

На правах рукописи

Маккоев Вячеслав Алексеевич



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ
НА КАРЬЕРАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С УЧЕТОМ ВОЛНОВОГО ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ
ПРИ ВЗРЫВЕ**

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

**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:

кандидат технических наук, доцент

Хохлов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

Закалинский Владимир Матвеевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел Проблем геомеханики и разрушения горных пород, ведущий научный сотрудник;

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 сентября 2025 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

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

Автореферат разослан 16 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Горнодобывающая промышленность – одна из основных в экономике страны. Сегмент производства нерудных материалов на российском рынке является неотъемлемой частью горной отрасли. Щебень – наиболее широко используемый продукт добычи и переработки нерудных строительных материалов, который используется для дорожного строительства, производства железобетонных изделий (ЖБИ), производства товарного бетона, прокладки и ремонта ж/д путей и др.

Экономическая эффективность щебеночных карьеров напрямую зависит от объема производства товарного сырья, имеющего спрос на рынке продукции. В целях определения количества добытого щебня в рамках расчета налога на добычу полезных ископаемых с 01.09.2022 г., согласно подпункту 10 пункта 2 статьи 337 Налогового кодекса РФ (НК), определяется всё количество добытого сырья, независимо от его физического состояния и фракции. Приведенное изменение в НК свидетельствует как о необходимости повышения качества конечного продукта в виде щебня, так и об увеличении негативного воздействия повышенного выхода отсевов дробления при производстве щебеночной продукции.

При добыче строительного камня в настоящее время сохраняется проблема повышенного выхода (до 30 %) отсева, что приводит к уменьшению объемов кондиционных фракций и созданию неблагоприятной экологической обстановки из-за организации отсевных отвалов. Все вышеперечисленное ведет к снижению экономической эффективности предприятий.

Повышенный выход отсева при производстве щебня объясняется тем, что при выборе параметров буровзрывных работ недостаточно полно учитывают физико-механические свойства пород и характеристики применяемых взрывчатых ве-

ществ (ВВ). При этом, несмотря на широкий ряд представленных решений в данной области, рациональное использование недр на основе вариации параметров буровзрывных работ (БВР) позволит снизить выход некондиционных фракций щебня, что позволит значительно улучшить экономическую эффективность горных предприятий.

Степень разработанности темы исследования

Вопросу снижения выхода мелочи при дроблении породы на щебень и определению параметров взрыва посвящены работы Адушкина В.В., Викторова С.Д., Виноградова Ю.И., Журкова С.Н., Кочанова А.Н., Кутузова Б.Н., Менжулина М.Г., Мисника Ю.М., Покровского Г.И., Ракишева Б.Р., Ребиндера П.А., Ржевского В.В., Шевкуна Е.Б. и др. Труды этих ученых внесли значительный вклад как в теоретическую, так и в практическую составляющую производства взрывных работ при добыче нерудных строительных материалов.

Несмотря на широкий ряд представленных решений, разработка новой концепции, основанной на экспериментальных данных, представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Предмет исследования – зона предразрушения в массиве горных пород, образующаяся при ведении взрывных работ на карьерах строительных материалов.

Объект исследования – процессы разрушения горных пород взрывом на карьерах строительных материалов.

Цель работы – снижение выхода некондиционной фракции щебня (отсева) при ведении буровзрывных работ на карьерах по добыче щебеночной продукции.

Основная идея работы заключается в снижении степени предразрушения кусков взорванной горной массы за счет уменьшения диаметра заряда и применения взрывчатых веществ с пониженной скоростью детонации.

Задачи исследования:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта в области разрушения горных пород взрывом на карьерах строительных материалов.

2. Исследование влияния взрывчатых и детонационных характеристик взрывчатых веществ на размеры зон предразрушения.

3. Определение корреляционной зависимости концентрации образованных взрывом микротрещин от напряжений, возникающих в горной породе при взрыве на различных расстояниях.

4. Определение корреляционной зависимости величины напряжений, возникающих в горной породе при взрыве от относительного расстояния в случае приведения используемых взрывчатых веществ к эталонному взрывчатому веществу типа Аммонит № 6ЖВ.

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

Научная новизна:

1. Получена зависимость между напряжениями, возникающими в горной породе на различных расстояниях при взрыве, и детонационными характеристиками взрывчатых веществ с учетом свойств взрываеваемого массива.

