

На правах рукописи

Зигангиров Рамиль Ринатович



**ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ВЗРЫВНОЕ
ДРОБЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОГО МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД**

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Виноградов Юрий Иванович

Официальные оппоненты:

Тюпин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра прикладной геологии и горного дела, профессор;

Реготунов Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория разрушения горных пород, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск.

Защита диссертации состоится **16 июня 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 апреля 2026 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ

Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день в России около 70 % от общего объема добычи твердых полезных ископаемых добывается открытым способом. Ввиду постепенного истощения запасов богатых руд, в эксплуатацию вводятся участки месторождений, имеющие низкое содержание полезного компонента в руде и характеризующиеся сложными горно-геологическими условиями, что приводит к увеличению объемов вынимаемой горной массы. Эти факторы предъявляют новые требования к ведению буровзрывных работ, основанные на рациональном использовании ресурсов и снижении затрат с учётом достижения заданного качества взрыва.

При ведении буровзрывных работ (БВР) на горных массивах с неоднородным геологическим строением параметры БВР рассчитываются на основании усредненных физико-механических свойств пород, в результате чего масса зарядов взрывчатого вещества (ВВ) либо больше, либо меньше необходимого, что приводит к неудовлетворительному качеству фрагментации горной массы.

Таким образом, расчёт параметров БВР на месторождениях с неоднородным геологическим строением, учитывающих изменчивость физико-механических свойств пород, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Усложнение горно-геологических условий предъявляет новые требования к оперативному определению физико-механических свойств пород в подготавливаемом к взрыву блоке. Одним из перспективных методов является идентификация горных пород по параметрам бурения взрывных скважин. Большой вклад в развитие этого направления внесли И.А. Тангаев, В.А. Коваленко, С. Н. Жариков: за рубежом R. Teale, M.J. Scoble, J.A. Sanchidrian и др. В России наиболее полную практически реализуемую методику предложил И.А. Тангаев, оценивая

энергоёмкость разрушения горных пород при бурении и взрывании и сравнивая их между собой. Однако, полученные зависимости требуют актуализации ввиду появления более новых и совершенных станков шарошечного бурения. Стоит отметить, что вариация сетки скважин на блоке при применении данной технологии невозможна, таким образом управлять можно только количеством потенциальной энергией взрыва, заложенной во взрываемый блок.

Вопросом взрывного разрушения геологически неоднородного массива горных пород занималось большое количество отечественных ученых: Н.В. Мельников, В.А. Белин, Б.Н. Кутузов, А.В. Дугарцыренов, В.Х. Кантор, Р.А. Рахманов, Ш.А. Камолов и др. В работах ученых рассматривались методы создания различных конструкций скважинного заряда с учетом физико-механических свойств пород и взрывчатых характеристик самих ВВ, тем самым закладывая в массив горных пород необходимое количество энергии ВВ. Но рациональное решение может быть достигнуто только в том случае, если известны физико-механические свойства пород, слагающих буровзрывной блок.

Таким образом, задача расчёта параметров буровзрывных работ на массивах с неоднородным геологическим строением требует дальнейшего развития.

Предмет исследования: энергозатраты на разрушение горных пород взрывом.

Объект исследования: процессы разрушения взрывом массивов горных пород с неоднородным геологическим строением.

Цель работы: минимизация энергозатрат на дробление неоднородных массивов горных пород взрывом и обеспечение снижения выхода негабаритной фракции во взорванной горной массе.

Идея заключается в определении коэффициента крепости горных пород по параметрам шарошечного бурения взрывных скважин и расчёте массы скважинного заряда на основе эталонных удельных энергозатрат на дробление различных по крепости горных пород взрывом, полученных методом воронкообразования.

Задачи исследования

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта определения физико-механических свойств горных пород подготавливаемого к взрыву блока по параметрам шарошечного бурения и расчёта параметров буровзрывных работ на массивах с неоднородным геологическим строением.

2. Определение корреляционных зависимостей между физико-механическими свойствами горных пород, слагающих исследуемый массив, и параметрами шарошечного бурения взрывных скважин.

3. Определение эталонных удельных энергозатрат на взрывное дробление пород с различными физико-механическими свойствами.

4. Создание метода расчёта массы и выбора конструкции каждого скважинного заряда на основе результатов, полученных при проведении экспериментальных работ, и реализация ее в виде компьютерной программы, позволяющей автоматизировать процесс расчёта.

