

На правах рукописи

Гасымов Эмиль Эльчин оглы



**ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКА ШАРОШЕЧНОГО
БУРЕНИЯ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Симисинов Денис Иванович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра эксплуатации горного оборудования, заведующий кафедрой;

Кузиев Дильшад Алишерович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Защита диссертации состоится **17 сентября в 13:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория №1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

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 пневмударников (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 «AtlasCopco» 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 разработанности темы 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., Симисин 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 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 *Р_{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 методика 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 состоит в:

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.).

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 диссертации в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 2 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

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.

Объем и 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, научные положения, выносимые на защиту, а также приведены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлен анализ литературных источников и патентных материалов по достигнутому техническому уровню конструкций отечественных и зарубежных карьерных буровых станков, в том числе с ППУ.

Во второй главе проведен анализ конструктивных параметров ППУ, представлен теоретический расчет ударного импульса силы удара по долоту, даны графики зависимости силы удара от давления воздуха в ППУ, зависимости скорости бурения от крепости породы и величины воздействия на шарошку от работы ППУ.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния степени открытия задвижки на величину рабочего давления в ППУ, представлены экспериментальные исследования трехмассовой ударной системы «поршень-боек-инструмент» в ППУ, даны рекомендации по возможности применения таких ударных систем для снижения напряжений в шарошечном долоте.

В четвертой главе предложены рекомендации по использованию разработанной конструкции элементов ППУ в СБШ, дана методика для расчета основных параметров СБШ с ППУ.

В заключении приводятся общие выводы и рекомендации.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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 *Рос*, что для СБШ-250 составляет 120-130 кН и сохраняет ресурс шарошки в допустимом диапазоне.

Регулирование силы удара способствует усовершенствованию процесса разрушения породы, что ведет к увеличению скорости бурения и снижению общих затрат на бурение. Особое значение регулирования удара заключается в возможности минимизировать максимальную силу удара по хвостовику шарошки, что предотвращает его перегрузку и изнашивание.

Усовершенствованная конструкция ППУ для разрушения горных пород входит в состав става СБШ и связана с шарошечным инструментом. Буровой станок состоит из ходовой части с кабиной оператора и мачтой с вращателем (рисунок 1, а).

Внутри нижней части бурового става размещается пневмоударник. Внизу муфты бурового става находится подвижная заслонка, выполненная в виде двух пластин с отверстиями, соединенных ободом (рисунок 1, б, в). Подвижная заслонка может радиально перемещаться для регулирования потока воздуха. Управление заслонкой помогает стабилизировать скорость бурения и долговечность шарошки за счет регулирования объема воздуха подающегося или проходящего через ППУ для улучшения условий работы шарошки и интенсификации разрушения забоя через регулирование осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент (рисунок 1, 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).

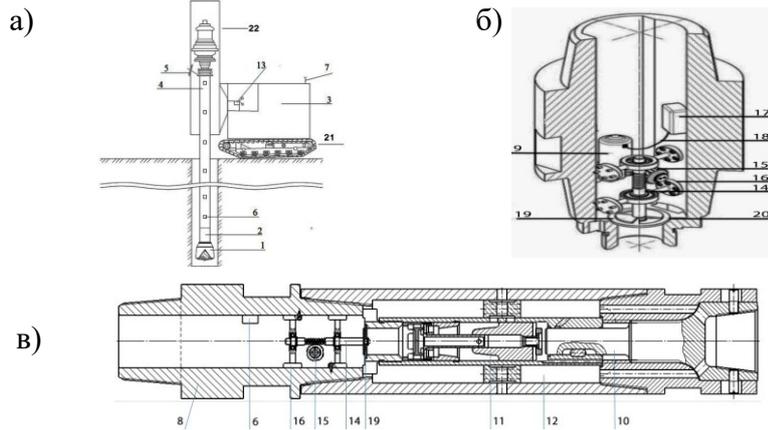


Рисунок 1 - Устройство ППУ для разрушения горной породы

При проведении экспериментов потери напора ΔP (Па) в задвижке 19 вычислялись по формуле (1):

$$\Delta P_{\text{задвигки}} = \zeta \rho v^2 / 2, \quad \text{Па} \quad (1)$$

где, ζ – коэффициент местного сопротивления равен 0,4-0,5; v – скорость потока воздуха, определяемая по показаниям трубки Пито (м/с), ρ – плотность воздуха, кг/м³.