2. Установлены зависимости размеров зон предразрушения от детонационных характеристик взрывчатых веществ.

3. Выявлена эмпирическая зависимость между концентрацией образованных взрывом микротрещин и напряжениями в горной породе при взрыве.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

9. Развитие теории и разработка способов и средств разрушения и предразрушения горных пород механическими, взрывными, гидравлическими, тепловыми, электрофизическими, комбинированными и другими воздействиями.

10. Воздействие взрывов на массив горных пород, горные выработки, подземные и наземные сооружения, на окружающую среду.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработанные способы управления размерами зон предразрушения при БВР, основанные на вариации основных параметров БВР и применяемых ВВ, используются в деятельности АО «Полюс Алдан» (акт внедрения от 05.07.2024 г.) и АО «ЭВОБЛАСТ РУС» (акт внедрения от 24.05.2024 г.) при добыче щебеночной продукции.

Получены свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662255 «Программа расчета полей напряжений в массиве горных пород при динамическом воздействии» от 07.06.2023 г. и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680786 «Программа для расчета основных параметров воронки выброса» от 14.12.2021 г.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования выполнен обзор, анализ и научное обобщение результатов исследований отечественных и зарубежных ученых в области ведения буровзрывных работ на карьерах строительных материалов и в области формирования зоны структурного ослабления прочности пород. Эксперименты были использованы для определения размеров зон предразрушения и интенсивности наведенной взрывом микро-трещиноватости. Экспериментальные исследования проводились как в полевых, так и в лабораторных условиях. Измерение

было выполнено для конкретизации результатов полевых испытаний. Методы математической обработки данных были применены для анализа и интерпретации результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Размеры зоны предразрушения $R_{пред}$ для исследуемого известняка определяются диаметром заряда d и скоростью детонации взрывчатого вещества D по зависимости вида: $R_{пред} = (d/2) \cdot (0,014 \cdot D + 4,56)$ при $(\sigma_{мин} \geq 0,15 \cdot \sigma_{сж})$.

2. Степень предразрушения массива горных пород определяется количеством микротрещин на единицу объема, а концентрация микротрещин N является функцией напряжений σ , возникающих в породе, и имеет вид: $N = 37,44 \cdot \sigma - 641,2$.

3. Для щебеночных карьеров, при выборе параметров буровзрывных работ (диаметр, тип взрывчатого вещества) необходимо учитывать размер зоны предразрушения как основного источника формирования мелких фракций при вторичном дроблении.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается корректным анализом и обобщением более ранних научных исследований влияния параметров буровзрывных работ на выход некондиционной фракции щебня, полигонными и промышленными исследованиями дробления массива горных пород в условиях разработки месторождения «Бурное» Куранахского рудного поля, а также положительным результатом использования рекомендаций при добыче щебеночной продукции на АО «Полюс Алдан».

Апробация диссертационного исследования проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 3 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» (октябрь 2021 года, г. Санкт-Петербург).

2. XVIII международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 года, г. Санкт-Петербург).

3. XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023» (февраль 2023 года, г. Москва).

4. XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (декабрь 2024 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в проведении анализа технической и научной литературы, разработке методики исследования, подготовке и проведении полевых испытаний, проведении лабораторных исследований, сборе, анализе и обобщении результатов, формулировании защищаемых положений и выводов. Проведены обработка и интерпретация результатов полевых испытаний по определению параметров взрывных волн и размеров зон предразрушения в условиях действующего месторождения «Бурное».

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 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 2 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами в каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений,

словаря терминов, списка литературы, включающего 158 наименований, списка иллюстративного материала и 4 приложений. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю – к.т.н., доценту, доценту кафедры взрывного дела Хохлову С.В., к.т.н., старшему научному сотруднику, доценту кафедры взрывного дела Виноградову Ю.И., развитие идей, помощь и поддержка которых способствовали успешному выполнению всех этапов работы, а также признательность к.т.н., ассистенту Соколову С.Т. и аспиранту Зигангирову Р.Р. за помощь в планировании и проведении полевых экспериментов и практические советы при написании диссертации.