5. Апробация полученных результатов путем проведения опытно-промышленных взрывов.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является разработка метода расчёта массы и выбора конструкции скважинного заряда с учетом неоднородного геологического строения массива горных пород.

Научная новизна

1. Установлена логарифмическая зависимость удельной энергоёмкости бурения шарошечным способом от коэффициента крепости горных пород.

2. Установлена зависимость эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород Куранахского рудного поля взрывом от их коэффициента крепости.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам: 7,9.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработанный метод расчёта массы и выбора конструкции каждого скважинного заряда, основанные на определении физико-механических свойств пород подготавливаемого к взрыву блока по параметрам шарошечного бурения внедрены в деятельность АО «Полюс Алдан» (акт внедрения от 05.07.2024 г.).

Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684396 «Программа расчета коэффициента крепости горных пород параметрам, полученным при бурении взрывных скважин» от 13.12.2022 г., № 2024683950 «Программа расчета массы скважинного заряда на основе параметров, полученных при бурении взрывных скважин» от 14.10.2024 г.

Методология и методы исследования.

При проведении исследования использовались анализ и научное обобщение исследований по определению энергозатрат на разрушение горных пород. Для определения физико-механических свойств горных пород применялись регламентируемые государственными стандартами методы определения предела прочности при различных видах нагружения. Параметры шарошечного бурения измерялись в полевых условиях установленным на буровом станке сертифицированным оборудованием. Экспериментальные и опытно-промышленные взрывы проводились с применением взрывчатых материалов, допущенных к применению в Российской Федерации. Оценка

объема разрушения горных пород на экспериментальных взрывах проводилась с применением сертифицированного оборудования и программного обеспечения. Методы математической обработки данных были применены для анализа и интерпретации результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Коэффициент крепости горных пород для месторождений с неоднородной геологической структурой при бурении взрывных скважин достоверно определяется на основе эмпирической зависимости этого коэффициента от параметров шарошечного бурения, установленной по результатам исследований на контрольных скважинах.

2. Взаимосвязь коэффициента крепости с эталонными удельными энергозатратами на дробление горных пород взрывом с достаточной для практических целей точностью описывается линейной зависимостью в диапазоне значений коэффициента крепости от 6 до 10.

3. При взрывании геологически неоднородного массива горных пород определение массы и конструкции скважинного заряда на основе эталонных удельных энергозатрат при дроблении горных пород взрывом позволяет снизить выход негабарита на 2-5 % и уменьшить расход взрывчатых веществ в среднем на 20 %.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается представительным объемом данных лабораторных и натурных экспериментов, проведенных с использованием сертифицированного оборудования; результатами опытно-промышленных взрывов и практической реализацией разработанных рекомендаций при производстве взрывных работ на месторождениях Куранахского рудного поля.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 2

научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

1. IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI в.: технологии, наука, образование», Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 26-28 октября 2021 г.

2. XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 16-20 мая 2022 г.

3. XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023», НИТУ «МИСиС», г. Москва, 30 января-3 февраля 2023 г.

4. XII Международный научно-практический форум «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, 27-31 мая 2025 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе научной литературы по теме исследования, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований, сборе и анализе данных, формулировании защищаемых положений и выводов. Проведена обработка и интерпретация результатов полевых исследований по определению зависимостей удельной энергоёмкости бурения шарошечным способом и удельных энергозатрат на взрывное дробление от коэффициента крепости горных пород для условий месторождений Куранахского рудного поля.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 100 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 33 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю – к.т.н., старшему научному сотруднику, доценту кафедры взрывного дела [Ю.И. Виноградову], к.т.н., доценту, доценту кафедры взрывного дела С.В. Хохлову за развитие идей, помощь и поддержка которых способствовали успешному выполнению всех этапов работы, а также признательность к.т.н., ассистенту кафедры взрывного дела С.Т. Соколову и к.т.н. В.А. Маккоеву за помощь в планировании и проведении полевых экспериментов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен анализ методов расчёта параметров буровзрывных работ. Выявлено, что при ведении буровзрывных работ на массивах горных пород с неоднородным геологическим строением параметры БВР рассчитываются по усредненным значениям физико-механических свойств пород, что приводит к неудовлетворительному качеству взрыва.

