

На правах рукописи

Алиева Лейла



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО БЕЗЛЕЗВИЙНОГО
ИНСТРУМЕНТА**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Жуков Иван 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 **24 июня 2025 г. в 13:00** 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 № 3321**.

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

Автореферат разослан 24 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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

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

Степень разработанности темы исследования. Исследованию и проектированию конструкций бурильных машин, их элементов и процессов взаимодействия с объектом разрушения посвящены работы ряда ученых. Особый вклад внесли ученые: О.Д. Алимов, А.И. Бажал, Л.И. Барон, И.А. Бегагоен, Е.Ф. Губанов, А.В. Гилев,

С.Н. Гудимов, Л.Т. Дворников, С.В. Доронин, А.Г. Дядюра, А.Б. Жабин, И.А. Жуков, К.И. Иванов, В.В. Нескоромных, С.М. Никитенко, Ю.А. Прядко, А.С. Реготунов, Б.Н. Смоляницкий, Н.И. Сысоев, В.В. Тимонин, А.О. Шигин, Л.А. Шрейнер, Д.А. Юнгмейстер, Gang Cheng, Songyong Liu, Jialin Tian и др.

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

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

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

Цель работы – повышение эффективности ударно-поворотного бурения машинами, оснащенными безлезвийным породоразрушающим инструментом.

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

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

1. Систематизировать результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.
2. Оценить влияние геометрических характеристик безлезвийного бурового инструмента и его элементов на эффективность разрушения горной породы.
3. Провести аналитическое исследование влияния полей напряжений при симультанном (одновременном) воздействии на горную породу группой инденторов.
4. Провести экспериментальные исследования по разрушению горных пород породоразрушающим инструментом, армированным инденторами по различным схемам.
5. Разработать рекомендации по совершенствованию, рациональному выбору конструкций, схем и способов армирования инденторами породоразрушающего инструмента.

Научная новизна работы

1. Развита теоретическая основа задачи вдавливания плоского штампа Ж. Буссинеска и контактной задачи Г. Герца применительно к задаче симультанного разрушения горной породы двумя инденторами с учетом кривизны их рабочих поверхностей.
2. Установлена функциональная взаимосвязь между геометрическими параметрами элементов безлезвийного бурового инструмента, механическими свойствами разрушаемой горной породы, усилием ударного воздействия и глубиной внедрения инструмента.
3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость между показателями результативности ударного разрушения горной породы высокой крепости и соотношением расстояния между соседними инденторами и их диаметром, позволяющая определять оптимальную величину данного соотношения.
4. Предложен нетрадиционный подход к совершенствованию безлезвийного бурового инструмента, учитывающий влияние его геометрии и структуры на эффективность разрушения породы.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пунктам: 14 «Критерии и технологические

требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых» и 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах».

Теоретическая и практическая значимость работы:

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

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

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

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

Методология и методы исследования. Работа проводилась с использованием методов научного обобщения и анализа литературных источников и патентных материалов. В рамках исследования были выполнены численные расчёты, компьютерное моделирование

и экспериментальные испытания, направленные на оценку влияния геометрических параметров безлезвийного бурового инструмента на эффективность разрушения горной породы ударом. Экспериментальные и стендовые исследования выполнены на лабораторных установках с использованием современных приборов и аппаратуры.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (СПб, 2022 г., 2023 г.); Международный

форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (СПб, 2022 г., 2023 г.); III Всероссийская молодежная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и творчество: вклад молодежи» (Дагестан, 2022 г.); VII международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика» (СПб, 2024 г.); VIII международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (СПб, 2025 г.).

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

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание и особенности бурильных машин, показаны систематизированные известные виды породоразрушающих инструментов штыревого типа, а также безлезвийных твердосплавных вставок. Представлен анализ проблем, связанных с обоснованием конструктивного исполнения безлезвийного бурового инструмента. Выявлена необходимость разработки новых технических решений, обеспечивающих снижение энергозатрат и увеличение производительности буровых работ.

Во второй главе представлены теоретические исследования симультанного разрушения горной породы двумя инденторами при ударном воздействии на буровой инструмент. Определена функциональная взаимосвязь между свойствами разрушаемой горной породы, геометрическими параметрами индентора, условиями нагружения и глубиной внедрения инструмента. Приведен сравнительный анализ различных форм инденторов.

