иванов, В.А. Латышев, В.Д. Андреев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.

55. Каталог буровых коронок КЗТС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user_files/Katalog_Koronki_2023_KZTS.pdf (дата обращения: 11.03.2025).

56. Квагинидзе, В.С. Буровые станки на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: учебное пособие / В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, Ю.А. Антонов, В.Б. Корецкий. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 291 с.

57. Комиссаров, А.П. Влияние конструкции породоразрушающего инструмента на эффективность ударного бурения / А.П. Комиссаров, С.Г. Фролов, Г.В. Прокопович // Горное оборудование и электромеханика.– 2012.– №8. – С. 11-15.

58. Комиссаров, А.П. Выбор рациональных параметров породоразрушающего инструмента буровых машин ударного действия / А.П. Комиссаров, Д.В. Быков, Г.В. Прокопович // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – №7. – С. 22-24.

59. Компрессорное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kaishanrus.com/articles/?ELEMENT_ID=470 (дата обращения: 11.03.2025).

60. Кондратенко, А.С. Пути повышения эффективности ударно-вращательного бурения скважин / А.С. Кондратенко, В.В. Тимонин, В.Н. Карпов, А.И. Попелюх // Горный журнал. – 2018. – № 5. – С. 63-68.

61. Коронки для бурения с выносным перфоратором [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rocktechnology.sandvik/ru/products/rock-tools/top-hammer-drilling-tools/коронки-для-бурения-с-выносным-перфоратором/> (дата обращения: 11.03.2025).

62. Косьянов, П.М. Оптимизация параметров бурового инструмента для повышения его эффективности / П.М. Косьянов, В.Г. Краснов // Недропользование XXI век. – 2019. – № 1 (77). – С. 62–65.

63. Крюков, Г.М. Закономерности силового взаимодействия внедряющихся инструментов с породой // Известия вузов. Горный журнал. – 1978. – № 3. – С. 68–75.

64. Крюков, Г.М. Определение объема разрушения при одиночном ударе // Известия вузов. Горный журнал. – 1969. – № 3. – С. 75–79.

65. Крюков, Г.М. Сопротивление горных пород средней и выше средней крепости внедрению в них твердых инструментов // Известия вузов. Горный журнал. – 1975. – № 8. – С. 44–51.

66. Курганова, Ю.А. Анализ возможности повышения свойств материала вк15 для бурового инструмента / Ю.А. Курганова, К.С. Панина, П.С. Бешенков // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 518-524.

67. Кутузов, Б.Н. Процесс динамического взаимодействия инструмента с породой / Б.Н. Кутузов, Г.М. Крюков, В.П. Тарасенко. – М.: Изд-во Московского горного института, 1969. – 280 с.

68. Латышев, В.А. Исследование влияния геометрических параметров породоразрушающих инденторов на эффективность ударного разрушения горных пород / В.А. Латышев, В.С. Куртов, В.М. Солдатова // Сборник трудов НИПИГОРМАШ. – Свердловск, 1985.

69. Линник Ю.Н. Влияние армирующих материалов горнорезущего инструмента на взрывобезопасность их применения / Ю.Н. Линник, А.Б.

Жабин, В.Ю. Линник, З.Р. Раджабов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 3. – С. 222–233.

70. Линник, Ю.Н. Влияние геометрических параметров и степени затупления горнорезущего инструмента на взрывобезопасность их применения / Ю.Н. Линник, А.Б. Жабин, В.Ю. Линник // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 279–289.

71. Липин А.А. Перспективные пневмоударники для бурения скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №2. – С. 74-78.

72. Липин, А.А. Погружные гидроударники объемного типа / А.А. Липин, В.В. Тимонин // Горный журнал. – 2006. – № 12. – С. 57–58.

73. Лурье А.И. Теория упругости.-М.: Наука, 1970.-340с

74. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1976. – 215 с.

75. Мавлютов, М.Р. Исследование процесса разрушения горных пород при одновременном динамическом вдавливании нескольких штампов / М.Р. Мавлютов, Р.М. Сакаев, Р.Ш. Уразаев // В кн.: Разрушение горных пород при бурении скважин. – 1973. – С. 202–205.

76. Муминов, Р.О. Разработка мероприятий по совершенствованию вращательно-падающего механизма бурового станка / Р.О. Муминов, А.Н. Рузибаев, Н.Н. Жураев, Равшанов Ж.Р., Д.А. Кузиев // Уголь. – 2024. – Т. 1176. – №. 1. – С. 94-99.