Показано, что оценка физико-механических свойств горных пород в подготавливаемом к взрыву блоке по параметрам

шарошечного бурения позволяет более точно рассчитывать параметры буровзрывных работ, что позволяет уменьшить затраты на разрушение пород взрывом.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния основных физико-механических свойств горных пород на параметры шарошечного бурения. Дано детальное описание методики проведения данных исследований. Были получены корреляционные зависимости между скоростью и удельной энергоемкостью бурения и пределом прочности пород на сжатие. Установлена зависимость удельной энергоёмкости бурения горных пород шарошечным способом от коэффициента крепости горных пород.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению эталонных удельных энергозатрат на дробление взрывом горных пород различной крепости по методу воронкообразования (метод Ливингстона). Дано детальное описание методики проведения исследований. Установлена зависимость эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом от коэффициента крепости.

В четвертой главе приведен метод расчёта массы заряда в каждой скважине с учетом неоднородности геологического строения подготавливаемого к взрыву блока. Представлена блока-схема программы для ЭВМ, позволяющей автоматически рассчитывать массу скважинного заряда на основе данных, полученных при бурении взрывных скважин шарошечным способом. Представлены результаты опытно-промышленных испытаний, отражающие эффективность предлагаемого метода расчёта.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Коэффициент крепости горных пород для месторождений с неоднородной геологической структурой при

бурении взрывных скважин достоверно определяется на основе эмпирической зависимости этого коэффициента от параметров шарошечного бурения, установленной по результатам исследований на контрольных скважинах.

Определение физико-механических свойств горных пород на основе параметров шарошечного бурения является наиболее перспективным и наименее затратным методом оценки геологического строения подготавливаемого к взрыву блока.

Современные научные исследования и практические рекомендации сводятся к определению классификации пород по скорости или удельной энергоемкости бурения с дальнейшей привязкой к каждой группе пород своего значения удельного расхода. Минус такого подхода к классификации заключается в том, что строение буровзрывного блока, а, следовательно, и физико-механические свойства пород принимаются на основе данных геологоразведки или по обнажениям пород на свободных поверхностях блока. Такой подход вполне применим на горных массивах, в которых различные геологические тела имеют точно установленные и условно постоянные направления падения и простираия (например, угольные месторождения).

Однако на месторождениях, где геологическое строение массива горных пород включает в себя обширный спектр пород со значительно отличающимися физико-механическими свойствами, при этом направления их падения и простираия меняются от одного буровзрывного блока к другому, требуется районирование по высоте уступа, при этом каждая взрывная скважина должна рассматриваться отдельно, так как в районе каждой из них могут находиться породы с совершенно разными физико-механическими свойствами.

Для определения влияния физико-механических свойств пород был выполнено бурение нескольких контрольных скважин.

На основе анализа актуальной геологической информации исследуемого месторождения были выделены характерные типы горных пород и участки их заложения, как по площади, так и по глубине. На этих участках были отобраны образцы горных пород из кернов инженерно-геологических скважин для определения их плотности и пределов прочности на одноосное сжатие, растяжение и срез со сжатием. Анализ полученных данных показал тесную корреляцию ($R^2 = 0,87$) между значениями пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение, в результате чего в дальнейшем анализе можно было оперировать более привычным в производственных условиях коэффициентом крепости пород, так как он рассчитывается следующим образом (1):

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{10}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на одноосное сжатие, МПа.

Вблизи каждой инженерно-геологической скважины были пробурены три скважины станком шарошечного бурения с установленным на нем специальным оборудованием, позволяющим фиксировать параметры бурения по глубине скважины: осевое давление на долото, давление для создания крутящего момента на вращателе, давление воздуха на продувку скважины, частота вращения, скорость бурения, удельная энергоёмкость бурения. После чего результаты лабораторных испытаний сопоставлялись с данными бурения в соответствии с глубиной залегания полученных образцов горных пород.

Было установлено, что наибольшее влияние коэффициент крепости оказывает на такие показатели, как скорость бурения и удельная энергоёмкость бурения. Ввиду того, что скорость бурения может резко возрасти при попадании в пустоты и трещины массива, в качестве показателя трудности разрушения пород была выбрана удельная энергоёмкость шарошечного

бурения, корреляционная зависимость от коэффициента крепости которого имеет логарифмический вид ($R^2 = 0,85$, рисунок 1) (2):

$$E = 14,56 \cdot \ln(f) + 9,35, \quad (2)$$

где f – коэффициент крепости горных пород.