В третьей главе изложены результаты вычислительного и физического экспериментов по исследованию эффекта симультанности при разрушении горной породы безлезвийным буровым инструментом. Подтверждено, что симультанное внедрение инденторов формирует крупные сколы и снижает энергоёмкость бурения.

В четвертой главе представлены и обоснованы новые технические решения твердосплавной вставки и буровой коронки, применение которых позволяет уменьшить энергоёмкость процесса бурения, улучшить очистку забоя скважины от буровой мелочи и повысить механическую скорость бурения.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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

При ударно-поворотном способе бурения (рисунок 1) горных

пород высокой крепости инструмент разрушает породу преимущественно за счет ударной нагрузки F и периодически поворачивается для очистки забоя от разрушенных, но не отделившихся частиц. К машинам, реализующим такой способ, относятся буровые станки (НКР-100М, БП-100Н), перфораторы, пневмоударники (рисунок 2, а) и др., у которых ударная забойная мощность N_y составляет 90 % и более от общей мощности, расходуемой на забое, а 10 % приходится на мощность N_e от вращателя. Такие машины оснащаются штыревым безлезвийным буровым инструментом (рисунок 2, б). Конструкция типовой штыревой коронки включает в себя корпус с коническим или резьбовым отверстием для соединения буровой штангой, породоразрушающие вставки (инденторы, рисунок 2, в), изготовленные из твердого сплава (например, ВК-15), а также отверстия и каналы для отвода шлама. Эффективность процесса бурения ударно-поворотным способом оценивается механической скоростью, определяется объемом разрушенной за один удар породы и глубиной внедрения инструмента и, следовательно, зависит от геометрических параметров твердосплавных вставок, которыми оснащается буровой инструмент, от расстояния между соседними вставками и от общей схемы размещения вставок на рабочей поверхности инструмента.

Процесс одновременного (симультанного) внедрения твердосплавных вставок в горную породу при ударном воздействии можно разделить на несколько ключевых стадий (рисунок 3).

Под воздействием силы, приложенной к инденторам, происходит деформация поверхности породы с образованием площадки контакта, под которой возникает сложное напряженное состояние. Характер распределения напряжений зависит от геометрии индентора, величины приложенной силы, физико-механических свойств породы, наличия трещин и текстурных особенностей. При достижении предела прочности породы в наиболее напряженной зоне происходит хрупкое разрушение, проявляющееся в образовании лунки выкола. При определенном соотношении расстояния между соседними инденторами и их диаметра происходит наложение полей напряжений в породном массиве, что приводит к сколу породы в пространстве между инденторами относительно крупными частицами.

Решение задачи оценки эффективности симультанного разрушения горной породы двумя инденторами базируется на теоретических основах задачи вдавливания плоского штампа Ж. Буссинеска и контактной задачи Г. Герца. Поставленная задача решается в следующем порядке. Рабочая поверхность индентора разделяется на элементарные участки малой длины (рисунок 4, а). Благодаря этому, внедрение каждого отдельного участка в породу, происходящее под действием внешней силы, рассматривается с позиции задачи вдавливания кольцевого штампа (рисунок 4, б), что по сути соответствует задаче давления штампа круговой формы в плане с плоским основанием на полупространство (рисунок 4, в), площадь контакта которого с породой равна площади боковой поверхности элементарного участка индентора. При таких условиях глубина внедрения индентора определяется, согласно принципу суперпозиции, итерационным вычислением глубины внедрения в породу каждого участка и последующим суммированием полученных величин.

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

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

где E – модуль упругости, Па, μ – коэффициент Пуассона, φ_1 – функция, характеризующая перемещение штампа, причем

$$\varphi = -2(1-\mu)\varphi_1 \text{ мм.}$$

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

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) = & \frac{2}{\pi} h_u \cdot \arctg \theta^{-1} - \frac{4(1-\mu^2)Q}{\pi E \sqrt{(x-x_Q)^2 + (y-y_Q)^2 + z^2}} \times \\ & \times \arctg \frac{\theta \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2 - r^2}}{\sqrt{(x-x_Q)^2 + (y-y_Q)^2 + z^2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где h_u – глубина внедрения штампа, мм;

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

ординаты точки приложения силы Q .