77. Нескоромных, В.В. Влияние поверхностно-активных веществ на искривление скважин при бурении в анизотропных горных породах / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, М.С. Попова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 146–158.

78. Нескоромных, В.В. Особенности силового воздействия алмазного резца на породу в процессе бурения скважин / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, А.Ю. Харитонов // Булатовские чтения. – 2021. – Т. 1. – С. 349–353.

79. Нескоромных, В.В., Основы проектирования буровых инструментов с эксцентриситетом вооружения торцевой части для бурения анизотропных горных пород / В.В. Нескоромных, П.Г. Петенёв., Д.С. Иванов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 2 (374). – С. 63–69.

80. Оборудование для бурения погружным пневмоударником [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mining.tcgc.ru/assets/files/DTH_RUS_2008.pdf (дата обращения: 11.03.2025).

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

82. Опарин, В.Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин / В.Н. Опарин, В.В. Тимонин, В.Н. Карпов, Б.Н. Смоляницкий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 81–104.

83. Павлова, Н.Н. Разрушение горных пород при динамическом нагружении / Н.Н. Павлова, Л.А. Шрейнер. – М.: Недра, 1964. – 160 с.

84. Патент № 2077650 РФ, МПК E21B 10/36 (2006.01). Буровая коронка для ударно-поворотного бурения / Буровая коронка для ударно-поворотного бурения : № 94017501/03 : заявл. 12.05.1994 : опубл. 20.04.1997 / Линенко-Мельников Ю.П., Лисовский А.Ф. – 8 с.

85. Патент № 225501 РФ, МПК E21B 10/56 (2006.01). Породоразрушающая твердосплавная вставка : № 2024109420 : заявл. 08.04.2024 : опубл. 23.04.2024 / Жуков И.А., Алиева Л., Боева А.Е. – 6 с.

86. Патент № 2646637 РФ, МПК E21B 10/36 (2006.01), E21B 10/48 (2006.01). Буровая коронка : № 2016145016 : заявл. 16.11.2016 : опубл. 06.03.2018 / Дворников Л.Т., Никитенко С.М., Жуков И.А., Корнеев В.А. – 5 с.

87. Патент № 2655455 С РФ, МПК E21B 10/36 (2006.01), E21B 10/46 (2006.01). Буровая коронка : № 2017130064 : заявл. 24.08.2017 : опубл. 28.05.2018 / Дворников Л.Т., Никитенко С.М., Жуков И.А., Корнеев В.А. – 5 с

88. Патент № 2801724 РФ, МПК E21B 10/48(2023.05). Буровая коронка : № 2023109387 : заявл. 13.04.2023 : опубл. 15.08.2023 / Л. Алиева, И.А. Жуков – 12 с.

89. Пелипенко, Н.А. Интегральный анализ износа буровых инструментов / Н.А. Пелипенко, Р.Р. Бакланов, И.С. Процук // Горный журнал. – 2020. – № 12. – С. 60–64.

90. Погружные пневмударники [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://aokmo.ru/catalog/burovoy_instrument/pnevmodarniki_pogruzhnye/ (дата обращения: 11.03.2025).

91. Подземные буровые станки НКР-100МПА, МВПА, МА, МВА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aokmo.ru/catalog/podzemnoe_oborudovanie/stanki_podzemnye/146-nkr100mpa_mvpa_ma_mvva/ (дата обращения: 11.03.2025).

92. Породоразрушающие буровые инструменты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chinax.com/litechtools/pz6d37456-tungsten-carbide-drill-button-bits-hydraulic-rock-drill-parts.html> (дата обращения: 11.03.2025).

93. Протодяконов, М.М. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: справочное пособие / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е. И. Ильницкая. – М.: Недра, 1981. – 192 с.

94. Прядко, Ю.А. Разработка методики проектирования коронок с цилиндросферическими твердосплавными вставками для штангового бурения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Прядко Юрий Андреевич. – Новокузнецк – Фрунзе, 1988. – 287 с.

95. Реготунов, А.С. О влиянии некоторых факторов на величину показателя энергоемкости разрушения горных пород в процессе шарошечного

бурения взрывных скважин // Проблемы недропользования. – 2020. – №3(26). – С. 41-51.