После алгебраических преобразований коэффициент крепости горных пород можно рассчитать по следующему выражению (3):

$$f = 0,53 \cdot 1,07^E \quad (3)$$

Полученная зависимость с достаточной для производственных целей точностью позволяет определить коэффициент крепости горных пород по глубине каждой скважины.

2. Взаимосвязь коэффициента крепости с эталонными удельными энергозатратами на дробление горных пород взрывом с достаточной для практических целей точностью описывается линейной зависимостью в диапазоне значений коэффициента крепости от 6 до 10.

Одним из основным параметров буровзрывных работ является удельный расход ВВ, который физически отражает количество энергии взрыва, необходимой для достижения заданного качества взрыва.

Известно, что затраты энергии при механическом дроблении твердых материалов пропорциональны объёму деформируемой среды, вновь образованной поверхности продуктов разрушения и среднему геометрическому из объёма и поверхности объекта разрушения.

Согласно гипотезе П.А. Ребиндера, плотность поверхностной энергии, необходимой для создания новой свободной поверхности, для данной совокупности физико-механических свойств остаётся постоянной.

Общие затраты на дробление твердых тел $A_{др}$ есть сумма энергетических затрат на их деформацию и образование новых поверхностей (4):

$$A_{др} = \frac{\sigma_r^2}{2E}V + \sigma_n S, \quad (4)$$

где σ_r – прочностная характеристика породы;

E – модуль упругости;

V – объём разрушения;

σ_n – плотность поверхностной энергии;

S – площадь вновь образованной поверхности.

В то же время работа на дробление есть часть полной энергии взрыва (5):

$$A_{др} = \eta A = \eta q e V = \eta g V, \quad (5)$$

где η – коэффициент полезного действия взрыва;

A – полная энергия взрыва;

q – удельный расход ВВ;

e – удельная теплота взрыва ВВ;

V – объём разрушаемого материала;

g – удельные энергозатраты на дробление горных пород взрывом.

Подставив выражение (5) в формулу (4), выведем формулу расчета площади вновь образованной поверхности (6):

$$S = \frac{(\eta g - \frac{\sigma_r^2}{2E})V}{\sigma_n}, \quad (6)$$

Для 1 м³ породы площадь вновь образованной поверхности зависит только от удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом и КПД взрыва.

Исходя из предположения А.Ф. Суханова о прямой пропорциональности площадей плоскости отрыва и общей поверх-

ности кусков разрушенной породы, можно сделать вывод: существует некоторое значение эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом, которое обеспечивает максимальный объем разрушения пород и КПД дробления. К такому же выводу пришел С.В. Livingston, проанализировав данные, полученные методом воронкообразования.

Тогда задача сводится к определению корреляционной зависимости эталонных удельных энергозатрат взрывом от их коэффициента крепости, для чего была разработана следующая методика экспериментальных работ:

1. выбор участков массива горных пород, каждый из которых сложен одним типом пород с известным коэффициентом крепости;
2. проведение экспериментальных взрывов методом воронкообразования (методом Ливингстона);
3. обработка результатов экспериментальных взрывов.

Экспериментальные работы были проведены на породах типа «известняк» и «песчаник» и включали в себя серию взрывов на 4-х участках.

После проведения взрывных работ разрушенная горная масса разбиралась и замерялся объем получившейся воронки. Эталонные удельные энергозатраты на дробление горных пород взрывом для пород данной крепости определялись как (7):

$$g_{\text{эт}} = \frac{Q}{V_{\text{max}}} e \text{ (кДж/м}^3\text{)} \quad (7)$$

где Q – масса заряда ВВ, кг;

V_{max} – максимальный объем воронки для пород данной крепости, м³;

e – удельная теплота взрыва ВВ, кДж/кг (для аммонита № 6 ЖВ принималась равной 4312 кДж/кг).

Полученные данные позволили определить зависимость эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород

взрывом от коэффициента крепости (для $f = 6 \div 10$) (рисунок 2) (8):

$$g_{\text{эт}} = 310,46 \cdot f + 1129,7, \quad (8)$$

Таким образом, при известном значении коэффициента крепости горных пород можно рассчитать эталонные удельные энергозатраты на дробление горных пород взрывом, обеспечивающие максимальное КПД действия взрыва и объем разрушения.