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 рассмотрен механизм образования зоны предразрушения при ведении БВР, определены параметры БВР и характеристики применяемых ВВ, влияющие на размеры зон предразрушения. Проанализированы методы определения размеров зон структурного ослабления породы по различным существующим методикам, обусловлен факт выхода отсева после дробления непосредственно с зон предразрушения. Проведена постановка задач исследования.

Во второй главе поставлены задачи экспериментальных исследований, выбраны критерии оценки результатов полигонных и лабораторных испытаний. Описаны методики проведения измерений скорости детонации ВВ, измерения напряжений в горной породе, отбора образцов горных пород, измерения гранулометрического состава взорванной горной массы, описаны условия проведения и программа проведения экспериментов.

Также представлена методика проведения лабораторных экспериментов.

В третьей главе детально описаны полевые и лабораторные исследования по определению размеров зон предразрушения и степени предразрушенности среды при ведении взрывных работ. Найдены зависимости между напряжениями, возникающими в горной породе на различных расстояниях при взрыве, и скоростью детонации ВВ. Определена зависимость концентрации образованных взрывом микротрещин от напряжений, возникающих в породе при взрыве.

В четвертой главе определена зависимость между геометрическими параметрами заряда и напряжениями, возникающими в горной породе при взрыве. Установлено, что мелкая фракция щебня образуется при переработке предразрушенной горной массы. Отражены результаты опытно-промышленных испытаний, отражающие эффективность использования приведенных рекомендаций.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Размеры зоны предразрушения $R_{пред}$ для исследуемого известняка определяются диаметром заряда d и скоростью детонации взрывчатого вещества D по зависимости вида: $R_{пред} = (d/2) \cdot (0,014 \cdot D + 4,56)$ при $(\sigma_{мин} \geq 0,15 \cdot \sigma_{сж})$.

Зона структурного ослабления ограничивается областью наведенных взрывом микротрещин, а наведение этих микротрещин (волновое предразрушение) зависит от величины напряжений, возникающих в горной породе при взрыве.

Разрушение породы главным образом зависит от энергии волн напряжения, распространяющихся в среде. Одной из важнейших волновых характеристик, влияющих на величину напряжения, является импульс взрыва, который предопределяет все последующие фазы развития взрыва: деформацию породы, ее дробление и перемещение горной массы. Параметры

взрывного импульса, влияющие на характер разрушения породы, зависят от скорости детонации применяемого взрывчатого вещества.

Понятие предразрушения касается не только части массива, находящейся за зоной регулируемого дробления, но и отдельных фрагментов горной породы после взрыва из зоны дробления. Это важно, поскольку эти куски имеют наведенную взрывом микротрещиноватость, которая способствует структурному ослаблению прочности этих кусков и, как следствие, повышается выход мелкой фракции при дальнейшей переработке взорванной горной массы на щебень.

Были измерены ускорения смещений горной породы на различных расстояниях от взрыва с целью получения сведений о характере волновых процессов при взрывных работах. Измерения проводились на экспериментальных взрывах с регистрацией ускорений смещения горной массы измерительными преобразователями. Замер ускорений на трех относительных расстояниях от взрыва – 10, 40 и 70 радиусов заряда был проведен с взрыванием зарядов Аммонита № 6ЖВ, Гранулита РП и Эмульсолита А-20. Выбор расстояний обусловлен максимальной изученностью процессов разрушения в данных зонах. При каждом взрыве регистрировалась скорость детонации ВВ.

Схема расположения скважин для каждого взрыва представлена на рисунке 1. Слева оранжевым цветом обозначена взрывная скважина, синим - отмечены измерительные скважины для размещения датчиков. Справа обозначено размещение датчиков относительно зарядов.

Каждый акселерометр был закреплен в скважине алебастром с добавлением буровой мелочи на уровне центра заряда ВВ. Показания ускорений смещения были проинтегрированы в скорости смещения, а связь между напряжениями, возникающими в горной породе, и скоростью смещения при

воздействии сейсмозрывной волны устанавливалась с помощью пересчета данных о массовых скоростях на параметры возникающих напряжений путем расчета напряжения в горной породе по формуле (1):

$$\sigma_0 = \rho_0 \cdot C_p \cdot U_x \quad (1)$$

где σ_0 – напряжения, возникающие в горной породе, Па;

ρ_0 – плотность породы, кг/м³;

C_p – скорость распространения продольной волны в массиве, м/с;

U_x – скорость смещения породы, м/с.

