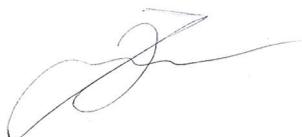


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет имени императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Гасымов Эмиль Эльчин оглы



ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОГРУЖНОГО
ПНЕВМОУДАРНИКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКА ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ

Научная специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Юнгмейстер Д.А.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Современное состояние и перспективы развития бурения в карьерах и открытых разработках в Российской Федерации и Азербайджанской республики.....	10
1.2 Основные факторы, влияющие на бурение горных пород вращательным способом с использованием шарошечного долота	13
1.3 Научные основы и современные тенденции развития буровых станков для открытых горных работ	16
1.4 Анализ процесса бурения горных пород с использованием ударно-вращательного метода.....	20
1.5 Анализ конструкции бурового станка СБШ.....	24
1.6 Анализ шарошечных долот	26
1.7 Анализ конструкции погружных пневмоударников	32
1.8 Анализ влияния ударного импульса на бурения горных пород.....	38
1.9 Цель и задачи исследований.....	44
ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ	46
2.1 Совершенствование конструкций карьерных буровых станков на основе морфологического анализа.....	46
2.2 Определение методов повышения эффективности работы ППУ	60
2.3 Определение конструктивных параметров, обеспечивающих эффективную работу ППУ	66
2.5 Методика расчета СБШ и погружного пневмоударника с учетом основных расчетных параметров	72
2.6 Вывод по главе 2.....	75

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ППУ.....	77
3.1 Методика проведения исследований на степень открытия задвижки.....	78
3.2 Экспериментальное исследование характеристик трехмассовой ударной системы для ППУ	82
3.3 Моделирование поведения конструкции шарошечного долота при динамическом и статическом воздействии методом конечных элементов	88
3.4 Выводы по Главе 3.....	95
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ РАБОТЫ ППУ В УСЛОВИЯХ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ	96
4.1 Конструкция модернизированного станка с ППУ	96
4.2 Варианты исполнения ППУ с трехмассовой системой и рекомендации по их применению	102
4.3 Укрупнённая методика расчёта параметров ППУ	104
4.4 Пример расчёт силы удара ППУ	106
4.5 Особенности эксплуатации СБШ с ППУ.....	108
4.6 Выводы по Главе 4.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В рамках современных тенденций развития буровзрывных работ в горнодобывающей промышленности выделяется необходимость повышения эффективности бурения взрывных скважин, особенно в условиях работы с крепкими породами сложной структуры. В Российской Федерации к числу наиболее распространённых буровых станков относится СБШ 250. Одной из ключевых задач при использовании данных станков является увеличение скорости бурения при одновременном сохранении долговечности оборудования буровых установок, в частности шарошечного долота. Перспективным вариантом решения этой важной задачи является использование в СБШ погружных пневмоударников (ППУ).

Ведущую роль в разработке ППУ сыграли зарубежные компании «Sandvik», «Atlas Copco». В модели RH560 компании «Sandvik» за счет улучшения воздушного цикла и усовершенствования конструкции поршня увеличивается ударная мощность. Проведенные испытания этой модели в разнообразных горно-геологических условиях выявили увеличение скорости проходки на 15% и более. Компания «Atlas Copco» разработала различные модели ППУ COP M6, M7 и M8, в которых возможно использовать режимы работы Low Flow и High Flow, что обеспечивает их адаптацию к разным воздушным давлениям. Эти ППУ увеличивают скорость бурения на 20-30%, долговечность бурового инструмента не уменьшается. К сожалению, известные конструкции ППУ не позволяют изменять параметры ударника в процессе работы.

Правильно подобранные параметры потока и давления воздуха в ППУ играют важную роль в увеличении эффективности буровых операций. Повышение эффективности бурения можно достичь за счет точной настройки параметров буровых операций.

Эти параметры напрямую связаны с условиями работы на месторождении, характеристиками породы, скоростью вращения, осевым давлением на долото и характеристиками бурового оборудования.

Известны запатентованные конструкции ударников, в которых для формирования сложного ударного импульса используется боек, расположенный между поршнем и буровым инструментом, что должно способствовать повышению интенсификации бурения, росту производительности бурения, однако требуется экспериментальная проверка работоспособности системы «поршень-бойк-шарошка» и ее влияние на стойкость долота.

Таким образом, вопросы определения диапазона регулировки силы удара с использованием промежуточного элемента «бойка» для повышения скорости бурения в условиях твердых пород, а также пород со сложной структурой, состоящей из чередующихся твердых и мягких слоев и повышения эффективности станков шарошечного бурения с применением ППУ являются актуальными.

Степень научной разработанности исследования

Исследованием буровых машин и их элементов занимался ряд ученых в России, так и за рубежом. Большой вклад внесли ведущие ученые: Александров Е.В., Алимов О.Д., Габов В.В., Гилев А.В., Дворников Л.Т., Жуков И.А., Подэрни Р.Ю., Шигин А.О., Симисинов Д.И., Сысоев Н.И. и др.

Идеи и разработки, представленные в их исследованиях, имеют широкую практическую и теоретическую значимость для использования в ударно-вращательном бурении. Однако процесс влияния осевой нагрузки, крутящего момента, управления силой удара, предупредительной скорости бойка, энергии, амплитуды и длительности ударного импульса на породоразрушающий инструмент, такой как шарошка, остаётся малоизученным.

Также необходимо изучить взаимосвязь механической скорости бурения с использованием ППУ. Требуется дальнейшее развитие исследований методов регулирования силы удара, в частности, через использование управляемой задвижки в ударной системе с промежуточным элементом (бойком) между поршнем-ударником и буровым инструментом.

Это необходимо для обоснования повышения скорости бурения, а также для улучшения контроля процесса бурения, которое требует проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует: п. 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»; п. 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» областям исследований паспорта научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Целью работы является повышение механической скорости бурения шарошечными станками с погружными пневмоударниками массивов со сложно структурированными породами и определение диапазона регулирования силы удара за счет изменения потока воздуха.

Идея работы: заключается в регулировании параметров ППУ с использованием ударной системы «поршень – боек – инструмент» управляемой заслонкой, которая контролирует поток воздуха в стволе бурового станка шарошечного бурения.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы, определить направления и способы совершенствования погружных пневмоударников для станков шарошечного бурения.
2. Провести экспериментальные исследования трехмассовой ударной системы при использовании совместного влияния осевой нагрузки, частоты вращения долота и дополнительной ударной нагрузки, на механическую скорость бурения скважины станком СБШ с использованием механизма «поршень-бойк-инструмент».
3. Провести экспериментальные исследования по изменению сечения задвижки ППУ для прохода потока воздуха и регулирования рабочего давления.

4. Разработать рекомендации и алгоритм управления режимом работы управляемой задвижки в ППУ для станков СБШ.

Объект исследования – процесс бурения взрывных скважин.

Предмет исследования – погружной пневмоударник бурового станка с регулируемым потоком воздуха через него.

Научная новизна диссертации заключается в установлении зависимости механической скорости бурения станка СБШ с ППУ от его параметров, регулируемой с помощью задвижки, для повышения скорости бурения; в установлении зависимости параметров процесса бурения и напряжения бурового инструмента от дополнительной ударной нагрузки с использованием ударного механизма «поршень-боек-инструмент».

Положения, выносимые на защиту:

1. Поток в буровом ставе разделяется в задвижке с регулируемым сечением прохода воздуха в ППУ с изменением рабочего давления 0,0-0,7 МПа за счет увеличения потерь в задвижке, тем самым снижает силу удара поршня-ударника до величины менее 0,3 $P_{ос}$, что для СБШ-250 составляет 120-130 кН и сохраняет ресурс шарошки в допустимом диапазоне.

2. Создание растянутого во времени составного ударного импульса, воздействующего на шарошку, позволяет увеличить скорость бурения для станков СБШ с ППУ не менее чем на 30% за счет применения трехмассовой ударной системы «поршень-боек-инструмент», у которой боек имеет массу не более 0,02 от массы поршня.

Методология и методы исследований

Работа проводилась с использованием метода научного обобщения и анализа литературных источников и патентных материалов, включала теоретические и экспериментальные исследования влияния основных режимных параметров на механическую скорость бурения, а также компьютерную обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих выявить направления совершенствования методики расчета рабочих характеристик погружных пневмоударников в различных горных условиях.

Степень достоверности и обоснованность научных положений и рекомендаций обеспечивается комплексным анализом, строгой методологией исследования, соответствием теоретических выводов с экспериментальными результатами, а также применением проверенных методов математической обработки и статистической проверки.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана методика расчета основных параметров ППУ с регулируемым потоком воздуха; а также определении параметров ударного импульса при использовании в ППУ трехмассовой ударной системы «поршень-боек-инструмент» для уменьшения вероятности снижения стойкости бурового долота (шарошки).

2. Разработана конструкция СБШ с ППУ, в которой параметры ППУ изменяются регулированием потока воздуха в ставе бурового станка, конструкция защищена патентом на изобретение «Система для разрушения горных пород» (Патент РФ № 2770472).

3. Разработанная методика расчета рабочих характеристик погружных пневмоударников в различных горных условиях использована в деятельности ООО «ИЗ-КАРТЭКС» для повышения производительности и снижения затрат в буровой промышленности (акт внедрения от 20.03.2024 г., Приложение Б).

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на семинарах и конференциях: IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2021); XX Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В. Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2022).

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах (пункты списка литературы № 16, 85, 89, 91, 92, 93, 94, 105), 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, в 2 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (Приложения А).

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследований, разработке программы и методики лабораторных исследований, разработке экспериментального стенда, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций по результатам работы. Разработана методика расчета рабочих характеристик погружных пневмоударников в различных горных условиях для повышения производительности и снижения затрат в буровой промышленности. Исследования закономерности влияния регулирования потока воздуха на процесс бурения.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, содержит 129 страниц машинописного текста, содержит 43 рисунка, 12 таблиц список литературы из 109 наименований и приложения на 2 страницах.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Современное состояние и перспективы развития бурения в карьерах и открытых разработках в Российской Федерации и Азербайджанской республики

Буровзрывные работы (БВР) на карьерах являются важным этапом в горнодобывающей промышленности, который позволяет эффективно и безопасно добывать полезные ископаемые [17]. Эти работы включают в себя бурение скважин и проведение взрывов для разрушения горных пород.

БВР играют важную роль в горнодобывающей промышленности Азербайджана и в Российской Федерации, обеспечивая эффективное извлечение полезных ископаемых из недр земли [98,4]. Этот процесс включает бурение скважин для закладки взрывчатых веществ и последующее проведение взрывных работ, направленных на дробление горных пород [3].

В Азербайджане бурение в карьерах и открытых разработках является важной частью горнодобывающей промышленности, которые добывают различные полезные ископаемые, такие как известняк, мрамор, песок, и другие материалы, используемые в строительстве и промышленности, (рисунок 1.1) [107].

Основным методом является роторное бурение, в процессе бурения роторное буровое долото вращаясь, разрушает горную породу. При пневматическом бурении установками компаний производителей «Atlas Copco» и «Sandvik», используют компрессоры марки «Sullair» и «Kaeser» [97].

Одним из крупных заводов республики Азербайджан, который применяет метод роторного бурения при добыче полезных ископаемых, является цементный завод «Garadagh Cement Plant» компании «Holcim Azerbaijan» [98]. Именно буровой станок СБШ-250 является одним из наиболее востребованных типов оборудования для буровзрывочных работ в горнодобывающей промышленности Российской Федерации и странах СНГ. При помощи СБШ-250 бурят взрывные скважины в карьерах и на открытых разработках, обеспечивая эффективное дробление горных пород (рисунок 1.2) [30].



Рисунок 1.1 - Буровзрывные работы в Азербайджане в карьере Гедабек

Скорость бурения скважин на карьерах зависит от множества факторов, таких как крепость породы, диаметр шарошки и осевое усилие [2,3].

Факторы влияющие на скорость бурения: крепость породы(оказывает значительное влияние на скорость бурения); мягкие породы (известняк, глина) требуют меньшее усилие и менее мощное оборудование; средне-крепкие породы (песчаник, гранит) снижают скорость бурения по сравнению с мягкими породами, так как порода оказывает большее сопротивление и требуется более мощное оборудование и повышенное усилие; твердые породы (базальт, кварцит) требуют применения специализированных буровых инструментов и методов, а также более мощное оборудование и усилие, при этом скорость бурения значительно ниже из-за высокой крепости породы [104].



Рисунок 1.2 - Буровзрывочные работы в РФ (Быстринский ГОК)

Также следует учитывать, что диаметр шарошки (бурового инструмента) влияет на скорость бурения следующим образом: малый диаметр шарошки обеспечивает более высокую скорость бурения, так как меньшая площадь контакта с породой уменьшает сопротивление [11]. Малый диаметр подходит для бурения мелких и средних скважин в мягких и средне-крепких породах.

Большой диаметр шарошки снижает скорость бурения из-за увеличенной площади контакта и повышенного сопротивления породы и требует применения более мощного оборудования и осевого усилия, особенно в твердых породах [1]. Большой диаметр шарошки позволяет бурить крупные скважины, что может быть необходимо для определенных задач [4].

Также следует отметить, что ключевым фактором, влияющим на скорость бурения, является осевое усилие (сила, приложенная вдоль оси бурового инструмента) [44]. Малое осевое усилие, применяется при бурении мягких пород для предотвращения износа бурового инструмента, при этом скорость бурения выше в мягких породах, но недостаточно для эффективного бурения твердых пород [38]. Среднее осевое усилие, обеспечивает сбалансированную скорость бурения в средне-крепких породах, при этом минимизирует износ бурового инструмента и обеспечивает достаточную скорость бурения [16].

Большое осевое усилие, применяется при бурении твердых пород, где необходимо преодолеть высокое сопротивление породы, при этом увеличивается скорость бурения [17], но повышается износ бурового инструмента, что требует более мощного оборудования. Следует отметить, что при большом осевом усилии в бурении может произойти поломка оборудования или нештатная ситуация.

Скорость бурения скважин определяется сочетанием крепости породы, диаметра шарошки и осевого усилия и при этих факторах, для достижения оптимальной скорости бурения необходимо правильно подобрать параметры в зависимости от условий месторождения и характеристик породы [23]. Нахождение баланса между параметрами скорости бурения и износом оборудования, а также безопасностью проведения работ, является ключевым фактором успеха буровзрывных работ на карьерах.

При анализе литературы были выявлены такие актуализированные аспекты БВР для Республики Азербайджан и Российской Федерации, как [107,39]:

1. Повышение эксплуатационных характеристик буровых станков, а также эффективность и безопасность бурения.

2. Регулирование осевого усилия через контроль и настройку, что уменьшит износ бурового инструмента и увеличить скорость бурения, что в свою очередь снизит затраты на техническое обслуживание и замену оборудования.

Эти аспекты помогут улучшить производительность и экономическую эффективность БВР, способствуя развитию горнодобывающей промышленности в Азербайджане и России. Поэтому следует считать, что разработка и внедрение технологий, направленных на увеличение скорости БВР, является ключевым направлением в горнодобывающей промышленности как Российской Федерации, так и Азербайджана.

1.2 Основные факторы, влияющие на бурение горных пород вращательным способом с использованием шарошечного долота

Вращательное бурение с использованием шарошечного долота является одной из наиболее распространенных и эффективных технологий для проходки скважин в твердых горных породах. В России одним из ключевых представителей оборудования для бурения является станок СБШ (станок буровой шарошечный), который используется для бурения взрывных скважин в карьерах и рудниках [37]. В данной главе рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность бурения, такие как скорость бурения, диаметр шарошечного долота, крепость породы и осевое усилие [19].

Скорость бурения является важным показателем эффективности процесса и зависит от ряда факторов. По данным исследования Д. Джонса и коллег [50], скорость бурения напрямую связана с мощностью буровой установки и характеристиками используемого долота. Оптимизация параметров бурения, таких как скорость вращения и подача бурового раствора, позволяет значительно повысить производительность [18,50]. Аналогично, Д. М. Уилсон отмечает, что

выбор подходящего типа долота и корректировка режимов работы могут существенно ускорить процесс бурения [53].

Иванов К. И. и соавторы утверждают, что правильная настройка режимов бурения позволяет значительно повысить скорость проходки [26]. Подэрни Р.Ю. также отмечает, что скорость бурения можно увеличить за счет использования долот с улучшенной конструкцией резцов или зубьев и оптимизации режимов бурения, таких как скорость вращения и осевое усилие [60].

Диаметр шарошечного долота оказывает значительное влияние на параметры бурения. Как указывают Смит Л. М., Голдман В. Э., увеличение диаметра долота требует большей мощности буровой установки и увеличивает износ инструмента [66]. Исследования показывают, что правильный выбор диаметра долота должен учитывать баланс между необходимой производительностью и экономической эффективностью буровых работ [51].

Смирнов А. А., отмечает, что выбор диаметра долота должен учитывать специфику горных пород и требуемую ширину скважины [66]. Подэрни Р.Ю. подчеркивает, что оптимальный диаметр долота должен обеспечивать баланс между скоростью бурения и устойчивостью к износу [56].

Увеличение диаметра долота приводит к увеличению площади контакта с породой, что снижает концентрацию нагрузки на каждый резец, уменьшая износ, но требует большей мощности буровой установки. Оптимизация диаметра долота важна для поддержания высокой скорости бурения при минимальных затратах на инструмент [12,15].

Крепость породы является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность бурения. В работе Р. Мартинеса подчеркивается, что более крепкие породы требуют применения долот с повышенной износостойкостью, а также увеличения осевого усилия и мощности буровой установки [52,70]. Для бурения особо твердых пород рекомендуется использование долот с алмазными или твердосплавными вставками, что позволяет достичь более высокой производительности и долговечности инструмента [20]. Исследования Кузнецова,

Д. А. и коллег показывают, что более крепкие породы требуют использования долот с повышенной износостойкостью и увеличения осевого усилия [48].

Осевое усилие, или нагрузка на долото, является критически важным параметром, влияющим на скорость бурения и износ инструмента. По данным исследований С. Дэвиса, правильное осевое усилие позволяет эффективно разрушать породу и минимизировать время бурения [51,63]. В то же время, чрезмерное усилие может привести к преждевременному износу или поломке долота. Рекомендации по оптимизации осевого усилия включают использование датчиков нагрузки и системы автоматического регулирования [7].

А.В. Гилев подчеркивает, что правильное осевое усилие позволяет эффективно разрушать породу и минимизировать время бурения [18]. Для оптимального распределения осевого усилия необходимо использовать системы автоматического регулирования, которые обеспечивают стабильное давление на долото и предотвращают его перегрузку [30].

Правильное осевое усилие распределяет нагрузку равномерно, предотвращая чрезмерное изнашивание отдельных резцов и улучшая общую производительность бурения. Регулируемое осевое усилие помогает поддерживать стабильную скорость бурения даже в условиях меняющейся крепости породы [22].

Бурение горных пород вращательным способом с использованием шарошечного долота является сложным и многогранным процессом, зависящим от множества факторов. Скорость бурения, диаметр долота, крепость породы и осевое усилие играют ключевые роли в определении эффективности бурения [26]. Грамотное управление этими параметрами позволяет не только повысить производительность буровых работ, но и снизить затраты на эксплуатацию бурового оборудования и инструментов. Важно продолжать исследования в данной области для разработки новых технологий и методов, способствующих повышению эффективности бурения, особенно за счет использования погружных пневмоударников.

1.3 Научные основы и современные тенденции развития буровых станков для открытых горных работ

Основополагающие параметры новых буровых станков для применения в открытых горных работах были научно обоснованы и определены в лаборатории разработки полезных ископаемых ИГД АН СССР (в дальнейшем - ИГД имени А. А. Скочинского) Н.В. Мельниковым и Б. А. Симкиным в 1956 году [60].

Эти исследования первыми установили взаимосвязь между проектированием вращательных буровых станков и ключевыми технологическими параметрами, такими как вместимость ковша экскаватора и высота забоя, оказывающими значительное влияние на процесс буровзрывных работ [29]. Анализ показал, что для открытой добычи наиболее перспективен шарошечный метод бурения скважин. В рамках исследований был предложен стандартизированный ряд отечественных вращательных буровых станков с шарошечными долотами [30,32].

Этот ряд основывается на десятом ряде предпочтительных чисел (R 10) и включает станки с условными диаметрами бурения 100, 125, 200, 250, 320 и 400 мм. При этом возможно использование и других диаметров, например, 160, 214, 229, 270 мм [60].

В своих работах академик АН СССР - Н.В. Мельников пишет о высокой эффективности трех типов буровых станков диаметрами до 214, 250 и 320 мм предназначенные для выполнения бурения взрывных скважин вне зависимости горно-геологических и горнотехнических условий [61]. В 1958 году, на основе методики, разработанной в ИГД АН СССР, Гипроуглеавтоматизация спроектировала вращательный буровой станок БСШ-1. Конструкторским коллективом руководил инженер Ю.А. Нанкин, который позже продолжил свою работу в ИГД имени А. А. Скочинского. С 1962 года началось серийное производство модернизированного варианта БСШ-1М, первые образцы которого успешно испытались на Гайском ГОКе в 1962 году. На основе опыта эксплуатации была разработана новая модификация [64] БСШ-2М (2СБШ-200), ставшая популярной на карьерах в 60-70-е годы [60].

К началу 80-х годов СССР стал мировым лидером по производству шарошечных буровых станков, выпуская более 400 машин в год. Станки отличались простотой конструкции, дешевизной, хорошей ремонтпригодностью и адаптированностью к местным условиям, что позволило им удерживаться на рынке до сих пор. В 1997 году на Ижорском заводе имени П.Г. Коробкова начался выпуск нового бурового станка СБШ-270 ИЗ с ходовой частью тяжелого типа от серийного экскаватора, тем самым увеличилась масса до 160 т, а надежность вибрации при работе снизилась [65]. Станок успешно прошел испытания на Лебединском ГОКе и продолжил совершенствоваться, рассматривая для модернизации под условия угольных разрезов с возможностью увеличения диаметра бурения до 320 мм и длины штанг до 18 м [60,64].

Зарубежные компании также активно развивают и совершенствуют буровую технику, предлагая широкий спектр моделей станков для вращательного бурения, отвечающих современным требованиям горнодобывающей промышленности. Основные мировые производители, такие как Atlas Copco, Caterpillar, Global P&H (Harnischfeger), и Sandvik Mining and Construction, занимают лидирующие позиции на рынке [9].

Atlas Copco (с 2002 года, правопреемник и владелец бренда Ingersoll-Rand) выпускает 12 моделей самоходных полностью гидрофицированных станков для вращательного бурения. Эти станки имеют массу от 28 до 169 тонн и отличаются высокой степенью автоматизации и возможностями регулировки работы [11,60].

Caterpillar (с 2011 года, правопреемник и владелец бренда Bucyrus) предлагает электрифицированные станки сверхтяжелого класса и полностью гидрофицированные станки среднего и тяжелого типоразмеров, разработанные на базе технологий компании [11].

Reedrill. Global P&H (Harnischfeger) выпускает электрические и дизель-гидравлические станки среднего и тяжелого типоразмера, подчеркивающие надежность и удобство в эксплуатации благодаря инновационным технологическим решениям [100].

Sandvik Mining and Construction (бывший Driltech) производит 14 моделей самоходных полностью гидрофицированных станков вращательного бурения с диаметрами от 127 до 381 мм и массой от 33,57 до 145,1 тонны [55]. Эти станки идеально подходят для работы в различных горнотехнических условиях благодаря их мощности и универсальности [59].

HAUSHERR System Bohrtechnik выпускает гидравлические буровые станки серии НВМ, которые отличаются малой массой (до 40 тонн) и оснащены стандартным опорно-поворотным устройством (ОПУ), что улучшает их функциональность [12,74].

Эти станки отличаются применением гидрофикации основных приводов, что обеспечивает меньшую массу по сравнению с моделями, использующими тяжелые электрические приводы постоянного тока, а также улучшенными возможностями регулирования и управления. Зарубежные производители также предлагают широкий диапазон диаметров бурения, длины и диаметра штанг, возможной глубины бурения и мощности используемых дизелей или трансформаторов и компрессоров [99]. Особенности конструкции зарубежных станков часто включают мачты ферменной конструкции из высококачественного металлопроката коробчатого сечения с открытой передней панелью, а также использование гидромоторов и гидроцилиндров для приводов вращения и подачи [98]. Это обеспечивает высокую степень механизации и автоматизации работы, упрощает обслуживание и повышает надежность оборудования [97].

Из обсуждения современного состояния и развития буровой техники можно выделить несколько ключевых выводов [37]. Научные разработки, проведенные в СССР, заложили основу для стандартизации и оптимизации процессов бурения, оказав значительное влияние на производительность и эффективность буровых станков [61]. Внедрение шарошечных методов и типоразмерных рядов станков значительно улучшило технологические процессы в открытой добыче. Серийное производство и последующая модернизация буровых станков в СССР и России позволили адаптировать оборудование к местным условиям и расширить его

функциональность, что поддерживало высокий уровень эксплуатации и ремонтпригодность.

Ведущие мировые производители буровой техники, такие как Atlas Copco, Caterpillar и Sandvik, продолжают разрабатывать и внедрять инновационные решения, такие как полная гидрофикация приводов и автоматизация управления. Эти разработки делают станки более эффективными, мобильными и адаптивными к различным условиям эксплуатации [87]. Улучшение техники и технологий бурения направлено не только на увеличение производственной эффективности, но и на снижение экологического воздействия и затрат на эксплуатацию, что отражает глобальные тренды по устойчивому развитию и эффективному использованию ресурсов [101].

Бурение взрывных скважин как в России, так и на мировом уровне продолжает развиваться благодаря технологическим инновациям, стандартизации оборудования и улучшению его эксплуатационных характеристик, обеспечивая высокую конкурентоспособность и эффективность в горнодобывающей отрасли [108, 57].

Можно сказать научные исследования, проведенные в ИГД имени А. А. Скочинского, заложили основу для стандартизации и оптимизации процессов бурения, что значительно улучшило производительность и эффективность буровых станков. Особое внимание уделялось взаимосвязи проектирования вращательных буровых станков и ключевых технологических параметров, таких как вместимость ковша экскаватора и высота забоя [42]. Эти параметры оказали значительное влияние на процесс буровзрывных работ [32] и привели к разработке стандартизированного ряда отечественных буровых станков с шарошечными долотами.

Совершенствование погружного пневмоударника является важным шагом в повышении эксплуатационных характеристик станков шарошечного бурения [45]. Это позволяет улучшить технологические процессы, делая их более эффективными и адаптивными к различным условиям эксплуатации. Улучшение

таких параметров, как энергия удара и скорость поршня, способствует увеличению производительности буровых станков [100].

Модернизация буровых станков, начиная с первых моделей и до современных, показывает значительные достижения в адаптации оборудования к местным условиям и расширении его функциональности [2]. Эти усовершенствования обеспечивают высокую производительность, надежность и ремонтпригодность, что поддерживает конкурентоспособность станков на долгосрочной основе.

Мировые лидеры в производстве буровой техники, такие как Atlas Copco, Caterpillar и Sandvik, продолжают внедрять инновационные решения, улучшая гидрофикацию приводов и автоматизацию управления буровыми станками [59,43]. Эти разработки делают оборудование более эффективным и надежным, снижая эксплуатационные затраты и экологическое воздействие. Совершенствование погружного пневмоударника для повышения эксплуатационных характеристик станков шарошечного бурения отражает важность непрерывного развития и внедрения инноваций в горнодобывающей отрасли, ППУ в случаи создании регулируемой давления в нем позволит существенно улучшить качество введения БВР.

1.4 Анализ процесса бурения горных пород с использованием ударно-вращательного метода

Российская Федерация выделяется как одна из главных горнодобывающих держав мира, обладая 16% мировых запасов минерально-сырьевых ресурсов. На её территории зарегистрировано свыше 20 000 месторождений твёрдых полезных ископаемых, однако только треть из них вовлечена в промышленное использование [60]. Среди к крупным месторождениям значатся: Курская магнитная аномалия, Кузнецкий угольный бассейн и железорудные месторождения Алтае-Саянской области, Норильский рудный узел, и другие участки в развивающихся регионах Сибири и Дальнего Востока вдоль Байкало-Амурской магистрали [38].

Текущая промышленная эксплуатация этих объектов составляет примерно 20%. В контексте разработки твёрдых полезных ископаемых значительную часть производственных операций занимает проходка взрывных скважин, объём которых на отдельных предприятиях может достигать десятков и сотен тысяч погонных метров ежегодно [75].

Широко применяется использование ударно-вращательного метода бурения с применением погружных ударных машин в условиях горных пород высокой прочности, а также на рудниках и карьерах [38].

Этот метод обеспечивает эффективность процесса бурения благодаря комбинации ударных и осевых нагрузок с вращением бурового инструмента, значительно повышая производительность работ [59-62].

Ударно-вращательное бурение способно значительно повысить производительность и эффективность бурения по сравнению с обычным вращательным бурением. Этот метод сочетает использование ударных нагрузок с осевой нагрузкой и скоростью вращения бурового инструмента, создавая эффективную систему, которая повышает производительность. В настоящее время наиболее продуктивным способом бурения пород высокой твердости является использование пневмоударных машин и ударно-вращательного метода [54-56].

Ударно-вращательный метод бурения находит применение для скважин с различным функциональным назначением, особенно эффективен при максимальных глубинах до 300 метров. Эффективность метода на больших глубинах ограничивается из-за технических ограничений существующих компрессоров высокого давления, которые не способны адекватно удалять шлам из забоя [57,58]. Несмотря на указанные ограничения, ударно-вращательный метод обеспечивает высокую эффективность при работе с труднопробиваемыми горными породами, благодаря своим технологическим характеристикам.

Оценка максимально возможной глубины бурения ППУ зависит от фактических геологических и гидрогеологических условий, таких как вид пород и их сопротивление бурению, а также от используемого оборудования. Кроме того, для обводненных скважин необходимо также учитывать гидростатическое

давление, в то время как для скважин без водяных отверстий необходимо учитывать общее сопротивление потоку очищающего агента. Таким образом, для обеспечения бурения горных скважин необходимо учитывать все факторы, влияющие на бурение [63,74].

Технология пневмоударного бурения с использованием погружных пневмоударников, имеющая длительный период применения в промышленности, отличается особенностями работы с горными породами в условиях ударно-вращательного бурения [67]. Эффективность данного метода обусловлена соответствующей конструкцией породоразрушающего инструмента и учетом ряда технологических параметров, таких как энергетические характеристики пневматических ударных машин, свойства очистного агента, геолого-технические условия месторождения, а также других факторов, влияющих на процесс бурения [64-66]. Этот метод позволяет достигать высокой точности и эффективности при бурении горных пород, делая его надежным и экономически выгодным решением [68].

Основные технологические факторы, оказывающие влияние на ударно-вращательное бурение, включают [5,16,21]:

1. Поддержание высокой энергии ударов пневмоударника, что критично для эффективного разрушения горных пород. Инструменты, такие как штыревые долота с притупленной или сферической формой резцов, требуют оптимизации удельной энергии ударов для минимизации затрат энергии при разрушении пород различной буримости.

2. Методы поддержания высокой энергии ударов включают использование компрессоров высокого давления, оптимизацию геометрических параметров системы для снижения противодействия на выхлопе пневмоударника и применение газожидкостных смесей.

3. Регулировка скорости вращения бурового снаряда, зависящая от энергии и частоты ударов пневмоударника, физико-механических свойств пород и конструктивных характеристик инструмента. Оптимальная частота вращения определяется с учетом конкретных условий бурения.