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

$$h_u = \frac{P(1-\mu^2)}{2rE} + \frac{Q(1-\mu^2)}{\pi rE} \cdot \arctg \frac{r}{\sqrt{l_H^2 - r^2}}. \quad (3)$$

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

по формуле

$$S_i = 2\pi \int_{t_{i-1}}^{t_i} (x\sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2}) dt; \quad (4)$$

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

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

$$k_\phi = \sum_{i=1}^j \left[\left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{S_i}} + \frac{1}{\sqrt{\pi S_i}} \arctg \sqrt{\frac{1}{\pi l_H^2 / S_i - 1}} \right) \sin^2 \beta_i \right], \quad (5)$$

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

Чем больше значение коэффициента влияния формы индентора, тем на большую глубину он будет внедряться в горную породу при прочих равных условиях. Для сравнения эффективности симультанного разрушения горной породы двумя инденторами были взяты инденторы, рабочие поверхности которых выполнены по 4 вариантам: 1) сферическая форма; 2) баллистика (парабола); 3) индентор-катенид (цепная линия); 4) в форме тела вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через вершину трактрисы параллельно ее асимптоте, – благодаря уникальному свойству трактрисы обеспечивается эквидистантное изменение формы рабочего участка индентора при изнашивании.

Получены следующие результаты расчета коэффициента влияния формы инденторов, выполненных по 4 выбранным вариантам: 1 – 4,158; 2 – 6,376; 3 – 5,600; 4 – 6,712. Таким образом, применение трактрисы в качестве образующей боковой поверхности рабочего участка индентора обеспечит увеличение глубины внедрения в сравнении с традиционно применяемыми инденторами.

На рисунке 5 показана вставка, содержащая рабочий участок, выполненный в виде тела вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через вершину трактрисы параллельно её асимптоте. Геометрические параметры рабочего участка вставки задаются величинами диаметра d_H , длины рабочего участка l_p и высоты трактрисы a . В зависимости от исходных данных геометрические параметры вставки могут быть найдены по результатам решения трех задач

1) Если заданы диаметр d_H и высота трактрисы a , длина рабочего участка определяется выражением

$$l_p = a \cdot \arcsin(1 - d_H / 2) \cdot \ln \operatorname{tg}(\arcsin(1 - d_H / (2a)) / 2). \quad (6)$$

2) Если заданы длина рабочего участка l_p и высота трактрисы a , то диаметр индентора определится из формулы

$$d_H = 2a \cdot (1 - \sin \alpha), \quad (7)$$

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

3) Если заданы диаметр d_H и длина рабочего участка l_p , то высота трактрисы найдется как

$$a = d_H / (2(1 - \sin \alpha)), \quad (8)$$

где расчетная величина угла α определяется из выражения

$$l_p = \frac{d_H}{2(1 - \sin \alpha)} (\cos \alpha + \ln \operatorname{tg} \alpha). \quad (9)$$

На новое техническое решение твердосплавной вставки получен патент РФ № 225501 от 23.04.2024.

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

Анализ известных технических решений буровых коронок штыревого типа (пример приведен на рисунке 6, а) показывает, что отношение расстояния между осями соседних твердосплавных вставок к их диаметру l_H/d_H на практике принимается в интервале от 1 до 3 (рисунок 6, б). При этом указанное соотношение в работах различных ученых также не имеет конкретики (рисунок 6, в). Критериями оптимальности величины отношения l_H/d_H выступают объем и глубина разрушения породы при ударном воздействии и удельное количество инденторов в единицу площади рабочей поверхности корпуса бурового инструмента. Превышение оптимальной величины l_H/d_H приводит к тому, что за один удар разрушается не вся площадь забоя, и коронка войдет в контакт с породой корпусом, что приведет к его повреждению и приостановке процесса бурения для замены инструмента.

Вычислительные экспериментальные исследования, проведенные в среде T-Flex, позволили установить картину распределения напряжений в горной породе при нагружении двумя инденторами, расположенными на различном расстоянии друг от друга. В качестве моделируемой горной породы был выбран гранит с коэффициентом крепости 18. Вставки из твердого сплава ВК-15 со сферическими рабочими поверхностями были предварительно погружены на глубину, соответствующую рабочему участку, после чего к их торцам прикладывалась распределенная нагрузка, имитирующая воздействие ударной волны.