3. При взрывании геологически неоднородного массива горных пород определение массы и конструкции скважинного заряда на основе эталонных удельных энергозатрат при дроблении горных пород взрывом позволяет снизить выход негабарита на 2-5 % и уменьшить расход взрывчатых веществ в среднем на 20 %.

При взрывании геологически неоднородного массива горных пород количество ВВ закладывается с запасом, так как при расчёте параметров БВР используют усредненные или максимальные значения физико-механических свойств пород. Однако, эти свойства могут разительно отличаться по высоте каждой скважины, а, следовательно, и по площади буровзрывного блока.

Для обеспечения максимального объема разрушения и достижения максимального КПД взрыва каждого скважинного заряда была разработана следующая методика расчёта массы и выбора конструкции скважинного заряда:

1. определяется средневзвешенное значение коэффициента крепости горных пород на каждом единичном участке скважины f_i по значениям удельной энергоемкости шарошечного бурения этой скважины (9):

$$f_x = \frac{\sum_{k=1}^i f_k \cdot l_k}{l_x}; \quad (9)$$

где f_k – коэффициент крепости пород на элементарном отрезке (под элементарным отрезком понимается часть единичного отрезка скважины, в пределах которого параметры бурения не изменяются);

l_k – длина элементарного отрезка скважины, м;

l_x – длина единичного участка скважины, м (в данной работе принималось равным 1 м).

2. для каждого единичного участка скважины рассчитывается требуемая энергия заряда ВВ Q_i по формуле (10):

$$Q_i = \frac{g_i V_i}{e}; \quad (10)$$

где g_i – удельные энергозатраты на дробление взрывом пород с коэффициентом крепости f_i , кДж/м³;

V_i – объем разрушаемого единичного участка, определяется как произведение сетки скважин на длину единичного участка, м³;

e – удельная теплота взрыва применяемого ВВ, кДж/кг.

3. Рассчитывается суммарная масса применяемого ВВ для каждой скважины, а при необходимости выбирается отличная от сплошной конструкция заряда.

В соответствии с этим алгоритмом (рисунок 3) было проведено 3 опытно-промышленных взрыва на массиве с неоднородным геологическим строением. Параметры буровзрывных работ по искомой и предлагаемой методикам представлены в таблице 1.

Результаты опытно-промышленных взрывов показали, что расчёт массы и выбор конструкции скважинного заряда по предлагаемой методике позволяет сократить расходы ВВ на один массовый взрыв в среднем на 20 %, выход негабарита до 5 % и увеличить производительность экскавации на 15-20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение научно-технической задачи, направленной на снижение затрат на дробление горных пород взрывом и уменьшение негабаритной фракции во вз-

рванной горной массы при ведении буровзрывных работ на массивах с неоднородным геологическим строением за счёт разработки комплексного метода расчёта массы и выбора конструкции каждого скважинного заряда с учетом физико-механических свойств горных пород.

По результатам выполнения диссертационной работы сформулированы следующие результаты:

1. Показано, что при ведении взрывных работ на горных массивах с неоднородным геологическим строением необходимо применять системы мониторинга параметров бурения взрывных скважин, позволяющие получить в полевых условиях информацию о физико-механических свойствах пород с достаточной для производственных целей точностью.

2. Установлено, что наибольшее влияние на скорость и удельную энергоёмкость шарошечного бурения оказывает предел прочности пород на сжатие, что позволяет перейти к более привычному в производственной деятельности коэффициенту крепости пород.

3. Выявлена эмпирическая зависимость коэффициента крепости пород f от удельной энергоёмкости шарошечного бурения E .

4. Установлено, что для каждого типа пород существует эталонное значение удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом, обеспечивающее максимальный объём разрушения пород.

5. Выявлена эмпирическая зависимость эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом от коэффициента крепости в пределах значений этого коэффициент $f = 6 \div 10$.

6. Разработан метод расчёта массы и выбора конструкции скважинного заряда, позволяющий снизить расход взрывчатых веществ на один взрыв на 20 % и уменьшить выход негабарита на 2-5 %.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований по теме диссертация является определение эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом для всего интервала значений коэффициента крепости.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Зигангиров Р.Р.** Алгоритм определения зависимости между параметрами бурения и физико-механическими свойствами горных пород / **Зигангиров Р.Р.**, Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Рахманов Р.А. // Научно-технический сборник «Взрывное дело». – 2021. – № 133/90. – С. 122-136.