В результате аппроксимации функции $\zeta = f(n)$, $\Delta p = f(n)$ (рисунок 2) получена эмпирическая формула для определения коэффициента местного сопротивления задвижки формулы 2 и 3:

$$\zeta = 493,62e^{-10,05n}, R^2=0,99 \quad (2)$$

$$\Delta P = -486,68n + 393,31, R^2 = 0,97 \quad (3)$$

В полученной формуле n это положения задвижки, соответствующие заданному перепаду давления.

Регулирование силы удара на исполнительном органе через установление положения задвижки на величину 0,0 – 0,7 МПа, соответствующего заданному перепаду давления, играет важную роль, так как изменение уровня давления в ППУ позволяет контролировать ударную мощность поршня.

При этом включение/выключение ППУ позволяет также устранять заклинивание шарошки, что способствует очищению

лезвия шарошки от налипшего штыба, тем самым улучшает работу станка СБШ в целом.

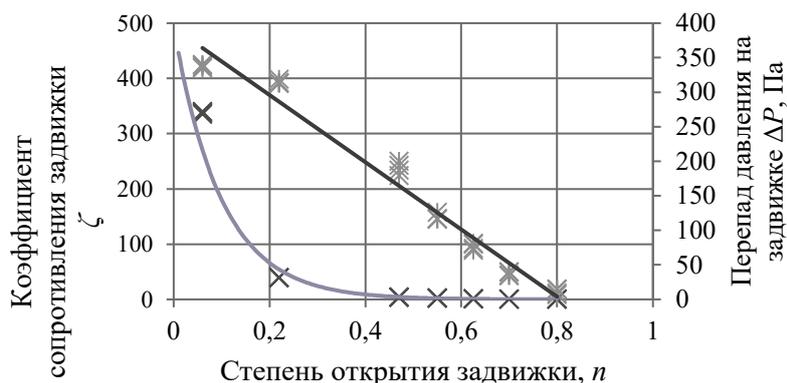


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента местного сопротивления задвижки и падения давления от степени открытия задвижки

В исследованиях, например, фирмы Atlas Copco (ударник Secoroc) и проф. Р.Ю. Подерни, отмечается, что применение станков СБШ с ППУ может значительно увеличить производительность, в некоторых случаях более чем на 50%, при этом снижая себестоимость бурения на 40% или более. Тем не менее, важно учитывать, что интенсивные удары поршня ударника по шарошке могут уменьшить её долговечность. Следовательно, необходимо контролировать силу удара поршня, чтобы уменьшить интенсивность изнашивания шарошки.

Согласно теореме сохранения импульса, силу удара поршня можно определить, используя параметры массы поршня (m), его скорости (v_n) и времени соударения (τ). Для стандартного ППУ модели М-48 с массой поршня около 5 кг, скоростью 3,94 м/с и временем соударения 0,001 с, сила удара может быть рассчитана по формуле 4:

$$P_{oc}^{v\partial} = m_n v_n / \tau = 20 \text{ кН}, \quad (4)$$

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

В результате проведения экспериментального бурения на полигоне Саблино с использованием шарошечного долота диаметром 85 мм на гранитных монолитах построены графики (рисунок 3)

зависимости скорости бурения от энергии удара, эксперимент проводился с использованием стандартного ударника Hitachi с энергией удара 350 Дж и ручного перфоратора, установленного во вращающемся ставе, с энергией удара 10 Дж.

Зависимости из рисунка 3 показывают возможность увеличения скорости бурения в два и более раз, но при этом отмечается значительное уменьшение стойкости долота с ростом энергии удара. Скорость бурения является функцией энергии удара и может быть определена по формуле 5:

$$v_{\text{бур}} = 0,0051A_{\text{уд}} + 0,272, R^2 = 0,9778 \quad (5)$$

где $A_{\text{уд}}$ – энергия удара, R^2 – величина достоверности аппроксимации.