Результаты вычислительного эксперимента представляют собой градиентную диаграмму напряженно-деформированного состояния (рисунок 7), обеспечивающую возможность детального анализа напряженного состояния в любой точке модели. Основным критерием оценки влияния расстояния между геометрическими осями двух одновременно внедряемых вставок определялась величина расчетного напряжения $\sigma_{ми}$ в пространстве между этими вставками в сравнении с напряжением контактного разрушения ($\sigma_{кр}$) для заданного типа гранита.

Анализ результатов численного моделирования (таблица 1) позволил установить оптимальное значение параметра l_{II}/d_{II} . Полученные данные подтверждают гипотезу Барона Л.И. о существовании оптимального диапазона значений соотношения расстояния l_{II}/d_{II} от 1,67 до 1,71 для эффективного разрушения горной породы. Проводимые исследования показали, что при $l_{II}/d_{II} \leq 1,7$ происходит разрушение горной породы не только непосредственно под каждой вставкой, но и в пространстве между соседними вставками. Это свидетельствует о существенном влиянии соседних зон напряжений друг на друга, что приводит к более эффективному разрушению породы и увеличению скорости бурения.

С целью подтверждения полученных результатов, а также уточнения оптимального значения отношения l_{II}/d_{II} и оценке влияния особенностей одновременного внедрения групп твердосплавных вставок проведен физический эксперимент в условиях динамического воздействия на горную породу.

Экспериментальный стенд (рисунок 8) изготовлен по принципу ударного вертикального копра. За счет свободного падения боек наносит удар по штанге (ШБП Т-25-800), на конце которой закреплен инструмент, опирающийся на гранитный блок горной породы размерами 72х30х17 см со средним значением коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 18$. В качестве инструмента используется физическая модель коронки, оснащенная шаблоном, позволяющим устанавливать два индентора на разном расстоянии друг от друга. Для опытов были взяты инденторы цилиндросферические (Г26, ГОСТ 880-75), как наиболее распространенные в практике, и изготовленные по авторскому патенту № 225501 (рисунок 5).

По результатам эксперимента при оценке среднего объема

разрушения породы (V_{cp}) при одновременном ударном воздействии двумя цилиндросферическими инденторами (рисунок 9, а), выявлено, что отношение l_H/d_H имеет два оптимальных значения: 1,2 и 1,5. Полученные данные свидетельствуют о том, что при увеличении расстояния между инденторами ширина общей лунки выкола уменьшается (рисунок 10), т.е. при $l_H/d_H = 1,2$ зона концентрации контактных напряжений располагается ближе к поверхностному слою породы, а при $l_H/d_H = 1,5$ эта зона уходит вглубь, обеспечивая этим увеличение глубины внедрения инденторов h_{cp} за один удар в среднем на 13%, а также сокращение на 20% удельного количества инденторов на единицу площади рабочей поверхности коронки.

Очевидно, что результаты физического и вычислительного эксперимента расходятся. Это означает, что исследование буровых коронок штыревого типа должно проводиться не в статических условиях, а в динамических – при непосредственном моделировании ударного воздействия на породу.

Оценка среднего объема разрушения породы (V_{cp}) и глубины общей лунки выкола (h_{cp}) при одновременном ударном воздействии двумя новыми инденторами (рисунок 9, б), показала, что оптимальной величиной отношения l_H/d_H является 1,5. Можно сделать вывод, что оптимальное расстояние между соседними инденторами является величиной, независимой от формы рабочего участка индентора, и для инструмента, применяемого при ударно-поворотном бурении оптимальной величиной l_H/d_H следует считать 1,5.