4. Регулирование осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент, что способствует эффективному прижиму резцов к породе и увеличивает эффективность разрушения при ударе, а также предотвращает отскок инструмента.

Контроль расхода очистного агента, который является ключевым параметром, влияющим на энергетические характеристики пневмоударного бурения. Необходимо минимизировать любые факторы, снижающие расход очистного агента, и обеспечивать оптимальный перепад давления при использовании газожидкостных смесей, учитывая повышенное аэрогидравлическое сопротивление и влияние на объемный расход энергоносителя [76,77].

Развитие техники и технологий пневмоударного бурения включает использование различных типов ударных машин в зависимости от используемого очистного агента (воздух), что позволяет адаптировать метод к специфическим условиям эксплуатации и геологии. Разнообразие и многофункциональность ударно-вращательного оборудования, представленного как отечественными, так и зарубежными производителями, способствует расширению областей его применения, включая сооружение скважин различного назначения, от геологоразведочных работ до разведки коренных месторождений и бурения в многолетнемерзлых породах [79,81].

Российская Федерация является одной из ведущих горнодобывающих держав мира, обладая значительными запасами минеральных ресурсов. Для эффективной разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых широко применяется ударно-вращательный метод бурения с использованием погружных пневмоударников. Этот метод обеспечивает высокую производительность благодаря комбинации ударных и осевых нагрузок с вращением бурового инструмента, что особенно эффективно в условиях высокой твердости пород [84].

Совершенствование буровых станков шарошечного бурения, включая улучшение пневмоударников, критично для повышения производительности и эффективности буровых работ [89]. Основные технологические факторы, такие как поддержание высокой энергии ударов, оптимальная частота вращения и

регулирование осевой нагрузки, играют ключевую роль в достижении максимальной эффективности процесса бурения [93]. Адаптация оборудования к специфическим условиям эксплуатации и использование современных технологий позволяет повысить точность и надёжность буровых операций, что способствует развитию горнодобывающей отрасли и эффективному использованию минеральных ресурсов страны.

1.5 Анализ конструкции бурового станка СБШ

В нынешний день буровые установки с шарошечным бурением СБШ 250 являются наиболее распространёнными среди горнодобывающих предприятий России и стран СНГ [91]. Несмотря на широкое распространение, эти отечественные буровые установки все еще отстают в техническом развитии по сравнению с зарубежными аналогами. Таким образом, необходимо рассмотреть наиболее эффективный тип буровой установки и стратегии повышения ее производительности, чтобы опередить конкурентов в области бурения. Установка СБШ 250 является основным оборудованием для проектов по разработке карьеров, поскольку она способна бурить как вертикальные, так и наклонные скважины (рисунок 1.3) [41]. Также способность машины работать в любых погодных условиях делает ее оптимальным инструментом для бурения. Это особенно выгодно для буровых операций, требующих работы на открытом воздухе, который может подвергаться воздействию суровых температур или ненастной погоды. Это также выгодно для буровых проектов, которые распределены на длительный период времени, так как машина может работать в любых условиях без сбоев.

Отечественные машины популярны среди потребителей благодаря своей доступности, экономичности и широкому спектру применения, то есть более низкой себестоимостью и удобству к горному бурению, по сравнению с зарубежными аналогами. Это преимущество стало ключевым фактором их популярности, и они остаются наиболее предпочтительным выбором среди потребителей. Кроме того, отечественные станки предоставляют пользователям возможность гибко изменять детали и компоненты в соответствии со своими

потребностями и требованиями [30,31].



Рисунок 1.3 - Машина буровая шарошечная СБШ-250 МНА-32 Диаметр бурения 190 – 250 мм, глубина бурения 32000 – 55000 мм, масса 80000 – 90000 кг

Использование отечественного бурового оборудования является экономически эффективным и обеспечивает широкий спектр преимуществ. Оно не только облегчает многоступенчатое обслуживание техники, но и способствует загрузке отечественных заводов горного машиностроения. Это имеет большой социальный эффект, так как создает новые рабочие места для людей, проживающих в непосредственной близости от производственного объекта. Расширение использования отечественного бурового оборудования способно оказать большое социальное воздействие, стимулируя экономический рост и способствуя экономическому развитию страны [75,96].

Для достижения этой цели в конструкцию отечественных буровых машин с шарошечным бурением должны быть включены технологические достижения. К ним относятся усовершенствованные системы управления, позволяющие автоматизировать работу, а также модификации самой буровой системы для снижения вибраций и повышения долговечности. Также важно учитывать такие факторы, как параметры бурения, конструкция долота, геология породы и параметры машины. Тщательно внедряя эти усовершенствования, буровики смогут получить выгоду от повышения производительности и увеличения срока службы долот, сохранив при этом породоразрушающий инструмент. Очевиден

большой интерес к разработке подобных технологий для отечественных станков шарошечного бурения [32].

Из предоставленного анализа бурения взрывных скважин с использованием шарошечных буровых машин в России и странах СНГ подчеркивает важность технического состояния и правильной эксплуатации этих машин для обеспечения эффективности горного производства. В частности, буровая установка СБШ 250, являющаяся наиболее распространенной среди горнодобывающих предприятий, несмотря на широкое использование, отстает в техническом развитии по сравнению с зарубежными аналогами. Это требует рассмотрения стратегий для повышения ее производительности, чтобы соответствовать современным требованиям бурения и улучшить конкурентоспособность в этой области.

Основными направлениями для улучшения эффективности отечественных буровых машин являются - внедрение автоматизированного управления, усовершенствование технических средств для снижения вибраций, повышения скорости бурения за счет ППУ. Технологические улучшения не только увеличат производительность и точность буровых операций, но и могут значительно продлить срок службы бурового оборудования и долот, при этом сохраняя их эффективность в разрушении пород. Кроме того, применение отечественного бурового оборудования способствует поддержке местного машиностроения, созданию рабочих мест и стимулированию экономического развития регионов [71]. Это подчеркивает актуальность к развитию ППУ и усовершенствованию отечественных технологий в области горнодобывающей промышленности, позволит в некоторых случаях не только повысить скорость бурения, но и рост стойкости шарошечного долота.

1.6 Анализ шарошечных долот

В научной литературе присутствуют различные точки зрения относительно классификации бурения с использованием шарошечных долот. Некоторые исследователи аргументируют, что данная методика может быть отнесена к ударному типу бурения, поскольку зубья шарошек, катясь по забою скважины,

оказывают воздействие на породу, аналогичное ударному разрушению [64]. Шарошечное бурение, осуществляемое на скоростях 80–150 оборотов в минуту, характеризуется низкими скоростями приложения нагрузок (менее 0,6 м/с), в результате чего порода разрушается за счет статического раздавливания [68].

Вращательное бурение характеризуется сочетанием вращательного и поступательного движений, при этом к буровому инструменту прикладываются крутящий момент и осевая нагрузка [74]. Основываясь на энергетической теории разрушения, выводы из которой соотносятся с теориями механического разрушения горных пород, авторы [69] предлагают классифицировать шарошечное бурение как вращательный метод, поскольку он обеспечивает минимальную энергоёмкость разрушения [36].



Рисунок 1.4 – Трёхшарошечные долото

Трёхшарошечные долота (рисунок 1.4) [50] функционируют по принципу скалывания породы. Суть этого принципа заключается в следующем: при вращении буровой штанги с установленным долотом и приложении значительной нагрузки (примерно 500–2000 кг на 1 см диаметра) в зоне контакта зубьев долота с разрабатываемой породой возникают напряжения, которые с увеличением нагрузки способствуют появлению трещин и последующему раскалыванию породы [101].

Скорость проходки скважины зависит как от частоты вращения буровой штанги, так и от величины прилагаемой нагрузки. Однако это не означает, что

увеличение данных параметров всегда приводит к повышению эффективности бурения [32]. Превышение определенных значений частоты вращения или нагрузки может привести к снижению скорости проходки, как показано на рисунке 1.6 [57], где представлена зависимость глубины проникновения долота за один оборот от удельной осевой нагрузки. Процесс разрушения породы во время бурения условно делится на три стадии:

1. Абразивное истирание, при котором происходит постепенное изнашивание породы за счет трения;
2. Усталостное разрушение, характеризующееся образованием микротрещин в результате повторяющихся нагрузок;
3. Объемное разрушение, включающее механическое раскалывание породы под воздействием прямых динамических ударов.

При низкой осевой нагрузке на долото происходит первая стадия разрушения породы, характеризующаяся абразивным истиранием. Этот процесс приводит к стачиванию поверхности забоя скважины, что можно определить по характеру выносимого шлама, представляющего собой пылевидные частицы [102].

Скорость бурения на данной стадии остается низкой, составляя приблизительно 3 м/ч. С увеличением нагрузки на долото наступает вторая стадия — усталостное разрушение [86]. На этой стадии образуются более глубокие трещины по сравнению с абразивным истиранием, однако они не соединяются между собой, что требует значительного числа ударов зубьев долота для дальнейшего разрушения породы.

Скорость бурения также остается относительно низкой и не превышает 10 м/ч. Как показано на графике (рисунок 1.5) [49], эффективность бурения на первых двух стадиях остается недостаточной, что требует дальнейшего увеличения нагрузки для перехода к третьей стадии — объемному разрушению. На данной стадии глубокое проникновение зубьев долота в породу и соединение между собой образующихся трещин приводят к раскалыванию породы, что существенно увеличивает эффективность бурения [74].

Буровой шлам на этой стадии состоит в основном из крупных осколков породы и малого количества пылевидных частиц. Однако чрезмерная нагрузка может привести к тому, что корпус шарошки почти контактирует с породой, в результате чего обломки породы застревают между долотом и поверхностью забоя, что препятствует их эффективному удалению продувкой из сопел долота [108]. Таким образом, избыточная нагрузка может негативно сказаться на общей эффективности бурения.

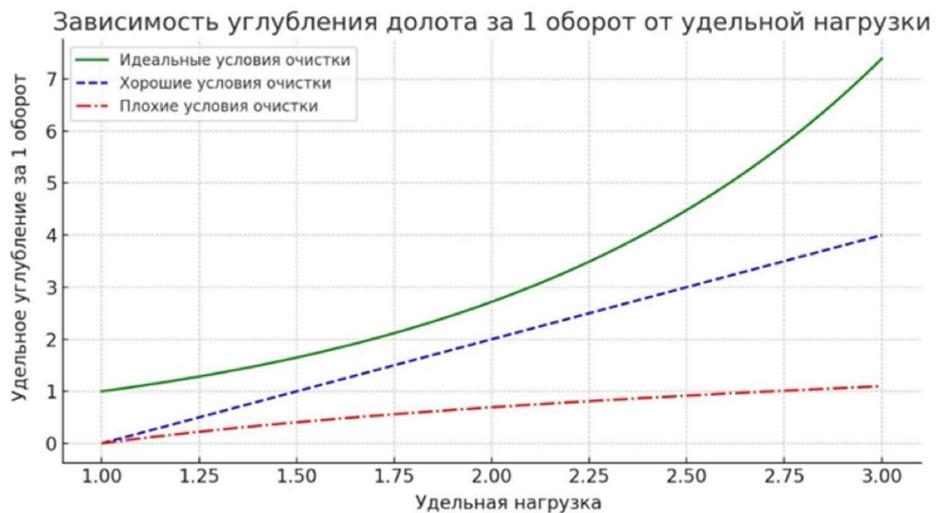


Рисунок 1.5 - Зависимость углубления шарошки от нагрузки

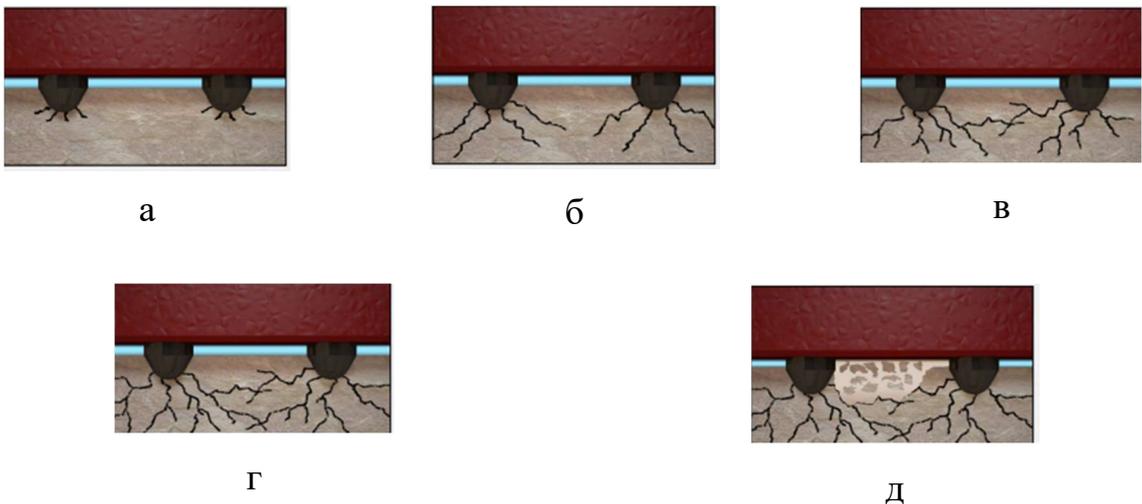


Рисунок 1.6 - Стадия разрушения породы

Рассмотрим методику Шигина А.О. в которой говорится уровень энергии, необходимой для продвижения бурового инструмента, определяется мощностью, передаваемой от привода подачи к рабочему органу и буровому инструменту. Это можно выразить следующим образом формулой (1.1) [80,83,85]:

$$N = \frac{\Delta E}{t} = \frac{m(v_2 - v_1)}{2t}, \quad (1.1)$$

где N — мощность, передаваемая от привода подачи к буровому инструменту, Вт, ΔE — изменение кинетической энергии при продвижении бурового инструмента через породу, Дж; m — эквивалентная масса, характеризующая массу рабочего органа и энергию подающего привода, кг; v_1 и v_2 — скорости равномерного продвижения бурового инструмента при бурении породы с различными физико-механическими свойствами, t — время переходного процесса, за которое скорость подачи бурового инструмента изменяется от v_1 до v_2 [80].

При изменении скорости продвижения бурового инструмента при переходе на более твердую породу возникает дополнительное напряжение, вызванное ударом [86], рассчитывается формулой (1.2):

$$\sigma_{\text{уд}} = \frac{F_{\text{уд}}}{S} = \frac{m(v_2 - v_1)}{tS}, \quad (1.2)$$

где $\sigma_{\text{уд}}$ — напряжение, возникающее в металле при ударе, МПа; S — площадь контактной поверхности в подшипниковых узлах или других элементах, воспринимающих нагрузку удара [81].

Выразив эквивалентную массу из уравнений для кинетической энергии и напряжения при ударе, можно определить напряжение, возникающее при переходе бурового инструмента на породу с более высоким показателем буримости (1.3) [82]:

$$\sigma_{\text{уд}} = Nt/S(v_2 - v_1) \quad (1.3)$$

Для условий бурения однородной породы ресурс роликовых опор качения можно определить (1.4) следующим образом [81]:

$$R = C/P, \quad (1.4)$$

где R — ресурс опор, C — динамическая грузоподъемность, P — нагрузка на опоры.

Для условий бурения слоистой породы выражение примет вид (1.5):

$$R = C/P(1 + \alpha), \quad (1.5)$$

где α — коэффициент, учитывающий слоистость породы.

Для условий бурения трещиноватой породы, при минимальном напряжении цикла $\sigma_{\min} = 0$, выражение принимает вид (1.6):

$$R = C/P (1 + \beta), \quad (1.6)$$

где β — коэффициент, учитывающий трещиноватость породы

С учетом приведенных уравнений для определения ресурса опор качения шарошек можно рассчитать стойкость буровых долот с коническими шарошками (1.7):

$$D_{\text{шмакс}} = K/\sqrt{L}, \quad (1.7)$$

где $D_{\text{шмакс}}$ — максимальный диаметр шарошки, K — коэффициент, учитывающий прочностные характеристики шарошки и условия бурения.

Для трехшарошечных долот выражение для стойкости выглядит следующим образом (1.8):

$$D_{\text{шмакс}} = K/\sqrt{L(1 + \gamma)}, \quad (1.8)$$

где γ — коэффициент, учитывающий взаимодействие между шарошками.

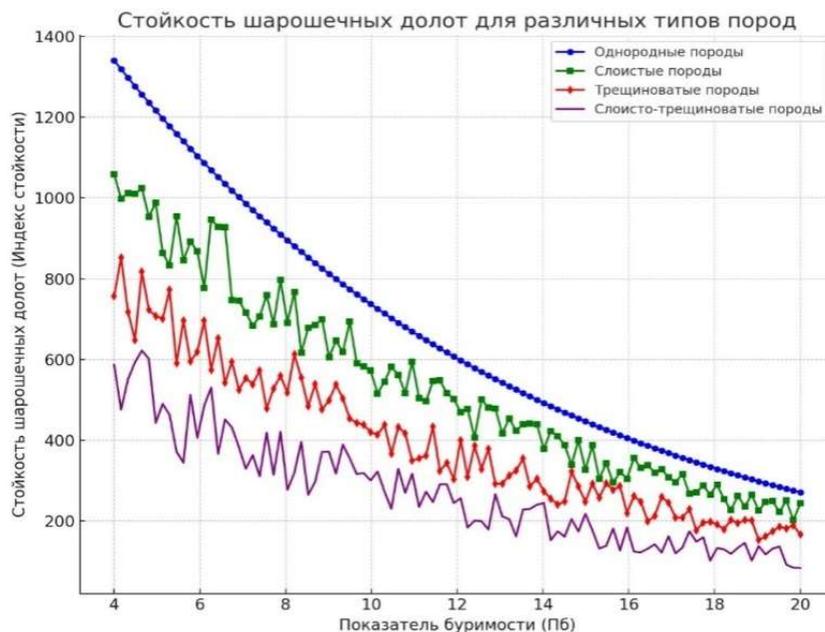


Рисунок 1.7 - Стойкость шарошечных долот в зависимости от показателя буримости

На основе рисунка 1.7 [86] видно, что стойкость шарошечных долот обратно пропорциональна показателю буримости породы: чем тверже и абразивнее порода,

тем быстрее изнашиваются долота. Это подчеркивает необходимость выбора подходящих буровых инструментов и режимов бурения для оптимизации их ресурса и эффективности.

Разработанная методика позволяет учитывать усилие подачи, частоту вращения бурового става, механические свойства стали тел качения в опорах шарошек, а также размер трещин и пограничных слоев вдоль оси бурового става [87].

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

Механизм разрушения породы: разрушение происходит в три стадии – абразивное истирание, усталостное разрушение и объёмное разрушение. На каждой стадии характеристики породы и взаимодействие с долотом различны, что требует адаптации параметров бурения [84].

Значимость экспериментальных данных: графические зависимости, такие как зависимость углубления долота за один оборот от частоты вращения, подчеркивают значимость точной настройки параметров для разных условий работы. Экспериментальные данные необходимы для определения оптимальных условий для конкретных условий бурения [85].

Напряжения при ударе: при переходе на более твердую породу возникает дополнительное напряжение в металле бурового инструмента, обусловленное ударной нагрузкой. Это напряжение можно определить на основе изменения скорости продвижения бурового инструмента и площади контактной поверхности.

Необходимость дальнейшего изучения: различные подходы к классификации шарошечного бурения указывают на необходимость продолжения исследований в этой области, чтобы лучше понять механизмы разрушения породы и оптимизировать процессы бурения.

1.7 Анализ конструкции погружных пневмоударников

Принцип ударно-вращательного бурения с использованием погружных пневмоударников (ППУ) предполагает отдельное выполнение ударного воздействия и вращения. Ударно-циклическое воздействие на буровую головку

осуществляется специализированным узлом ППУ, который генерирует удары, в то время как вращатель обеспечивает необходимую скорость вращения буровой колонны. Механизм подачи отвечает за создание и регулировку давления ППУ к дну скважины, что позволяет компенсировать откат машины, принимая во внимание мощностные характеристики оборудования и прочность горной породы [27].

Процесс бурения включает четыре ключевых этапа: удар, вращение, осевое давление и удаление буровой мелочи с дна скважины. Кроме того, в процессе бурения осуществляется транспортировка буровых отходов на поверхность, что обеспечивает чистоту и безопасность рабочего места. Эти действия способствуют не только эффективному разрушению породы, но и значительно улучшают эффективность всего процесса бурения [96]. На одной из иллюстративных схем показан механизм пневмоударного бурения, предназначенный для создания взрывных скважин. В этом контексте особое внимание уделяется тому, как ударный узел машины эффективно отделяет буровое долото от дна скважины [28]. Долото, оснащенное твердосплавными элементами для разрушения горной породы — инденторами, получает ударные импульсы, которые напрямую передаются к дну скважины, вызывая разрушение породы под действием ударно-циклических нагрузок.

Шарошечное долото, альтернативный и широко применяемый инструмент в буровой индустрии, также используется для разрушения горной породы, но его конструкция и принцип действия отличаются от долот с инденторами [31]. Шарошечное долото оснащено несколькими конусами (шарошками), которые покрыты твердосплавными вставками или алмазами. Каждый конус вращается на своей оси, когда долото вращается в скважине [32]. Принцип работы шарошечного долота заключается в крутящем и давящем воздействии на породу. Вращение конусов приводит к их качению по дну скважины, что вызывает дробление и разрушение породы под комбинированным воздействием сдвига, сжатия и раскалывания [14]. Твердосплавные или алмазные вставки на конусах улучшают их износостойкость и позволяют эффективно работать даже с очень твердыми и

абразивными породами.

На рисунке 1.8 [28] в качестве примера приведен состав современного бурового оборудования пневмоударного бурения перспективного отечественного бурового комплекса «Ерофей» для реализации проектов по развитию БАМа.

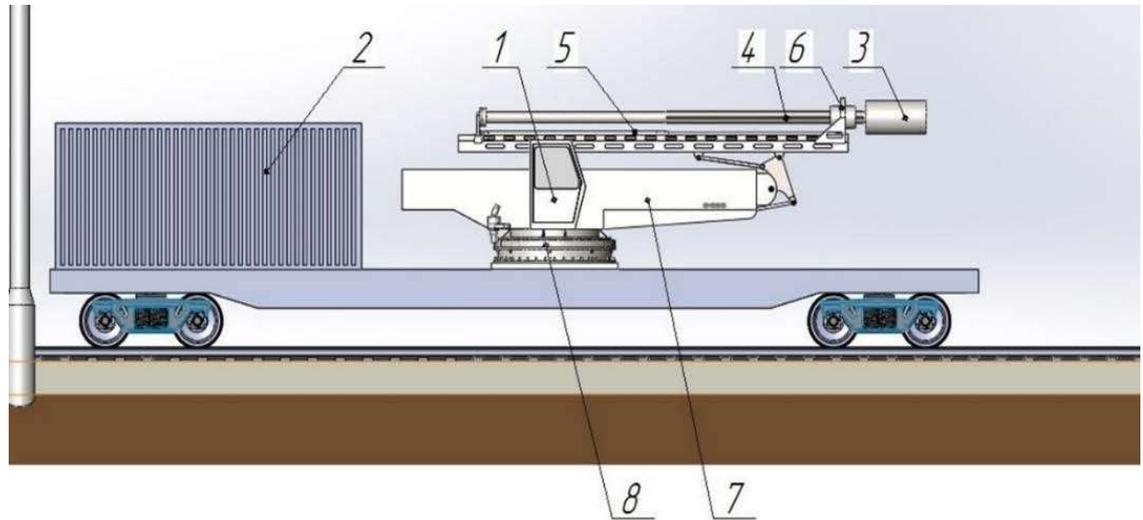


Рисунок 1.8 - Состав бурового комплекса «Ерофей»

1 – кабина машиниста; 2 – компрессор; 3 – пневмоударник; 4 – штанга; 5 – механизм подачи; 6 – вращатель; 7 – манипулятор; 8 – опорно-поворотное устройство

Аналитические исследования показали, что ударно-вращательный способ бурения погружными пневмоударниками, разработанный в РФ, динамично и успешно развивается, продолжая расширять области своего практического применения в мировой практике проведения буровых работ. При этом развитие техники и технологии ударно-вращательного бурения с применением ППУ в нашей стране идет с заметным отставанием от мирового [27,72].

Данное обстоятельство требует более углубленного сравнительного анализа современного уровня технического развития зарубежных и отечественных средств ударно-вращательного бурения с применением ППУ [33].

На мировом уровне требования к безопасности при разработке полезных ископаемых становятся всё строже, особенно учитывая углубление шахт и повышенную сейсмическую активность в некоторых регионах [28]. Это ведет к необходимости использования более безопасных и автоматизированных методов бурения. В этом контексте ведущие роли в разработке систем автоматизации

занимают компании Atlas Copco и Sandvik, которые предложили различные уровни автоматизации своих буровых комплексов. Эти системы позволяют минимизировать человеческое участие в буровом процессе, повышая тем самым безопасность и эффективность операций [32].

Переход к безлюдным технологиям требует значительных инвестиций и интеграции различных технологий в единую систему управления [14]. Это обеспечит координацию и контроль за всеми процессами бурения в реальном времени [107]. Внедрение таких технологий открывает новые перспективы для повышения эффективности и безопасности в горнодобывающей промышленности, а также способствует снижению затрат на труд и повышению уровня автоматизации производственных процессов.

Для интеграции преимуществ существующих моделей пневмоударников и оптимизации затрат на бурение на единицу длины за счет увеличения скорости проходки, компания Sandvik разработала новую модель пневмоударников, обозначенную как RH560. Эта модель объединяет надежность предыдущей модели RH460 и конструктивную простоту модели RH510 [49]. Было достигнуто улучшение воздушного цикла и усовершенствование конструкции поршня, что привело к значительному увеличению ударной мощности и одновременному снижению количества компонентов, что минимизирует вероятность поломок [52].

В отрасли горнодобычи существуют различные мнения относительно целесообразности применения пневмоударников премиум-класса, оснащенных без продувочного клапана на коронке. Модель RH560 представляет собой компромиссное решение, поскольку хоть и не содержит продувочного клапана, демонстрирует высокую надежность [31]. Проведенные испытания новой модели в разнообразных горно-геологических условиях выявили увеличение скорости проходки на 15% и более, а также улучшение вертикальности скважин. Эти результаты позволяют значительно сократить затраты при выполнении буровых работ.

Кроме того, RH560 обладает повышенной мощностью, усовершенствованной системой смазки и сниженным потреблением воздуха, что

обеспечивает возможность бурения скважин большего диаметра без ущерба для темпа работ [59].



Рисунок 1.9 – Погружной пневмоударник фирмы Epiroc и SANDVIC

В современной горной промышленности и строительстве высокоскоростные пневматические шарошечные погружные ударники серии COP M от Epiroc (рисунок 1.9) [11] играют ключевую роль в увеличении производительности и эффективности бурения. Модели COP M6, M7 и M8 разработаны для работы с отверстиями различного диаметра, что делает их подходящими для широкого спектра применений [77]. Эти ударники отличаются уникальной конструкцией, которая позволяет использовать два различных режима работы — Low Flow и High Flow — что обеспечивает их адаптацию к разным воздушным давлениям и объемам на различных высотах и в разных климатических условиях [105]. Дополнительно, благодаря инновационной технологии воздушного цикла, патентованной Epiroc, и новому дизайну битов с твердосплавными шейками, ударники серии COP M позволяют достигать высокой скорости бурения и продлевать интервалы между заточками [59].

Из анализа погружных пневмоударников (ППУ) можно сделать, что они используются в бурении для эффективного разрушения горных пород [83]. Их

основное назначение заключается в передаче мощных ударных импульсов непосредственно на буровое долото, что позволяет значительно увеличивать скорость бурения.

Вот ключевые преимущества и причины использования ППУ:

- **Повышенная скорость бурения:** ППУ обеспечивает высокую скорость бурения за счет мощных ударных импульсов, что позволяет быстрее проходить скважины и увеличивать производительность буровых работ.
- **Глубокое бурение:** ППУ эффективны для бурения глубоких скважин, поскольку ударная энергия передается непосредственно на буровое долото, минимизируя потери энергии и увеличивая глубину проникновения.
- **Точность и качество скважин:** ППУ позволяют поддерживать высокую вертикальность скважин и качество их стенок, что критически важно для взрывных и добычных скважин.
- **Применение в сложных геологических условиях:** ППУ могут эффективно работать в различных горно-геологических условиях, включая твердые и абразивные породы.

Регулирование силы удара по шарошке имеет ключевое значение для повышения скорости бурения и обеспечения долговечности оборудования. Вот основные причины, почему это важно:

- **Повышение скорости бурения:** Регулирование силы удара позволяет адаптировать буровой процесс к конкретным горно-геологическим условиям, обеспечивая максимальную эффективность разрушения породы.
- **Увеличение срока службы оборудования:** Чрезмерная сила удара может привести к быстрому износу и поломкам шарошечного долота и других элементов бурового комплекса. Правильное регулирование силы удара помогает минимизировать эти риски и продлить срок службы оборудования.
- **Безопасность и устойчивость процесса:** Чрезмерная сила удара может вызвать нестабильность бурового процесса и привести к аварийным ситуациям. Правильное регулирование силы удара обеспечивает стабильность и безопасность

буровых операций.

Эффективное использование и контроль погружных пневмударников играют важную роль в современном бурении, обеспечивая высокую производительность, экономичность и безопасность буровых операций.

Это разработки подчеркивают к развитию отечественных погружных пневмударников с использованием шарошечного долота.

1.8 Анализ влияния ударного импульса на бурения горных пород

Аппроксимирование зависимости сопротивления горной породы внедрению от площади модели линейной зависимостью дает возможность производить инженерные расчеты с достаточной степенью точности [6].

Было проведено исследование на компьютере влияния параметров прямого импульса [43], (рис.1.10). Крайние значения $\alpha_1 E$ соответствуют самой мягкой и самой крепкой породе, пробуриваемой ударным способом. Исследование было проведено для клиновидной формы лезвия длиной 4 см и углом приострения 110° . Площадь сечения штанги была принята равной $7,4 \text{ см}^2$, $\rho c = 40 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{см}^3$ (для стали). Вычисления производились для $\alpha_1 E$, равного 600, 1400 и 3500 МПа.

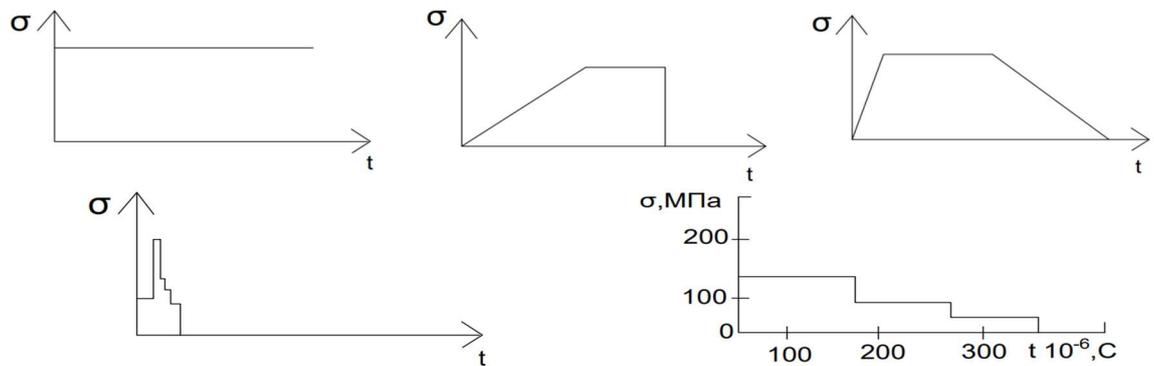


Рисунок 1.10 - Формы импульсов

На основе выполненных расчетов были определены максимальные значения $\sigma(t)$, что свидетельствует о наибольшем внедрении в породу и дает прямоугольный импульс. При этом, глубина внедрения при увеличении напряжения $\sigma(t)$ прямоугольного импульса в n раз также увеличивается в n раз. Увеличение продолжительности прямоугольного импульса всегда дает

приращение глубины внедрения, и эффективнее, чем больше $\sigma(t)$, так как в этом случае больше приращение абсолютного значения глубины внедрения [73].