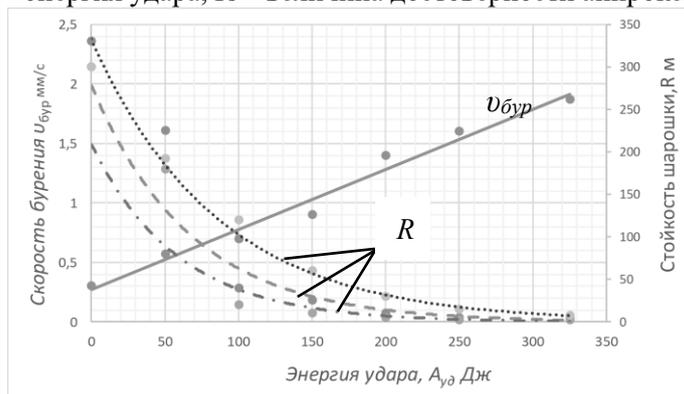


Рисунок 3 - Зависимости скорости бурения и стойкости шарошки от энергии удара ППУ

На рисунке 3 условно показаны предполагаемые зависимости уменьшения стойкости долота с ростом энергии удара. Конкретные значения стойкости долота должны определяться в результате ресурсных испытаний опытных образцов ППУ с различными массами ударников, установленных на буровом станке, работающем в различных горно-геологических условиях с различными типами шарошек. Предполагаемая зависимость стойкости шарошки от энергии удара может быть выражена формулой 6:

$$R_{\text{стойкость шарошки}} = 332,71e^{-0,012A_{\text{уд}}}, R^2=0,993 \quad (6)$$

Из рисунка 3 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.

Сохранение стойкости долота требует регулирования силы удара и изменения энергии удара в соответствии с различными типами горных пород.

Для реальных станков СБШ-250 и ППУ с массой ударника 7-10 кг, с учётом коэффициента запаса прочности шарошки сила удара должна быть ограничена 30% от осевого усилия, что для СБШ-250 с осевым усилием до 400 кН составит 120-130 кН, это соответствует гипотезе профессора Шигина А.О. о максимальном значении силы удара поршня в ППУ.

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.

Одной из ключевых проблем поиска новых технологических решений для буровых работ, требующих инновационного подхода, является повышение скорости бурения со снижением вибраций при бурении сложноструктурированных пород, а также переход от низкочастотных колебаний бурового става к высокочастотным.

Это может осуществляться за счёт использования трехмассовых ударных систем «поршень-боек-инструмент», которые позволяют перейти от колоколообразного импульса к семейству коротких импульсов меньшей амплитуды, что обеспечивает более стабильную работу шарошки без снижения её ресурса. Принцип работы трехмассовой системы (рисунок 4.в) основан на применении процесса «дребезга» (убыстряющиеся высокочастотные колебания) бойка между сближающимся поршнем и шарошкой.

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. В соответствии с указанным выше соотношением для тяжёлых ударников ($m_{\text{п}} > 5 \text{ кг}$)

отношение массы бойка и поршня должны составлять 0,02. Создание множественных микро импульсов позволяет создать суммарный ударный импульс любой формы.

В ходе экспериментальных исследований проводились серии ударов двумя типами ударников на разработанном стенде с системой фиксации ударного импульса при помощи двух цилиндров (цельного цилиндра и цилиндра с бойком), масса которых была одинакова (рисунок 4 а, б). Сигнал от датчика через схему компенсации электрических наводок поступали на аналоговый вход AI Channel 2 устройства DAQ Signal Accessory и далее на плату NI, установленную в шасси Q1604. Затем сигнал от датчика поступал в измерительный канал, конфигурируемый в среде NI Signal Express.

Для ударника с бойком учитывались преамплитуда (длина импульса на уровне 0,5) и площадь импульса (рисунок 5). Экспериментально были определены численные значения длительности фронта импульса (Δt_1), длительности первого ударного импульса на уровне 0,5 (Δt_2), а также амплитуды первого ударного импульса (A_1). Суммарное количество энергии удара оценивалось через величину, пропорциональную площади ударного импульса S_1 , рассчитываемую как произведение амплитуды импульса (A_1) на его длительность на уровне 0,5 (Δt_2). Данные показывают, что использование ударника с бойком повышает ударную мощность минимум на 30%, увеличивая тем самым эффективность работы шарошечного долота с ППУ.

Анализируя графики, можно утверждать, что использование удара с применением бойка, сопровождающееся постепенным увеличением ударной силы, может улучшать производительность шарошечного долота при эксплуатации ППУ.

Амплитуда импульса у цельного ударника на 11% выше, чем у ударника, оснащенного бойком, при этом длительность импульса у цельного ударника на 37% короче, если сравнивать с продолжительностью импульса от ударника с бойком.