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

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

Любая схема размещения инденторов на рабочей поверхности буровой коронки может быть представлена в виде набора групп инденторов, расположенных в вершинах треугольника. Согласно условию разрушения горной породы не только под индентором, но и в пространстве между ними, длина сторон треугольника должна соответствовать величине оптимального соотношения l_{II}/d_{II} , т.е. должна быть равна 1,2-1,5 от диаметра индентора. Углы между сторонами треугольника при этом должны задаваться в диапазоне 47-77°. Этим условиям удовлетворяет схема размещения инденторов по концентрическим окружностям (рисунок 11) в количестве $z = (6 - z_u)k$, где k – порядковый номер окружности при отсчете от центра коронки, z_u – количество инденторов в центре коронки (0 или 1). При этом диаметр инденторов задается в 6,58-9,12 раз меньше диаметра коронки. При таких размерах и схеме размещения инденторов обеспечивается разрушение породы в пространстве между инденторами, при этом буровая коронка может быть повернута на любой угол.

Для оптимизации процесса бурения, снижения вероятности отклонения скважины от заданного направления бурения и повышения эффективности очистки забоя, конструкция буровой коронки должна быть выполнена с выпукло-вогнутым рабочим профилем. С этих позиций разработано новое техническое решение безлезвийной буровой коронки, защищенное патентом РФ №2801724 (рисунок 12).

В предложенной конструкции буровой коронки породоразрушающая поверхность образована вращением относительно продольной геометрической оси коронки синусоиды, описываемой в прямоугольной системе координат уравнением

$$y = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{3\pi}{D}x - \frac{\pi}{2}\right), \quad (10)$$

где D – диаметр коронки; $H = (0,15 \dots 0,20)D$ – глубина вогнутой части, при которой обеспечивается жесткость установки инденторов и отсутствие существенного влияния изгибных деформаций.

Твердосплавные вставки устанавливаются равномерно по концентрическим окружностям, проходящим через вершины и точки перегиба синусоиды, а геометрическая ось каждого индентора является нормалью синусоиды. Благодаря заданным соотношениям за один удар происходит разрушение по всей поверхности забоя.

Очистка забоя скважины от разрушенной буровой мелочи

происходит при подаче через центральное сквозное отверстие сжатого воздуха или промывочной жидкости. Благодаря тому, что породоразрушающая поверхность выполнена по синусоиде, поток промывочного агента направляется через вогнутую часть во всех направлениях не только между твердосплавными инденторами, но и под ними, и далее по касательной к синусоиде выносит шлам вдоль стенок скважины (рисунок 13), не препятствуя процессу бурения.

Механическая скорость бурения пневмоударником, оснащенный предложенной буровой коронкой с инденторами, выполненными по трактрисе, оценивалась в сравнении со скоростью бурения традиционно применяемой в пневмоударниках штыревой коронкой с полусферическими инденторами по формуле

$$V = V_0 - \zeta L, \quad (11)$$

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

Расчет проводился для условий бурения скважины длиной $L = 25$ м пневмоударником ПП-105 с параметрами: число ударов в минуту $n = 2000$, $\zeta = 0,0004$ мин⁻¹. Начальная скорость бурения была пересчитана с учетом того, что глубина внедрения инструмента за один удар увеличивается на 10%, как это установлено экспериментом. Тогда, для пород различной крепости ($f = 10 \dots 20$) механическая скорость бурения увеличивается на 11,0-12,5% (рисунок 14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

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

устанавливать рациональную форму индентора, обеспечивающую максимальную глубину внедрения инструмента.

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

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

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

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

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

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Алиева Л.** Анализ конструкций безлезвийного бурового инструмента и постановка проблем его совершенствования / **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 157-170. – DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-157-170.

2. Теплякова А.В. Компьютерное моделирование динамических процессов в элементах бурильных машин ударного действия / А.В. Теплякова, **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 161-171. – DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-161-171.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

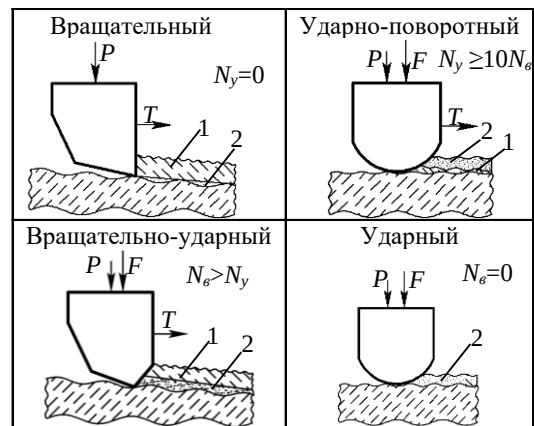
3. Теплякова А.В. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин / А.В. Теплякова, А.М. Азимов, **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №9. – С. 120-132. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_120.