96. Репин, А.А. Опыт создания в ИГД СО РАН погружных пневмоударников высокого давления для открытых горных работ / А.А. Репин, Б.Н. Смоляницкий, С.А. Алексеев и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 157–168.

97. Репин, А.А. Повышение мощности малогабаритных погружных пневмоударников / А.А. Репин, В.В. Тимонин, С.Е. Алексеев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 86–93.

98. Сериков, Д.Ю. Совершенствование конструкций промывочных узлов бурового инструмента / Д.Ю. Сериков, В.Ю. Близнюков, Ю.Н. Пильник // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2020. – № 2 (326). – С. 27–31.

99. Симисинов, Д.И. Исследование параметров размерных цепей бурового шарошечного инструмента / Д.И. Симисинов, Л.В. Городилов, А.Д. Симисинов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 4. – С. 107-118.

100. Смирнов, В.В. Исследование механизма разрушения пород при ударе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1968. – № 4. – С. 39–46.

101. Смоляницкий, Б.Н. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б.Ф. Симонов, Смоляницкий Б.Н., Репин А.А., Данилов Б.Б. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 204 с.

102. Современная буровая техника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.s-b-t.ru/> (дата обращения: 11.03.2025).

103. Суханов, А.Ф. Буримость горных пород.-М.: Недра, 1972-240с.

104. Сысоев, Н.И. Моделирование процесса внедрения клиньев разной формы в породный массив при осевой и винтовой схемах ударного

нагрузки / Н.И. Сысоев, А.А. Гринько, Д.А. Гринько // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 120-132.

105. Сысоев, Н.И. Переносной перфоратор с винтовым рабочим ходом бурового инструмента / Н.И. Сысоев, А.А. Гринько, Д.А. Гринько // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 3. – С. 301–313.

106. Теплякова, А.В. Компьютерное моделирование динамических процессов в элементах бурильных машин ударного действия / А.В. Теплякова, Л. Алиева, И.А. Жуков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 161–171.

107. Теплякова, А.В. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин / А.В. Теплякова, А.М. Азимов, Л. Алиева, И.А. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 120-132.

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

109. Тимошенко, С.П. Теория упругости: пер. с англ. / Под ред. Г.С. Шапиро, С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – 2-е изд. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

110. Третьяк, А.Я. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 217–222.

111. Ураимов М., Еремьянц В.Э., Квитко С.И. Механизм дискретного поворота инструмента гидравлического перфоратора / М. Ураимов, В.Э. Еремьянц, С.И. Квитко // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 284–289.

112. Ураимов, М. Конструктивные особенности гидравлического перфоратора для бурения шпуров ударно-поворотным способом // *Машиноведение*. – 2020. – № 1 (11). – С. 98–105.

113. Ураимов, М. Результаты предварительных испытаний гидравлического перфоратора для бурения шпуров ударно-поворотным способом / М. Ураимов, А.С. Квитко // *Машиноведение*. – 2023. – № 2 (18). – С. 33–40.

114. Храпуновский инструментальный завод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zavodhiz.ru/burovye-oborudovanie/burovye-oborudovanie-2.html> (дата обращения: 11.03.2025).

115. Шадрина, А.В. Анализ и научное обобщение результатов исследований ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок / А.В. Шадрина, Л.А. Саруев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 8. – С. 120–136.

116. Шапошников, И.-И.Д. Бурение продольным ударом. Влияние коронки // *Отраслевые аспекты технических наук*. – 2011. – №9. – С. 11-16.

117. Шигин, А.О. К вопросу о нагрузках на породоразрушающий инструмент при бурении сложноструктурных горных пород / А.О. Шигин, А.В. Гилёв // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2012. – № 6. – С. 16–29.

118. Шигин, А.О. К вопросу о повышении эффективности разрушения горных пород шарошечными долотами / А.О. Шигин, Д.А. Борейко, Д.Ю. Сериков // *Территория Нефтегаз*. – 2022. – № 3–4. – С. 24–31.

119. Шигин, А.О. Сравнительный анализ эффективности работы шарошечных буровых долот / А.О. Шигин, Д.А. Борейко, Н.Д. Цхадая, Д.Ю. Сериков // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. – 2021. – № S2. – С. 1–7.

120. Шрейнер, Л.А. Твердость хрупких тел. – Изд. АН СССР. 1949. – 144 с

121. Шрейнер, Л.А. Физические основы механики горных пород.-М.:

Гостоптехиздат, 1950.-210с.