Амплитуда импульса у цельного ударника оказалась на 11% выше, чем у модифицированного ударника с бойком, тогда как длительность импульса на половинной амплитуде у цельного ударника сокращается на 37% по сравнению с ударником с бойком.

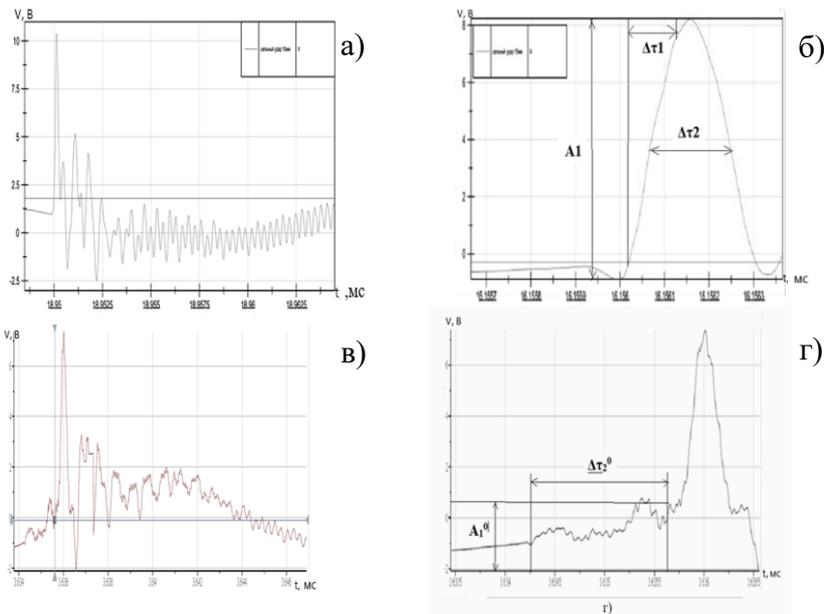


Рисунок 5 - Анализ ударных импульсов в программе Diadem
а) Удар цельным цилиндром; б) увеличенный фрагмент удара цельного цилиндра; в) удар с бойком; г) увеличенный фрагмент удара с бойком

При анализе ударных импульсов обнаруживается, что цельный ударник вырабатывает меньше энергии в сравнении с ударником, комплектованным дополнительным бойком. Это указывает на то, что энергия удара, с использованием промежуточного элемента "бойка" приводит к более равномерному распределению энергии удара во времени (рисунок 5.в). Это способствует снижению пиковых ударных нагрузок, обеспечивая улучшенные условия для работы шарошечного долота.

Особенно значимым является регулирование ударной силы в минимизации максимального ударного воздействия на хвостовик шарошки, что помогает предотвратить его перегрузку и изнашивание. Это критически важно для увеличения срока службы бурового оборудования и сокращения времени простоя, вызванного ремонтными работами.

Таким образом, управление и регулировка ударной функции ППУ улучшает эффективность и надежность буровых операций, обеспечивая более быстрое и безопасное проведение работ.

Выполненные исследования подтверждают, что станки СБШ с ППУ демонстрируют значительный прирост скорости бурения, достигая увеличения в диапазоне с интервалом 15-25%, а по данным Atlas Copco (Secogoc), этот прирост может быть даже до 50% при использовании специализированных шарошек.

В предположении условия аддитивности роста скорости бурения от осевой нагрузки и действия ППУ (по К.И.Иванову), суммарную скорость бурения от СБШ с ППУ можно рассчитать по формулам (7,8,9):

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{СБШ}} + v_{\text{ППУ}}, \quad (7)$$

где $v_{\text{СБШ}}$ – скорость бурения, обеспеченная осевым усилием станка, $v_{\text{ППУ}}$ – скорость бурения, обеспеченная погружным пневмоударником,

$$v_{\text{сбш}} = \frac{14400 P_k n}{44 D \sqrt{f^3}}, \quad (8)$$

где P_k – осевое усилие на долото при бурении, МН; n – частота вращения штанги, с^{-1} ; D – диаметр шарошки, f – крепость породы по шкале Протодьяконова

$$v_{\text{ппу}} = \frac{80 A_{\text{уд}} n_y}{f d^2}, \quad (9)$$

где $A_{\text{уд}}$ – энергия единичного удара = (150-300) Дж (для пневмоударника П-110), n_y – частота ударов = 22 с^{-1} , d – диаметр скважины, мм.