Наибольшее внедрение дает прямоугольный импульс, оптимальным будет такой импульс, который при наибольшем внедрении лезвий долота в породу дает наименьшее напряжение в штанге. В штанге возникают знакопеременные нагрузки [42]. При этом, усталостная долговечность штанги будет тем больше, чем меньше сумма абсолютных значений напряжений в положительном и отрицательном импульсах [21].

Вместе с тем глубина внедрения при равной площади импульсов будет тем больше, чем больше значение коэффициента передачи импульса в породу. Если этот коэффициент будет равен единице, то отраженного импульса вообще не будет и внедрение при данном количестве движения в импульсе будет наибольшим. Для соблюдения условия прямой передачи импульса в породу необходимо, чтобы (1.9):

$$\sigma_R = \frac{F(h)}{S} - \sigma(t) = 0, \quad (1.9)$$

где σ_R - напряжения в ударном инструменте, S - площадь удара, $F(h)$ - сила удара, $\sigma(t)$ - напряжение в штанге.

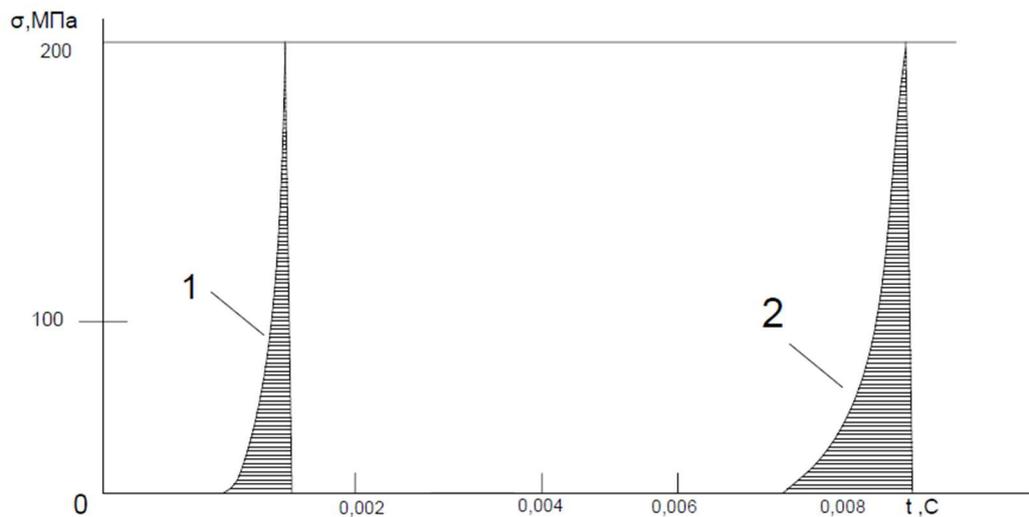


Рисунок 1.11 - Форма оптимальных импульсов по данным расчетов для различных горных пород (1- $\alpha^1 E=3500$ МПа; 2- $\alpha^1 E=600$ МПа. Глубина внедрения составила соответственно 0,037; 0,216 м.)

Для тех же условий что и в предыдущем случае, были проведены необходимые расчеты. На рисунке 1.11 [94] показаны оптимальные импульсы, при которых $\sigma_R = 0$ (наибольшее допустимое напряжение в штанге $\sigma_t = 200$ МПа) для двух различных пород, имеющих $\alpha_1 E = 3500$ МПа и $\alpha_1 E = 600$ МПа.

По результатам моделирования, можно сделать вывод, что наиболее близким к оптимальному значению будет импульс треугольной формы с полого возрастающим передним фронтом и круто обрывающимся задним фронтом [105].

Анализ данных, представленных в исследовании, позволяет глубже понять влияние различных форм ударных импульсов на процесс бурения и внедрение в горную породу. Основные моменты, которые выделяются в ходе анализа:

1. Линейная аппроксимация сопротивления породы внедрению: Предложенная линейная зависимость между сопротивлением породы и площадью сечения лезвия дает возможность с достаточной точностью проводить инженерные расчеты. Это указывает на прямую корреляцию между площадью сечения и силой сопротивления породы, что упрощает проектирование и адаптацию инструментов для разных условий бурения.

2. Исследование параметров прямого импульса: Выполненные расчеты для клиновидного лезвия с различной прочностью породы показали, что форма импульса оказывает значительное влияние на глубину внедрения. Прямоугольные импульсы, при увеличении их продолжительности, позволяют достигать большей глубины внедрения, что особенно эффективно при высоких значениях напряжений $\sigma(t)$.

3. Оптимальная форма импульса: Наилучшие результаты дает прямоугольный импульс, который позволяет достичь глубокого внедрения при минимальном напряжении в штанге. Это снижает усталостные нагрузки на штангу и увеличивает ее долговечность.

4. Условие прямой передачи импульса в породу: Моделирование показало, что для максимального внедрения важно достичь условия, при котором отраженный импульс отсутствует (коэффициент передачи импульса равен

единице). Это условие достигается, когда результирующее напряжение в ударном инструменте σ_R равно нулю.

5. Влияние геометрических параметров на внедрение: Геометрия лезвия, включая длину и угол приострения, напрямую влияет на эффективность процесса внедрения. Оптимизация этих параметров может существенно повысить производительность бурения.

В результате, наилучшая форма ударного импульса для различных пород – это треугольная форма с полого возрастающим передним фронтом и круто обрывающимся задним фронтом. Эта форма импульса обеспечивает наилучшее сочетание глубины внедрения и минимального напряжения в штанге, что оптимально для увеличения продолжительности эксплуатации бурового оборудования и эффективности процесса бурения. Исходя из этих выводов можно сказать, что промежуточный элемент бойек влияет на ударный импульс и можно установить связь между ударными импульсами и ролью бойка в повышении эффективности бурения рисунок 1.12.

При бурении горных пород одним из ключевых элементов является боек, который используется в сочетании с поршнем и породоразрушающим инструментом. Основное назначение бойка в буровых установках состоит в передаче ударной энергии от поршня к буровому инструменту, что существенно повышает эффективность процесса разрушения породы.

Боек представляет собой промежуточный элемент, который устанавливается между поршнем ударного механизма и буровым инструментом. Его основные функции включают:

1. Передача ударной энергии: боек передает ударную энергию от поршня к буровому инструменту, что усиливает ударное воздействие на породу. Это способствует эффективному разрушению горных пород и повышению скорости бурения.

2. Амортизация и распределение нагрузки: боек помогает распределить ударную нагрузку более равномерно по поверхности бурового инструмента, снижая риск его повреждения и продлевая срок службы.

3. Снижение вибраций: использование бойка снижает вибрационные нагрузки на буровой ствол и оборудование, что улучшает условия работы оператора и повышает безопасность буровых операций.

Устройство на рисунке 1.12, соответствующее патенту № 2720041 [52], позволяет разрушать горные породы с использованием ударных импульсов сложной формы, которая регулируется в зависимости от параметров ударной системы «поршень-боек-инструмент» [45].

Ударный механизм (рисунок 1.12) [52] состоит из поршня 4 с резьбовым отверстием 18 и бойка 8, выполненного с центральным ступенчатым отверстием 17, через которое соединяется с поршнем 4 винтом 16 с круглой шляпкой большего диаметра и меньшей высотой, чем диаметр и высота отверстия 17 в бойке 8. Ввинчиванием винта 16 регулируется расстояние между бойком 8 и поршнем 8 не более 6 мм.

В зависимости от таких параметров, как масса бойка, масса и ход поршня, давление воздуха перед шарошкой следует ожидать устойчивое протекание процесса дребезга, которое зависит от параметрического соотношения коэффициента восстановления скорости и отношения масс бойка и ударной системы.

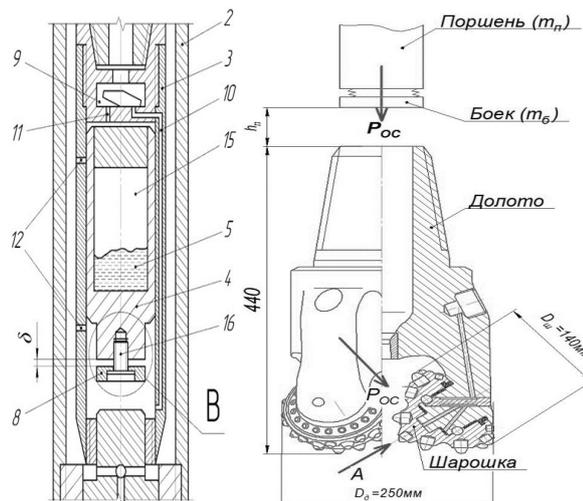


Рисунок 1.12 - Устройство трехмассовых ударных систем ударного механизма: разрез ППУ с ударником и бойком с винтом, общий вид шарошки и ударника с бойком

В соответствии с указанным выше соотношением для тяжёлых ударников ($m_{\text{п}} > 5$ кг) отношение массы бойка и поршня должны составлять 0,02. Создание множественных микроимпульсов позволяет создать суммарный ударный импульс любой формы [44].

Таким образом, использование трехмассовых систем, в которых боек, как промежуточный элемент между поршнем-ударником, позволяет создать ударный импульс в буровом инструменте рациональной формы и стабилизировать силу удара [47]. Это позволяет утверждать, что использование трехмассовых систем решает задачу формирования импульсов треугольной формы с полого возрастающим передним фронтом и круто обрывающимся задним фронтом [50]. Боек позволяет более точно контролировать передачу энергии от поршня к породе, что способствует увеличению глубины внедрения и снижению износа оборудования.

1) Минимизация отраженного импульса: в описаниях ударного импульса упоминается, что оптимальные результаты достигаются при минимальном отражении импульса от породы. Боек, за счёт своих физических и конструктивных особенностей, способствует минимизации отражённого импульса, что приближает к условию $\sigma_R = 0$, которое означает, что вся энергия удара передаётся непосредственно в породу, улучшая процесс бурения.

2) Управление ударной мощностью: управление параметрами удара через изменение конструкции бойка и его зазора с поршнем позволяет адаптировать ударные характеристики под конкретные условия бурения. Это особенно важно при работе с различными типами пород.

3) Эффективность и долговечность инструмента: использование бойка может увеличивать долговечность породоразрушающего инструмента за счёт снижения пиковых нагрузок на долото. Это описывается в патенте № 2720041, где подчеркивается важность уменьшения напряжений в штанге для повышения усталостной долговечности инструмента [54].

Однако, несмотря на многочисленные преимущества, такие как повышение скорости бурения, продление срока службы оборудования и снижение вибраций,

существует ряд недостатков. Главным из них является возможное влияние на процесс дребезга повышенного давления воздуха в месте перемещения бойка, сложность подбора материала для изготовления бойка и невозможность точного контроля силы удара, что может привести к быстрому износу или разрушению бойка. Кроме того, сложность настройки системы и повышенные затраты на обслуживание также являются существенными ограничениями. Таким образом, для достижения оптимальных результатов требуется точная настройка системы и контроль параметров ударных нагрузок. Необходимо также практическое испытание этих систем в реальных условиях, чтобы подтвердить их эффективность и надежность в промышленных масштабах.

1.9 Цель и задачи исследований

По результатам проведенного анализа сформулирована цель, идея и поставлены задачи диссертационной работы.

Целью работы является повышение механической скорости бурения шарошечными станками с погружными пневмоударниками массивов со сложно структурированными породами и определение диапазона регулирования силы удара за счет изменения потока воздуха.

Идея работы: заключается в регулировании параметров ППУ с использованием ударной системы «поршень – боек – инструмент» управляемой заслонкой, которая контролирует поток воздуха в стволе бурового станка шарошечного бурения.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы, определить направления и способы совершенствования погружных пневмоударников для станков шарошечного бурения.
2. Провести экспериментальные исследования трехмассовой ударной системы при использовании совместного влияния осевой нагрузки, частоты вращения долота и дополнительной ударной нагрузки, на механическую скорость

бурения скважины станком СБШ с использованием механизма «поршень-боек-инструмент».

3. Провести экспериментальные исследования по изменению сечения задвижки ППУ для прохода потока воздуха и регулирования рабочего давления.

4. Разработать рекомендации и алгоритм управления режимом работы управляемой задвижки в ППУ для станков СБШ.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

Во второй главе рассматриваются методики расчета основных параметров погружного пневмоударника, используемого с шарошечным долотом. Приведена методика расчета "поршень-боек-инструмент", описано взаимодействие системы и заданы характеристики трех основных элементов системы, теоретически определены значения скорости бурения с учетом особенностей работы СБШ с ППУ.

Проводится расчет параметров поршня, включая его массу, ход и скорость движения, т.к. они определяют энергию удара, передаваемую на долото. Важно рассчитать массы элементов ударной системы и задать материал, чтобы минимизировать потери энергии и увеличить эффективность передачи удара.

Рассматриваются методики расчета скорости бурения станком СБШ с погружным пневмоударником при различных значениях крепости породы.

2.1 Совершенствование конструкций карьерных буровых станков на основе морфологического анализа

Новые сложные задачи по переоснащению парка горных машин на горнодобывающих предприятиях РФ включают формирование производственной политики, выявление стратегий развития предприятия при прогнозировании взаимодействий с окружающей средой, мониторинг состояния горной техники, ее своевременное обновление и повышение эффективности эксплуатации.

На рудниках и карьерах для отделения полезного ископаемого от массива в год пробуриваются сотни тысяч метров шпуров и скважин, интенсификация этих работ (повышение скорости бурения при росте стойкости породоразрушающего инструмента) может дать весьма значительный эффект. Для обоснования направлений модернизации буровой техники может эффективно применяться структурный или морфологический анализ.

«Метод морфологического ящика» или метод Цвикки применяется для исследования сложных, в том числе технических систем. Формализованный морфологический анализ, использованный при оценке эффективности разработки новых, альтернативных комплексов горных машин или самих горных машин, позволил разработать и запатентовать ряд оригинальных конструкций новых машин, которое использовалась в работах Куклина Е.А. [33].

Технический (производственный) процесс, в том числе и процесс бурения взрывных скважин на карьерах, однозначно характеризуется целями (функциями) производства, поэтому применение формализованного морфологического анализа для исследования возможных направлений совершенствования основных процессов представляет теоретический и практический интерес.

В целом любой процесс: физический, химический, экономический, в может быть разложен на ряд целей (или функций). В качестве функций (Ф) могут рассматриваться основные операции совершенствования процесса шарошечного бурения. Между функциями не должно быть противоречия, они устраняются путем объединения и исключения “разнонаправленности” отдельных функций и уточнения формулировок (см. таблица 2.1) [36]. На основе сбалансированного, непротиворечивого и понятного структурирования процесса (разложения на функции) может быть составлена основная морфологическая таблица (ОМТ), где по каждой функции формируются (выбираются) возможные ее практические реализации. Направленность совершенствования процесса отображается выбором различных структурных моделей из ОМТ, которые создаются путем отбора по одной реализации из каждой функции с последующим их объединением [32,33].

Для этого случая ОМТ и дальнейшее применение формализованного морфологического анализа подробно рассмотрено в [93].

При анализе путей совершенствования производства буровых работ на карьерах, необходимо определить процесс и провести корректное разделение процесса на функции, для которых можно привести достаточное количество технических реализаций. Таким наименованием процесса, по нашему мнению, может быть формулировка: «Интенсификация бурения взрывных скважин по

крепким породам». Или в развернутом виде – «Исследование путей повышения эффективности совершенствования бурения взрывных скважин в условиях открытых горных работ при разработке крепких руд» [105]. Анализ процесса может быть проведен в любом направлении его развития [38]. Такой процесс разбивается на следующие функции (Ф):

1. Интенсификация разрушения;
2. Снижение вибрации;
3. Повышение стойкости инструмента и бурового става;
4. Улучшение удаления штыба;
5. Повышение скорости бурения;
6. Возможность перехода на бурение измененным диаметром долота;
7. Сохранение скважины;
8. Формирование бурового става (наращивание ...);
9. Передача энергии от приводных устройств на исполнительные механизмы (ИО) и т.д.

Применение объединения аналогичных функций и исключение их дублирования дают возможность получить три основные функции:

Ф1 – интенсификация разрушения;

Ф2 – формирование и сохранение скважины, рациональное выполнение технологических операций;

Ф3 – эффективное удаление штыба.

В таблице 2.1 [34] представлена ОМТ описания процесса бурения в формулировке, данной выше.

Анализ таблицы 2.1 позволяет сделать следующие выводы:

1. Можно разработать $N=13 \times 13 \times 13=2107$ и более вариантов развития, большая часть которых может быть отброшена по причине дублируемости, несовместимости реализаций функций, абсурдности или противоречивости вариантов развития;

2. За прототип (вариант развития с известными параметрами) может быть принят вариант А1-В1-С1: буровой станок типа СБШ с долотом комбинированного действия.

3. При выборе по три наиболее перспективных варианта реализации для каждой функции получится так называемая упрощенная основная морфологическая таблица (УОМТ) размером 3x3 с общим числом вариантов $3 \times 3 \times 3 = 27$ (таблица 2.2) [93].

Таблица 2.1- Основная морфологическая таблица (ОМТ)

Реализация функции	Функции (цели)		
	А (Ф1)—интенсификация бурения	В(Ф2) — формирование скважины рациональными операциями	С(Ф3) - удаление штыба
1	Комбинированный инструмент, вращательное бурение: шарошка и резец	Свинчивание стандартных штанг, находящихся в кассете	Воздушной струей (эрлифт) в зазоре скважина-штанга
2	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: шарошка и резец, погружной пневмоударник	Свинчивание штанг, штанги подаются на ось скважины манипулятором	Водовоздушной струей в зазоре скважина-штанга
3	Комбинированный инструмент, вращательное бурение: шарошка и алмазная коронка	Бурение одной удлиненной штангой	Водяной струей (Гидротранспорт) в зазоре скважина-штанга
4	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: коронка и резец, погружной гидроударник	Став, формируется из гибких лент	Пеной в зазоре скважина-штанга
5	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: коронка и резец, выносной гидроударник	Став, формируется из гибких труб	Химическим разложением в зазоре скважина-штанга
6	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: коронка и резец, тепловое воздействие на забой	То же, что В1, с использованием обсадных труб для сохранности скважины	Разрушением с последующим выстиланием стенок скважины
7	Комбинированный инструмент, вращательное бурение: шарошка и резец, тепловое воздействие на	То же, что В2, с использованием обсадных металлических труб	Шнеком в зазоре скважина-штанга

Продолжение таблицы 2.1

Реализация функций	Функции (цели)		
	А (Ф1)—интенсификация бурения	В(Ф2) — формирование скважины рациональными операциями	С(Ф3) - удаление штыба
	забой		
8	Комбинированный инструмент: гидромеханический резец	То же, что В3, с использованием обсадных металлических труб	Ковшом в зазоре скважина-штанга
9	Взрывное разрушение	То же, что В4, с использованием обсадных металлических труб	Капсулой в зазоре скважина-штанга
10	Лазерное разрушение	То же, что В5, с использованием обсадных металлических труб	Сжиганием в зазоре скважина-штанга
11	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: шарошка и резец, химическое воздействие на забой	То же, что В1, с использованием напыления на стенках скважины полимера	То же, что С1, но в зазоре штанга-труба
12	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: шарошка и резец, СВЧ-воздействие на забой	То же, что В2, с использованием упрочнения стенок скважины	То же, что С2, но в зазоре штанга-труба
13	Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: шарошка и резец, бактериологическое воздействие на забой	То же, что В5, с использованием упрочнения стенок скважины	То же, что С3, но в зазоре штанга-труба

Можно составлять несколько матриц размером 3x3. Каждый из 27 (или более) выбранных вариантов необходимо описать для полного представления “работы” по этому варианту конкретного устройства и каждый из этих 27.

Таблица 2.2 – Упрощенная основная морфологическая таблица (УОМТ)

А	В	С
Комбинированный инструмент, вращательное бурение: шарошка и резец	Свинчивание стандартных штанг, находящихся в кассете	Воздушной струей (эрлифт) в зазоре скважина-штанга
Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: шарошка и коронка, погружной пневмоударник	Бурение одной удлиненной штангой	Водовоздушной струей в зазоре скважина-штанга

Продолжение таблицы 2.2

Комбинированный инструмент, ударно-вращательное бурение: коронка и шарашка, выносной гирдоударник	Став, формируется из гибких лент	Водяной струей (гидротранспорт) в зазоре скважина-штанга
---	----------------------------------	--

Вариант сравнивается с прототипом, например, станком СБШ-250МНА, по определенному набору параметров. При этом опять представляется целесообразным применение принципа “достаточности и необходимости тройственности” (аксиома 1).

Параметры — это такие общие и всеобъемлющие показатели эффективности использования той или иной реализации конкретной функции, по которой можно сравнивать результаты реализации всех трех (или более) функций [36]. Таким образом, можно предложить выбор из ряда следующих параметров (П):

1. П1 — воздействие на среду (человека) – образование пыли, вибрация, повышенное образование трещин в массиве и др;
2. П2 — стоимость выполнения операций (по функциям);
3. П3 — энергозатраты на выполнение операций.

Как следует из описания, все параметры должны исследоваться на минимум. Это важно для дальнейшего трансформирования безразмерных матриц.

Для оценки функций и параметров необходимо выбрать шкалы значимости (предпочтительности) и определить приоритеты, которые устанавливаются исходя из конкретных условий рассматриваемой задачи [8,34]. Дальнейшие действия предполагают принятие второй аксиомы: «для анализа на уровне предпочтительности вариантов достаточно рассматривать соотношения параметров для каждой функции в сравнении "больше или меньше" в двоичной системе». Это означает, что достаточно установить, что значение параметра для данной функции у конкретного варианта больше (меньше), чем значение этого же параметра у прототипа. Практика показывает, что определение таких соотношений обычно не вызывает сложностей и является объективным при корректном и детальном выборе и разделении функций и параметров [37]. Иными словами, для

двух простых заданных величин почти всегда можно точно определить, какая из них больше (меньше). Предположим, можно использовать следующие шкалы в двоичной системе для оценки важности функций и параметров.

Таблица 2.3 – Примеры отображения матрицы оценок с использованием тензора приоритетов функций и параметров [33]

№	Наименование операции	Варианты расстановки приоритетов		
		без приоритетов	с приоритетом функции	с приоритетом и функций и параметров
1	Величины приоритетов	$\lambda_{11} = \lambda_{12} = \lambda_{13} = 1;$ $\lambda_1 = 1; \lambda_2 = 1; \lambda_3 = 1;$ $\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 = 1:1:1$	$\lambda_{11} = 100; \lambda_{12} = 10;$ $\lambda_{13} = 1$: оценка по первой функции сдвигается в третий разряд двоичного числа, оценка второй функции сдвигается во второй разряд двоичного числа, оценка первой функции остается в первом разряде двоичного числа; $\lambda_{11} : \lambda_{12} : \lambda_{13} = 4:2:1;$ $\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 = 1:1:1$	$\lambda_{11} = 100; \lambda_{12} = 10;$ $\lambda_{13} = 1;$ $\lambda_{11} : \lambda_{12} : \lambda_{13} = 4:2:1;$ $\lambda_1 = 100; \lambda_2 = 10; \lambda_3 = 1;$ $\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 = 4:2:1$: оценка второго параметра сдвигается на один разряд в двоичной системе относительно оценки первого параметра, оценка третьего параметра сдвигается на один разряд относительно оценки второго параметра.
2	Характеристика оптимизации	Минимизация		
3	Матрица оценок	$A_{\hat{\alpha}_1} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$		
4	Преобразование матрицы $A_{\hat{\alpha}_1}$ по строкам	$a_1' = 0+0+1 = 1$ $a_2' = 1+1+1 = 11$ $a_3' = 1+0+0 = 1$	$a_1' = 1$ $a_2' = 111$ $a_3' = 100$	$a_1' = 1$ $a_2' = 111$ $a_3' = 100$
5	Преобразование столбца матрицы $A_{\hat{\alpha}_1}$ в двоичной системе	$T1 = 1+11+1 = 101$	$T1 = 1+111+100 = 1100$	$T1 = \begin{pmatrix} + & 1 \\ & 111 \\ + & 100 \\ \hline & 11111 \end{pmatrix} = 11111$
6	Суммарная оценка в десятичной системе	5	12	31

Например, I набор приоритетов: для функций: $\Phi_1 : \Phi_2 : \Phi_3 = 4 : 2 : 1$; для параметров: $\Pi_1 : \Pi_2 : \Pi_3 = 2 : 4 : 1$.

II набор приоритетов: для функций: $\Phi_1 : \Phi_2 : \Phi_3 = 2 : 4 : 1$; для параметров: $\Pi_1 : \Pi_2 : \Pi_3 = 2 : 4 : 1$.

Может быть несколько вариантов набора приоритетов.

По каждому варианту составляются безразмерные матрицы 3×3 , каждый элемент которой выражен в двоичной системе и определяется как отношение величины i -ого параметра j -ой функции исследуемого варианта к величине i -го параметра j -ой функции прототипа [86].

При отсутствии величин параметров матрицы могут быть получены экспертными методами, наличие конкретных величин по параметрам позволяет решить задачу в строгом виде. Отображение безразмерных матриц с учетом шкал приоритетов по функциям и параметрам в числа (скаляры) дает возможность ранжировать варианты по степени их рациональности. Примеры отображения матриц в скаляры приведены в таблице 2.3 [95].

Пакет компьютерных программ MORF позволил на основе описанного выше метода получить конкретные четкие рекомендации по выбору вариантов модернизации буровых станков [77].

Морфологический анализ процесса интенсификации бурения показал: для совершенствования станков шарошечного бурения по минимальному варианту целесообразно использование погружного пневмоударника с возможностью формирования ударного импульса оптимальной для данного типа породы образной формы [89].

Конкретные схемы бурового станка с ударным механизмом при заданной форме импульса могут быть реализованы за счет создания полых поршней-ударников со специальным заполнением, конструкции которых запатентованы, однако сложны при изготовлении и эксплуатации и поэтому в данной работе не рассматриваются [81].

Высокий приоритет имеют параметры экологического воздействия на среду (человека), это важный приоритет, указывают на необходимость обязательного

снижения уровня вредной составляющей вибрации бурового става. Это может быть осуществлено следующими средствами: установка демпфирующих устройств между буровым ставом и узлом вращателя или между канатом и гидроцилиндром подачи; устройство съемной кабины (не снижает вредное воздействие вибрации на станок в целом, и, особенно, на привод вращателя и мачту); установка пневмо-гидроаккумуляторов в напорной магистрали питания гидродомкрата подачи; установка следящей системы, позволяющей посредством управления частотой ударов погружного пневмоударника, снижать собственную частоту вибрации става (вариант практически трудно осуществляется) [90].

При использовании полностью электрорифицированных буровых станков наиболее эффективным средством является установка амортизаторов между ставом и вращателем [82].

Морфологический анализ процесса интенсификации бурения также показал:

1. Для модернизации СБШ целесообразно применение погружного пневмоударника с регулируемой ударной нагрузкой, величина которой может изменяться в зависимости от давления в ППУ, определяемое, например, регулируемой задвижкой, что может привести к росту скорости бурения за счет повышения концентрации ударной нагрузки на разрушающих элементах [87];

2. Требуется обязательное снижения уровня вибрации бурового става, что может быть выполнено известными средствами, например пневмо-гидроамортизаторами [88];

3. Целесообразно использование погружного пневмоударника с оптимизацией ударной нагрузки и формированием ударного импульса «Л»-образной формы. Это должно привести к повышению скорости бурения за счет более полного прилегания шарошки к забою, повышения концентрации ударной нагрузки на лезвиях, лучшего очищения лезвий (штырей) шарошек [75].

2.2 Анализ методики расчета от параметров погружного пневмоударника в СБШ

Для исследования ударных систем ППУ необходимо определить величину максимального осевого усилия, в зависимости от условий работы станка [57-59].

Во время работы станка на долото действует несколько сил. Суммарная сила будет рассчитываться по формуле 2.1 [56]:

$$P_{OC\max} = P_{OC}^* + P_{OC}^n + P_{OC}^{y\partial}, \quad (2.1)$$

где P_{OC}^* – усилие, создаваемое весом бурового оборудования; P_{OC}^n – осевое усилие подачи, создаваемое натяжными канатами, $P_{OC}^n = 300\text{кН}$ (по Подэрни Р. Ю.); $P_{OC}^{y\partial}$ – осевое усилие от удара ППУ [58].

1) Осевое усилие в нормальном режиме работы будет рассчитываться по формуле 2.2, согласно Подэрни Р. Ю. [60]:

$$P_{OC}^n = 10^{-2} \cdot (6...8) \cdot f \cdot D_{\partial} = 10^{-3} \cdot (6...8) \cdot \sigma_{сж} \cdot D_{\partial}, \text{кН}, \quad (2.2)$$

где f – крепость породы; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы при одноосном сжатии; D_{∂} – диаметр долота.

Ниже представлены расчеты для стандартного диаметра шарошки СБШ-250 и для испытательного стенда на полигоне СПГУ в Саблино, диаметр шарошки 85 мм [79].

а) при использовании шарошечного долота $\emptyset 85$ мм изготовленного из материала Сталь 12ХН2 для стендовых испытаний:

$$P_{OC}^n = 10^{-2} \cdot (6...8) \cdot f \cdot D_{\partial} = 10^{-2} \cdot 8 \cdot 5 \cdot 85 = 30\text{кН}$$

б) При использовании шарошечного долота $\emptyset 244$ мм изготовленного из материала Сталь 19ХГНМА используемого на станке СБШ-250:

$$P_{OC}^n = 10^{-2} \cdot (6...8) \cdot f \cdot D_{\partial} = 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10 \cdot 244 = 215\text{кН}$$

2) В случаях, когда шарошечное долото встречает на своем пути пустоты или происходит резкое скалывание породы и долото проваливается - на него будет действовать мгновенная нагрузка от веса бурового става и бурового оборудования. Такое осевое усилие будет рассчитываться по формуле (2.3) [80]:

$$P_{OC}^* = g \cdot \sum m_i, \quad (2.3)$$

где $\sum m_i$ – суммарная масса буровой системы.

Суммарная масса рассчитывается по формуле (2.4) [84]:

$$\sum m_i = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5, \quad (2.4)$$

где, $m_1 + m_2$ - масса подводных систем; m_3 - масса буровой головки; m_4 - масса бурового става, $m_4 = n \cdot m_{шт}$, (n - число штанг, $m_{шт}$ - масса одной штанги); m_5 - масса долота [83].

а) Суммарная масса бурового оборудования при использовании шарошечного долота $\varnothing 85$ мм изготовленного из материала Сталь 12ХН2 для стендовых условий состоит из массы станда: $\sum m_i = 500 \text{ кг}$.

Тогда, осевое усилие при изменении длины става будет составлять: $P_{OC}^* = 9,8 \cdot 500 = 4,9 \text{ кН}$.