Зависимость напряжений, возникающих в горной породе на различных расстояниях до взрыва, от скорости детонации имеет вид экспоненты для ближних расстояний и линейна с увеличением расстояния до взрыва.

Превышение сжимающих нагрузок свидетельствует о разрушении (необратимым деформационным изменениям структуры) горной породы. Согласно данным исследований по акустической эмиссии, активность, свидетельствующая о начале процессов микротрещинообразования в исследуемом типе пород, появляется при давлении порядка 15 % от предела прочности породы на одноосное сжатие. У исследуемой горной породы предел прочности $\sigma_{сж}$ составляет 95 МПа. Принимаемые 15 % от предела прочности породы на сжатие соответствуют 14,25 МПа, что принимается критерием предразрушения $\sigma_{мин}$ в целике.

Результаты обработки данных по напряжениям представлены на рисунке 2.

Вертикальными линиями на графике обозначены границы зон предразрушения, которые находятся в пределах от 33 до 77 радиусов заряда. График зависимости размера зоны предразрушения в радиусах заряда от скорости детонации ВВ представлен на рисунке 3.

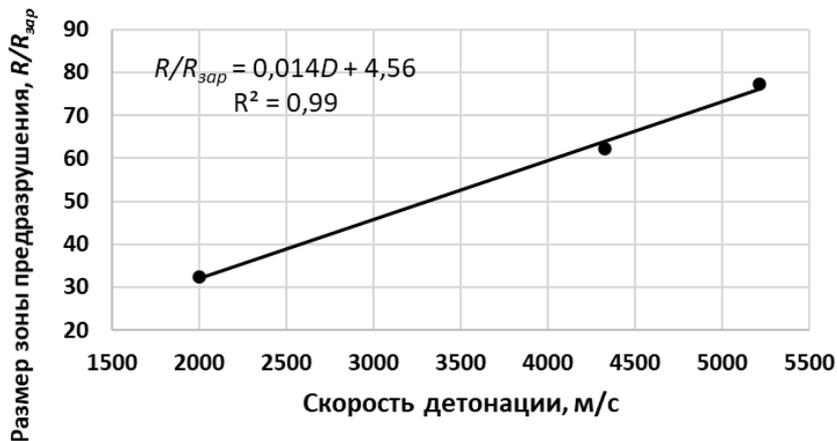


Рисунок 3 – Размер зоны предразрушения от скорости детонации ВВ

Зависимость размера зоны предразрушения в исследуемой породе от скорости детонации ВВ и диаметра заряда имеет линейный вид (2):

$$R_{пред} = (d/2) \cdot (0,014 \cdot D + 4,56), \text{ м} \quad (2)$$

при $(\sigma_{мин} \geq 0,15 \cdot \sigma_{сж})$

где $\sigma_{мин}$ – критерий предразрушения, МПа;

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

2. Степень предразрушения массива горных пород определяется количеством микротрещин на единицу объема, а концентрация микротрещин N является функцией напряжений σ , возникающих в породе, и имеет вид: $N = 37,44 \cdot \sigma - 641,2$.

Степень предразрушения массива горных пород обуславливается накоплением достаточного количества дефектов в среде для снижения прочности горной породы на определенную величину.

После обуривания технологических и взрывных скважин в соответствии с методикой проводилось бурение инженерно-геологических скважин с отбором проб (керна) горной

массы до проведения взрывных работ, а затем после. Извлеченные образцы были доставлены в лаборатории для проведения дальнейших лабораторных испытаний.

Метод рентгеновской компьютерной микротомографии был применен для получения количественных характеристик микротрещиноватости образцов. Реконструкция бинарных моделей рентгеновских изображений позволила определить концентрацию микротрещин на единицу объема (шт./см³).

Образцы, изъятые до и после взрыва, были просканированы для получения объемной модели и последующего расчета концентрации микротрещин. Результаты представлены на рисунке 4.