Учет сложности взаимосвязи между скоростью бурения от осевого усилия и воздействия ППУ для разных коэффициентов крепости породы f по шкале М.М. Протодьяконова, представлен следующим образом формулы 10, 11:

$$v_{\text{общ}} = v_{\text{СБШ}} + k_1 v_{\text{ППУ}} = \frac{14400 P_k n}{44 D \sqrt{f^3}} + k_1 \left(\frac{80 A_{\text{уд}} n_y}{f d^2} \right), \quad (10)$$

$$v_{\text{общ}} = (v_{\text{СБШ}} + v_{\text{ППУ}}) k_2 = \left(\frac{14400 P_k n}{44 D \sqrt{f^3}} + \frac{80 A_{\text{уд}} n_y}{f d^2} \right) k_2, \quad (11)$$

где, k_1 – коэффициент прироста скорости бурения с помощью ППУ, k_2 – коэффициент прироста суммарной скорости бурения, $v_{\text{ППУ}}$ – скорость бурения ППУ.

При коэффициенте k_1 равном 1,3 прирост скорости оказывается незначительным (около 5%, рисунок 7), что не соответствует экспериментальным данным. При увеличении энергии до предельного значения 300 Дж происходит увеличение скорости бурения на 10%. Это даёт основание считать, что необходимо пользоваться формулой (10), 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.

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния корпуса шарошечного долота в результате воздействия статической и ударной переменной нагрузки производилось в среде ANSYS. В результате моделирования, установлено, что максимальные напряжения в корпусе долота наблюдаются в месте контакта подшипника и корпуса (рисунок 8, а), а также в месте сопряжения лап и корпуса долота (рисунок 8, б).

Результаты показывают, что в подшипниках могут возникнуть повышенные напряжения, а прямое жесткое ударное воздействие по шарошке требует использования средств для снижения уровня такого воздействия. Прямой жесткий удар по шарошке может увеличить риск возникновения критических деформаций или повреждений.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях по выбору стали для изготовления долота, а также использовании регулирования силы удара с ударным механизмом «поршень-боек-шарошка», что может дополнительно улучшить распределение силы удара по всей поверхности шарошки, снижая напряжения в критических зонах долота, что будет способствовать его более равномерному изнашиванию. Кроме того, регулирование величины удара с помощью управляемой заслонки позволяет контролировать энергию удара, передаваемую на долото. Это критически важно для адаптации к различным типам пород и

условиям бурения, а также более плотного прилегания шарошки к забою.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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. – 2023. – № 1. – С. 107-118. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_107.

2. 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. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-96-105.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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. – 2022. – № 6-2. – С. 251-267. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_251.

4. 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. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.12

Статьи в прочих изданиях:

5. 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. – СПб.: Санкт-Петербургский Горный университет. – 2021. – С. 240-242.

6. **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. – СПб.: Санкт-Петербургский Горный университет – 2021. – С. 41-43.

7. Юнгмейстер, Д. А. Регулирование параметров погружного пневмоударника для СБШ / Д.А. Юнгмейстер, **Э.Э. Гасымов**, Соболева П. Д. // 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: УГГУ, 2022. – С. 162-165.

8. 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. 00018. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600018.

Патент:

9. 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», Бюл. № 11.