б) Суммарная масса бурового оборудования при использовании шарошечного долота $\varnothing 244$ мм изготовленного из материала Сталь 19ХГНМА с изменением длины става будет изменяться в пределах:

$$\sum m_i = 50 + 2950 + (1 \div 4) \cdot 750 + 45 = 3795 \div 6045 \text{ кг}.$$

Тогда, осевое усилие при изменении длины става будет меняться в пределах:

$$P_{OC}^* = 9,83 \cdot 3795 \div 9,83 \cdot 6045 = 37304,85 \div 59422,83 \text{ Н} \approx (37,3 \div 59,4) \text{ кН}$$

3) Расчет осевого усилия при использовании удара ППУ может производиться исходя из разных условий.

Условие не разрушения частей шарошечного долота.

Долото не является цельным элементом. Каждый элемент изготавливается из стали определенной марки, детали долота и марки стали приведены в таблице 2.4 [95].

Таблица 2.4 - Характеристики составных частей шарошечного долота

Деталь	Материал	Предел прочности, МПа
Шарошки	14ХНЗМА	930
Лапа	15НЗМА	730
Ось	14Х17Н2	850
Шары, ролики	55СМ5ФА-ШД	1400

Для вычисления осевого усилия, обеспечивающего сохранность компонентов шарошечного долота при вращательно-ударном бурении с использованием ППУ, необходимо определить максимальное значение суммы сил,

воздействующих на долото. При этом нужно учитывать коэффициент запаса прочности и материал, из которого изготовлено долото [81].

$$P_{OC_{max}} \leq [\sigma_{сжс}] \cdot \frac{S_i}{k_{зан}}, \quad (2.5)$$

$$(P_{OC}^* + P_{OC}^n + P_{OC}^{y\partial}) \leq \frac{[\sigma_{сжс}] \cdot S_i}{k_{зан}},$$

где S_i - опасное сечение в шарошке (S_1); в оси (S_2); в лапе (S_3); $[\sigma_{сжс}]$ - предельное допустимое значение напряжения сжатия, определяется в зависимости от фактического металла, из которого изготавливается шарошка (опорный узел, лапа); $k_{зан}$ - коэффициент запаса прочности ($k_{зан} = 1,05 \div 1,3$).

Для вычисления допустимой силы удара с целью не разрушения долота, примем металл с минимальным пределом прочности и его площадью сечения в долоте, учитывая при этом коэффициента запаса прочности. Исходя из таблицы 2.4 [83] видно, что минимальным пределом прочности обладает лапа долота.

Тогда из условия не разрушения долота в опасном сечении (в лапе), можно составить неравенство для определения величины $P_{OC}^{y\partial}$ [81] по формуле (2.6):

$$P_{OC}^{y\partial} \leq \frac{[\sigma_{сжс}] \cdot S_3}{k_{зан}} - (P_{OC}^* + P_{OC}^n) \quad (2.6)$$

Изменяя коэффициент запаса прочности, а также используя ранее рассчитанные величины, определим минимальное и максимальное значение осевого усилия при использовании удара ППУ [80-84].

а) при использовании шарошечного долота $\emptyset 85$ мм изготовленного из материала Сталь 12ХН2 для стендовых испытаний [81]:

$$P_{OC_{min}}^{y\partial} \leq \frac{730 \cdot 500}{1,3} - (4,9 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3);$$

$$P_{OC_{min}}^{y\partial} \leq 245,8 \text{ кН}.$$

$$P_{OC_{max}}^{y\partial} \leq \frac{730 \cdot 500}{1,05} - (4,9 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3);$$

$$P_{OC_{max}}^{y\partial} \leq 312,7 \text{ кН}.$$

Тогда:

$$P_{OC_{max}} = P_{OC}^* + P_{OC}^n + P_{OC}^{y\partial} = 4,9 + 30 + (245,8 \div 312,7) = 280,7 \div 347,6 \text{ кН}.$$

б) При использовании шарошечного долота $\varnothing 244$ мм изготовленного из материала Сталь 19ХГНМА используемого на станке СБШ-250 [44]:

$$P_{OC_{min}}^{y\partial} \leq \frac{730 \cdot 1000}{1,3} - (59,4 + 215).$$

$$P_{OC_{min}}^{y\partial} \leq 287 \text{ кН}.$$

В случаях уменьшения коэффициента запаса прочности [81]:

$$P_{OC_{max}}^{y\partial} \leq \frac{730 \cdot 1000}{1,05} - (37,3 + 215) = 442,9 \text{ кН}.$$

Отсюда видно, что существует довольно значительный запас осевого усилия, которое можно реализовать в удар, используя ППУ, без разрушения долота [77].

Тогда:

$$P_{OC_{max}} = P_{OC}^* + P_{OC}^n + P_{OC}^{y\partial} = 37,5 + 215 + 287 = 539,5 \text{ кН}$$

Условие сохранения ударного импульса:

Зная массу и скорость поршня-ударника из характеристик стандартного ППУ М-48, можно найти осевое усилие, по условию сохранения импульса (2.7) [78]:

$$m_n \cdot v_n = P_{OC}^{y\partial} \cdot \tau; \quad (2.7)$$

где m_n - масса поршня, $m_n \approx 5 \text{ кг}$ в стандартном ППУ М-48; v_n - скорость поршня, $v_n \approx 10 \text{ м/с}$; τ - время соударения, $\tau \approx 0,001 \text{ с}$.

Тогда для стандартного ППУ найдем усилие от удара (2.8) из формулы (2.7):

$$P_{OC}^{y\partial} = \frac{m_n \cdot v_n}{\tau} = \frac{5 \cdot 3,94}{0,001} \approx 20 \text{ кН}. \quad (2.8)$$

Условие скалывания (разрушения) породы

Глубина погружения зуба (штыря) при вращательном бурении по Подэрни М. Ю вычисляется по формуле (2.9) [58].:

$$h = \frac{1,5 \cdot 10^2 \cdot P_{OC}^n}{D_\partial \cdot f(\text{tg} \alpha / 2 + \mu_1) \cdot K_3}, \quad (2.9)$$

где μ_1 - коэффициент трения металла шарошки о породу, $\mu_1 = 0,25 \div 1$; K_3 - коэффициент затупления зуба, $K_3 = 1 \div 1,3$ (большее значение для пород более

высокой крепости и абразивности); f - коэффициент формы лезвия коронки (долота).

Под действием силы (рисунок 2.1) [79] лезвие бурового инструмента внедряется, сминая породу на глубину h , обратно пропорциональную прочности породы $\sigma_{сж}$:

Глубина погружения зуба (штыря) при вращательно-ударном бурении рассчитывается по формуле (2.10) [80]:

$$h = \frac{P_{OC}^{y\partial}}{2 \cdot D_{\partial} \cdot \sigma_{сж} \cdot f \cdot (tg \alpha / 2 + \mu_1) \cdot K_3}. \quad (2.10)$$

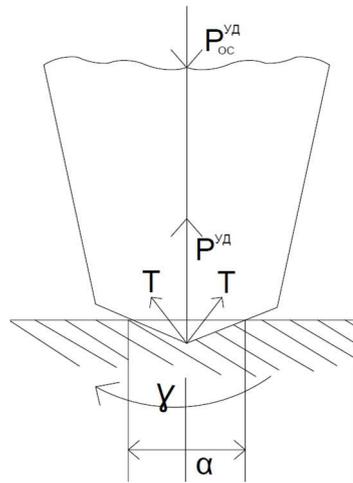


Рисунок 2.1 - Схема разрушения забоя скважины при ударном бурении

Под действием силы $P_{OC}^{y\partial}$ под штырем шарошечного долота возникает сила T , перпендикулярная оси скважины и вызывающая скалывание секторов породы между двумя очередными ударами долота (2.11):

$$T = \frac{P_{OC}^{y\partial}}{2(tg \frac{\alpha}{2} + \mu_1)}; \quad (2.11)$$

Эта сила должна преодолевать прочность породы на скалывание $\sigma_{ск}$, тогда (2.12):

$$T \geq \frac{\pi d^2}{4n} \sigma_{ск}; \quad (2.12)$$

где πd^2 – площадь ударного инструмента (в случае с шарошкой – суммарная площадь одновременно контактирующих с породой зубьев); n – число ударов в минуту.

Отсюда получаем формулу (2.13):

$$P_{OC}^{y\delta} \geq \frac{\pi d^2}{4n} \sigma_{ск} \cdot 2 \left(tg \frac{\alpha}{2} + \mu_1 \right). \quad (2.13)$$

В случае со штырями шарошки, угол заточки будет максимально тупым.

С увеличением осевого усилия за счёт силы удара пропорционально будет увеличиваться глубина погружения, соответственно будет увеличиваться производительность бурения [95].

Усилие должно быть не меньше того, что получится по данной формуле и не более 30 % от осевой нагрузки на шарошечное долото. Регулирование давления в пневмоударнике позволяет изменять силу удара в широком диапазоне, однако предпочтительным является диапазон $(0,15...0,3)P_{oc}$, т.к. указанное превышение осевого усилия не должно приводить к нарушению прочности долота, запас прочности которого существенно выше чем 1,3. Указанное превышение P_{oc} на 30% за счёт воздействия силы удара от ППУ подтверждается (гипотезой профессора Шигина А.О.) о возможном превышении осевого усилия.

2.2 Определение методов повышения эффективности работы ППУ

Для оценки риска, связанного с ударными воздействиями, необходимо определить уровень напряжений, возникающих в результате таких воздействий. Ударная нагрузка характеризуется, с одной стороны, величиной энергии, необходимой для продвижения бурового инструмента через горную породу, а с другой стороны – изменениями физико-механических свойств породы под воздействием этой энергии [65].

На рисунке 2.2 [94] показаны совмещенные графики роста скорости бурения и снижение стойкости шарошки в зависимости от энергии удара ППУ. Из графика видно, что существует критическое значения энергии удара и соответственно силы удара по шарошке, после которых при дальнейшем увеличении энергии удара начинается снижение стойкости шарошки ниже допустимых значений, при этом резко возрастает себестоимость бурения [71].

В том случае, если известны виды графиков зависимости скорости бурения и стойкости долота от энергии удара, то можно выбрать рациональный режим бурения.

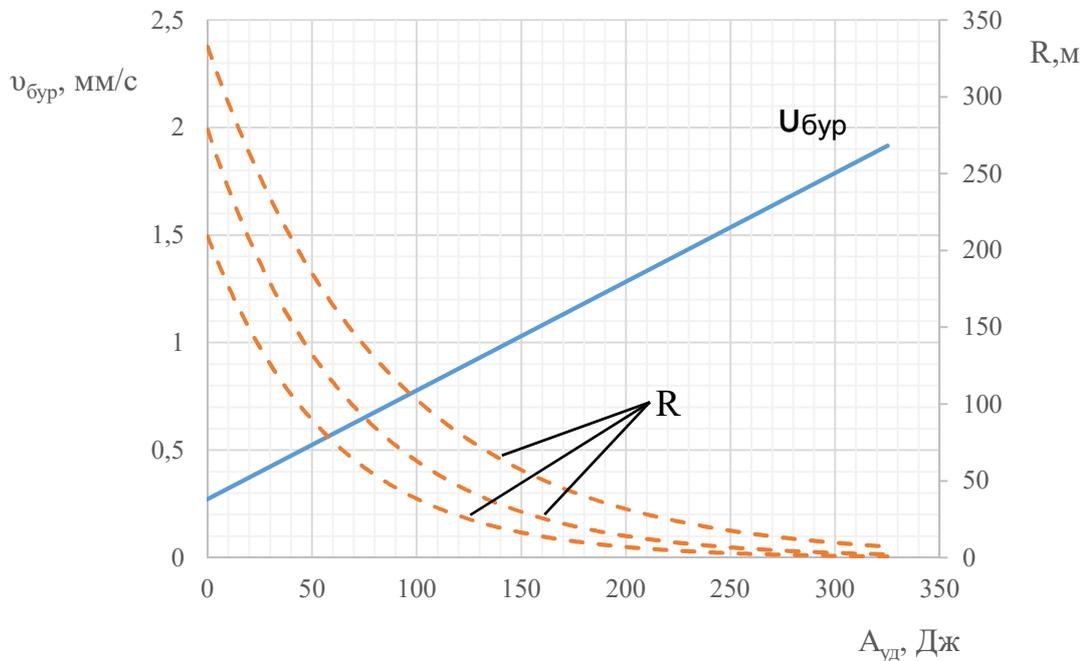


Рисунок 2.2 - Зависимости скорости бурения и стойкости шарошки от энергии удара ППУ

Для примера на рисунке 2.2 представлены результаты, выполненные в соавторстве с Юнгмейстером Д.А. на полигоне в Саблино при исследовании шарошечного долота диаметром 85 мм, осуществляющего бурение гранитного монолита. На рисунке 2.2 для долота диаметром 85 мм показана зависимость изменения скорости бурения от энергии удара [39,41]. При этом использовался стандартный ударник фирмы Хитачи (энергия удара 350 Дж), а также установленный во вращающемся ставе ручной перфоратор с энергией удара – 10 Дж. Таким образом из графика на рисунке 2.2 видно, что скорость бурения может быть увеличена в 10 и более раз (от 0,2 до 2 мм/с). Однако стойкость долота с увеличением энергии удара, наносимого по шарошке, также пропорционально уменьшается [42].

Как указано в работе Шигина А.О. стойкость шарошки в зависимости от крепости и других, указанных выше параметров массива, экспоненциально падает

с увеличением показателя буримости породы, причем стойкость тем интенсивнее падает, чем выше показатель буримости, трещиноватости и количества прослоек на погонный метр скважины [74 -80].

Совмещение трех графиков зависимостей стойкости от буримости пород, стойкости от энергии удара и скорости бурения от энергии удара позволяют, совмещая одинаковые оси, создать номограмму определения зависимости предполагаемой скорости бурения от горно-геологических условий и параметров ППУ [82].

Поэтому весьма актуальной является задача создания ППУ с регулируемой энергией удара [15].

На рисунке 2.3[93] показаны зависимости энергии удара от давления в ППУ для различных диаметров и масс поршня ударника ППУ, из рисунка видно, что можно достичь достаточно высоких значений энергии удара и, соответственно, силы удара. На рисунке 2.4 показано 3- D [91] модель шарошки и ударного механизма с бойком.

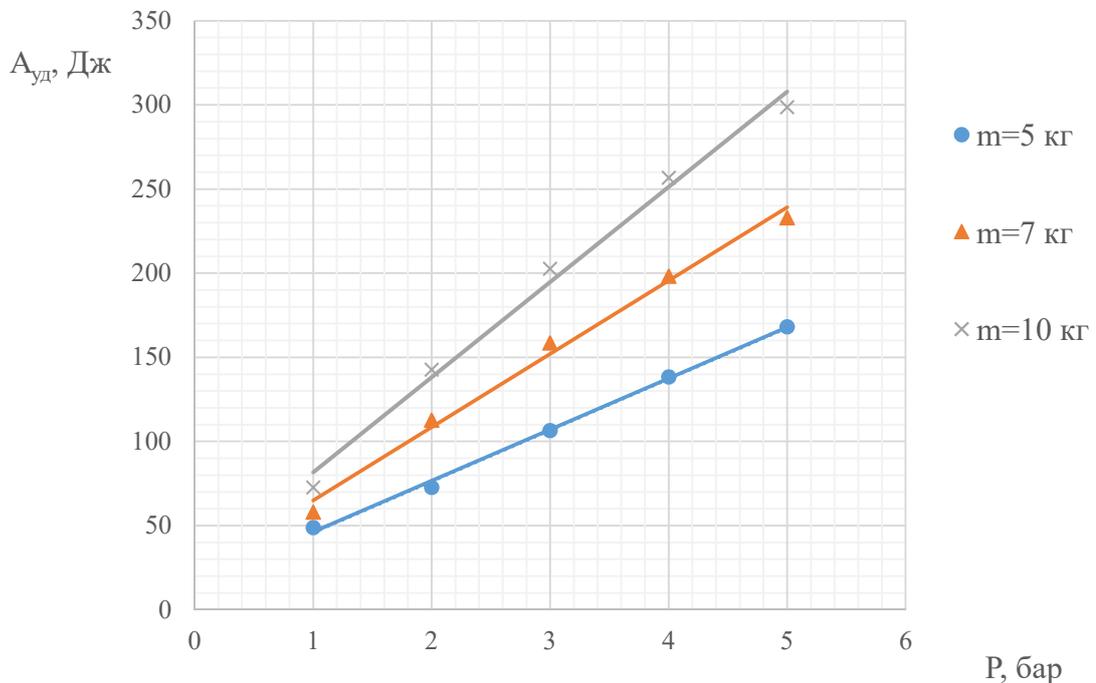


Рисунок 2.3 – Зависимости энергии удара ППУ от давления в рабочей полости пневмоударника

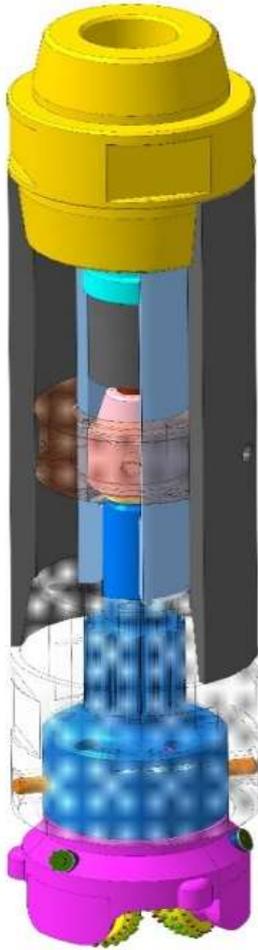


Рисунок 2.4 - 3-D модель шарошки и ударного механизма

Сила удара в соответствии с теоремой сохранения импульсов может быть определена из следующего соотношения [Бутенин с.340] (2.14):

$$m_n \cdot v_n = P_{oc}^{уд} \cdot \tau, \quad (2.14)$$

где m_n – масса поршня, v_n – скорость поршня, τ – время соударения.

Следуя Бутенину Н.В. расчёт силы удара по формуле 2.14 соответствует среднему значению силы, чтобы найти максимальное значение нужно удвоить полученное значение.

Бурение погружными пневмоударниками (ППУ) относится к механическому высокочастотному (10–30 Гц) способу разрушения породного массива [83]. Давление воздуха является основной движущей силой в работе пневмоударника, определяющей его мощностные характеристики (W): E – энергию единичного

удара, Дж и $f_{\text{уд}}$ - частоту ударов, Гц, при обеспечении требуемого объема воздуха для поддержания номинального давления (2.15):

$$W = E f_{\text{уд}} \quad (2.15)$$

С увеличением номинального давления увеличивается энергия единичного удара (2.16) [81]:

$$E = F S_{px} p_{\text{ср}}, \quad (2.16)$$

где F - площадь поршня – ударника со стороны ударного торца, м², S_{px} – рабочий ход ударника, м, $p_{\text{ср}}$ – среднее давление в рабочих камерах пневмоударника, Па (регулируется, например, в зависимости от степени открытия задвижки).

Сокращается время ударного цикла $t_{\text{ц}}$, (с) и происходит увеличение скорости удара – v_y (м/с) по буровому долоту ударником массой m , (кг) (2.17):

$$v_y = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (2.17)$$

Необходимо вычислить предупредную скорость поршня, это возможно сделать из уравнений силы удара.

Сила, оказываемая воздухом на поршень-ударник (2.18):

$$F = p_{\text{ср}} S - p_{\text{ост}} S_{\text{ш}}, \quad (2.18)$$

где S – площадь, на которую приходится рабочее давление воздуха, $p_{\text{ост}}$ – противодействие, создающееся в штоковой части, $p_{\text{ост}} = 0,2$ МПа, $S_{\text{ш}}$ – площадь в штоковой части, $S_{\text{ш}} = 0,010455$

Сила удара поршня-ударника считается по формуле (2.19):

$$F = m_{\text{уд}} a, \quad (2.19)$$

где a – ускорение ударника, приобретаемое им в движении.

При этом время движения поршня может определяться по следующей формуле (2.20):

$$t = \sqrt{\frac{2L_x}{a}}, \quad (2.20)$$

Приравниваем силы: $p_{\text{ср}} S - p_{\text{ост}} S_{\text{ш}} = m a$, отсюда ускорение ударника (2.21):

$$a = \frac{p_p S - p_{ост} S_{ш}}{m} \quad (2.21)$$

Также ускорение ударника равняется (2.22):

$$a = \frac{2L_x}{t^2} \quad (2.22)$$

Приравнивая уравнения получаем (2.23):

$$\frac{2L_x}{t^2} = \frac{p_p S}{m}, \quad (2.23)$$

Получаем время движения поршня-ударника (2.24):

$$t = \sqrt{\frac{2mL_x}{p_p S - p_{ост} S_{ш}}}. \quad (2.24)$$

Предударная скорость (2.25):

$$v_n = at. \quad (2.25)$$

Сила удара (2.26):

$$F_{y\partial} = \frac{m_{y\partial} v_n}{\tau}, \quad (2.26)$$

где τ – время удара.

Указанное значение силы не должно превышать условия: сила удара по шарошке меньше 25% от осевого усилия. Зарубежные рекомендации по выбору и адаптации погружных пневмоударников включают принципы реализации ударно-вращательного бурения, а также правила обслуживания и эксплуатации буровых машин, что способствует повышению качества и эффективности буровых работ [109]. В зарубежной практике особое внимание уделяется оценке износа твердосплавных резцов буровых долот и коронок после бурения скважин и их своевременной заточке. [103]. Сильный износ инденторов буровых долот приводит не только к увеличению времени бурения скважин, но и к повышенному износу компонентов бурового оборудования, таких как погружные пневмоударники и буровые ставни, а также к возрастанию расхода ресурсов [15]. В итоге это приводит к снижению производительности буровых работ и повышению их стоимости [85]. Изменение параметров поршня ударника вызывает значительное изменение ударного импульса, поэтому для каждого стандартного диаметра шарошки и материала его изготовления может быть подобрана конструкция ППУ, в которой реализуются условия сохранения стойкости шарошки.

2.3 Определение конструктивных параметров, обеспечивающих эффективную работу ППУ

На кафедре машиностроения Горного университета при участии автора разработано устройство для эффективного разрушения горных пород с использованием ударных импульсов, включающее породоразрушающий инструмент (шарошечное долото) и ударный механизм, в котором имеется поршень и боек; устройство запатентовано (патент «Устройство для разрушения горных пород ударными импульсами» [52].

Важной особенностью ударного механизма является наличие подпружиненного бойка, размещенного между поршнем и породоразрушающим инструментом, где верхний конец пружин находится в пазах поршня, а нижний конец связан с бойком [86]. Эта конструкция способствует улучшению скорости бурения, долговечности породоразрушающего инструмента и обеспечивает более безопасные рабочие условия [45].

Ударные импульсы, создаваемые в результате воздействия бойка на породоразрушающий инструмент при взаимодействии с поршнем, имеют различные параметры во времени и интенсивности (рисунок 2.5) [92]. В зависимости от настроек массы бойка, поршня, характеристик пружин, можно формировать ударные импульсы различной формы [42,102]. Это позволяет оптимизировать форму импульса для конкретного типа горной породы и породоразрушающего инструмента, что способствует повышению долговечности инструмента и увеличению скорости бурения [91].

Для определения осевого усилия при «сложном» ударе, расчет предлагаемой ударной системы в ППУ необходимо вести, аналогично расчетам, проводимыми для пневматических и гидравлических перфораторов, основанных на теоретических работах Нагаева Р. Ф., Юнгмейстера Д. А., Пиваева В. А. и др [41].

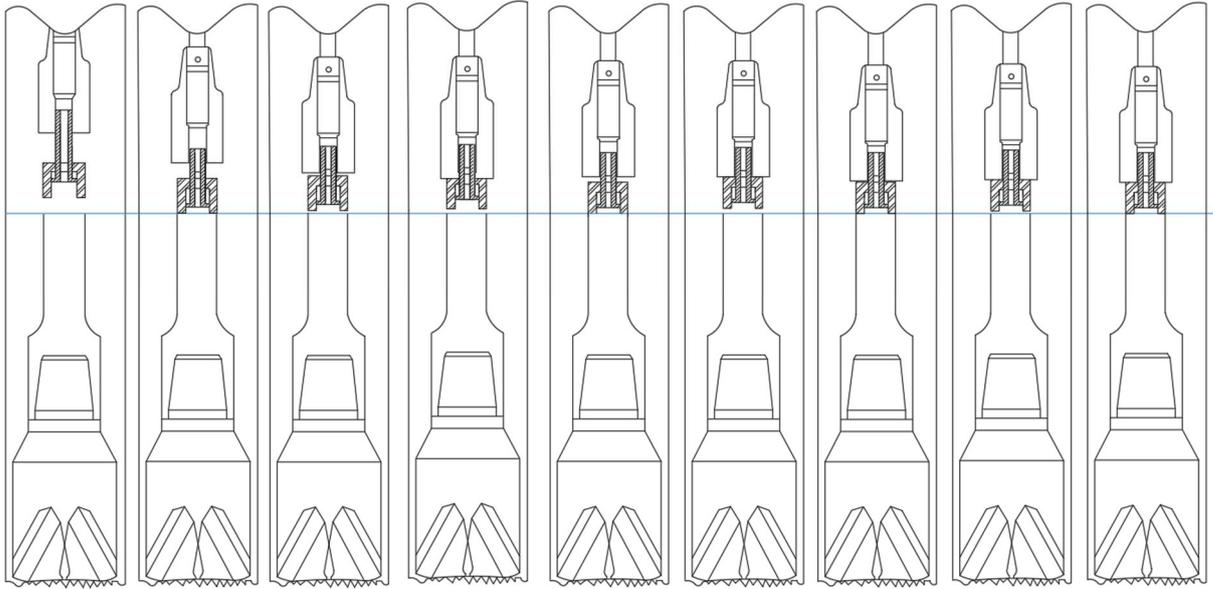


Рисунок 2.5 - Схема перемещения бойка между сближающимися поршнем и шарошечным долотом в погружном пневмоударнике

Было выведено соотношение масс элементов ударной системы. Если предположить, что m_1 - масса переходника с долотом; m_2 - масса, равная сумме масс бойка m' и поршня-ударника $m_{\text{п}}$ ($m_2 = m' + m_{\text{п}}$), тогда отношение масс элементов ударной системы $m_{\text{п}}:m':m_1$ будет соответствовать 40:1:200.

Исходя из этого соотношения, введя некоторые коэффициенты: $\mu = \frac{m'}{m_2}$ - коэффициент, характеризующий отношение массы бойка к совместной массе поршня-ударника и бойка; $\nu = \frac{m_2}{m_1}$ - коэффициент, характеризующий отношение массы сдвоенного ударника к массе переходника с долотом; а так же используя R - коэффициент восстановления скорости при соударении бойка между переходником и поршнем-ударником, показывающий то, на сколько удар упругий, получим следующий график (рисунок 2.6) [54] области существования «дребезга».

Коэффициент R , характеризуется исключительно материалом, из которого изготовлены элементы ударной системы. При нормальных условиях для соударения стальных изделий он равняется 0,56, но может принимать большие значения при соударении тел из стали и легированных сплавов [16,32].

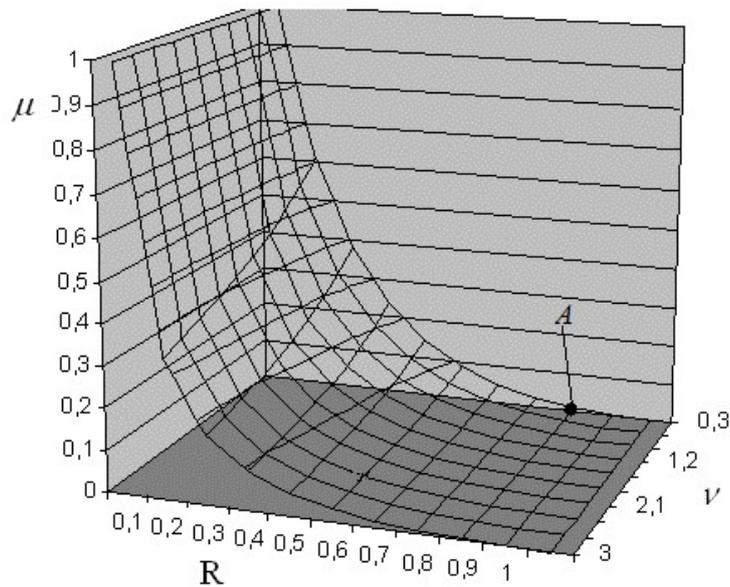


Рисунок 2.6 - График зависимости функции μ от переменных R и ν

Соотнося массы элементов ударной системы в предлагаемом ППУ таким образом, чтобы соответствовать точке А на области существования «дребезга», коэффициент восстановления скорости R будет составлять 0,85. Зная массу поршня-ударника $m'_2 \approx 5$ кг и переходника с долотом $m_1 \approx 60$ кг, можно вывести приблизительную массу бойка по формуле (2.27) [86].

$$\begin{cases} m' = m_1/200 \\ m_{\text{п}} = 40 \cdot m' \end{cases} \quad (2.27)$$

В зависимости от таких параметров, как масса бойка, масса и ход поршня, давление воздуха перед шарошкой следует ожидать устойчивое протекание процесса дребезга, которое зависит от параметрического соотношения коэффициента восстановления скорости и отношения масс бойка и ударной системы (рисунок 2.6) [13]. Устойчивое протекание процесса дребезга для указанных выше соотношений (формула 2.27) соответствует точке А на графике рисунка 2.6, эта точка определяет предельное значение μ . В соответствии с указанным выше соотношением для тяжёлых ударников ($m_{\text{п}} > 5$ кг) отношение массы бойка и поршня должны составлять 0,02. Создание множественных микроимпульсов позволяет создать суммарный ударный импульс любой формы.

Изменение коэффициента α не будет происходить, так как увеличение длины бурового става не будет влиять на ударную систему из-за установки ППУ в первую штангу [17].

Изменяя массу сдвоенного ударника ($m_2 = m' + m_{\Pi}$) и расстояние между поршнем-ударником и переходником с долотом найдем скорость движения поршня по формуле (2.28) [87]:

$$\begin{cases} A_{уд} = (P_p + m_2 \cdot g) \cdot h_n \\ A_{уд} = \frac{m_2 \cdot v_{\Pi}^2}{2} \end{cases}, \quad (2.28)$$

где h_n - ход поршня ($h_n = 50$ мм для ППУ М-48); P_p - движущее усилие на поршне; v_{Π} - скорость движения поршня.

Скорость поршня будет влиять на усилие от удара (2.29):

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_p + m_{\Pi} g) \cdot h_n}{m_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_p \cdot h_n}{m_{\Pi}} + g \cdot h_n}, \text{ м/с} \quad (2.29)$$

Возникающие усилия на поршне при прямом и обратном ходе (2.30):

$$P_p = (S_{\Pi} P_c - S_o P_B) \cdot k_1, \quad (2.30)$$

где S_{Π} - полезная площадь поршня при прямом ходе; S_o - полезная площадь поршня при обратном ходе; P_c - давление в сети ($P_c = 0,54$ МПа); P_B - давление на выхлопе ($P_c = 0,11$ МПа); k_1 - потери на трение ($k_1 = 0,9$).

$$P_B = (S_o P_c - S_{\Pi} P_B) \cdot k_2, \quad (2.31)$$

где k_2 - потери на трение и на сопротивление трению бура ($k_2 = 0,65$), формула (2.31).