122. Штаерман, И.Я. Контактная задача теории упругости.-М.: Госгортехиздат, 1949.-270с

123. Эйгелес, Р.М. Разрушение горных пород при бурении. М.: Недра, 1971.-163с.

124. Aldannawy, H., Rouabhi, A., Gerbaud, L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555-1570.

125. Capik, M., Yilmaz, A.O. Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, vol. 139, pp. 104633.

126. Dvornikov, L.T., Korneyev, V.A., Korneyev, P.A., Nikitenko, S.M. Experimental estimation of drilling energy efficiency and life time of new rotary bits equipped with combined inserts on the basis of superhard composite materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. P. 012025.

127. Liu, S., Chang, H., Li, H., Cheng, G. Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 91, pp. 18–28.

128. Muminov, R. O., Rayhanova, G. E., Kuziev, D. A. Experimental research and analysis of a quarry drilling rig // *Ugol*. 2021, vol. 5, pp. 32–36.

129. Perneder, L., Detournay, E., Downton, G. Bit rock interface laws in directional drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012, vol. 51, pp. 81–90.

130. Song, X., Li Q., Zhao J., Zhang Y., Chen M. Influence of weight-on-bit on percussive drilling performance // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 7, pp. 3491–3505.

131. Su, O., Yarali O., Akcin N.A. Comparison of drilling performance of chisel and button bits on the electro hydraulic driller // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013, vol. 46, pp. 1577–1587.

132. Tian, J., Fu, C., Yang, L., Yang, Z., Pang, X., Li, Y., Liu G. The wear analysis model of drill bit cutting element with torsion vibration // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015, vol. 7, no. 1, p. 254026.

133. Wang, Q., Zhang, Y., Liu, H., Chen, Z., Li, M. Development of a rotary cutting test system and drilling experiment for rock mass // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023, vol. 24, no. 1, p. 24.

134. Wu, D., Yin, K., Gan, X., Zhang, X., Yin, Q. Strength analysis of new kinds of RC drill bit and its experimental study / Wu D., Yin K., Gan X., Zhang X., Yin Q. // *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, vol. 47, no 1, pp. 197-202.

135. Zhukov, I.A., Dvornikov, L.T., Nikitenko, S.M. About creation of machines for rock destruction with formation of apertures of various cross-sections // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – P. 012171. – Presented at: International Conference on Industrial Engineering, Tomsk, Russia, 1–4 December 2015.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Чертежная документация стенда

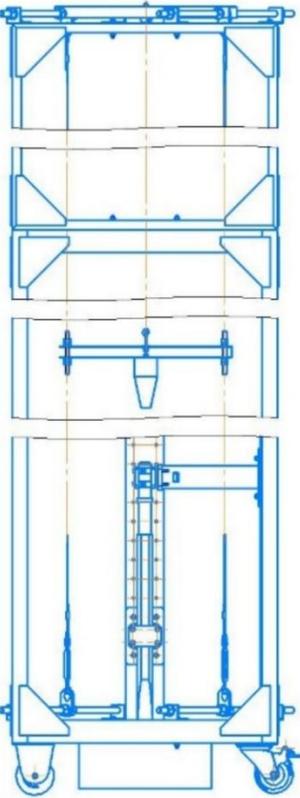
КМУИАС-30/22 "Искра" версия © 2023 ООО "ИСКРА-Системы автоматизации" Ростов. Все права защищены
Имя № листа: Листы и детали | Взам. штаб № | Имя № листа | Листы и детали