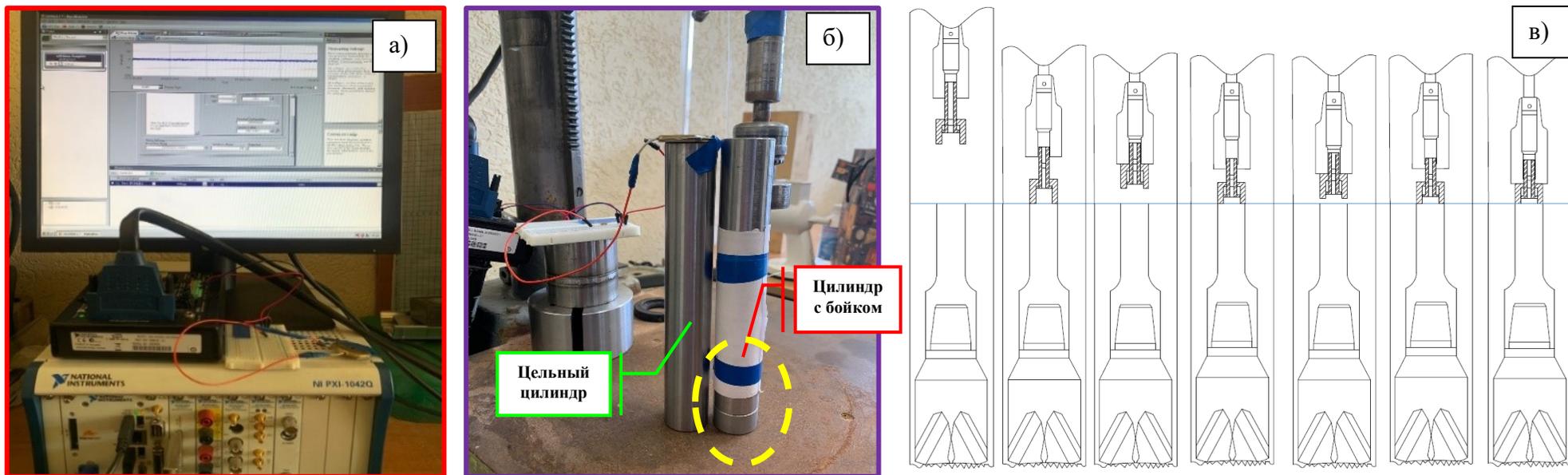


Рисунок 4 - Стенд системы фиксации ударного импульса

а) процессор и датчик DAQ Signal Accessory от фирмы National Instruments (NI); б) цельный цилиндр и цилиндр с бойком; в) удар бойка с погружным пневмударником и шарошечным долотом.

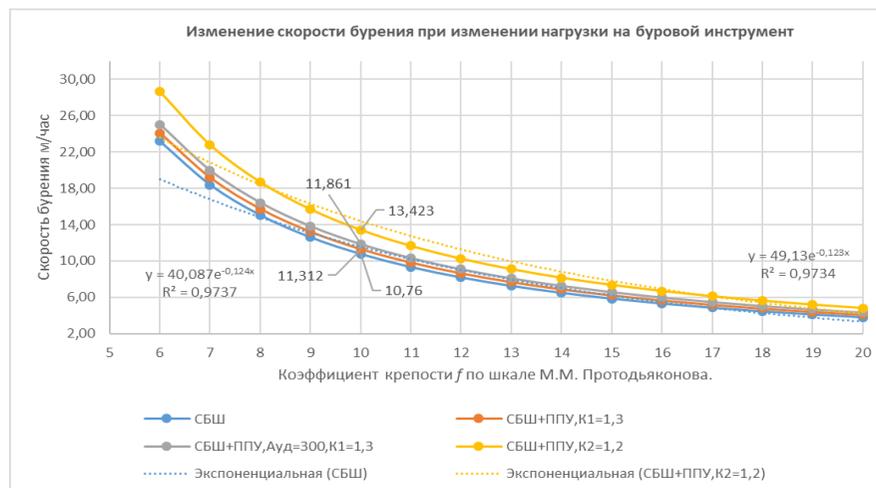


Рисунок 7 - График зависимости скорости бурения от коэффициента крепости f по шкале М.М. Протодяконова