Для использования стандартного ППУ М-48 рассчитываются усилия, возникающие на поршне и скорости прямого и обратного хода:

$$P_p = (0,002 \cdot 0,54 \cdot 10^6 - 0,0023 \cdot 0,11 \cdot 10^6) \cdot 0,9 = 744,3 \text{ Н};$$

$$P_B = (0,0023 \cdot 0,54 \cdot 10^6 - 0,002 \cdot 0,11 \cdot 10^6) \cdot 0,65 = 664,3 \text{ Н};$$

$$v_{\Pi,p} = \sqrt{\frac{2 \cdot (744,3 + 5 \cdot 9,81) \cdot 0,05}{5}} = 3,98 \text{ м/с}; v_{\Pi,б} = \sqrt{\frac{2 \cdot (664,3 + 5 \cdot 9,81) \cdot 0,05}{5}} = 3,73 \text{ м/с}.$$

Для соблюдения условия существования дребезга, следует увеличить размеры поршня и диаметра корпуса ППУ. Таким образом, усилие, возникающее

на поршне будет возрастать из-за увеличения полезных площадей. И будут составлять [77,78]:

$$P_p = (0,004 \cdot 0,54 \cdot 10^6 - 0,0046 \cdot 0,11 \cdot 10^6) \cdot 0,9 = 14886H;$$

$$P_g = (0,0046 \cdot 0,54 \cdot 10^6 - 0,004 \cdot 0,11 \cdot 10^6) \cdot 0,65 = 13286H.$$

Результаты расчетов для прямого хода поршня-ударника приведены в таблице 2.5 [95].

Таблица 2.5 – Расчетные данные ударной системы с ППУ

P_{OC}^{y0} , кН	v_n , м/с	h_n , м	m_n , кг	m' , кг	m_2 , кг	m_1 , кг
20180	3,94	0,05	5	0,125	5,125	60
22106	4,31	0,06				
23877	4,66	0,07				
25526	4,98	0,08				
27074	5,28	0,09				
28538	5,57	0,1				
103592	14,44	0,05	7	0,175	7,175	
113479	15,82	0,06				
122571	17,08	0,07				
131034	18,26	0,08				
138983	19,37	0,09				
146501	20,42	0,1				
117541	12,74	0,05	9	0,225	9,225	
128759	13,96	0,06				
139076	15,08	0,07				
148679	16,12	0,08				
157697	17,09	0,09				
166228	18,02	0,1				
130033	11,53	0,05	11	0,275	11,275	
142444	12,63	0,06				
153858	13,65	0,07				
164481	14,59	0,08				
174458	15,47	0,09				
183895	16,31	0,1				
135861	11,05	0,05	12	0,3	12,3	
148828	12,10	0,06				
160753	13,07	0,07				
171852	13,97	0,08				
182277	14,82	0,09				
192136	15,62	0,1				

Как показывают конструкторские проработки и расчеты в результате модернизации СБШ следует ожидать рост скорости бурения, повышение срока

службы элементов ударной системы, при этом расчетные показатели следует проверить в реальных условиях [94].

Изменение площади поршня-ударника, существенно влияет на увеличение ударной скорости, причем скорость поршня-ударника массой 7 кг (с повышенной площадью сечения, на которую действует сжатый воздух) в сравнении со скоростью ударника массой 5 кг (со стандартной площадью сечения ударника М-48) увеличивается с 5 м/с до 12 м/с, поэтому снижение ударной скорости может быть предусмотрено путем оптимизации сечения поршня или уменьшением величины хода поршня [40,106]. Рациональные соотношения масс и сечений поршня ударника, а также величины хода поршня-ударника будут рассмотрены при проведении дальнейших исследований, в том числе экспериментальных [25]. При этом, оперируя параметрами элементов ударной системы, можно подобрать их таким образом, чтобы обеспечить повышение эффективности разрушения породы до 25-30% [88].

В таблице 2.6 [93] даны два варианта требуемых параметров ударных систем для стенда и для проектируемого станка.

Таблица 2.6 – Конструктивные характеристики

Параметры	Стенд		Станок	
	Диаметр долота	75мм		244 мм
Стандартное усилие подачи, регламентированное заводом-изготовителем	30 кН		240 кН	
Сила удара	5- 10 кН		50- 80 кН	
Скорость соударения поршня с шарошкой	3-8 м/с			
Масса поршня-ударника	0,2-1 кг	5 кг	9 кг	12 кг
Масса бойка	0,01-0,02 кг	0,1 кг	0,18 кг	0,3 кг

Существенной проблемой качественной работы трехмассовых ударных систем является подбор материала для бойка, который работает в режиме знакопеременных напряжений высокого уровня [92]. Поэтому после проведения экспериментальных исследований опытных образцов ППУ с трехмассовой

системой следует осуществить выбор материала бойка. Предположительно это могут быть титановые сплавы с легирующими добавками либо модификации победита.

2.5 Методика расчета СБШ и погружного пневмоударника с учетом основных расчетных параметров

Как показали ранее выполненные исследования по определению скорости бурения станком СБШ с ППУ прирост скорости в сравнении с бурением стандартным станком находится в интервале (15-25) % [92,99], по данным Secogoc указанный прирост может составлять до 50% при использовании специальных шарошек.

Определение средней скорости бурения при выполнении допущения о возможности использования принципа аддитивности расчётных величин скорости бурения обычным станком СБШ и скорости бурения погружным пневмоударником производится по формулам (2.32), (2.33) и (2.34) [84]:

$$v_{\text{ср}} = v_0 + v_{\text{ппу}}, \quad (2.32)$$

$$v_0 = 14400 \frac{P_k * n}{P_{\text{кон}} * D}, \quad (2.33)$$

где P_k - осевое усилие на долото при бурении, МН; n – частота вращения штанги, с^{-1} ; $P_{\text{кон}}$ – контактная прочность буримых пород, МПа.

$$P_{\text{кон}} = 44\sqrt{f^3}, \quad (2.34)$$

$$v_0 = 14400 \frac{P_k * n}{44\sqrt{f^3} * D}. \quad (2.35)$$

Можно утверждать, что скорость бурения погружным пневмоударником, также как и формула (2.35), определяется по методикам Иванова К.И. (2.36) [26]:

$$v_{\text{ппу}} = \frac{80 * A_{\text{уд}} * n_{\text{у}}}{f * d^2}, \quad (2.36)$$

где $A_{\text{уд}}$ – энергия единичного удара, $A_{\text{уд}} = (150 - 300)$ Дж (для примера расчёта принимается погружной пневмоударник П-110), $n_{\text{у}}$ – частота ударов, $n_{\text{у}} =$

22 с^{-1} , d - диаметр скважины, мм, f – коэффициент крепости горной породы по шкале проф. М.М.Протоdjeяконова.

Бурение станками СБШ с ППУ кроме чисто ударного воздействия на забой, повышающего скорость бурения [14], может давать повышенную скорость бурения (до 50%) за счёт: более плотного прилегания шарошки к забою, очищения породоразрушающих элементов от штыба, возможного повышения трещиноватости забоя, улучшения отвода штыба из призабойной зоны, улучшения условий продувки и других условий работы шарошки при нанесении по ней ударов. В этом случае можно утверждать, что простое суммирование формул 2.34 и 2.36 будет давать заниженные результаты расчёта скорости бурения, поэтому для выхода на экспериментальные показатели скорости бурения возможно использование двух вариантов коэффициентов повышения скорости бурения: k_1 – коэффициент прироста скорости бурения погружным пневмоударником, k_2 – коэффициент прироста суммарной скорости бурения. Данные расчёта скорости бурения представлены в таблице 2.7 [90].

Таблица 2.7 – Данные расчета скорости бурения в СБШ

f	R_k , МН	D , м	n , с^{-1}	$R_{\text{кон}}$, МПа	$v_{\text{сбш}}$, м/час
6	0,2	0,25	1,3	646,7	23,16
7				814,9	18,38
8				995,6	15,04
9				1188,0	12,61
10				1391,4	10,76
11				1605,2	9,33
12				1829,0	8,19
13				2062,4	7,26
14				2304,9	6,50
15				2556,2	5,86
16				2816,0	5,32
17				3084,1	4,86
18				3360,2	4,46
19	3644,0	4,11			
20	3935,5	3,81			

В этом случае расчетные зависимости скорости бурения с учётом коэффициента k_1 (формула 2.37) или коэффициента k_2 формула (2.38) имеют вид:

$$v_{\text{общая}} = v_{0 \text{ СБШ}} + k_1 * v_{\text{ппу}}. \quad (2.37)$$

$$v_{\text{общая}} = (v_{0 \text{ СБШ}} + v_{\text{ппу}})k_2. \quad (2.38)$$

На графике (рисунок 2.7) [89] представлены зависимости скорости бурения стандартным станком СБШ (нижний график), а также зависимости скорости бурения, рассчитанные с учётом различных подходов учёта эффективности бурения СБШ с ППУ. Из графиков на рисунке 2.7 [92] видно, что использование формулы (35), в которой $A_{\text{уд}} = 150$ Дж, а коэффициент k_1 равен 1,3, даёт незначительный прирост скорости бурения, около 5 %, что не соответствует экспериментальным данным, а графики, построенные по формулам (2.37) и (2.38) фактически сливаются. При увеличении энергии до предельного значения 300 Дж происходит увеличение скорости бурения до величины 10 %. Это даёт основание считать, что необходимо пользоваться формулой (2.36), так, для коэффициента k_2 , равного 1,2 и энергии удара 150 Дж, прирост скорости бурения составит около 25%.

Изменение коэффициента k (от 1,0 до 1,3) при расчёте скорости бурения горных пород с помощью ППУ определяется в результате экспериментальных исследований. Использование трёхмассовых ударных систем в ППУ, способствующее увеличению эффективности бурения, позволяет предполагать, что $k > 1$ и ориентировочно может быть оценен 1,2.

Величина потока воздуха в ППУ, управляемая заслонкой, влияет на эффективность бурения. Это улучшает условия работы шарошки и интенсифицирует разрушение забоя. Новая конструкция радиоуправляемой заслонки с ППУ обеспечивает широкий диапазон регулирования частоты удара по шарошке. Использование поршней ударников различной конструкции и, соответственно, массы позволяет создать универсальный ППУ с большим диапазоном параметров удара [88,92].

Добавление коэффициентов k , которые варьируются от 1 до 1,3, при расчёте скорости бурения горных пород с помощью ППУ, а также использование

трёхмассовых ударных систем, отражает увеличение эффективности бурения, благодаря оптимизированной передаче ударной энергии.

Увеличение скорости бурения в среднем на 25% является значительным преимуществом, особенно в условиях сложно-структурированных пород, как, например, в случае со вскрышными породами, разрабатываемыми АО «Апатит».

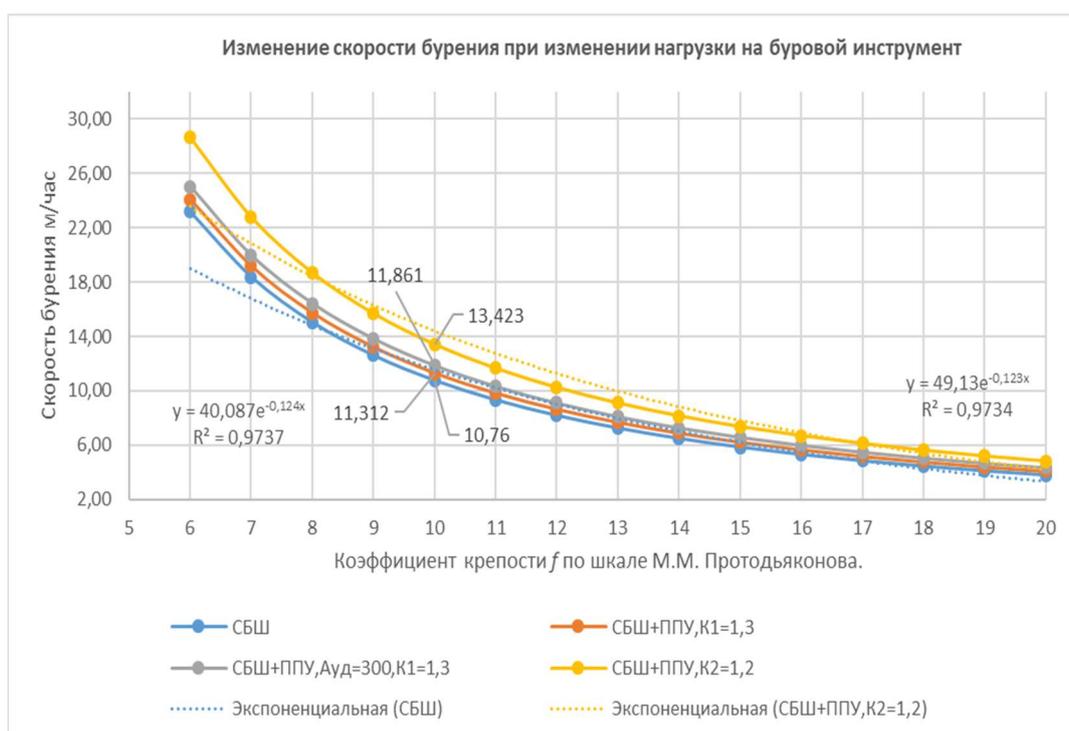


Рисунок 2.7 - Изменение скорости бурения при изменении нагрузки на буровой инструмент

Такие улучшения не только повысят эффективность работы, но и могут сократить общие затраты на бурение за счет уменьшения времени, необходимого для прохождения сложных участков [28]. Это также может повлиять на снижение износа бурового оборудования, так как более эффективная передача ударной энергии не превысит стандартную нагрузку на буровой инструмент.

2.6 Вывод по главе 2

Теоретические исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В результате морфологического анализа процесса бурения СБШ получены рекомендации по возможным путям совершенствования конструкции бурового станка. Одним из наиболее существенных направлений является

использование погружного пневмоударника для СБШ, в конструкции которого может быть применена трехмассовая ударная система.

2. Использование регулируемой задвижки для дросселирования потока воздуха и изменения величины давления в диапазоне от 0,2 до 0,8 МПа представляется эффективным методом для оптимизации работы ударной системы при бурении. Это позволяет адаптировать энергию удара к различным типам пород, что в свою очередь может улучшить производительность буровой установки. Изменение режимов работы пневмоударника обеспечивают возможность настройки ударной системы под конкретные условия бурения.

3. Разработана методика расчета силы удара в зависимости от давления в ППУ и его конструктивных параметров. Регулирование давления в пневмоударнике позволяет изменять силу удара в широком диапазоне, однако предпочтительным является диапазон $(0,15 \dots 0,3)P_{oc}$.

4. Использование системы «поршень-боек-инструмент» в бурении можно считать эффективным по причинам: повышение скорости бурения; увеличение энергии удара на забое. В зависимости от параметров: масса бойка, масса и ход поршня, давление воздуха перед шарошкой следует ожидать устойчивое протекание процесса дребезга, которое зависит от параметрического соотношения коэффициента восстановления скорости и отношения масс бойка и ударной системы. В соответствии с указанным выше соотношением для тяжёлых ударников ($m_n > 5$ кг) отношение массы бойка и поршня должны составлять 0,02. Создание множественных микроимпульсов позволяет создать суммарный ударный импульс любой формы.

5. Получены теоретические зависимости скорости бурения от крепости породы, установлены параметры дополнительных коэффициентов, позволяющих считать, что простое суммирование величин скорости бурения от осевого усилия и от воздействия на шарошку ППУ требует учета их взаимного влияния и повышения значения скорости бурения не менее чем на 25%.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ППУ

Одним из ключевых аспектов эксперимента было исследование динамических характеристик удара, как с использованием бойка, так и без него. Эти исследования были направлены на выявление различий в передаче энергии удара в зависимости от наличия или отсутствия бойка. Для этого была разработана специальная методика, включающая в себя измерение параметров удара, таких как сила и продолжительность воздействия. Важным элементом исследования было также изучение ударной волны, образующейся при ударах с бойком и без него, для оценки её влияния на исследуемые объекты. Экспериментальные исследования проводились с использованием специализированного оборудования, которое позволяло точно фиксировать все необходимые параметры. При ударах с бойком учитывались особенности конструкции и материалы, используемые для изготовления бойка, а также его взаимодействие с исследуемыми объектами. В свою очередь, исследования без бойка предоставили данные о поведении системы при непосредственном контакте ударного элемента с объектом. Сравнительный анализ полученных результатов позволил сделать выводы о влиянии бойка на эффективность и характер ударных воздействий, что является важным для оптимизации конструкций и улучшения эксплуатационных характеристик систем.

Экспериментальные исследования влияния на поток воздуха задвижки. В дополнение к исследованиям ударных воздействий, был проведен комплекс экспериментов, направленных на изучение влияния задвижки на поток воздуха. Эти эксперименты включали в себя анализ изменения параметров воздушного потока при различных положениях задвижки. Для этого была разработана методика, предусматривающая измерение скорости и давления воздушного потока до и после прохождения через задвижку. Использование стендовой установки позволило моделировать различные режимы работы задвижки и фиксировать изменения в параметрах воздушного потока. Полученные данные были проанализированы для определения оптимальных условий работы задвижки, а также для выявления факторов, влияющих на эффективность её функционирования. Результаты этих исследований стали основой для

последующих рекомендаций по улучшению конструкций и методов регулирования задвижек.

Особое внимание в рамках данной работы уделялось моделированию поведения конструкции шарошечного долота при различных типах нагрузок. Метод конечных элементов (МКЭ) использовался для анализа напряженно-деформированного состояния долота под воздействием как динамических, так и статических нагрузок. Моделирование позволило оценить прочностные характеристики долота, выявить критические зоны и определить оптимальные параметры конструкции.

3.1 Методика проведения исследований на степень открытия задвижки.

Для исследования величины снижения давления за регулируемой задвижкой перед ППУ модернизирован лабораторный стенд Санкт-Петербургского Горного Университета (рисунок 3.1) [92].

Порядок выполнения исследований на стенде:

Потери давления в местном сопротивлении могут быть определены по следующей формуле (3.1) [92]:

$$\Delta P_{\text{задвигки}} = \zeta \rho v^2 / 2, \quad (3.1)$$

где ζ - коэффициент местного сопротивления задвижки; ρ - плотность несущей среды (воздух), $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; v - средняя скорость воздуха, м/с.

Для определения коэффициента местного сопротивления задвижки (3.2) выразим его из формулы (3.1) [92]:

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2}, \quad (3.2)$$

В формуле (3.2) имеется два неизвестных параметра, которые можно определить экспериментально на стенде.

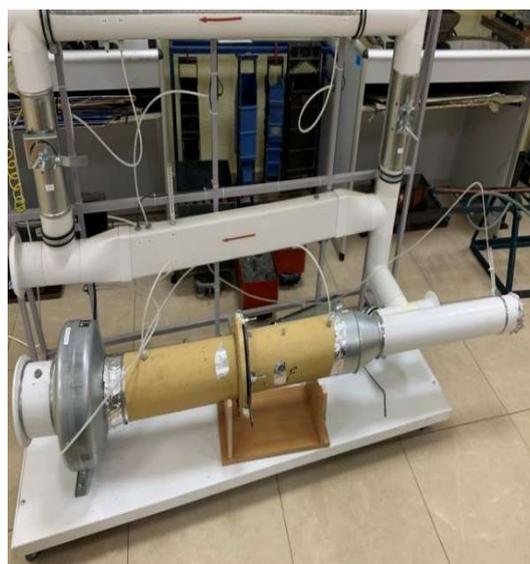
Результаты замеров представлены в таблице 3.1 [92].

Порядок выполнения исследований на стенде:

1. Включается установка, устанавливается задвижка в положение, соответствующее максимальной степени открытия (полностью открыто);
2. Снимаются показания измерительных приборов: $dP-1$, $dP-2$, $P-1$ (рисунок 3.2) и заносятся в таблицу 3.1;
3. Изменяется положение задвижки (шаг закрытия должен быть таким, чтобы обеспечить 20 промежуточных положения до полного закрытия);
4. Повторяются замеры указанные в п.2. и вносятся в таблицу 3.1;
5. Рассчитывается значение средней скорости по формуле $v = \sqrt{2 \frac{dP-2}{\rho}}$ и вносится в таблицу 3.1;
6. Рассчитывается коэффициент ζ по формуле (3.1), причем $\Delta p = dP1 - P1$



А)



Б)

Рисунок 3.1 - Модернизированный лабораторный стенд

Таблица 3.1 - Протокол испытания потерь давления на задвижке

№ п/п	Положение задвижки (степень открытия - n)	Показания манометра $dP-1$ (перед задвижкой), Па	Показания манометра $P-1$ (после задвижки), Па	Показания трубки Пито $dP-2$, Па	Средняя скорость потока v , м/с	Коэффициент местного сопротивления задвижки, ζ
1	0,9	150	165	102	12,9	0,058237
2	0,8	136	127	76	11,1	0,159098
3	0,7	150	115	71	10,8	0,434641
4	0,6	194	102	64	11,2	1,1874

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Положение задвижки (степень открытия - n)	Показания манометра dP-1 (перед задвижкой), Па	Показания манометра P-1 (после задвижки), Па	Показания трубки Пито dP-2, Па	Средняя скорость потока v , м/с	Коэффициент местного сопротивления задвижки, ζ
5	0,5	189	73	52	9,3	3,243867
6	0,4	246	67	51	8,9	8,861943
7	0,3	315	5	10	6,4	24,21001
8	0,2	320	3	8	3,6	66,13949
9	0,1	324	2	6	2,1	180,687
10	0,05	330	1	1	1,3	298,6481
11	0,04	339	2	1	1,3	330,2223
12	0,03	345	2	1	1,3	365,1346
13	0,02	351	2	1	1,3	403,7379
14	0,01	361	1	1	1,3	446,4226

По данным, полученным в ходе эксперимента, можно построить зависимость вида $\zeta = f(n)$, т.е. зависимость коэффициента местного сопротивления задвижки от степени открытия задвижки.

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости $\Delta p = f(n)$ и $\zeta = f(n)$, представленные на рисунке 3.2 [92].

В результате аппроксимации функции $\zeta = f(n)$, была получена эмпирическая формула для определения коэффициента местного сопротивления задвижки (3.3):

$$\zeta = 493,62e^{-10,05n} \quad (3.3)$$

Таким образом, полученная формула позволяет определить положение задвижки, соответствующее заданному перепаду давления (коэффициенту местного сопротивления) с целью регулирования силы удара на исполнительном органе [86,88]. Пример расчета дан в главе 4.

В процессе бурения вертикальных скважин в массивах крепких пород, таких как гранит, важно обеспечить эффективное управление пневмоударником для поддержания высокой скорости и качества работ. Для этого необходимо точно настраивать степень открытия или закрытия задвижки, что влияет на давление в пневмоударнике и, соответственно, на силу удара поршня по хвостовику шарошки.

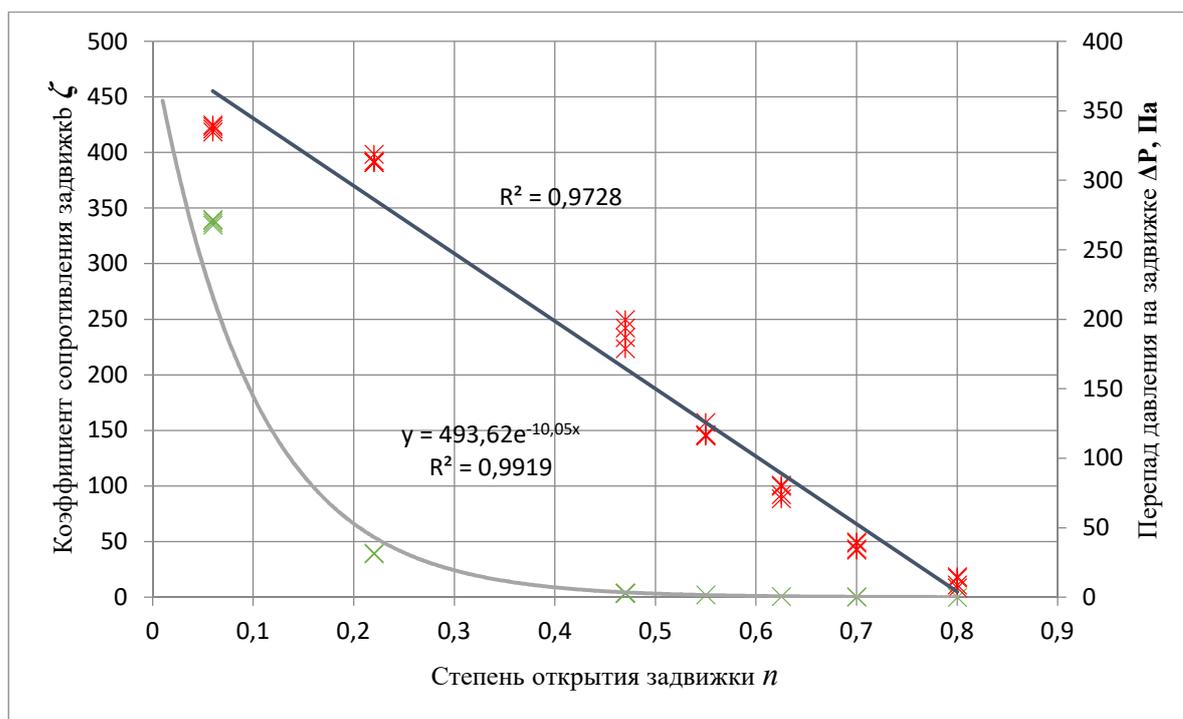


Рисунок 3.2 - Зависимость коэффициента местного сопротивления задвижки и падения давления от степени открытия задвижки

Механизм управления заслонкой начинает свою работу с получения сигнала от машиниста через систему блока управления с монитором. Сигнал передается через антенну на ретранслятор, оттуда - на приемно-передающее устройство, а затем на блок управления заслонкой. При получении команды "Открытие" переключатель срабатывает, активируя привод червячного механизма, который открывает заслонку. Это позволяет увеличить объем воздуха, поступающего в пневмоударник, и повысить скорость бурения.

После включения пневмоударника процесс бурения стабилизируется, увеличивается скорость просверливания, нормализуется уровень вибрации, а также устраняются проблемы, такие как подклинивание шарошки в скважине или образование подушки буровой мелочи на забое [93]. Важно отметить, что энергия удара и частота ударов пневмоударника зависят от степени открытия заслонки, что позволяет регулировать силу удара в зависимости от требований процесса. Однако для уменьшения скорости бурения может потребоваться закрытие заслонки. Это снижает объем воздуха, поступающего в пневмоударник, и, как следствие, силу

удара поршня. Такой подход позволяет адаптировать процесс бурения к изменяющимся условиям и обеспечить оптимальные результаты.

Теоретические расчеты параметров воздушного потока в пневмоударнике являются сложной задачей из-за необходимости учета потерь давления на задвижке и в подводящих каналах [92]. Для нормальной работы пневмоударника требуется разработка специальных конструкций, например, с дополнительными каналами в муфтах для обеспечения устойчивого срабатывания воздушного клапана. Таким образом, оптимальное управление заслонкой пневмоударника играет ключевую роль в процессе бурения гранитных скважин, обеспечивая эффективность и безопасность работ [94].

Установление определенной величины степени открывания задвижки и, соответственно, определенной величины давления в ППУ позволяет снижать (или увеличивать) силу удара поршня ППУ по хвостовику шарошки. Ранее было установлено, что величина этой силы не должна превышать 20% от осевого усилия. Наличие ППУ с определенной силой удара позволяет повысить скорость бурения на 20-25% от номинальной. При этом включение/выключение ППУ позволяет также устранять заклинивание шарошки, способствует очищению лезвия шарошки от налипшего штыба, тем самым способствует улучшению работы СБШ в целом [76].

Правильное использование этой системы позволяет повысить производительность и качество бурения, что является важным условием успешного завершения проектов по бурению скважин в сложных горных условиях

3.2 Экспериментальное исследование характеристик трехмассовой ударной системы для ППУ

Постановка задачи экспериментального исследования

В соответствии с поставленной в работе целью и задачами необходимо провести следующие стендовые исследования [38]:

- разработка и изготовление стендовой установки для сравнительного изучения процесса удара цельным (цельнометаллическим) ударником и ударником

с бойком, разделенным с ударником регулируемым по величине зазором d (рисунок 3.4) [89];

- разработка методики проведения экспериментальных исследований;
- исследование процесса вертикального удара под действием силы тяжести цельного ударника и ударника с бойком в зависимости от энергии удара (высота подъема ударника) и величины зазора [39];
- обработка осциллограмм ударов, полученных в результате проведения экспериментальных исследований (рисунок 3.3) [89];
- анализ результатов стендовых экспериментов.

Постановка задачи экспериментального исследования [44]

В соответствии с поставленной в работе целью и задачами необходимо провести следующие стендовые исследования [13]:

- разработка и изготовление стендовой установки для сравнительного изучения процесса удара цельным (цельнометаллическим) ударником и ударником с бойком, разделенным с ударником регулируемым по величине зазором d ;
- разработка методики проведения экспериментальных исследований;
- исследование процесса вертикального удара под действием силы тяжести цельного ударника и ударника с бойком в зависимости от энергии удара (высота подъема ударника) и величины зазора;
- обработка осциллограмм ударов, полученных в результате проведения экспериментальных исследований;
- анализ результатов стендовых экспериментов.

При реализации метода в качестве контролируемых параметров, характеризующих удар, выбраны амплитуда импульса (первый импульс в последовательности), его ширина и площадь, а для ударника с бойком, кроме перечисленных, амплитуда, ширина по уровню 0,5 и площадь предимпульса [31,38].

Рассматривается первый импульс в последовательности, к его параметрам относятся следующие: $\Delta\tau_1$ - длительность фронта, A_1 - амплитуда, $\Delta\tau_2$ - ширина импульса по уровню 0,5 [89].



Рисунок 3.3 - Экспериментальный стенд

Также рассматривается предимпульс, под которым понимается на графике импульс реакции бояка малой амплитуды, предшествующий во времени первому импульсу в последовательности. К анализируемым параметрам предимпульса относятся: $\Delta\tau_1^0$ - длительность фронта, A_1^0 - амплитуда, $\Delta\tau_2^0$ - ширина предимпульса по уровню 0,5.



Рисунок 3.4 - Вес ударника-бойка

Результаты экспериментальных исследований показаны на таблицах 3.2, 3.3, 3.4. Остальные импульсы последовательности анализу не подвергаются, поскольку представляют собой суммарную реакцию опоры и ударника [89,91].