Листов: 2

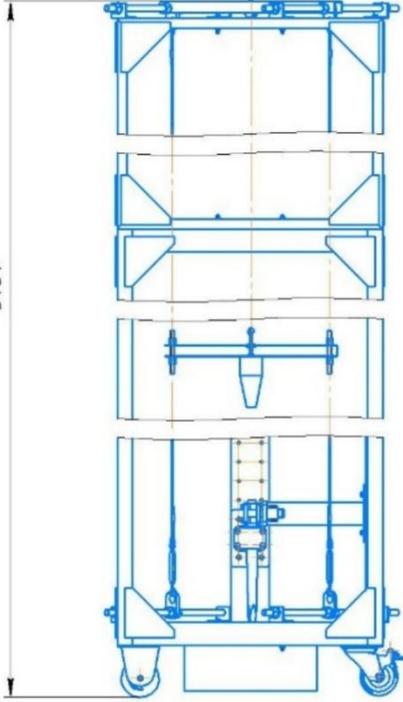
Лист: 1

Имя № листа: 628-23УЭМ.000 СБ

628-23УЭМ.000-01



628-23УЭМ.000



3484

				628-23УЭМ.000 СБ			
Изм./Лист	№ док-т.	Подп.	Дата	<p style="font-size: 14px;">Стенд ударный</p> <p style="font-size: 14px;">Сборочный чертёж</p>	Лист	Масса	Максимум
Разраб.	Алиева Л		08.02.2023		120,12	1:10	
Пров.					Лист 1	Листов 2	
Т.контр.					Горный университет		
Исполн.	Жуков И.А				Копировал _____ Формат А3		

Не для коммерческого использования

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<u>Сборочные единицы</u>						
Справ. №	*)	1	628-23УЭМ.100	Каркас	1	*)2хА3
		2	628-23УЭМ.300	Направляющий узел	1	для ф237*16хА3
			-01	Направляющий узел	1	для ф38
		3		Трос	1	
		4		Талреп	1	
		5		Трос	1	
		6		Трос	1	
		7		Талреп	1	
	8		Трос	1		
<u>Детали</u>						
Инв. № дубл.		11	628-23УЭМ.401-01	Уголок крепежный	8	
		12	628-23УЭМ.402	Шпилька М16	4	
		13	628-23УЭМ.403	Фланец	4	
	А4	14	628-23УЭМ.404	Ползушка	2	
	А4	15	628-23УЭМ.405	Монтажный профиль	1	
		16	628-23УЭМ.406	Монтажный профиль	1	
		17	628-23УЭМ.407	Втулка	4	
		18	628-23УЭМ.408	Шайба М5	2	
		19		Боек	1	
	А3	20		Штанга-3	1	
628-23УЭМ.000						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.	Алиева Л.				Лит.	Лист
Пров.						Листов
						1 2
Н.контр.					Стенд ударный	
Утв.	Жуков И.А.					
Не для коммерческого использования				Копировал	Формат	А4