Пересчет микротрещин позволил определить разницу их концентрации до и после взрыва. Согласно данным эксперимента, до взрыва средняя концентрация трещин составляла 1678 шт./см³. Приведенное значение было принято за относительный ноль. Зависимость концентрации микротрещин N от напряжений σ , возникающих в породе, представлена на рисунке 5 и определяется выражением (3):

$$N = 37,44 \cdot \sigma - 641,2 \quad (3)$$

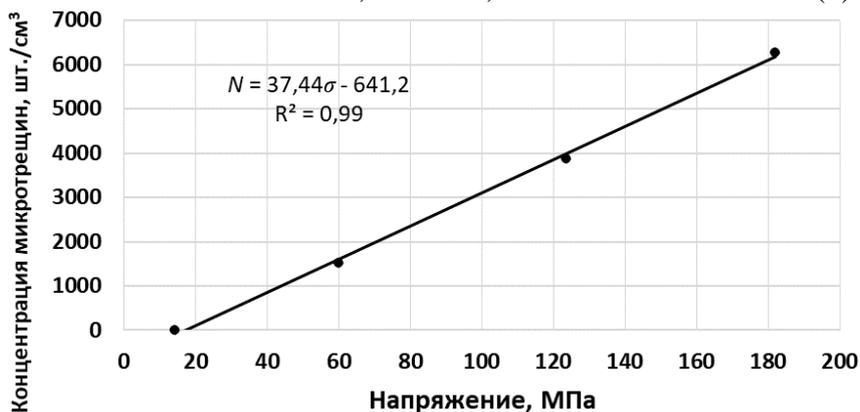


Рисунок 5 – График зависимости концентрации микротрещин в породе от напряжений

По данным проведенных экспериментов, на ближних расстояниях (10R), концентрация наведенной микротрещиноватости N находится в пределах ≈ 5 тыс. шт./см³, а с ростом скорости детонации увеличивается до $\approx 14,2$ тыс. шт./см³. На средних (40R) расстояниях значение N растет с ≈ 350 до ≈ 2000 шт./см³.

3. Для щебеночных карьеров, при выборе параметров буровзрывных работ (диаметр, тип взрывчатого вещества) необходимо учитывать размер зоны предразрушения как основного источника формирования мелких фракций при вторичном дроблении.

При проектировании буровзрывных работ не учитываются размеры зон предразрушения, что приводит к повышению выхода отсевных фракций при переработке предразрушенных кусков горной массы на щебень.

Скважины на блоке располагаются таким образом, чтобы границы зоны дробления каждой скважины соприкасались с этой границей соседней скважины, а размеры этих зон находятся в пределах 20-30 радиусов заряда.

Чем меньше расстояние от заряда, тем выше концентрация микротрещин, а, следовательно, и степень предразрушения отдельных кусков горной массы после взрыва.

Отсюда следует вывод о том, что необходимо уменьшать разницу между зоной разрушения и зоной предразрушения. Размеры зоны предразрушения всегда будут больше размеров зон регулируемого дробления, а расчеты показали, что наименьший эффект предразрушения кусков достигается при ЛНС больше, чем радиус зоны предразрушения. Необходимо уменьшать объемы предразрушенной взрывом породы, соблюдая соотношение (4):

$$W = R_{\text{пред}} \cdot (1,3 \div 1,7) \quad (4)$$

Это соотношение обеспечивает меньшую концентрацию микротрещин в отдельных кусках взорванной горной массы

при ведении буровзрывных работ в условиях разработки месторождения «Бурное».

Апробация результатов была осуществлена путем проведения опытно-промышленных взрывов. После вторичного дробления и расситовки на грохоте были замерены объемы фракций щебня относительно общего объема вторичного дробления. В результате были получены объемы щебня фракций 0-10, 10-20, 20-40, 40+ мм. Результаты выражены на диаграмме (рисунок 6).

Синим цветом обозначен выход фракций при взрывании Эмульсолита Ø233 мм, оранжевым – Гранулита Ø233 мм, серым – Гранулита Ø155 мм.

Результаты показывают, что при уменьшении скорости детонации ВВ выход отсева снижается практически в 2 раза, а при уменьшении диаметра заряда еще на 2 %. Это объясняется тем, что при взрывании Эмульсолита диаметром 233 мм размер зоны разрушения каждой отдельной скважины составляет лишь 30 % от размера зоны предразрушения, а значит, концентрация микротрещин увеличивается в большем объеме. При взрывании Гранулита диаметром 233 мм размер зоны разрушения каждой отдельной скважины составляет 65 % от размера зоны предразрушения. При уменьшении размера зоны предразрушения в 2,3 раза выход отсевных фракций после переработки уменьшается в 2 раза.