Таблица 3.2 - Таблица ударника бойка

Удар с зазором, 3мм	$\Delta\tau_1$, мс	$\Delta\tau_2$, мс	A1, В	S1	$\Delta\tau_1'$, мс	A_1^0 , мс	S1'
	0,64	0,64	4,40	2,8	0,82	0,1	0,08
	0,41	0,41	4,20	1,7	1,22	0,1	0,10

Средняя площадь ударника с бойка = 2,35

$\Delta\tau_1$ – протяженность фронта ударника;

$\Delta\tau_2$ - длина интервала ударника;

$\Delta\tau_1'$ – протяженность фронта бойка;

S1 – площадь бойка;

A_1^0 - амплитуда бойка;

S1' - площадь бойка

Таблица 3.3 - Таблица ударника бойка

Удар с зазором, 7мм	$\Delta\tau_1$, мс	$\Delta\tau_2$, мс	A1, В	S1	$\Delta\tau_1'$, мс	A_1^0 , мс	S1'
	0,48	0,48	7,11	3,44	1,13	0,13	0,15
	0,22	0,28	6,50	1,82	0,4	0,5	0,2
	0,35	0,31	9,25	2,89	1,33	0,38	0,5
	0,34	0,34	10,40	2,92	0,83	0,38	0,27

Средняя площадь равна уданика с бойком равна =3,31

Таблица 3.4 - Таблица цельного удара

Цельный удар	$\Delta\tau_1$, мс	$\Delta\tau_2$, мс	A1, В	S1
	0,22	2	4,40	2,03
	0,143	0,22	4,20	1,33

Средняя площадь цельного удара = 1,68

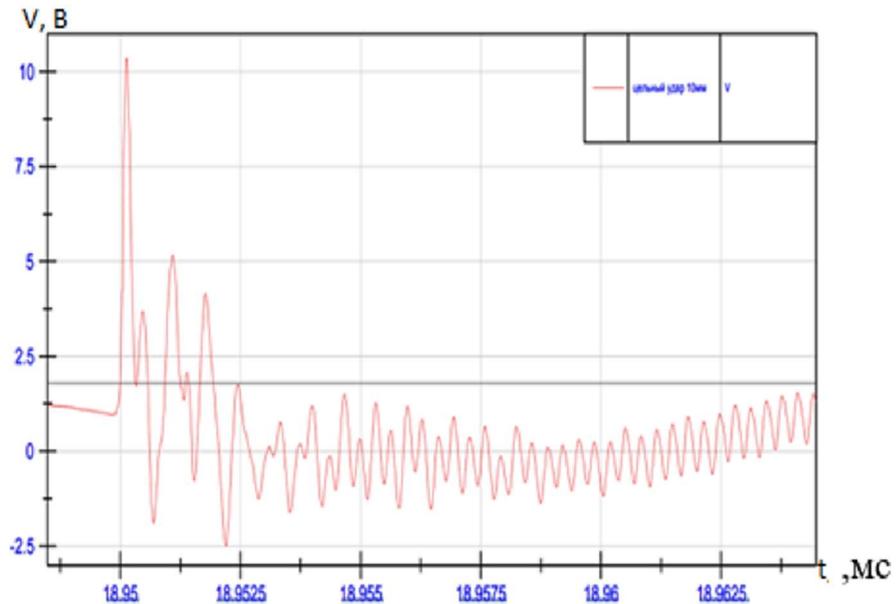
$\Delta\tau_1$ - протяженность основного фронта ударника;

$\Delta\tau_2$ - длина интервала ударника;

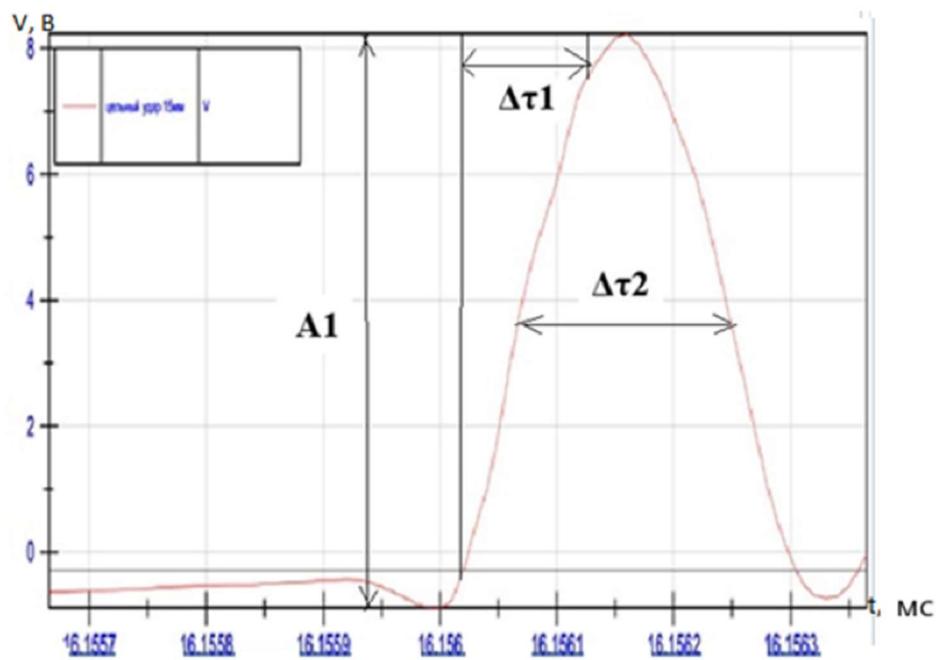
A_1 - амплитуда колебаний;

$S_1 = \Delta\tau_2 * A_1$ – площадь;

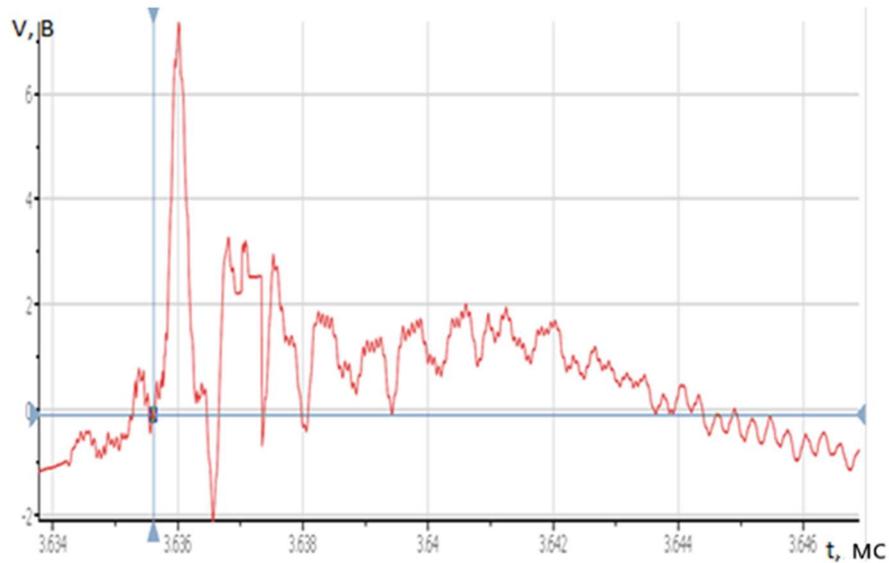
На рисунке 3.5 а, б показан график импульса удара цельным цилиндром, рисунок 3.4 в и г показан удар цилиндра с бойком [89].



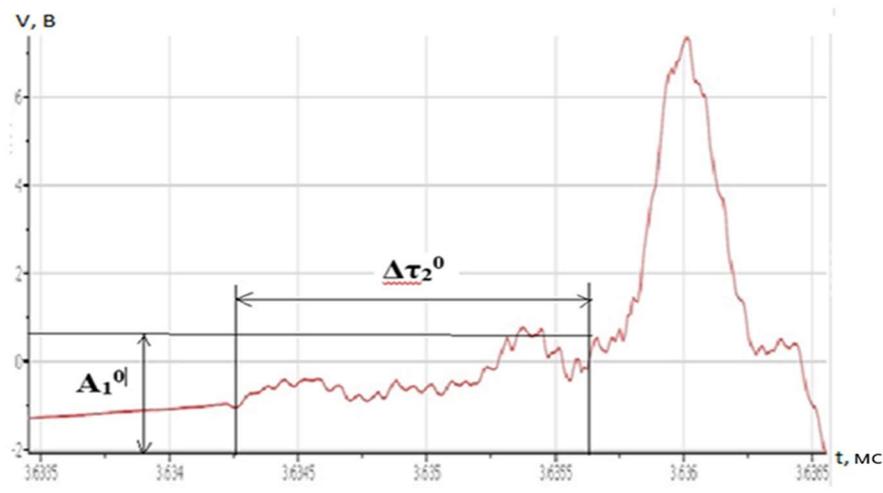
а)



б)



в)



г)

г)

Рисунок 3.5 - Анализ ударов в программе Diadem

а) Удар цельным цилиндром, б) увеличенный график удара цельным цилиндром

в) удар с бойком г) увеличенный график удара с бойком

Результаты стендовых исследований ударного воздействия

1. Амплитуда импульса цельного ударника выше на 100-110%, чем ударника с бойком;
2. Ширина импульса цельного ударника меньше на 130-140% в сравнении с шириной импульса от ударника с бойком;
3. В диаграмме удара цельного ударника отсутствует предимпульс, что является естественным из физических соображений;

4. При уменьшении ширины зазора амплитуда импульса уменьшается, ширина импульса по уровню 0,5 возрастает, длительность фронта возрастает;
5. При уменьшении ширины зазора амплитуда предимпульса уменьшается, его ширина возрастает;
6. Площадь импульса цельного ударника, пропорциональная энергии удара, а с бойком площадь амплитуды возрастает.

3.3 Моделирование поведения конструкции шарошечного долота при динамическом и статическом воздействии методом конечных элементов

Моделирование работы шарошечного долота выполнялось в двух ситуациях: осевая нагрузка на шарошечное долото и удар по шарошечному долоту совместно с осевой нагрузкой.

Модель шарошечного долота была упрощена (рисунок 3.6). Для увеличения скорости расчета моделировалась только одна твердосплавная вставка на каждой лапе, непосредственно находящаяся в контакте с породой. На рисунке 1, представлена модель, состоящая из ударника 1, шарошечного долота 2 и разрушаемого массива 3.

Моделирование удара производилось в программном комплексе Ansys Workbench в модуле для моделирования переходных процессов и динамического анализа Transient Structural. Модуль позволяет моделировать динамическое нагружение объектов в малом интервале времени [3,35].

Разрушение компонентов в данном моделировании не анализировалось, так как требует большого количества экспериментальных данных по испытаниям материалов [92]. Анализировалось только напряженно-деформированное состояние объектов.

Граничные условия

В качестве материала всех объектов моделирования применялась стандартная сталь (Structural steel) из библиотеки материалов Ansys Workbench. Параметры стали приведены в таблице 3.5 [92].

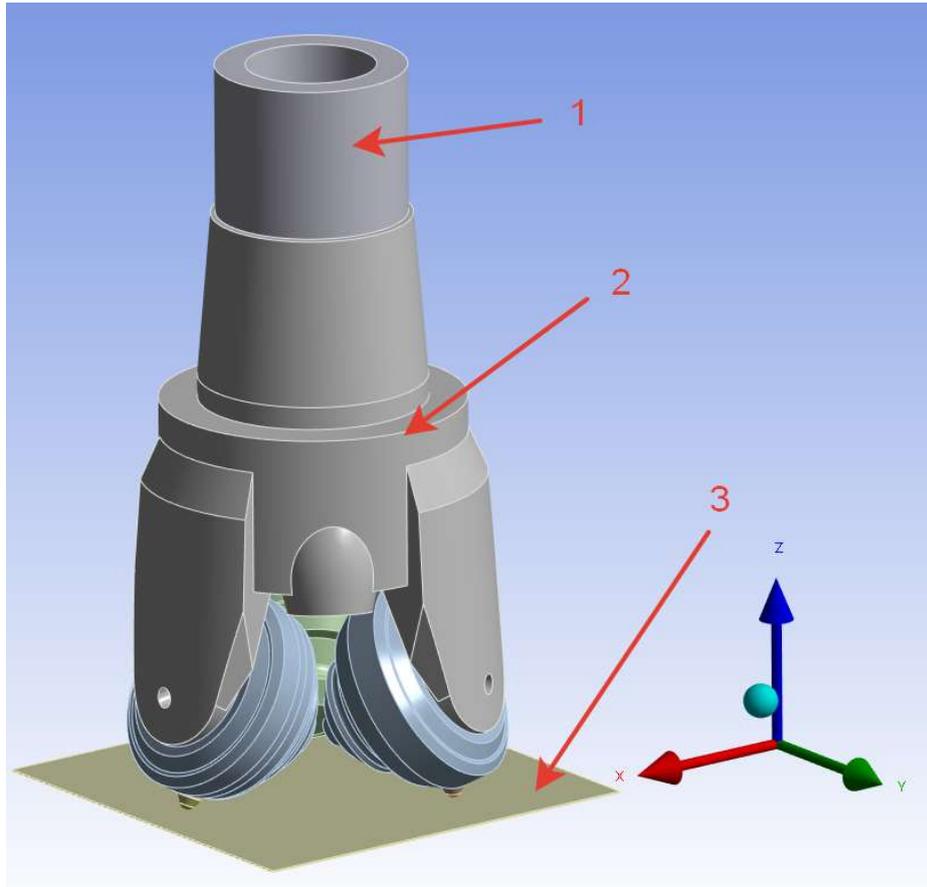


Рисунок 3.6 - Схема моделирования удара

Таблица 3.5 - Физико-механические характеристики стали Structural steel

Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, МПа	Модуль сдвига, МПа	Пределная прочность на сжатие, МПа	Предел текучести при сжатии, МПа	Пределная прочность на растяжение, МПа	Предел текучести при растяжении, МПа	Плотность, кг/м ³
$2 \cdot 10^5$	0,3	$1,7 \cdot 10^5$	$7,7 \cdot 10^5$	0	250	460	250	7850

Для предотвращения проникновения ударника в шарошечное долото, между ударником и долотом задавался контакт frictionless (без трения); между твердосплавной вставкой и разрушаемой породой задавался контакт frictionless (без трения); между остальными объектами задавался контакт bonded (неразрывный контакт) [92].

Конечно-элементная сетка представлена на рисунке 3.7. Для лучшего взаимодействия между ударником и долотом сетка была локально измельчена. Общее количество элементов – 81 619, узлов – 173 764.

При моделировании только осевого воздействия, задавалось осевое усилие 200 кН; при ударе применялось два параметра: начальная скорость движения ударника в момент удара – 10 м/с, осевое усилие 200 кН, масса ударника 5 кг.

Время моделирования составляло 0,001 с.

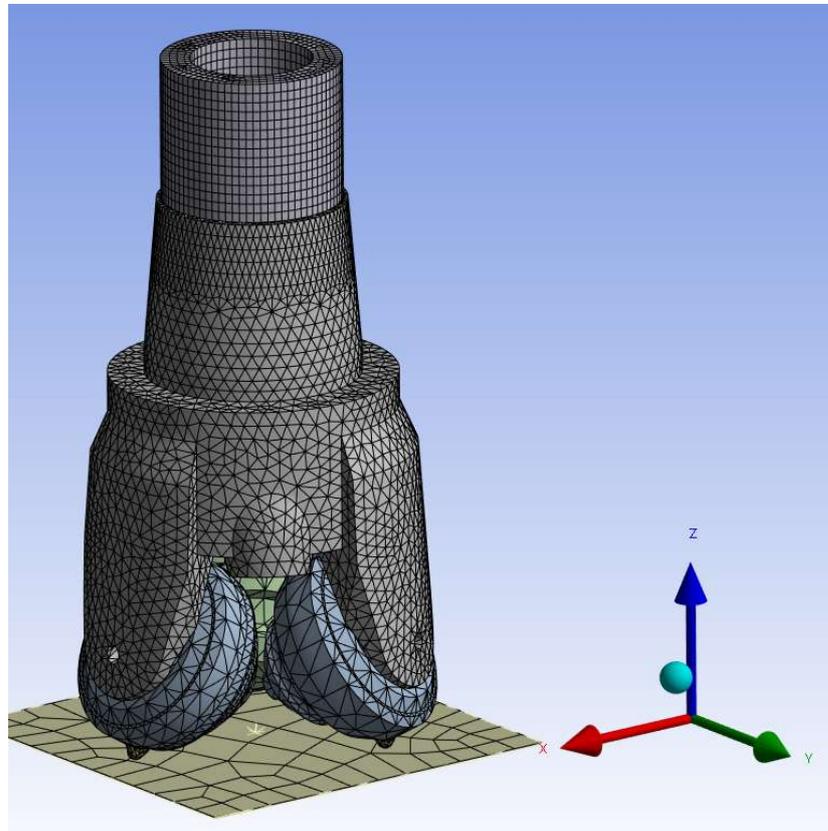


Рисунок 3.7 - Конечно-элементная модель

В результате моделирования, установлено, что наибольшее напряжение по Мизесу (эквивалентное напряжение), наблюдается в месте контакта твердосплавной вставки и разрушаемого массива и составляет порядка 9000 МПа (Рисунок 3.8). Данные результаты очевидны, так как осевая нагрузка распределяется между твердосплавными вставками (тремя вставками) и контакт происходит в одном узле конечного элемента. Использовать данные значения не стоит, так как порода моделировалась абсолютно жесткой и контакт происходил в точке, а не по поверхности.

Для исследования распределения напряжений на шарошечном долоте, рассмотрим напряжение только в корпусе долота. Подшипники, подпятники, корпуса шарошек, твердосплавные вставки рассматривать не будем.

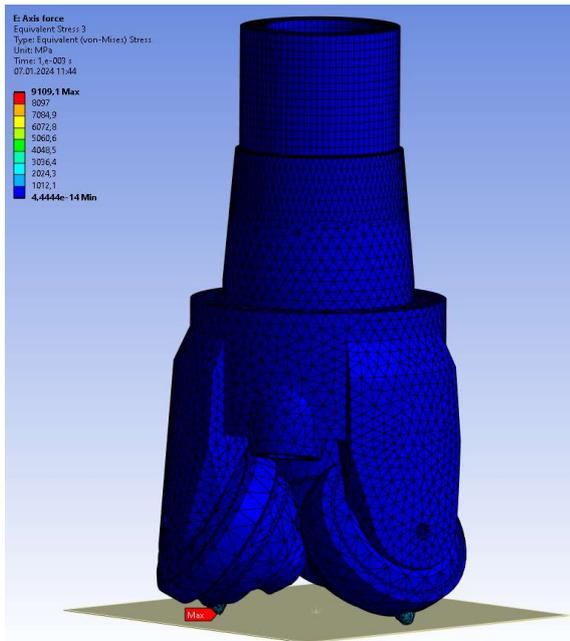


Рисунок 3.8 - Наибольшее напряжение при осевом усилии

Обнаружено, что максимальные напряжения в корпусе долота наблюдаются в каналах для подачи жидкости и воздуха и составляют порядка 228 МПа (рисунок 3.9). Также повышенные напряжения наблюдаются в месте сопряжения лап и оси шарошки, максимальное напряжение в этих местах составляют порядка 180 МПа (рисунок 3.10).

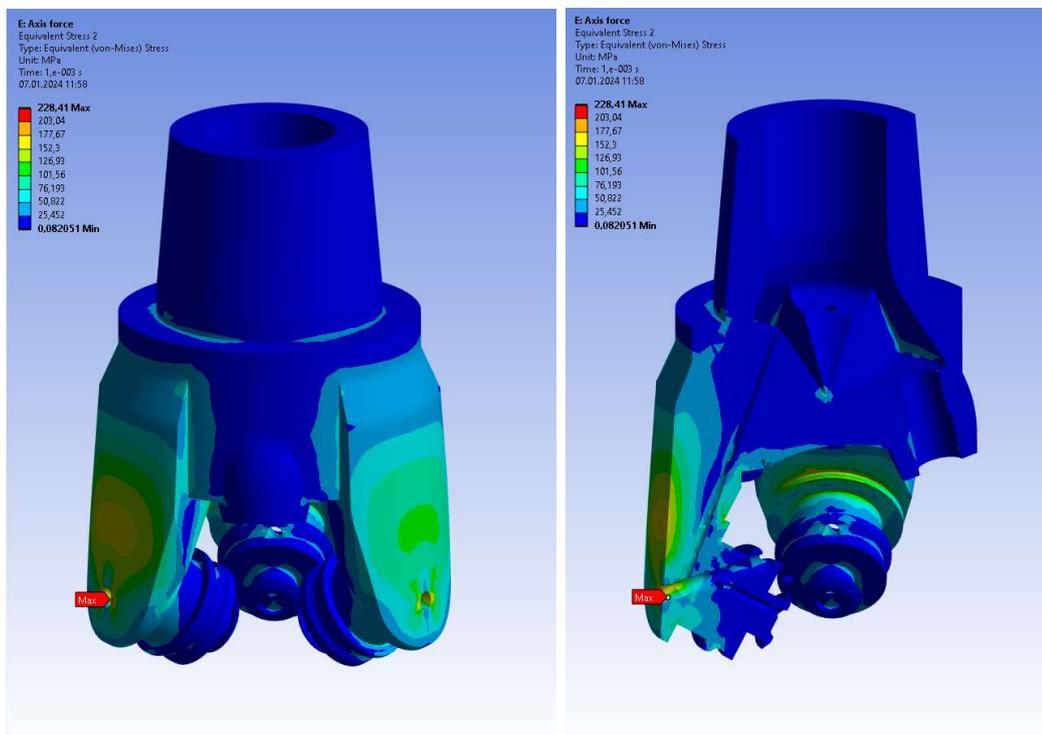


Рисунок 3.9 - Наибольшее напряжение при осевом усилии

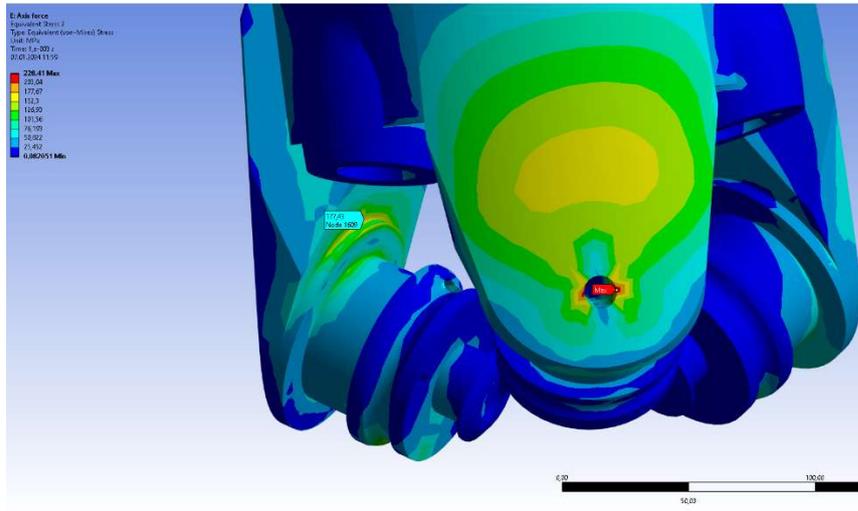


Рисунок 3.10 - НДС при осевом усилии

В местах контакта подшипника и оси шарошки напряжения составляют до 160 МПа (рисунок 3.11). При анализе конструкции, на эти места следует обратить внимание, так как толщина элементов конструкции в этих местах незначительная, что может привести к значительной деформации и поломке. Также, следует предположить, что и в подшипниках будут наблюдаться повышенные напряжения.

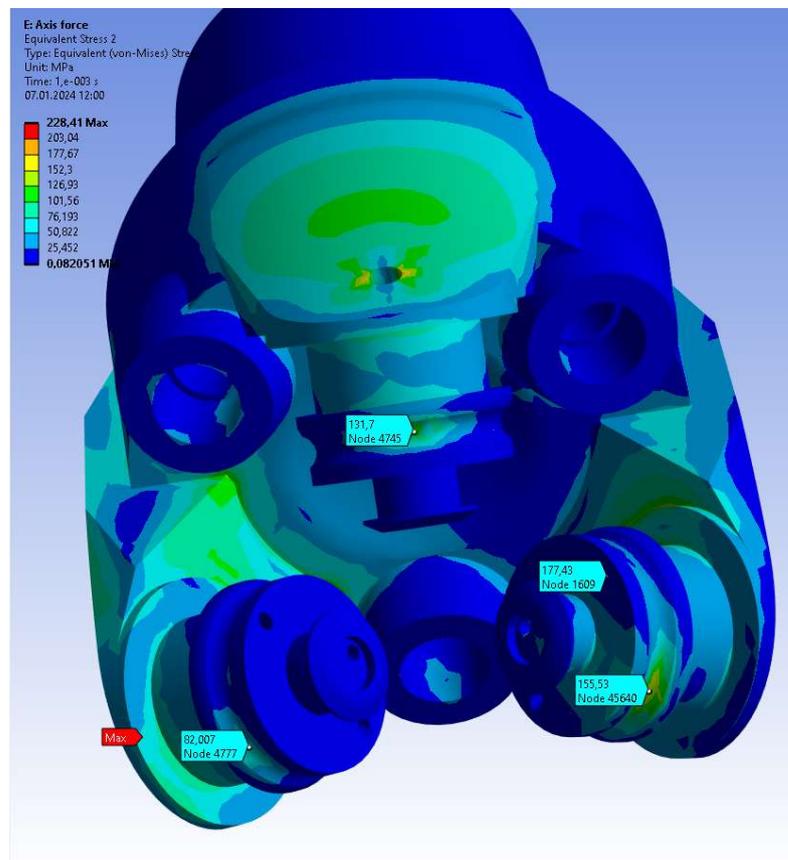


Рисунок 3.11 - НДС при осевом усилии

В результате моделирования, установлено, что наибольшее напряжение по Мизесу (эквивалентное напряжение), наблюдается в месте контакта твердосплавной вставки и разрушаемого массива и составляет порядка 12700 МПа. Данные результаты очевидны, так как осевая нагрузка и нагрузка от удара распределяется между твердосплавными вставками (тремя вставками) и контакт происходит в одном узле конечного элемента. Использовать данные значения не стоит, так как порода моделировалась абсолютно жесткой и контакт происходил в точке, а не по поверхности.

Для исследования распределения напряжений на шарошечном долоте, рассмотрим напряжение только в корпусе долота. Подшипники, подпятники, корпуса шарошек, твердосплавные вставки рассматривать не будем.

Обнаружено, что максимальные напряжения в корпусе долота наблюдаются в месте контакта подшипника и оси и составляют порядка 4000 МПа. Также повышенные напряжения наблюдаются в месте сопряжения лап и оси шарошки, максимальное напряжение в этих местах составляют порядка 340 МПа (рисунок 3.12).

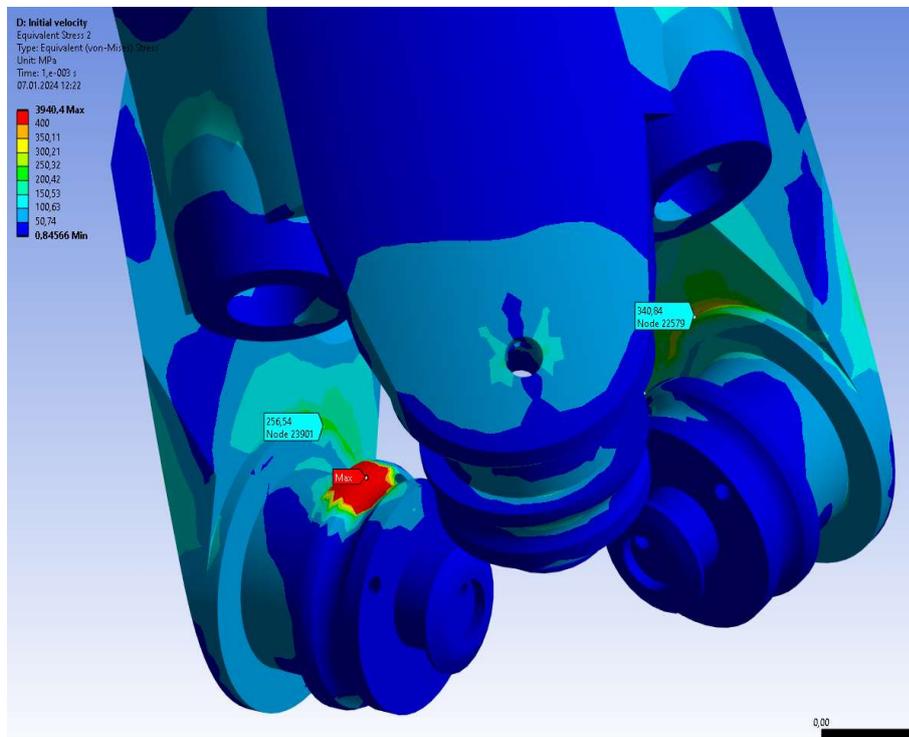


Рисунок 3.12 - НДС при осевом усилии и ударе

В местах контакта подшипника и оси шарошки напряжения составляют до 190 МПа (рисунок 3.13). При анализе конструкции, на эти места следует обратить внимание, так как толщина элементов конструкции в этих местах незначительная, что может привести к значительной деформации и поломке. Также, следует предположить, что и в подшипниках будут наблюдаться повышенные напряжения.

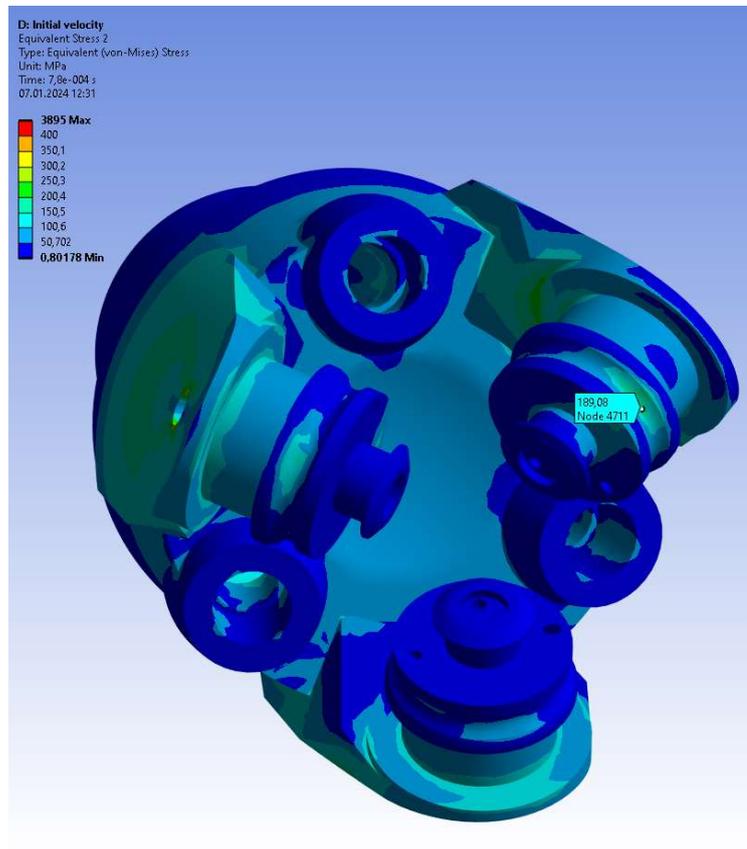


Рисунок 3.13 - НДС при осевом усилии и ударе

В результате моделирование, установлено:

1. При статическом нагружении только осевой силой, коэффициент запаса прочности находится в допустимых пределах для данной стали. Но имеются зоны с повышенным напряжением.
2. При динамическом нагружении имеется большое количество зон с недостаточным коэффициентом прочности. Вся конструкция при этом, имеет большое количество зон с повышенным напряжением.

Рекомендации

1. Для получения более достоверного результата рекомендуется изменить на сталь, используемую при производстве шарошечного долота.

2. В зонах с повышенным напряжением изменить локально сетку на более мелкую.

3.4 Выводы по Главе 3

1. Разработан стенд для исследования потерь давления на задвижке при разных степенях её открытия, получены уравнения и график, характеризующие зависимость коэффициента потерь задвижки и перепада давления от степени открытия задвижки.