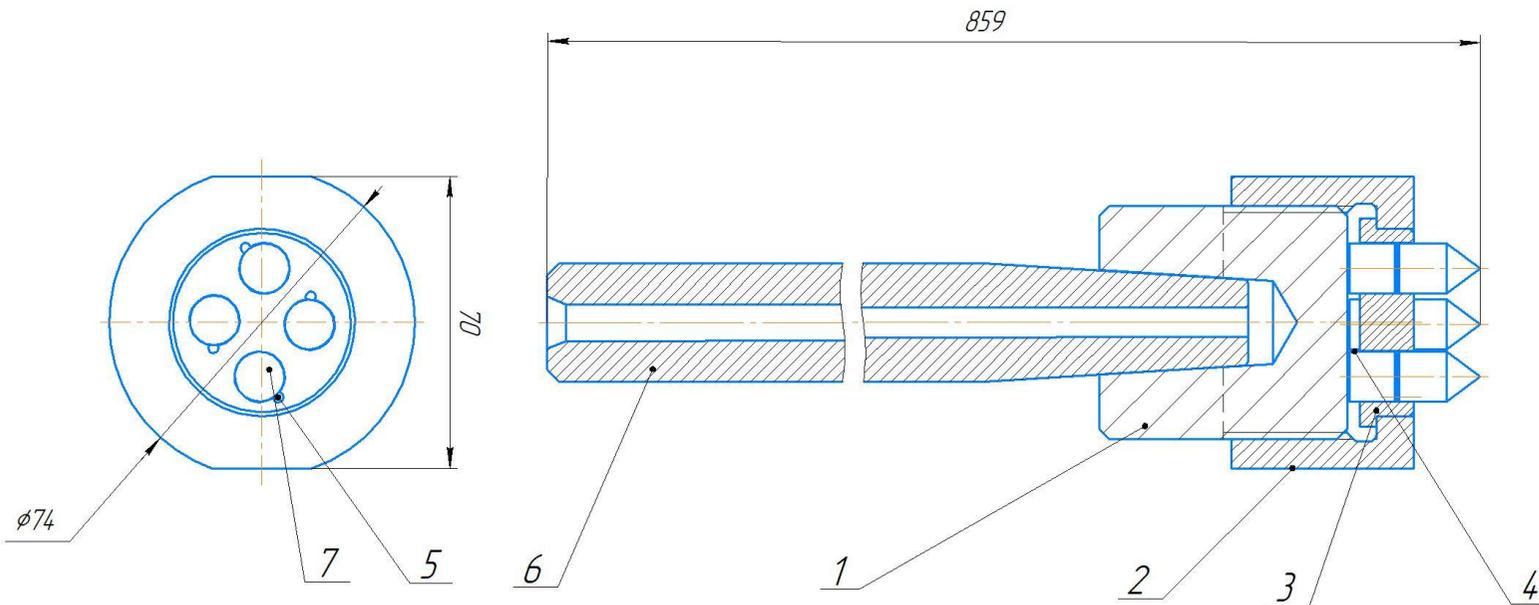
628-23УЭМ.200 СБ

Перв. примен.
628-23УЭМ.200

Справ. №

КОМПАС-3D 12.2 Учебная версия © 2023 ООО "АСКОН-Системы проектирования". Россия. Все права защищены.
Изд. № подл. Подл. и дата
Изд. № инв. № Инв. № дробл. Подл. и дата
Взам. инв. № Инв. № дробл. Подл. и дата

Не для коммерческого использования



1. * - Размеры для справок.
2. Общие допуски ГОСТ 30893.2 - $fk: H12, h12 \pm IT12/2$.
3. В случае избыточного натяга между резиновым стержнем и индентором - рекомендуется механически доработать резиновый стержень до получения нормального натяга.
4. В случае брака с избыточным зазором между стержнем и индентором - рекомендуется использовать подкладки из проволоки, танких полос, клея, бумаги и т.п.

				628-23УЭМ.200 СБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Алиева Л.			08.02.2023		5,1	1:1
Пров.					Лист	Листов	1
Т.контр.					Горный университет		
Н.контр.							
Утв.	Жуков И.А.						

Копировал

Формат А3

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты физического эксперимента

Таблица Б.1 – Результаты эксперимента по разрушению породы цилиндросферическими инденторами

№	d _и , мм	l _и , мм	L _и /d _и , мм	1					2					3					4					Среднее значение V _p , мм ³
				№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	
1	10,4	12,5	1,2	84	0,6	2,6	2,6	2,6	85,0	0,7	2,3	2,2	2,2	86,0	0,6	2,0	2,1	2,0	87,0	0,6	2,3	2,2	2,3	0,6
2	10,4	13,5	1,3	88	0,6	2,7	1,6	2,1	89,0	0,6	1,8	3,3	2,5	90,0	0,5	3,1	1,6	2,3	91,0	0,5	2,6	2,5	2,5	0,6
3	10,4	14,5	1,4	92	0,6	2,9	1,7	2,3	93,0	0,5	3,2	2,9	3,0	94,0	0,4	1,7	2,3	2,0	95,0	0,4	1,6	2,2	1,9	0,5
4	10,4	15,5	1,5	96	0,6	3,1	2,5	2,8	97,0	0,6	2,4	2,7	2,5	98,0	0,6	2,2	1,8	2,0	99,0	0,6	3,5	3,1	3,3	0,6
5	10,4	16,5	1,6	100	0,8	3,2	2,7	2,9	101,0	0,4	2,4	2,1	2,2	102,0	0,4	2,6	2,8	2,7	103,0	0,4	3,2	1,9	2,5	0,5
6	10,4	17,5	1,7	104	0,6	2,8	2,4	2,6	105,0	0,4	2,4	2,0	2,2	106,0	0,5	2,5	2,5	2,5	107,0	0,4	2,2	2,5	2,3	0,5

Таблица Б.2 – Результаты эксперимента по разрушению породы инденторами, выполненными по трактрисе