2. Виноградов Ю.И. К вопросу проектирования буровзрывных работ на месторождениях со сложным геологическим строением на примере Куранахского рудного поля / Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., **Зигангиров Р.Р.**, Рахманов Р.А. // Научно-технический сборник «Взрывное дело». – 2022. – № 137/94. – С. 45-65.

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

3. Виноградов, Ю.И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением / Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов, **Р.Р. Зигангиров**, А.А. Мифтахов, Ю.И. Суворов // Записки Горного института. – 2024. – Т. 266. – С. 231-245. EDN RUUFNM

4. Виноградов, Ю.И. Энергетическая концепция расчёта массы скважинного заряда на карьерах при изменчивости физико-механических свойств горных пород / Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов, **Р.Р. Зигангиров** // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2024. – №6. – С.50-68. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_6_0_50.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Зигангиров Р.Р.** Исследование энергозатрат на взрывное разрушение неоднородного массива / **Р.Р. Зигангиров** // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. – 2022. – Том 1. – С. 411-414. EDN MNYVEB.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684396 Российская Федерация. Программа расчёта коэффициента крепости горных пород параметрам, полученным при бурении взрывных скважин. Заявка № 2022683251: заявл. 01.12.2022; опубл. 13.12.2022 / С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов, **Р.Р. Зигангиров**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683950 Российская Федерация. Программа расчета массы скважинного заряда на основе параметров, полученных при бурении взрывных скважин. Заявка № 2024681239: заявл. 16.09.2024; опубл. 14.10.2024 / С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов, **Р.Р. Зигангиров**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

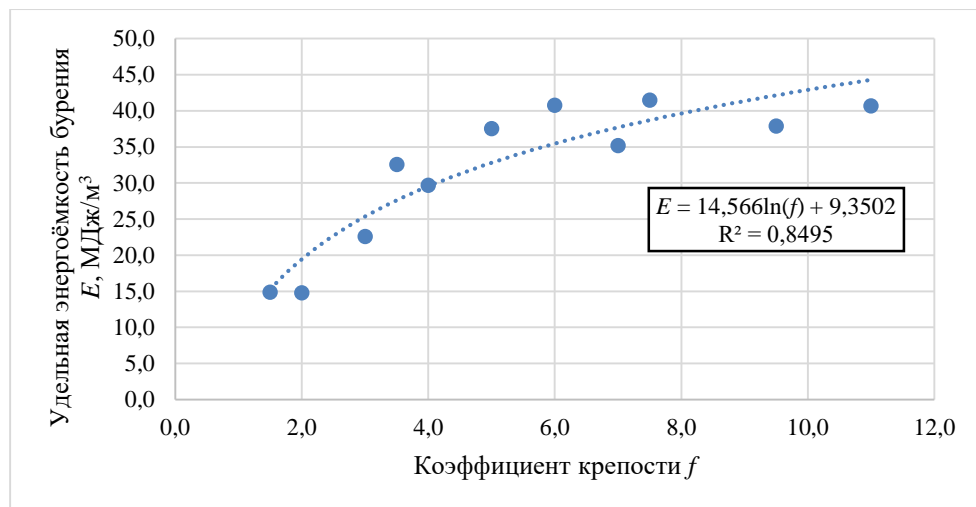


Рисунок 1 – Распределение средневзвешенных значений удельной энергоёмкости шарошечного бурения в соответствии со значениями коэффициента крепости