2. Разработан стенд, позволяющий исследовать ударные импульсы для различных моделей поршня-ударника. Сравнение формы ударного импульса после удара в преграду цельковым поршнем и поршнем с бойком определенной массы, существенно меньшей массы поршня, показывают, что в зависимости от величины зазора и соотношения масс поршня и ударника могут быть получены ударные импульсы существенно различной формы. При уменьшении ширины зазора амплитуда предимпульса уменьшается, его ширина возрастает. Площадь импульса цельного ударника, пропорциональная энергии удара, меньше площади импульса сдвоенного ударника, что означает повышение энергии удара, передаваемой в преграду, для сдвоенного ударника

3. Моделирование удара в программном комплексе Ansys Workbench в модуле для моделирования переходных процессов показало, что при статическом нагружении шарошки только осевой силой, коэффициент запаса прочности находится в допустимых пределах для данной стали. При динамическом нагружении имеются зоны с недостаточным коэффициентом прочности, особенно в твёрдосплавных вставках. Для тяжёлых ударников требуется тщательный подбор конструкции шарошек, выполненных из определенных сталей, и дополнительная проверка их работоспособности в системе Ansys.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ РАБОТЫ ППУ В УСЛОВИЯХ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

В соответствии с целью и задачами исследования была разработана конструкция станка СБШ-250 с радиоуправляемой задвижкой перед ППУ, на указанную конструкцию получен патент на изобретение. Изобретение относится к горной, горно-строительной и строительной промышленности, к буровой технике, применяется при бурении скважин ударно-вращательным способами, может быть использовано для разрушения твердых пород при бурении взрывных и геологоразведочных скважин буровыми станками.

4.1 Конструкция модернизированного станка с ППУ

Предложенная новая установка предназначена для регулирования потока воздуха в ставе бурового станка ППУ (рисунок 4.2). В её состав входит подвижная заслонка, червячный механизм и блок управления заслонкой, обеспечивающие эффективное управление процессом бурения. Технический результат достигается благодаря комплексному использованию этих элементов, обеспечивающих стабилизацию скорости бурения, улучшение условий работы шарошки и интенсификацию разрушения забоя [105]. Техническим результатом является повышение ударной мощности за счет урегулирование потока воздуха за счет регулируемом заслонкой [53].

Модернизированный станок имеет блок управления с монитором в кабине, который связан с антенной, закрепленной снаружи, а также ретранслятора (рисунок 4.8), установленного на опорном узле мачты и соединенного через отверстие для подачи воздуха с буровым ставом (рисунок 4.1). Верхнее приемно-передающее устройство установлено внутри опорного узла вращателя станка, напротив отверстия для подачи воздуха в буровой став. На внутренней стенке муфты над приводом червячного механизма жестко закреплен блок управления заслонкой, который через кабель соединен с приводом червячного механизма заслонки и внутри которого последовательно соединены приемно-передающее устройство с аккумулятором и переключателем (рисунок

4.3). В нижней части муфты горизонтально установлена подвижная заслонка, выполненная в виде двух пластин с отверстиями, которые установлены друг над другом и соединены единым ободом (рисунок 4.4, 4.5, 4.6, 4.7) [53].

Устройство поясняется следующими фигурами [105]:

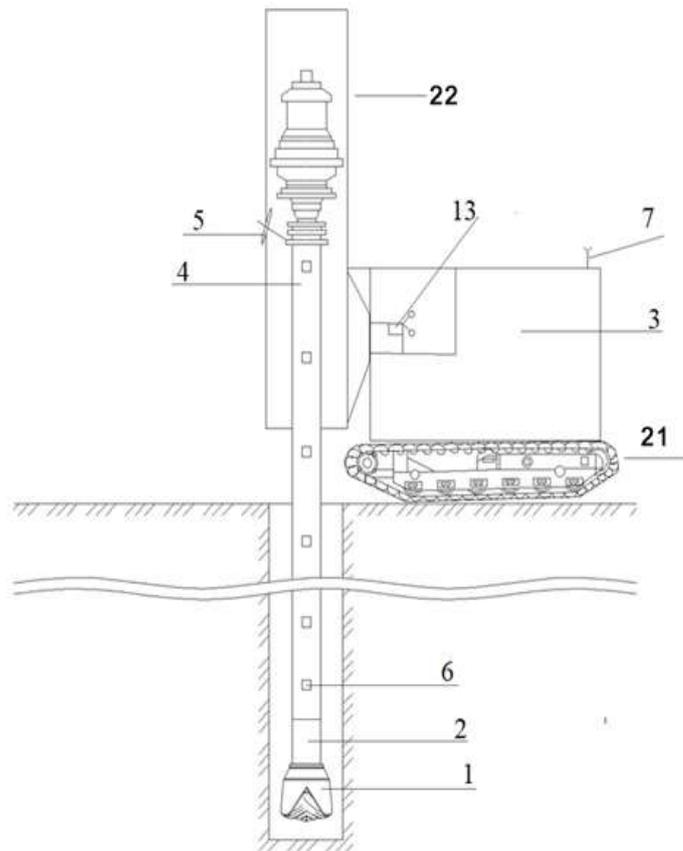


Рисунок 4.1 – Общий вид устройство в разрезе

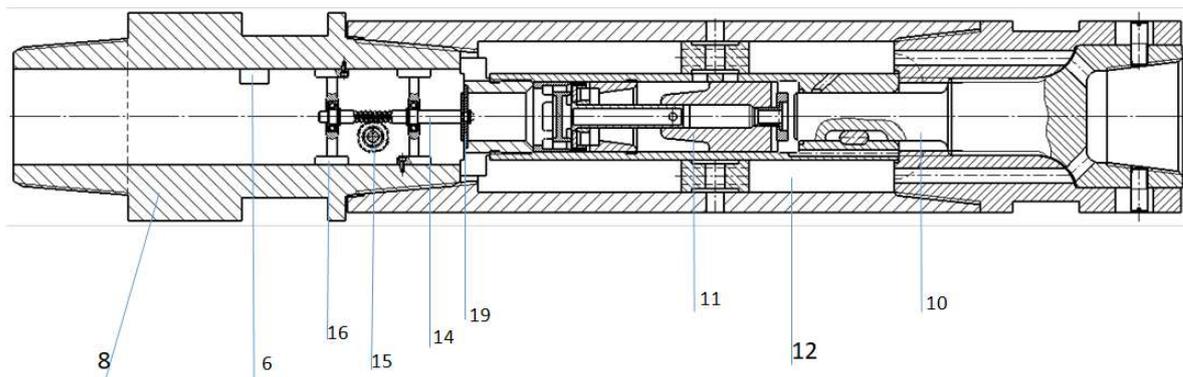


Рисунок 4.2 - Продольный разрез ударного механизма с бойком и пружинами

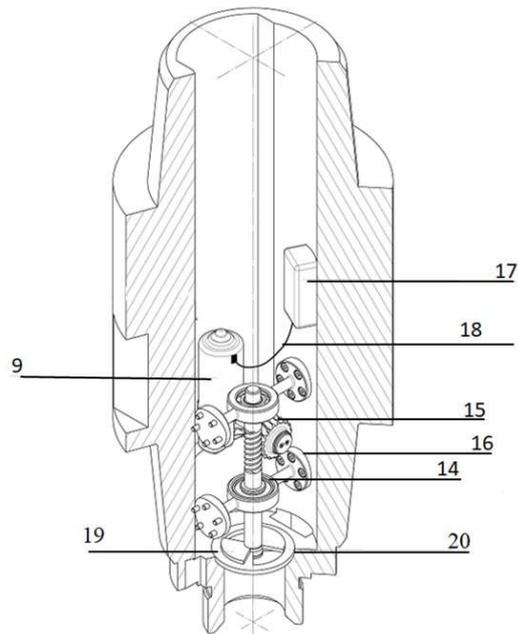


Рисунок 4.3 - Боек с пружинами и ударник в начальном положении

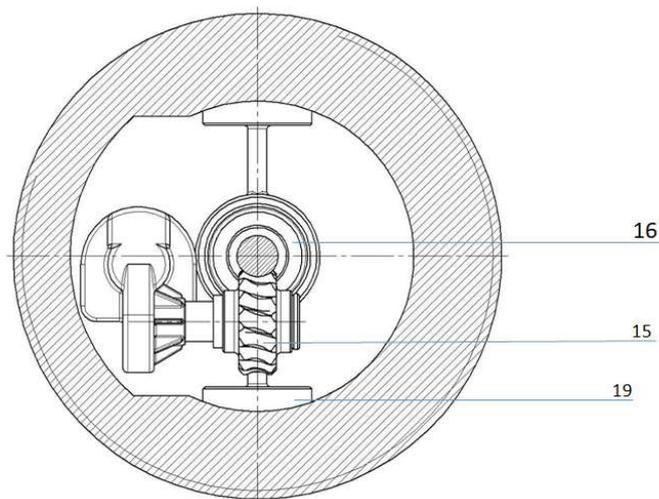


Рисунок 4.4 - Разрез заслонки

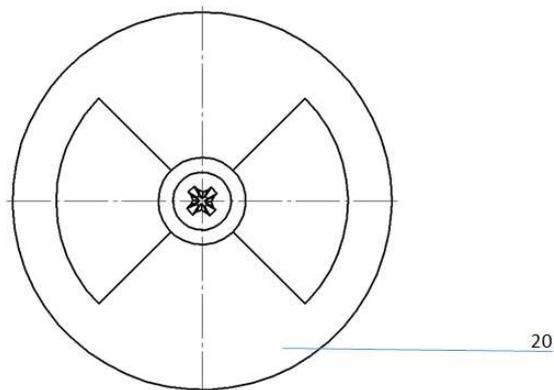


Рисунок 4.5 - Заслонка в позиции открыто

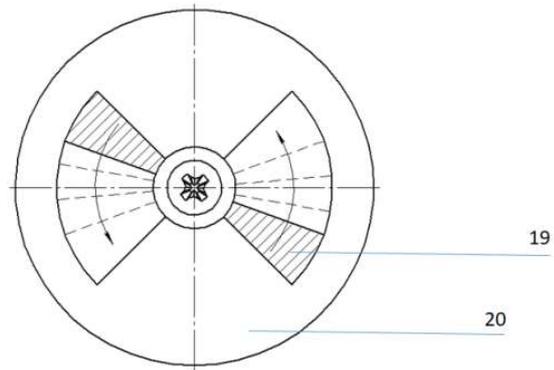


Рисунок 4.6 - Заслонка в позиции полуоткрыта

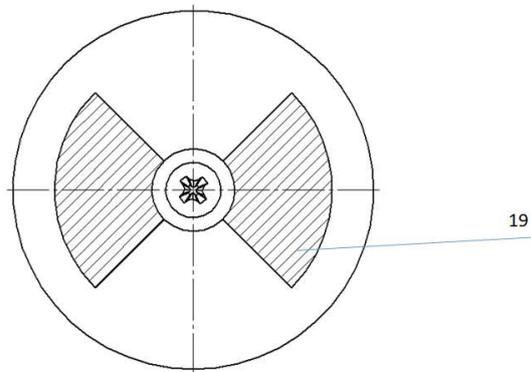


Рисунок 4.7 - Заслонка в позиции закрыта

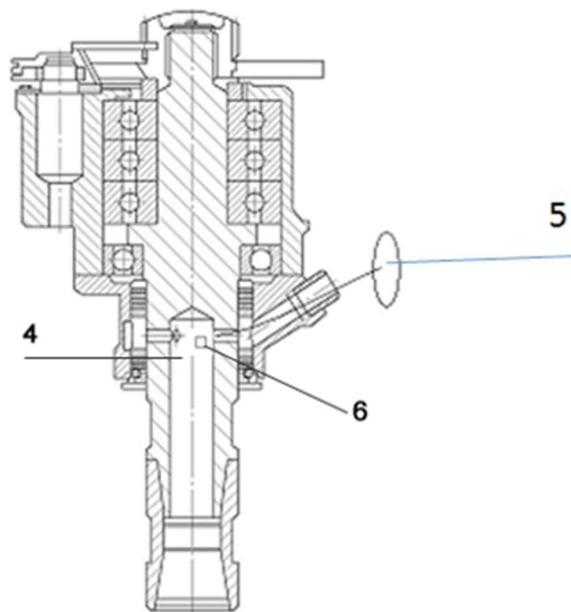


Рисунок 4.8 - Опорный узел

Нумерации на рисунках 4.1-4.8: 1 – шарошка; 2 – пневмоударник; 3 – кабина; 4 – буровой став; 5 – ретранслятор; 6 – приемно-передающее устройство; 7 – антенна; 8 – муфта; 9 – привод червячного механизма; 10 – хвостовик шарошки; 11 – поршень - ударник; 12 – воздушные каналы; 13 – блок управления с монитором; 14 – вал привода заслонки; 15 – червячный механизм; 16 – направляющие упоры; 17 – блок управления заслонкой; 18 – кабель; 19 – подвижная заслонка; 20 – обод; 21 – ходовая часть; 22 – мачта.

Устройство для регулирования потока воздуха в ставе бурового станка ППУ включает подвижную заслонку (19), червячный механизм (15) и блок управления заслонкой (17).

Буровой станок для разрушения горных пород ударными импульсами включает породоразрушающий инструмент шарошку (1), соединенную с пневмоударником (2).

В нижней части муфты (8) горизонтально установлена подвижная заслонка (19). Подвижная заслонка (19) выполнена в виде двух пластин с отверстиями, которые установлены друг над другом и соединены единым ободом (20).

В центре подвижной заслонки (19) вертикально закреплен вал привода заслонки (14). На валу привода заслонки (14) установлены не менее двух пар направляющих упоров (16), а между ними закреплен червячный механизм (15) с приводом червячного механизма (9).

К внутренней стенке муфты (8) над приводом червячного механизма (9) жестко закреплен блок управления заслонкой (17), который включает последовательно соединенные приемно-передающее устройство (6) с аккумулятором и переключателем.

Блок управления заслонкой (17) через кабель (18) соединен с приводом червячного механизма (9) заслонки (19).

В муфту вставлен пневмоударник (2) с поршнем-ударником (11) и хвостовиком (10). Пневмоударник (2) установлен внутри нижнего участка бурового става (4) между муфтой (8) и муфтой шарошки (1) с хвостовиком шарошки (10).

Между пневмоударником (2) и внутренними стенками нижнего участка бурового става (4) образуются воздушные каналы (12).

На ходовой части (21) установлена кабина (3), которая оснащена блоком управления с монитором (13), связанным с антенной (7), установленной снаружи на кабине (3).

Ретранслятор (5) установлен снаружи на опорном узле мачты (22) и соединен через отверстие для подачи воздуха с буровым ставом (4).

Верхнее приемно-передающее устройство (6) установлено внутри опорного узла вращателя станка, напротив отверстия для подачи воздуха в буровой став (4).

Другие приемно-передающие устройства (6) устанавливаются внутри каждой штанги в зависимости от их количества, которое связано с глубиной бурения.

Устройство работает при бурении однородного мягкого массива следующим образом: заслонка (19) закрыта, пневмоударник (2) не работает, а воздух, обходя по воздушным каналам (12) пневмоударник (2), идет только на продувку скважины.

При бурении вертикальных скважин массивов крепких пород сложных структур, например, гранита, требуется включение пневмоударника (2) для сохранения высокой скорости бурения [105].

Машинист передает сигнал «Открытия» с блока управления с монитором (13) через антенну (7) на ретранслятор (5), а от него на приемно-передающее устройство (6), а далее на блок управления заслонкой (17), при этом срабатывает переключатель и подсоединяет аккумулятор, который через кабель (18) включает привод червячного механизма (9) подвижной заслонки (19) [55].

После включения червячного механизма (15), приводится в движение вал привода заслонки (14), происходит открытие подвижной заслонки (19). Сжатый воздух через компрессор станка по буровому ставу (4) поступает в пневмоударник (2), при этом поршень-ударник (11) начинает наносить удары по хвостовику шарошки (10) и процесс бурения стабилизируется: увеличивается скорость бурения, нормализуется уровень вибрации, устраняется «подклинивание» шарошки в скважине, интенсифицируется продувка скважины, устраняется

«подушка» буровой мелочи на забое, происходит выравнивание поверхности забоя и т.д.

Энергия удара и частота ударов пневударника (2) зависит от степени открытия подвижной заслонки (19).

Для уменьшения скорости бурения дается сигнал «Закрытия» или «Прикрытия» с блока управления с монитором (13) через антенну (7) на ретранслятор (5), а от него на приемно-передающее устройства (6) и далее на блок управления заслонкой (17), при этом срабатывает переключатель и подсоединяет аккумулятор и через кабель (18), включает привод червячного механизма (9) подвижной заслонки (19). После включения червячного механизма (15), приводится в движение вал привода заслонки (14), происходит частичное или полное закрытие подвижной заслонки (19). Струя сжатого воздуха, которая поступает через компрессор, буровой став (4) и воздушные каналы (12) в пневмоударник (2), становится меньше или при полном перекрытии её воздух отсекается от пневмоударника (2) [52].

Управление заслонкой помогает стабилизировать скорость бурения и долговечность шарошки за счет регулирования объема воздуха через пневмоударник, улучшения условий работы шарошки и интенсификации разрушения забоя.

4.2 Варианты исполнения ППУ с трехмассовой системой и рекомендации по их применению

Варианты ППУ, которые рекомендуются к внедрению в соответствии с выполненными исследованиями отличаются массой поршня пневмоударника и зазором между корпусом пневмоударника и его наружной трубой. На рисунках 4.9 -4.10 показаны эскизные проекты для ППУ с различными массами поршня-ударника [42]. Так для массы ударника менее 5 кг предлагается использовать ППУ, указанный на рисунке 4.9 [90], и предназначенный для диаметров шарошки менее 250 мм.

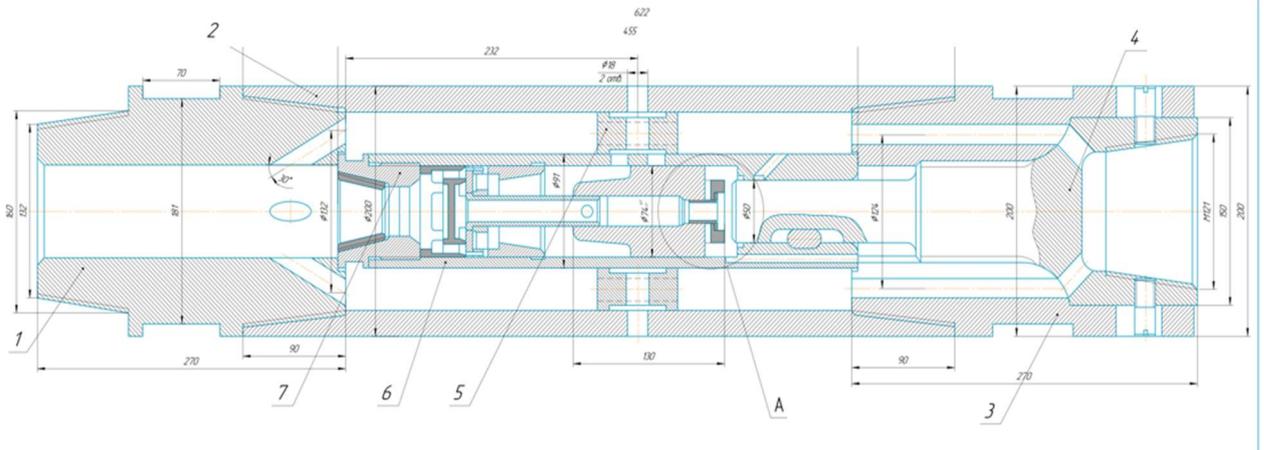


Рисунок 4.9 – Погружной пневмоударник с бойком с массой ударника менее 5 кг

Для тяжёлых ППУ и диаметров шарошки более 250 мм предлагается использовать ударник показанный на рисунке 4.10 [90]: масса поршня-ударника увеличена до 9 кг; поршень выполнен без суживающейся части в передней зоне, в отверстии выполнена резьба для крепления винта, удерживающего боек; боек предполагается выполнять из специальных сплавов, содержащих титан и алюминий, например, АТ6; в поршне ударнике выполнены отверстия для заполнения тяжелой жидкостью и винтовое соединение для удержания бойка; в передней части поршня-ударника выполнен переходник ступенчатой формы и связан с шарошкой; для прохождения воздуха к забою, между трубой става и корпусом ППУ, выполнены зазоры и перемычки с отверстиями.

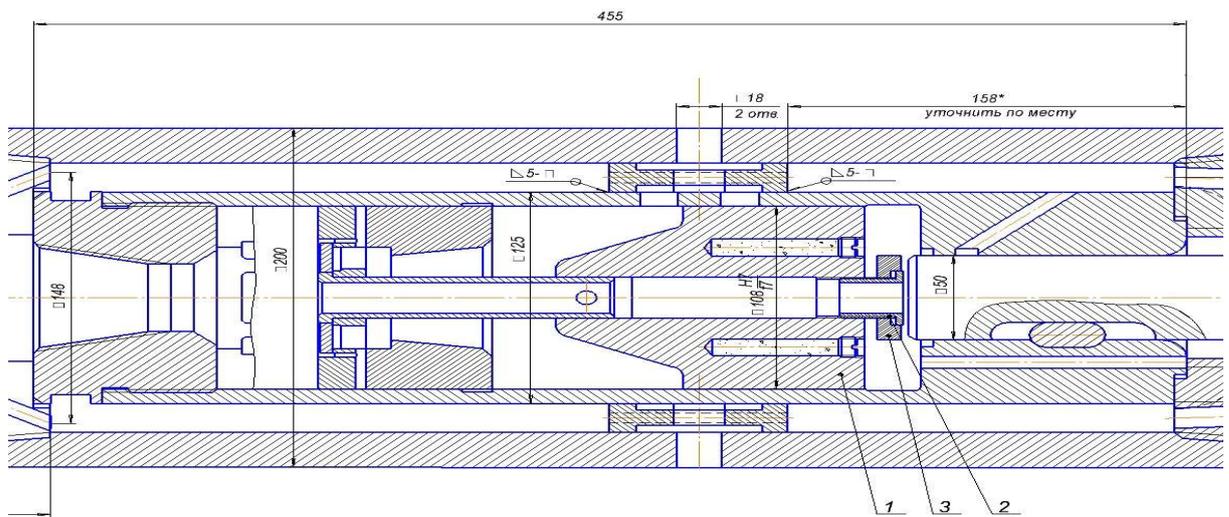


Рисунок 4.10 - Погружной пневмоударник с бойком с массой ударника 9 кг

4.3 Укрупнённая методика расчёта параметров ППУ

Для эффективного бурения с использованием самоходной буровой установки СБШ-250 и погружного пневмоударника М-48 необходимо правильно управлять степенью открытия задвижки, что позволяет регулировать давление и силу удара поршня. В данном разделе представлены расчеты и примеры по использованию погружных пневмоударников с буровыми станками СБШ-250.

Структура укрупнённой методики расчета параметров ППУ:

1. Определение основных исходных данных – диаметр шарошки и её вес, производительность компрессора, внутренний диаметр бурового става, давление, развиваемое компрессором, график зависимости коэффициента местного сопротивления от степени открытия задвижки и уравнение, аппроксимирующее эту зависимость; масса поршня ударника, площадь сечений за поршнем и перед поршнем, а также его ход.

2. Рассчитываются или принимаются потери давления по длине, потери на продувку. Принимается рабочее давление в ППУ.

3. Рассчитываются потери на задвижке

4. Рассчитывается скорость воздуха по заданной подаче компрессора и сечению бурового става

5. Определяется коэффициент местного сопротивления на задвижке при заданной плотности воздуха по формуле 3.3.

6. Определяем степень открытия задвижки по формуле 3.3 или по рисунку 3.2

Пример расчета степени открытия задвижки для создания в ППУ определенного давления.

Потери давления от компрессора до забоя складываются из потерь по длине и местных, которые в первую очередь представлены потерей давления на задвижке:

Давление, создаваемое компрессором, определяется по формуле (4.1):

$$P_{\text{компрессора}} = P_{\text{ппу}} + \Delta P + P_{\text{продувка}}, \quad (4.1)$$

где $P_{\text{ппу}}$ – давление необходимое для работы ППУ, МПа; ΔP – потери давления от компрессора до забоя, МПа; $P_{\text{продувка}}$ – потери давления в затрубном пространстве, МПа.

Потери давления от компрессора до забоя складываются из потерь по длине и местных, которые в первую очередь представлены потерей давления на задвижке (4.2):

$$\Delta P = \Delta P_{\text{задвигка}} + \Delta P_{\text{дл}}, \quad (4.2)$$

Тогда формула 4.3 примет вид [84]:

$$P_{\text{компрессора}} = P_{\text{ппу}} + \Delta P_{\text{задвигка}} + \Delta P_{\text{дл}} + P_{\text{продувка}}, \quad (4.3)$$

Давление на продувку и на потери по длине будут постоянны, а потери давления на задвижке определяем по формуле [87]:

$$\Delta P_{\text{задвигки}} = \zeta \rho v^2 / 2, \quad (4.4)$$

Задаваясь значениями $P_{\text{продувка}}$, $\Delta P_{\text{дл}}$ и $P_{\text{ппу}}$, можно рассчитать необходимые потери давления на задвижке. Из опытных данных или результатов моделирования известно, что:

$$P_{\text{продувка}} = 0,11 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_{\text{дл}} = 0,05 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{ппу}} = 0,5 \text{ МПа}$$

Зная номинальное давления в пневмосистеме можем вычислить давление на задвижке можем определить по формуле (4.5):

$$\Delta P_{\text{задвигка}} = P_{\text{компрессора}} - P_{\text{ппу}} - \Delta P_{\text{дл}} - P_{\text{продувка}} \quad (4.5)$$

$$\Delta P_{\text{задвигка}} = 0,7 - 0,5 - 0,11 - 0,05 = 0,04 \text{ МПа}$$

Зная формулу потерь давления на задвижке, определяем определим коэффициент местного сопротивления по формуле (4.6), где плотность воздуха (ρ) = 1.225 кг/м³

$$\zeta = 2\Delta P_{\text{задвигки}} / \rho v^2 \quad (4.6)$$

$$\zeta = 38,85$$

$$\Delta P_{\text{задвигки}} = 40000 \text{ Па}$$

Тогда по графику (рис. 3.2) или по формуле (3.3) расчета коэффициента местного сопротивления можно определить n – степень открытия задвижки (4.7):

$$n = -\ln(38,85/493,62) / 10,05 \quad (4.7)$$

$$n = 0,253$$

Расчет показал, что степень открытия задвижки – 0.25, значит она открыта на четверть.

4.4 Пример расчёт силы удара ППУ

При осевом усилии СБШ270, СБШ250 и СБШ215 $P_{ос}$, равным соответственно 400, 240, 160 кН, предельное значение силы удара $F_{уд}$ не должно превышать 30% от $P_{ос}$, что составляет, соответственно: 100, 60, 40 кН.

Возможны следующие варианты параметров ударной системы:

- масса ударника, $m_{уд} = \{14,5; 12; 10; 7\}$ кг;
- ход поршня $L_x = \{73; 50\}$ мм;
- рабочее давления за счёт дросселирования $P_{ППУ} = \{0,7; 0,5; 0,3\}$ МПа;
- ударная скорость $v_{уд} = \{4,5; 3,0; 1,5\}$ м/с.

Необходимо вычислить предударную скорость поршня, это возможно сделать из уравнений силы удара.

$p_{ост}$ – противодействие, создающееся в штоковой части, $p_{ост} = 0,2$ МПа, $S_{шт}$ – площадь в штоковой части, $S_{шт} = 0,010455$

Для принятых значений $L_x = 73$ мм или $L_x = 50$ мм и массы поршня-ударника $m_{уд} = 14,5$ кг при рабочем давлении от 0,2 МПа до 0,5 МПа, $S_{пр} = 0,0079$ м², $S_{шт} = 0,0041$ м² может быть построен график зависимости ударной скорости от рабочего давления.

Как видно из графика следствием понижения массы является увеличение скорости. Однако понижение массы позволяет уменьшить силу удара, значит, поэтому понижение массы является необходимым. Уменьшение хода ударника уменьшает время разгона поршня, а значит уменьшает его предударную скорость. Уменьшение хода ударника существенно влияет на его скоростные параметры. Но снижение хода ударника, связанное с удлинением штока переходника, может повлиять на стабильность работы ППУ, поэтому изменение конструкции ППУ не является оптимальным способом совершенствования ударной системы.

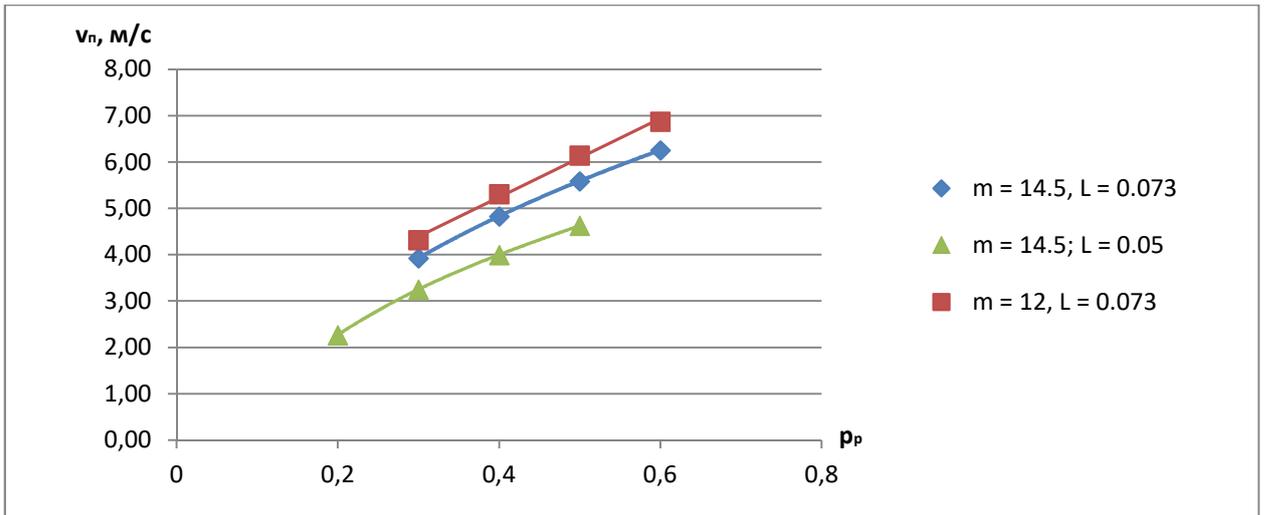


Рисунок 4.11- Зависимость предупредительной скорости от рабочего давления и хода ударника

Уменьшение давления, подающегося в рабочую область, понижает предупредительную скорость и при параметрах $L_x = 73$ мм, $p = 0,2$ МПа возможно достичь предупредительной скорости 1,13 м/с (рисунок 4.11) [87].

Это соотносится с опытом компании Atlas Copco (Secoroc), которая использует ППУ, работающие на малом давлении и имеющие малый ход поршня. Параметры ударной системы рассчитываются по методике, представленной во второй главе.

Время движения (из главы 2.3):

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 14,5 \cdot 0,073}{0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,01327 + 2 \cdot 10^6 \cdot 0,010455}} = 0,033 \text{ с.}$$

Ускорение ударника (из главы 2.3):

$$a = \frac{0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,01327 - 2 \cdot 10^6 \cdot 0,010455}{14,5} = 130,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Предупредительная скорость:

$$v_n = 130,3 \cdot 0,033 = 4,36 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Сила удара (глава 2.3), при $\tau = 0,00036$ с:

$$F_{y\partial} = \frac{14,5 \cdot 4,36}{0,00036} = 175 \text{ кН},$$

при $\tau = 0,0006$ с:

$$F_{y\partial} = \frac{14,5 \cdot 4,36}{0,0006} = 105 \text{ кН}.$$

Согласно Н.В. Бутенину «Курс теоретической механики», том 2, стр. 340, продолжительность удара $\tau = 0,001$ с, тогда предельно низкая сила удара может составлять:

$$F_{уд} = \frac{14,5 \cdot 4,36}{0,001} = 63,2 \text{ кН.}$$

4.5 Особенности эксплуатации СБШ с ППУ

Для обеспечения эффективной и безопасной работы с пневмоударниками на данном типе станков следует соблюдать следующие рекомендации:

1. Подготовка оборудования: перед началом работы убедитесь, что все компоненты пневмоударника и станка находятся в исправном состоянии. Проверьте качество шарошечных долот и состояние пневмоударника.