№	d _и , мм	l _и , мм	L _и /d _и , мм	1					2					3					4					Среднее значение V _p , мм ³
				№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	№ лунки	V _p , мм ³	h _д , мм	h _л , мм	h _{ср} , мм	
1	12,2	15	1,23	56	1,0	2,7	2,9	2,8	57,0	0,7	2,4	2,9	2,6	58,0	0,6	2,4	2,4	2,4	59,0	0,7	2,0	2,1	2,1	0,7
2	12,2	16	1,31	60	0,6	2,5	2,8	2,6	61,0	0,5	3,0	2,6	2,8	62,0	0,6	3,0	2,7	2,9	63,0	0,6	3,0	2,7	2,8	0,6
3	12,2	17	1,39	64	0,5	2,3	1,9	2,1	65,0	0,8	3,5	3,2	3,3	66,0	0,8	3,0	2,3	2,7	67,0	0,9	2,9	2,2	2,5	0,8
4	12,2	18	1,48	68	0,9	2,5	3,0	2,7	69,0	1,2	2,7	2,9	2,8	70,0	0,8	2,3	2,3	2,3	71,0	1,2	3,3	3,2	3,2	1,0
5	12,2	19	1,56	72	0,4	3,0	3,2	3,1	73,0	1,0	3,0	3,1	3,0	74,0	0,5	2,3	2,7	2,5	75,0	0,8	2,4	2,4	2,4	0,7
6	12,2	20	1,64	76	0,9	2,8	2,8	2,8	77,0	0,6	2,6	2,6	2,6	78,0	0,6	2,8	2,9	2,9	79,0	0,7	2,6	2,6	2,6	0,7
7	12,2	21	1,72	80	0,4	2,9	3,1	3,0	81,0	0,4	2,3	2,6	2,4	82,0	0,9	2,5	2,8	2,6	83,0	0,6	2,6	2,5	2,6	0,6

ПРИЛОЖЕНИЕ В
**Патенты на буровую коронку и на породоразрушающую
твердосплавную вставку**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2801724

БУРОВАЯ КОРОНКА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Алиева Лейла (RU), Жуков Иван Алексеевич (RU)*

Заявка № **2023109387**

Приоритет изобретения **13 апреля 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **15 августа 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **13 апреля 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 225501

ПОРОДОРАЗРУШАЮЩАЯ ТВЕРДОСПЛАВНАЯ ВСТАВКА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Жуков Иван Алексеевич (RU), Алиева Лейла (RU), Боева Анастасия Евгеньевна (RU)*

Заявка № 2024109420

Приоритет полезной модели 08 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 23 апреля 2024 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 08 апреля 2034 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г**Акт о промышленном внедрении результатов диссертации****Общество с ограниченной ответственностью
«МЕТАЛЛО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

юридический адрес: 125475, г. Москва, ул. Зеленоградская, стр. 35, корп. 1,
почтовый адрес: 653036, г. Прокопьевск Кемеровской области, ул. Правды, 25, тел./факс (3846) 61-52-71,
ИНН 7743619259, КПП 774301001, ОКПО 98238756, ОКВЭД 29.52., www.krepy.ru, e-mail: mmz@krepy.ru

**УТВЕРЖДАЮ**

Главный инженер ООО «ММЗ»

А.Н. Петрунин

«10» декабря 2024 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы Алиевой Лейлы на тему «Повышение эффективности бурения совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента» по научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Комиссия в составе:

Крестовоздвиженский П.Д. – зам.гл.инженера (Председатель),

Терентьев А.В. – зам.директора по производству,

Здырко А.Е. – нач.конструкторско-технологического отдела,

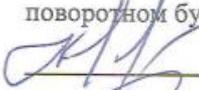
составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение эффективности бурения совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности ООО «ММЗ» при реализации работ в рамках проектов по разработке и совершенствованию породоразрушающего инструмента для машин, применяемых при ударно-поворотном бурении горных пород, в том числе:

- результаты экспериментальных исследований по оценке влияния расстояния между соседними инденторами бурового инструмента на показатели разрушения горной породы высокой крепости – объем разрушения и глубина внедрения инструмента;
- методика расчета скорости движения коронки в породе в зависимости от свойств породы, параметров ударного импульса и геометрической формы рабочих элементов коронки;
- рекомендации по выбору геометрических параметров инденторов, рабочей поверхности бурового инструмента и схемы армирования инденторами в зависимости от размеров скважины или шпура.

Материалы и результаты использованы:

1. При формировании и актуализации рекомендаций по рациональному выбору конструкций, схем и способов армирования инденторами породоразрушающего инструмента.
2. При разработке новых и совершенствовании применяемых конструкций бурового инструмента штыревого типа для машин, применяемых при ударно-поворотном бурении горных пород.

Использование указанных материалов позволяет снизить энергоемкость при ударно-поворотном бурении горной породы высокой крепости на 15-20%.


 П.Д. Крестовоздвиженский


 А.В. Терентьев


 А.Е. Здырко