4. **Алиева Л.** Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента / **Л. Алиева, И.А. Жуков** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, №4. – С. 1681-1694. – DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент № 2801724 Российская Федерация, МПК E21B 10/48(2023.05). Буровая коронка. Заявка № 2023109387: заявл. 13.04.2023 : опубл. 15.08.2023 / **Л. Алиева, И.А. Жуков**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 13 с.

6. Патент № 225501 Российская Федерация, МПК E21B 10/56(2006.01). Породоразрушающая твердосплавная вставка. Заявка № 2024109420: заявл. 08.04.2024 : опубл. 23.04.2024 / И.А. Жуков, **Л. Алиева, А.Е. Боева**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 7 с.



P – осевое усилие; T – крутящий момент;
1 – порода, разрушаемая срезом; 2 – порода, разрушаемая ударной нагрузкой

Рисунок 1 – Распределение мощности при разных способах бурения

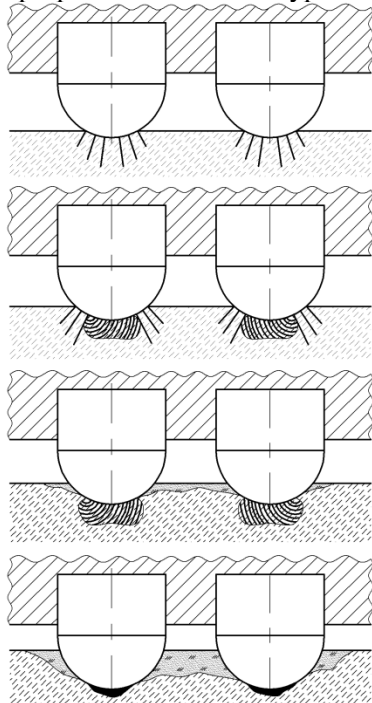


Рисунок 3 – Стадии хрупкого разрушения горной породы



а

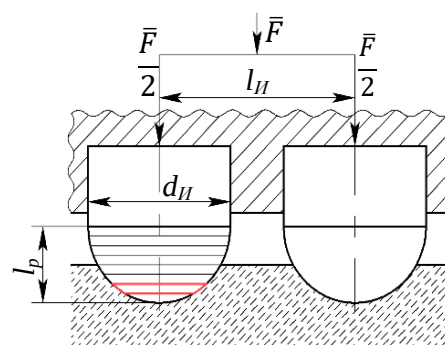


б

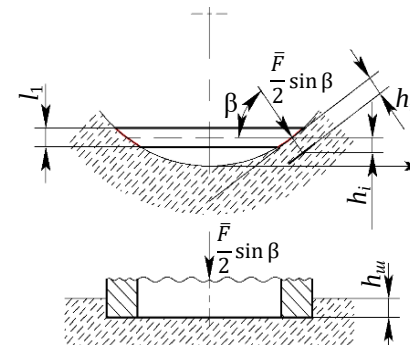


в

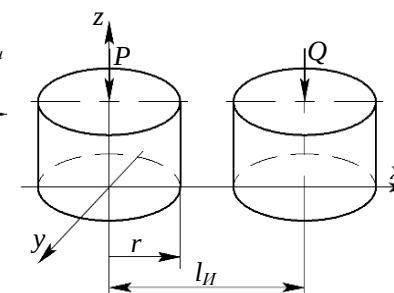
Рисунок 2 – Элементы горных машин для ударно-поворотного бурения: а – погружные пневмоударники; б – беззвонные буровые коронки; в – инденторы различной формы



а



б



в

Рисунок 4 – Симультанное внедрение инденторов в горную породу: а – внедрение двух инденторов; б – вдавливание кольцевого штампа; в – вдавливание двух штампов с плоской круговой формой в плане