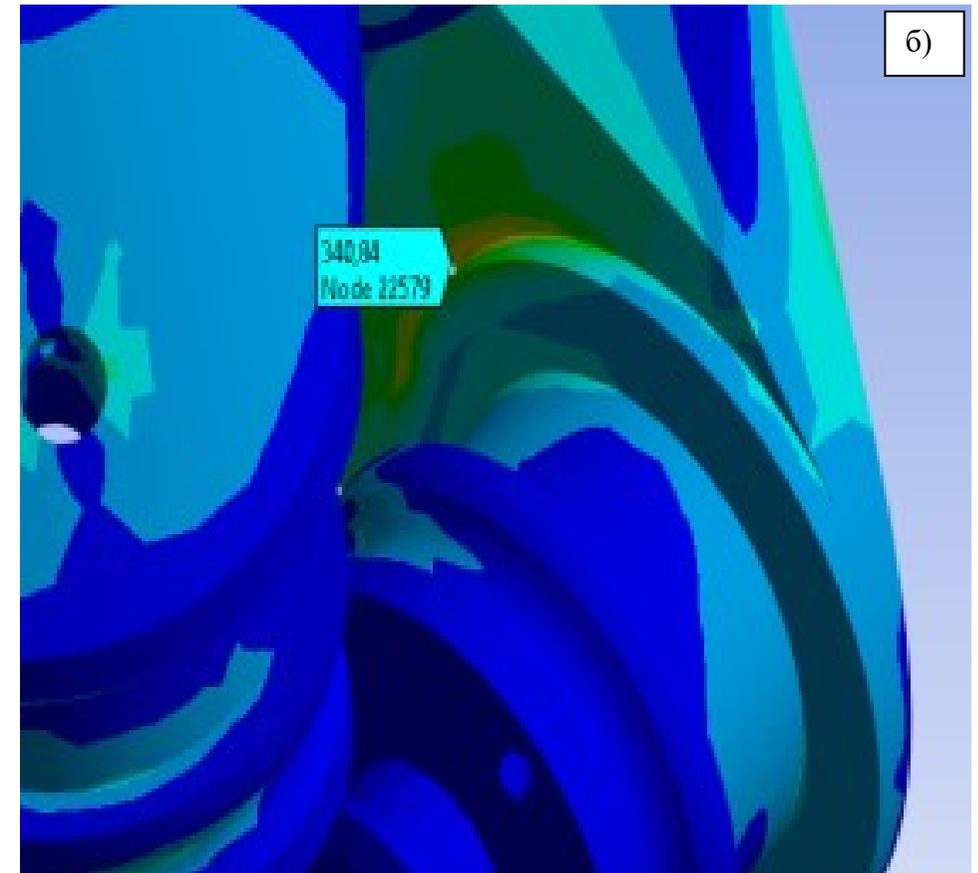
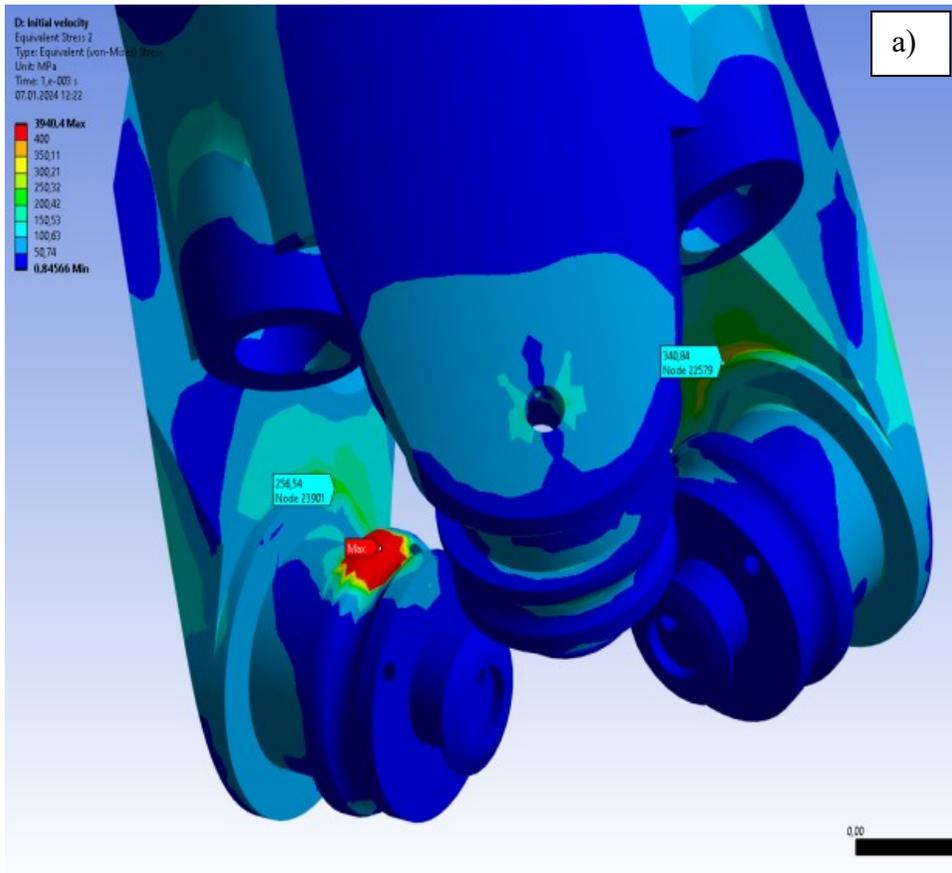


Рисунок 8 - а), б) Распределение напряжений в корпусе шарошечного долота при помощи моделирования в ANSYS