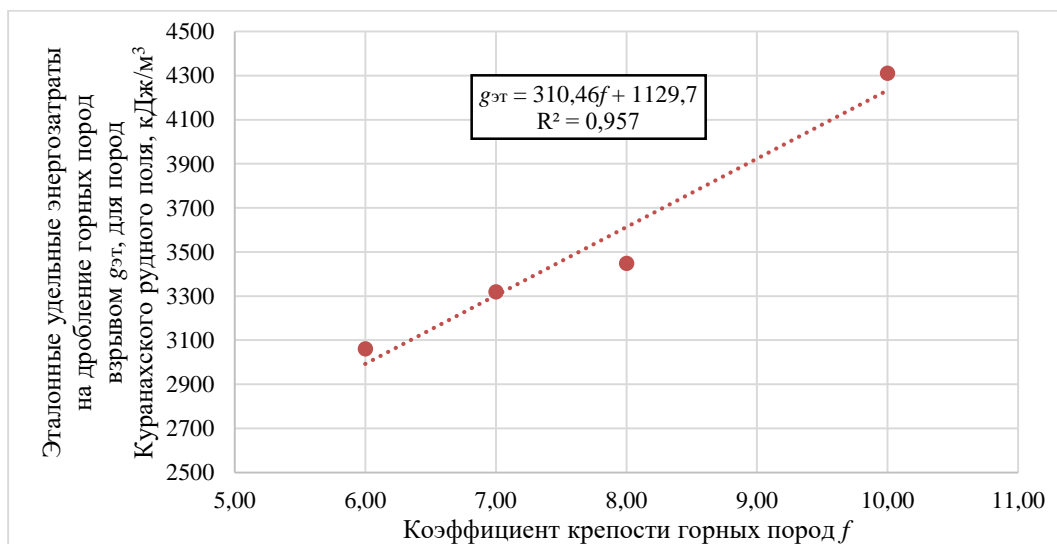


Рисунок 2 – Распределение значений эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом $g_{эт}$ от их коэффициента крепости f

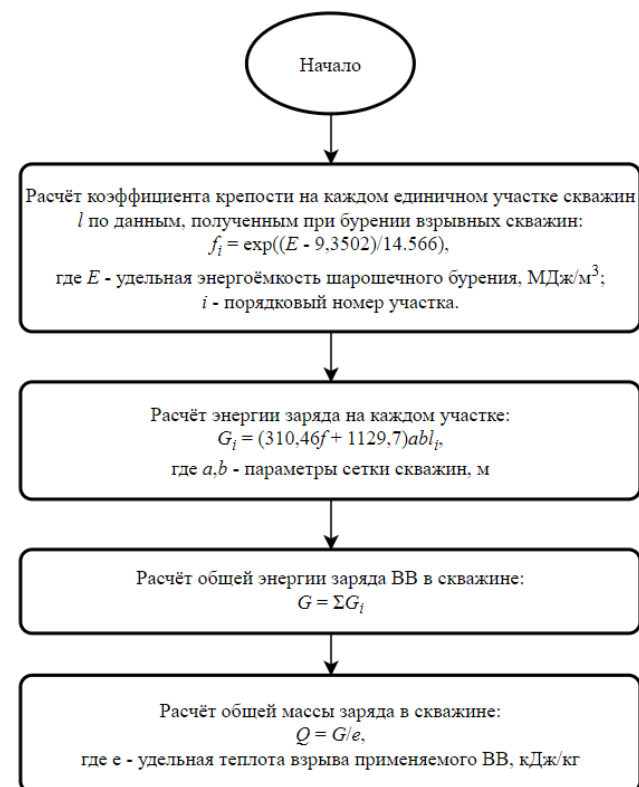


Рисунок 3 – Принципиальная блок-схема расчёта массы скважинного заряда по данным, полученным при бурении взрывных скважин

Таблица 1 – Параметры БВР при различных вариантах расчёта и экономический эффект

	1 блок		2 блок		3 блок	
	Исходный вариант	Предлагаемый вариант	Исходный вариант	Предлагаемый вариант	Исходный вариант	Предлагаемый вариант
Высота уступа H_y , м	7		6		11	
Величина перебура $l_{пер}$, м	0,5-1		0,5-1		0,5-1	
Удельный расход ВВ на блок q , кг/м ³	0,69	-	0,58	-	0,57	-
Сетка скважин $a \times b$, м	6 x 6		6 x 7		6 x 6	
Взрывчатое вещество	Гранулит РП		Гранулит РП		Гранулит РП	
Промежуточный детонатор	ПТ-П 750		ПТ-П 750		ПТ-П 750	
Система инициирования	Неэлектрическая		Неэлектрическая		Неэлектрическая	
Масса одного скважинного заряда $Q_{зар}$, кг	152*	114**	140*	114**	209*	152**
Выход негабарита, %	16	13	21	19	24	19
Средняя производительность экскавации в смену, м ³ /смена	3200	3700	3500	4200	3600	4200
Увеличение производительности экскавации, %	15		20		16	

* данные приведены по наибольшему количеству скважин на взрываемом блоке

** значения в столбце «Предлагаемый вариант» являются средними по каждому экспериментальному участку