2. Контроль давления воздуха: регулярно проверяйте и поддерживайте оптимальное давление воздуха, поступающего в пневмоударник, в соответствии с рекомендациями производителя.

3. Управление скоростью бурения: Используйте пневмоударник для регулирования скорости бурения в зависимости от типа породы и требуемой производительности.

4. Слежение за вибрациями: при работе с пневмоударниками следите за уровнем вибрации и при необходимости корректируйте его с помощью регулировки давления воздуха.

5. Безопасность: соблюдать все предписания по безопасности при работе с оборудованием. Используйте защитное снаряжение и обучайте персонал правильным методам работы с пневмоударниками.

6. Техническое обслуживание: регулярно проводить техническое обслуживание оборудования согласно рекомендациям производителя. При обнаружении любых неисправностей немедленно прекращайте работу и обращайтесь к специалистам для ремонта.

7. Обучение персонала: обучить персонал правильным методам работы с пневмоударниками и оборудованием, чтобы избежать несчастных случаев и повысить производительность работ.

8. Управление заслонкой позволяет эффективно контролировать работу пневмоударника и стабилизировать скорость бурения. Регулирование объема воздуха через пневмоударник позволяет поддерживать оптимальные условия для работы шарошки и увеличивать ее долговечность. Кроме того, управление заслонкой способствует улучшению условий работы шарошки, что повышает эффективность ее действия и интенсифицирует разрушение забоя. Эти факторы совместно обеспечивают более эффективное и продуктивное выполнение буровых работ.

В заключение можно сказать эффективное использование пневмоударников с буровыми станками СБШ требует строгого соблюдения рекомендаций по безопасной и эффективной эксплуатации оборудования.

4.6 Выводы по Главе 4

В Главе 4 были рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты использования погружных пневмоударников с буровыми станками СБШ-250, а также представлены рекомендации по их оптимальной эксплуатации.

Основные выводы заключаются в следующем:

1. Разработана и запатентована конструкция СБШ с задвижкой, регулирующей поток воздуха в буровом ставе. Регулирование степени открытия задвижки позволяет эффективно управлять давлением и силой удара пневмоударника. Это, в свою очередь, обеспечивает адаптацию к различным типам пород, увеличивает скорость бурения и снижает износ оборудования.

2. Предложена методика расчета потерь давления на задвижке, а также формулы для расчета средней скорости потока, коэффициента местного сопротивления и силы удара пневмоударника. Примеры расчетов демонстрируют, как эти параметры изменяются в зависимости от степени открытия задвижки.

3. Рекомендации по использованию: для твердых пород, таких как гранит, рекомендуется полное открытие задвижки (100%) для максимальной силы удара. Для пород средней твердости рекомендуется открытие задвижки на 50% для обеспечения умеренной силы удара и оптимальной производительности. Для

мягких пород или для уменьшения износа оборудования рекомендуется открытие задвижки на 25% или её закрытие.

4. Разработана методика проверочного расчета силы удара по хвостовику шарошки, длина хвостовика определяет ход поршня и позволяет регулировать силу удара уменьшая её до величины 0,3 от осевого усилия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научной работой, в которой на основе результатов проведенных исследований изложены научно обоснованные технические решения по повышению скорости бурения станков шарошечного бурения с погружными пневмоударниками и регулируемой задвижкой для стабилизации ударной силы по шарошечному долоту в станках СБШ.

Основные научные и практические выводы, сделанные в результате выполненных исследований, заключаются в следующем:

1. Выполненный анализ современного состояния исследований технического уровня конструкций отечественных и зарубежных карьерных буровых станков показал, что для станков СБШ создание ППУ с регулируемыми ударными параметрами при бурении сложно структурированных пород является актуальной задачей.

2. Теоретически доказан и подтверждён результатами лабораторных исследований эффект создания, растянутого во времени составного ударного импульса, воздействующего на инструмент без возникновения в нем опасных напряжений, с использованием механизма «поршень-боек-инструмент», при массе бойка не более 0.02 от массы поршня.

3. На основании проведенных исследований разработано устройство для разрушения горных пород ударными импульсами с регулируемой задвижкой (Патент РФ №2770472).

4. Работоспособность разработанной конструкции ППУ бурового станка СБШ-250 с регулируемой воздушной заслонкой доказана результатами лабораторных исследований. Теоретически обосновано, что при коэффициенте дополнительного воздействия на шарошку 1,2 скорость бурения увеличивается не менее чем на 30%.

5. Разработана методика проведения экспериментальных исследований и лабораторный стенд с регулируемой задвижкой для определения фактических потерь давления на задвижке и величины давления в ППУ при разных степенях сужения потока воздуха.

6. Определен диапазон изменения уровня давления в ППУ, позволяющий изменять силу удара поршня до величины не более 0.3 от осевого усилия и регулировать силу удара установлением определенного положения задвижки на величину до 0,5 – 0,3 МПа.

7. Результаты диссертационной работы приняты к использованию при разработке конструкции модернизированного ППУ для СБШ-270 в ООО «ИЗ-КАРТЭКС» г. Санкт-Петербург (акт внедрения от 20.03.2024).

8. В качестве дальнейшего развития исследований по теме диссертации важно продолжить исследование по изучению влияния на эффективность бурения регулируемой задвижки и применения трехмассовых ударных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1357593 А1 СССР, МПК E21F 5/00. Способ определения степени удароопасности массива горных пород : № 4077019 : заявл. 10.06.1986 : опубл. 07.12.1987 / А. А. Смирнов, А. А. Козырев, А. А. Ширяев [и др.] ; заявитель ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КОЛЬСКОГО ФИЛИАЛА ИМ.С.М.КИРОВА АН СССР. – EDN WJPDYD.
2. Барон, В.Л. Техника и технология взрывных работ в США / В.Л. Барон, В.Х. Кантор. – М.: Недра, 1989. – 376 с.
3. Батицкий, В.А. Автоматизация производственных процессов и АСУТП в горной промышленности / В.А. Батицкий, В.И. Куроедов, А.А. Рыжков. – М.: Недра, 1991. – 303с.
4. Бахвалов, Л.А. Построение и оптимизация математических моделей по экспериментальным данным. Учебное пособие / Л.А. Бахвалов, М.А. Комаров. – М.: МГГУ, 1997. – 111с.
5. Белов, М.П. Технические средства автоматизации и управления. Учебное пособие / М.П. Белов. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 184 с.
6. Благовещенская, М.М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами / М.М. Благовещенская, Л.А. Злобин. – М.: Высшая школа, 2005. – 768 с.
7. Блинов, Ю.Ф. Методы математического моделирования / Ю.Ф. Блинов, В.В. Иванцов, П.В. Серба // Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 2012. – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://fep.tti.sfedu.ru/russian/tmina/education/literatura/mmm1.pdf>.
8. Болобов, В. И. О распространении трещины по горной породе при ударе / В. И. Болобов, Б. Ле-Тхань, В. А. Плащинский // Обогащение руд. – 2019. – № 6. – С. 3-8.
9. Болобов, В. И., Чупин, С. А., Бочков, В. С., & Мишин, И. И. Увеличение срока службы породоразрушающих резцов путем повышения

износостойкости их державок термомеханической обработкой //Горный журнал. – 2019. – №. 5. – С. 67.

10. Буровой инструмент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rockmoreintl.com/DTH.html> (дата обращения 20.04.2024).

11. Буровой инструмент Secoroc для бурения погружным пневмоударником: каталог продукции / Перевод на русский язык. Atlas Copco Secoroc AB – 2015.03. – 48 с.

12. Буялич, Г. Д. Испытания шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин некруглого поперечного сечения / Г. Д. Буялич, В. П. Тащиенко, М. К. Хуснутдинов // Уголь. – 2019. – № 7(1120). – С. 15-18.

13. Буялич, Г. Д. Особенности шарошечного бурового инструмента для получения некруглого поперечного сечения скважины / Г. Д. Буялич, В. Н. Шмат, М. К. Хуснутдинов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5(132). – С. 10-14.

14. Воронцов, Д.С. Разработка магистрального железнодорожного бурового комплекса "Ерофей" / Д.С. Воронцов, В.Н. Карпов // В сборнике: Политранспортные системы материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия - ЕС. – Новосибирск: СГУПС, 2015. – С. 698–704.

15. Вохмин, С. А. Расчёт параметров буровзрывных работ при строительстве подземных горных выработок / С. А. Вохмин, Г. С. Курчин, А. К. Кирсанов, Н. А. Шкаруба ; Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий. – Красноярск : СФУ, 2022. – 180 с. – ISBN 978-5-7638-4481-8

16. Гасымов, Э. Э. Регулирование скорости бурения станком СБШ изменением потока воздуха через погружной пневмоударник / Э. Э. Гасымов // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021 : VIII Веждународная научно-практическая конференция. сборник тезисов. секция «круглый стол молодых ученых»– Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 41-43. – EDN BENGGS.

17. Гилев, А. В. 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.
18. Гилев, А. В. Повышение эффективности эксплуатации буровой техники на горных предприятиях / А. В. Гилев, А. О. Шигин, В. Т. Чесноков, И. Р. Белозеров; Сибирский федеральный университет; Институт горного дела, геологии и геотехнологий. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 372 с. – ISBN 978-5-7638-2866-5. – EDN SCJZIH.
19. Головченко, А. Е. Разработка новых технических средств и технологии ударно-вращательного бурения на основе использования внецентренных ударных импульсов : специальность 25.00.14 "Технология и техника геологоразведочных работ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Головченко Антон Евгеньевич, 2021. – 118 с. – EDN LAWZWS.
20. Грунь, В. Д. Основные вехи в истории развития угольной промышленности России / В. Д. Грунь, А. А. Рожков // *Горная промышленность*. – 2017. – № 4(134). – С. 9.
21. Грунь, В. Д. Развитие открытого способа добычи угля в России / В. Д. Грунь, В. Г. Килимник, Н. В. Ефимова // *Горная промышленность*. – 2007. – № 5(75). – С. 18-21. – EDN JUFNNL.
22. Жариков, С. Н. Способы уточнения свойств горных пород при производстве буровзрывных работ / С. Н. Жариков, В. Г. Шеменев, В. А. Кутуев // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2017. – Т. 9, № 1(31). – С. 74-80
23. Жуков, И. А. Модернизация гидромолотов, применяемых в условиях ремонта металлургических агрегатов / И. А. Жуков, Н. В. Мартюшев, Д. А. Зюкин [и др.] // *Металлург*. – 2022. – № 12. – С. 112-117
24. Жуков, И. А. Механика разрушения горных пород ударом при одновременном внедрении нескольких инденторов / И. А. Жуков // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2018. – № 1(125). – С. 93-99.

25. Заляев, М. Ф. Исследование вибрации при бурении скважин на термокарстовом газоконденсатном месторождении / М. Ф. Заляев // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13, № 4. – С. 36-40.

26. Иванов, К. И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых: горная книга / К.И. Иванов, Латышев В. А., Андреев В. Д. – Москва : Недра, 1987. – 271 с.

27. Карпов, В. Н. Разработка методики оценки энергоэффективности бурения скважин погружными пневмоударниками : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Карпов Владимир Николаевич. – Новосибирск, 2019. – 175 с.

28. Карпов, В.Н. Вопросы эргономики при проектировании железнодорожного бурового комплекса "Ерофей" / В.Н Карпов, З.П. Ощепков // В сборнике: Совершенствование технологии перевозочного процесса к 80-летию факультета «Управление процессами перевозок»: сборник научных трудов. Отв. ред. А.А. Климов. – Новосибирск: СГУПС, 2015. – С. 287–290.

29. Карпов, В.Н. Проблемы специализации железнодорожных магистралей в условиях Сибири и Дальнего Востока / В.Н. Карпов, Д.С. Воронцов // Политранспортные системы. Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск: СГУПС, 2015. – С. 56–62.

30. Клишин, В. И. Станок для бурения разведочных, дегазационных и технических скважин СБР-400 / В. И. Клишин, Д. И. Кокоулин, Б. Кубанычбек, А. П. Гуртенко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 4. – С. 50-55.

31. Клишин, В. И. Обоснование параметров и разработка станков для бурения скважин из подземных выработок / В. И. Клишин, Д. И. Кокоулин, А. П. Гуртенко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 1(101). – С. 11-16.

32. Козлов, Л. П. Методы расчета гидравлических потерь в разгонной камере / Л. П. Козлов, И. Л. Козлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 1. – С. 195-200.
33. Куклина Е. А. Методология устойчивого развития природно-ресурсных регионов // автореферат на соискание ученой степени доктора экономических наук. – 2008.
34. Куклина, Е. А. Морфологический анализ социально-экономического развития региона / Е. А. Куклина, Д. А. Юнгмейстер // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 3. – С. 136-143.
35. Куулар, О. О. Разработка конструкции системы горизонтирования карьерного бурового станка / О. О. Куулар, Ч. Д. о. Шавыраа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 104-108.
36. Куулар, О. О. Разработка конструкции системы горизонтирования карьерного бурового станка / О. О. Куулар, Ч. Д. о. Шавыраа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 104-108. – DOI 10.21440/0536-1028-2018-7-104-108
37. Логов, А. Б. Механическое разрушение крепких горных пород / А. Б. Логов, Б. Л. Герике, А. Б. Раскин. – Новосибирск : Новосибирский филиал Федерального государственного унитарного предприятия "Академический научно-издательский и книгораспространительский центр "Наука", 1989. – 141 с. – ISBN 5-02-028651-6.
38. Лукашов, К. А. Анализ направлений совершенствования вибрационных режимов работы СБШ / К. А. Лукашов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 1. – С. 291-294.
39. Лукашов, К. А. Обоснование рациональных режимов работы станка шарошечного бурения с наддолотным ударником для условий ОАО "Апатит" : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лукашов Кирилл Александрович. – Санкт-Петербург, 2004. – 131 с.

40. Макаров, А. П. Механизация горного производства. Горные машины и оборудование для открытых горных работ / А. П. Макаров, В. А. Храмовских. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – 252 с.

41. Нагаев Р.Ф. Исследование параметров пневмоперфоратора со сдвоенным ударником / Р. Ф. Нагаев, Д. А. Юнгмейстер, Л. Н. Пашкин, В. А. Пивнев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 1. – С. 295-296.

42. Наумова, П. Д. Модернизированный буровой станок СБШ-250 / П. Д. Наумова, Д. А. Юнгмейстер // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : Сборник статей по материалам VII международной научно-практической конференции, Новосибирск, 29 ноября – 09 2017 года. Том 7 (7). – Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников "Сибирская академическая книга", 2017. – С. 82-86.

43. Нескоромных, В. В. Направленное бурение и основы кернометрии : учебное пособие : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130203 "Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых" направления подготовки 130200 "Технология геологической разведки" / В. В. Нескоромных ; [В. В. Нескоромных] ; М-во образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный ун-т, Ин-т горного дела, геологии и геотехнологий. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Красноярск : СФУ, 2012.

44. Новосельцева, М. В. Гидроимпульсный механизм бурильных машин для алмазного бурения горных пород / М. В. Новосельцева // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 6. – С. 72-76.

45. Овезов, Б. А. Снижение критических последствий торсионных вибраций в результате разрушения горной породы долотами PDC / Б. А. Овезов, К. О. Щербакова, Л. Р. Календарова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – № 4. – С. 91-100.

46. 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.

47. 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.

48. Патент № 2107813 С1 Российская Федерация, МПК E21B 43/10, E21B 43/14, E21B 43/25. Устройство для обработки пластов массива грунта или породы (варианты) : № 93051526/03 : заявл. 14.08.1992 : опубл. 27.03.1998 / Л. Г. Джонс ; заявитель Мобил Ойл Корпорейшн. – EDN WWSURP.

49. Патент № 2174596 С2 Российская Федерация, МПК E21B 12/02, E21B 44/00, E21B 44/08. Способ регулирования условий бурения, влияющих на режим эксплуатации бура : № 98119444/03 : заявл. 21.03.1997 : опубл. 10.10.2001 / Л. М. Смит, В. Э. Голдман ; заявитель ДРЕССЕР ИНДАСТРИЗ, ИНК.. – EDN WWJQNG

50. Патент № 2359112 С2 Российская Федерация, МПК E21B 43/22, E21B 43/26. Способы регулирования свойств потери текучей среды из текучих сред на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ : № 2004133166/03 : заявл. 12.11.2004 : опубл. 20.06.2009 / Ф. Салливан, Я. Кристанти, И. Куйе [и др.] ; заявитель ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В.. – EDNMUEGBX.

51. Патент № 2467152 С2 Российская Федерация, МПК E21B 23/02. Крепежное устройство для использования в стволе скважины : № 2010115279/03 : заявл. 17.09.2008 : опубл. 20.11.2012 / М. Э. Спенсер, Р. Мартинес ; заявитель ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В.. – EDN IUCCLF.

52. Патент № 2720041 С1 Российская Федерация, МПК E21B 4/06, E21C 37/00. Устройство для разрушения горных пород ударными импульсами: № 2019111583 : заявл. 16.04.2019 : опубл. 23.04.2020 / Д. А. Юнгмейстер, А. И. Исаев, Р. И. Королев, П. Д. Соболева ; заявитель федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

53. Патент № 2770472 С1 Российская Федерация, МПК E21B 21/08, E21B 4/14. Система для разрушения горных пород: № 2021115145: заявл. 27.05.2021: опубл. 18.04.2022 / Д. А. Юнгмейстер, В. А. Шпенст, А. И. Исаев, Э. Э. Гасымов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

54. Пивнев, В. А. Рудничные испытания модернизированного перфоратора ПП-54С2 / В. А. Пивнев, Д. А. Юнгмейстер, В. В. Максов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 23-27.

55. Платовских, М. Ю. Экспериментальные и теоретические исследования перфоратора с ударной системой "поршень-боек-штанга" / М. Ю. Платовских, В. А. Пивнев, Д. А. Юнгмейстер [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 7. – С. 9-14.

56. Подэрни, Р. Ю. Анализ современного состояния мирового рынка поставок (выемочно) погрузочного карьерного оборудования (мехлопаты и драглайны) // Горная промышленность. – 2013. – №. 6. – С. 14-14.

57. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: учеб. для вузов // М.: Изд-во МГГУ. – 2003. – Т. 606. – С. 21

58. Подэрни, Р. Ю., Хромой, М. Р., Сандалов, В. Ф. Основные концепции создания универсального бурового станка нового технического уровня // Горные машины и автоматика. – 2001. – №. 2. – С. 16-20.

59. Примычкин, А. Ю. Обоснование параметров кольцевого упругого клапана системы воздухораспределения при создании пневмоударных машин: дис. – Ин-т горн. дела СО РАН, 2017.

60. Пятова, И. Ю. Обоснование и выбор рациональных параметров трансмиссий гидрообъемных приводов основных механизмов карьерного бурового станка: специальность 05.05.06 Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пятова Ирина Юрьевна, 2016. – 144 с. – EDN AUJGFG.

61. Реготунов, А. С. Экспериментальное исследование режимов ударного бурения горных пород / А. С. Реготунов, В. А. Антонов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 61-69.

62. Сабитов, А. Э. Обоснование компоновки и параметров перфораторов-ударников для исполнительных органов проходческих комбайнов / А. Э. Сабитов, А. И. Исаев, Д. А. Юнгмейстер, Р. Ю. Уразбахтин // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 4(122). – С. 17-22

63. Симисинов, Д. И. Обоснование параметров физической модели замкового подшипника трехшарошечного бурового долота / Д. И. Симисинов, А. И. Афанасьев, И. А. Захаров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11-1. – С. 190-196.

64. Смоляницкий, Б.Н. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / Смоляницкий Б.Н [и др.]; отв. ред. Б.Ф. Симонов. – Новосибирск: СО РАН, 2013. – Т. 43 – С.32–38

65. Смоляницкий, Б.Н. Разработка средств проходки скважин большого диаметра для нужд транспортного и промышленно-гражданского строительства / Б.Н. Смоляницкий, Д.С. Воронцов, В.Н. Карпов // В кн.: Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе. – Новосибирск: СГУПС, 2012. – С. 350–353.

66. Соколов, И. В. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца / И. В. Соколов, А. А. Смирнов, А. А. Рожков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 7. – С. 337-350.

67. Теймурова, Э. А. Фазовые превращения и распределение серебра при комплексной переработке высокопиритистого свинцового концентрата / Э. А. Теймурова, И. Г. Меликова // Химическая промышленность. – 2020. – Т. 97, № 5. – С. 217-224.

68. Технология и техника бурения : учеб. пособие / В.С. Войтенко [и др.] ; под общ. ред. В.С. Войтенко. В 2 ч. Ч. 1. Горные породы и буровая техника. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. — 237 с

69. Тимонин, В. В. Исследование системы воздухораспределения погружного пневмоударника с парой "клапан - ударник" / В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, Д. И. Кокоулин [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 6. – С. 207-217.

70. Тимонин, В.В. Создание средств проходки скважин увеличенного диаметра для транспортного и промышленно-гражданского строительства / В.В. Тимонин, С.Е. Алексеев, В.Н. Карпов // Сборник трудов: Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: Материалы Международной научно-практической конференции: проблемы, перспективы, новации. – Омск: СибАДИ, 2016. – С. 405–410.

71. Тимофеев, Е. Г. Применение информационных технологий в решении задачи рационализации ударных импульсов, генерируемых в машинах ударного действия / Е. Г. Тимофеев, И. А. Жуков // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2018 : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Севастополь, 29–31 мая 2018 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2018. – С. 161-164.

72. 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. 225-230.

73. Трубецкой, К.Н. Взрывное разрушение массивов горных пород при освоении недр / К. Н. Трубецкой, В. Н. Захаров, С. Д. Викторов [и др.] // Проблемы недропользования. – 2014. – № 3(3). – С. 80-95.

74. Фокс Брайан. Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках / Брайан Фокс. Издатель: Ульф Линде. Переводнарусскийязык // Atlas Copco Drilling Solutions LLC, Garland, Texas, USA, 2011. – 274 с

75. Хруцкий, А. А. Компьютерное моделирование рабочего процесса погружного пневмоударника П-110 / А. А. Хруцкий, В. С. Ощепков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 7. – С. 131-138

76. 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. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 8. – С. 120-136.

77. Шигин, А. О. Адаптивный вращательно-подающий механизм бурового станка для снижения непрогнозируемых нагрузок при бурении сложноструктурных пород / А. О. Шигин // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 79-83.

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

79. Шигин, А. О. Методика расчета усталостной прочности как основного фактора стойкости шарошечных долот / А. О. Шигин, А. В. Гилев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 3(62). – С. 22-27.

80. Шигин, А. О. Методология проектирования адаптивных вращательно-подающих органов буровых станков и технологий их применения в сложноструктурных породных массивах : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Шигин Андрей Олегович. – Красноярск, 2015. – 22 с. – EDN ZPZRLV.

81. Шигин, А. О. Напряжения и стойкость шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов горных пород / А. О. Шигин, А. В. Гилев, А. А. Шигина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 325-333.

82. Шигин, А. О. Повышение ресурса шарошечного бурового инструмента за счет оптимизации режимных параметров при бурении сложноструктурных массивов горных пород / А. О. Шигин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 10(93). – С. 59-67.

83. Шигина, А. А. Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом шарошечного бурения: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шигина Анна Александровна, 2017. – 128 с. – EDN EJOZSM.

84. Шигина, А. А. Сравнительная оценка методов анализа эффективности функционирования буровых станков / А. А. Шигина, А. О. Шигин, А. А. Ступина // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 117.

85. Юнгмейстер Д. А. Совершенствование исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса S-782 / Д. А. Юнгмейстер, М. И. Тимофеев, А. И. Исаев, Э. Э. Гасымов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 1. – С. 107-118.

86. Юнгмейстер, Д. А. Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка / Д. А. Юнгмейстер, А. И. Исаев, А. И. Ячейкин, П. Д. Соболева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 3. – С. 28-36.

87. Юнгмейстер, Д.А. Исследование конструкции устройства для бурения скважин плоского сечения в подземных выработках / Д. А. Юнгмейстер, С. А. Игнатъев, Г. В. Соколова [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 42-

88. Юнгмейстер, Д.А. Исследование удержания бойка за счет выбора режимов воздушного потока / М. Ю. Непран, Д. А. Юнгмейстер, А. И. Исаев [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 10. – С. 27-31

89. Юнгмейстер, Д.А. Исследование эффективности бурения горных пород при использовании поршня-ударника с бойком и регулируемой задвижки в

погружном пневмоударнике / Д. А. Юнгмейстер, **Э. Э. Гасымов**, С. В. Борисов, М. И. Тимофеев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 96-105.

90. Юнгмейстер, Д. А. Анализ вариантов модернизации станков шарошечного бурения с погружным пневмоударником / Д. А. Юнгмейстер, И. Крупенский, С. А. Лавренко // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 321-325.

91. Юнгмейстер, Д. А. Буровой станок с погружным пневмоударником для регулирования скорости бурения изменением потока воздуха / Д. А. Юнгмейстер, **Э. Э. Гасымов** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021 : Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 240-242.

92. Юнгмейстер, Д. А. Обоснование конструкции и параметров устройства для регулирования потока воздуха в погружных пневмоударниках станков шарошечного бурения / Д. А. Юнгмейстер, **Э. Э. Гасымов**, А. И. Исаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-2. – С. 251-267.

93. Юнгмейстер, Д. А. Обоснование параметров погружного пневмоударника бурового станка для регулирования скорости бурения потоком воздуха / Д. А. Юнгмейстер, А. И. Исаев, **Э. Э. Гасымов** // Горный журнал. – 2022. – № 7. – С. 72-77.

94. Юнгмейстер, Д. А. Регулирование параметров погружного пневмоударника для СБШ / Д. А. Юнгмейстер, **Э. Э. Гасымов**, П. Д. Соболева // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 162-165.

95. Юнгмейстер, Д. А., Горшков, Л. К., Пивнев, В. А., Судьенков, Ю. В.. Модернизация ударных буровых механизмов //СПб.: Политехника-сервис. – 2012.
96. Abu Bakar, M. Z. Penetration Rate and Specific Energy Prediction of Rotary–Percussive Drills Using Drill Cuttings and Engineering Properties of Selected Rock Units / M. Z. Abu Bakar, I. A. Butt, Y. Majeed // Journal of Mining Science. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 270-284.
97. Aimc.az: сайт. – Баку, 2024 — URL: <https://www.aimc.az/> (дата обращения 20.04.2024).
98. Angloasianmining.com: сайт. – Баку, 2024 - .- URL: <https://www.angloasianmining.com/> (дата обращения 20.04.2024).
99. Azam, S. et al. Geotechnical characterization of mine waste rock //Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: 5-9 October 2009, Alexandria, Egypt (volume 5). – IOS Press, 2011. – С. 3421-3425.
100. Bolobov, V. I. Modeling impact fracture of rock by hydraulic hammer pick with regard to its bluntness / V. I. Bolobov, S. A. Chupin, B. Le-Thanh // Eurasian Mining. – 2022. – No. 1. – P. 72-75.
101. Kwon, Ki. B. Evaluation of drilling efficiency by percussion testing of a drill bit with new button arrangement / Ki. B. Kwon, Ch. H. Song, J. Y. Park [et al.] // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2014. – Vol. 15, No. 6. – P. 1063-1068.
102. Livescu, S. A critical review of the coiled tubing friction-reducing technologies in extended-reach wells. Part 1: Lubricants / S. Livescu, S. Craig // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 157. – P. 747-759.
103. Tishchenko, I. V. Remote Impact Frequency Control of Air Hammers with Power Closure of Elastic Valve / I. V. Tishchenko, V. V. Chervov // Journal of Mining Science. – 2023. – Vol. 59, No. 1. – P. 91-98.
104. Walker, S. Productivity and Cost-efficiency Drive DTH Drilling / S. Walker // Engineering and Mining Journal. – 2012. – Т. 213. – №. 9. – С. 72.

105. Yungmeister, D., Drill rig with a down-the-hole hammer for regulating the drilling rate by changing the air flow / D. Yungmeister, **E. Gasimov**//E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 326. – С.

106. Yungmeister, D. A. Rationale for the parameters of bore hammer for tunneling the service roadways in cambrian clays / D. A. Yungmeister, A. I. Isaev // Journal of Industrial Pollution Control. – 2017. – Vol. 33, No. 1. – P. 920-925.

107. Zabrab75.ru: сайт. – Чита, 2024 — . — URL : <https://zabrab75.ru/news/obshhestvo/burovye-stanki-na-bystrinskom-goke-oboruduyut-sistemami-navigaczii/> (дата обращения 20.04.2024).

108. Zhukov, I. A. Improvement of Down-the-Hole Air Hammer Efficiency by Optimizing Shapes of Colliding Parts / I. A. Zhukov, B. N. Smolyanitsky, V. V. Timonin // Journal of Mining Science. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 212-217.

109. Zhukov, I. A. Improvement of Down-the-Hole Air Hammer Efficiency by Optimizing Shapes of Colliding Parts / I. A. Zhukov, B. N. Smolyanitsky, V. V. Timonin // Journal of Mining Science. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 212-217.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2770472

СИСТЕМА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

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

Авторы: *Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич (RU), Шпенст Видим Анатольевич (RU), Исаев Алексей Игоревич (RU), Гасымов Эмиль Эльчин оглы (RU)*

Заявка № 2021115145

Приоритет изобретения 27 мая 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 апреля 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 мая 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения



Утверждаю
 Главный конструктор
 ООО «ИЗ-КАРТЭКС ИМЕНИ П.Г. КОРОБКОВА»
 Емельянов А.А.
 Дата «20» марта 2024 г.

АКТ
 о использовании результатов
 кандидатской диссертации
 Гасымов Эмиль Эльчин оглы
 по научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель – ведущий конструктор, к.т.н. Суздальский С.О.;

Члены комиссии: Кудрявцев А.В., Гольденберг Р.Я., Гуров А.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование совершенствования погружного пневмоударника для повышения эксплуатационных характеристик станка шарошечного бурения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, приняты к использованию в деятельности ООО «ИЗ-КАРТЭКС» 24.11.2023 при разработке опытного образца погружного пневмоударника (ППУ) для СБШ-270, в том числе:

- Патент РФ №2770472 (Гасымов Эмиль Эльчин оглы, Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич, Шпенст Вадим Анатольевич, Исаев Алексей Игоревич.) «Система для разрушения горных пород». 2022 г.;
- Методика проведения экспериментов по регулируемой задвижке ППУ. Регулирование удара с помощью регулируемой заслонки позволяет контролировать энергию удара, передаваемую на долото. Это критически важно для адаптации к различным типам пород и условиям бурения, а также для снижения интенсивности изнашивания и повреждения бурового инструмента. Определен диапазон регулировки силы удара, повышение скорости бурения в условиях твердых пород, а также пород с комплексной структурой, состоящей из чередующихся твердых и мягких слоев.
- Методика расчета предельной силы удара поршня ППУ;
- Методика расчета производительности СБШ с ППУ.

Использование указанных результатов позволяет: повысить скорость бурения на 20%, улучшить регламент ремонтных работ бурового станка.

Председатель комиссии

Ведущий конструктор, к.т.н.  Суздальский С.О.

Члены комиссии:

Главный конструктор проекта  Гольденберг Р.Я.

Ведущий конструктор  Кудрявцев А.В.

Инженер-конструктор 3 категории  Гуров А.А.