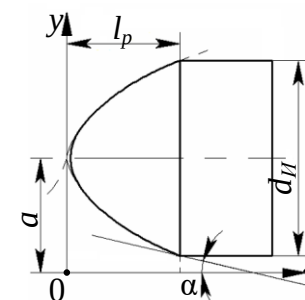
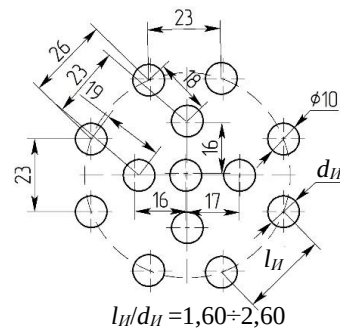


Рисунок 5 – Индентор с рабочим участком, выполненным по трактрисе



B

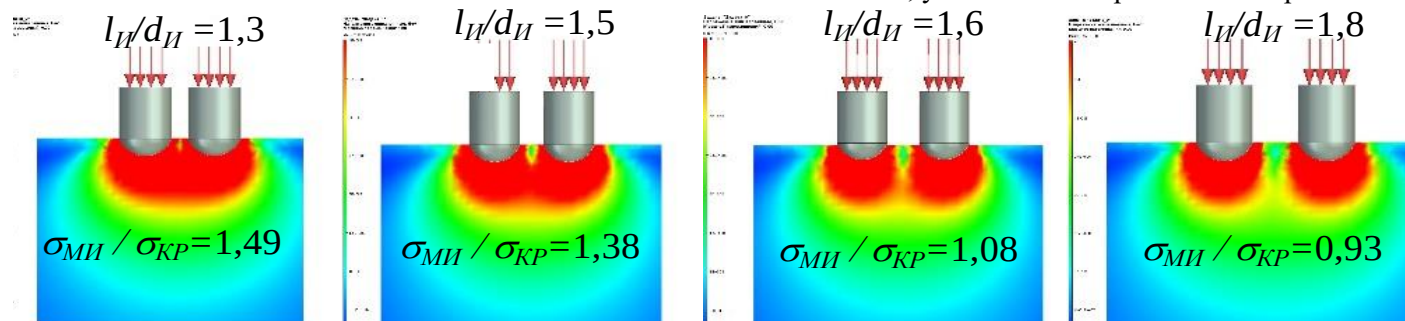


Таблица 1 – Результаты вычислительного эксперимента

l_H / d_H	$\sigma_{MH} / \sigma_{KP}$
1,22	1,87
1,30	1,49
1,38	1,50
1,46	1,38
1,54	1,25
1,63	1,08
1,71	1,03
1,79	0,93

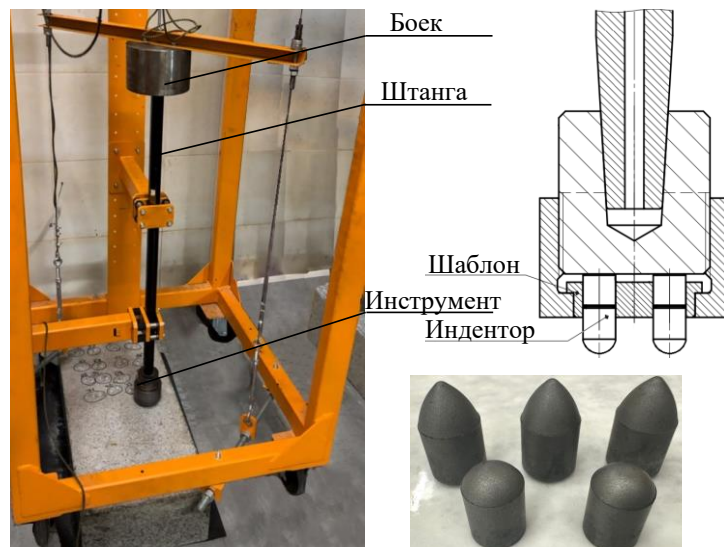


Рисунок 8 – Экспериментальное оборудование

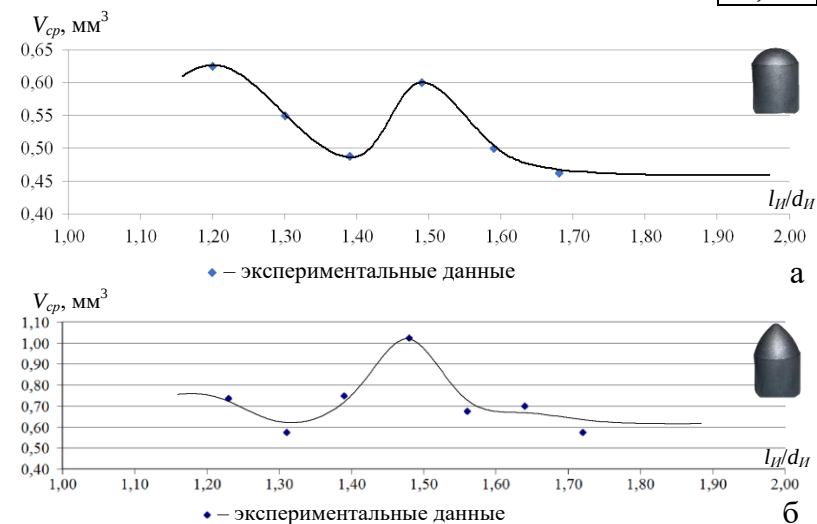


Рисунок 9 – Усреднённые результаты экспериментального исследования разрушения породы: а – цилиндросферическими инденторами; б – инденторами с рабочим участком, выполненным по трактрисе

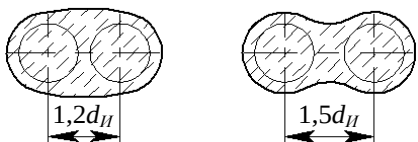


Рисунок 10 – Лунки выкола при разном расстоянии между инденторами

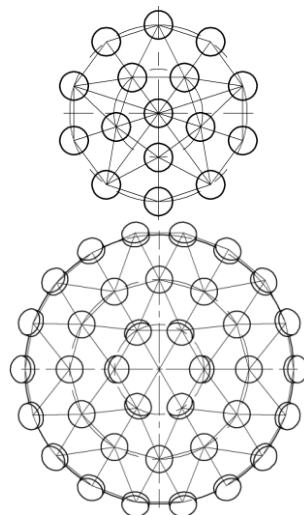


Рисунок 11 – Схемы размещения инденторов

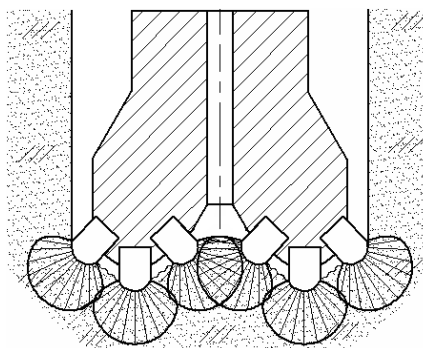


Рисунок 12 – Буровая коронка по патенту №2801724

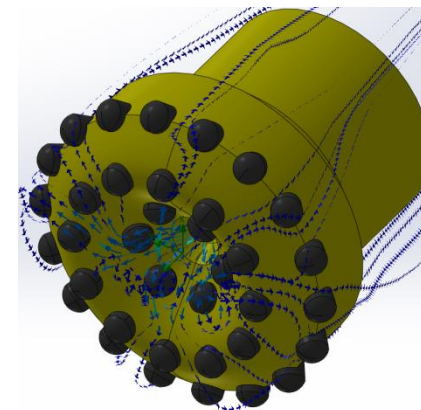


Рисунок 13 – Распределение потока промывочного агента

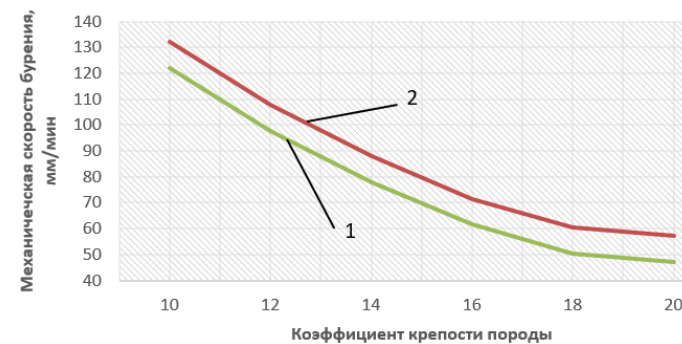


Рисунок 14 – Сравнение механической скорости бурения при использовании традиционного (1) и авторского инструмента (2)