При уменьшении диаметра взрываемых скважин до 155 мм размер зоны разрушения каждой отдельной скважины составляет 74 % от размера зоны предразрушения. В этом случае уменьшение размера зоны предразрушения в 1,5 раза способствует снижению выхода отсевов дробления в 1,2 раза.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что выход мелкой фракции при переработке взорванной горной массы на щебень образуется при измельчении предразрушенных кусков, а уменьшение концентрации микротрещин в отдельностях после

взрыва может быть уменьшено путем регулирования зоны предразрушения при ведении буровзрывных работ на карьере по добыче строительного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-исследовательской работой, содержащей в себе решение актуальной задачи снижения выхода мелкой фракции конечного продукта при дроблении породы на щебень после прохождения всех стадий обогащения посредством изменения таких параметров буровзрывных работ, как диаметр заряда и выбор применяемого взрывчатого вещества.

Основные научные результаты и выводы заключаются в следующем:

1. При добыче строительного камня (щебня) большое внимание уделяется качеству конечного продукта. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что после дробления горной массы на ДСК (дробильно-сортировочном комплексе) более 20 % продукции уходит в отсев при взрывании с применением взрывчатых веществ с высокой скоростью детонации. При применении взрывчатых веществ со скоростью детонации на ≈ 20 % ниже процент выхода мелкой фракции снижается вдвое, а при снижении диаметра заряда на 33 % выход мелочи уменьшается еще на 2 процента.

2. Установлено, что мелкая фракция при дроблении породы на щебень образуется при измельчении предразрушенных кусков за счет роста имеющихся микродефектов. При уменьшении размера зоны предразрушения в 3,6 раза выход отсевных фракций после переработки уменьшается в 2,5 раза.

3. Обоснована модель образования зоны предразрушения, определены фактические значения данной зоны в условиях Куранахского рудного поля.

4. Определены значения напряжений σ , возникающих при взрывном нагружении в горной породе на различных расстояниях R от скорости детонации D применяемого ВВ, и приведены зависимости размеров зон предразрушения от детонационных характеристик ВВ.

5. Установлены зависимости величины напряжений σ от скорости детонации D применяемого ВВ с учетом свойств взрываемого массива для расстояний 10, 40 и 70 радиусов заряда.

6. Выявлена эмпирическая зависимость между концентрацией наведенных взрывом микротрещин N и напряжениями в горной породе при взрыве σ .

7. Определено, что уменьшение эквивалентного диаметра заряда способствует снижению максимальной величины амплитуды волны напряжений, проходящей в массиве при взрыве породы, что ведет к снижению выхода отсевов дробления.

8. Проведены опытно-промышленные испытания, в результате которых определены фактические показатели выхода фракций щебня после прохождения горной массы через полный цикл обогащения.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие рекомендации:

1. Необходимо учитывать эффект предразрушения при рассмотрении получившихся отдельностей в зоне регулируемого дробления, поскольку минимизация этого эффекта дает хороший результат в виде повышения качества конечного продукта.

2. При ведении буровзрывных работ на карьерах строительных материалов следует учитывать размеры зоны предразрушения как основного источника формирования мелких фракций при вторичном дроблении. Отношение ЛНС к размеру

зоны предразрушения, а именно: $W = R_{\text{пред}} \cdot (1,3 \div 1,7)$, обеспечивает уменьшение степени предразрушения отдельных кусков после взрыва и позволяет снизить выход мелкой фракции при переработке горной массы на щебень.

3. Для уменьшения размеров зон предразрушения и снижения концентрации микротрещин во взорванной горной массе необходимо применять взрывчатые вещества с пониженной скоростью детонации, уменьшать диаметр заряда.

Предложенная методика апробирована на месторождении известняка в условиях Куранахского рудного поля. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Перспективным направлением в области дальнейших исследований, развивающих результаты, полученные в диссертационной работе, следует считать определение корреляционных связей зоны предразрушения с зонами разрушения и трещинообразования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Хохлов, С.В. Исследование вопроса управления и контроля за смещением взорванной рудной массы / С.В. Хохлов, А.В. Баженова, **В.А. Маккоев**, Р.А. Рахманов, И.А. Аленичев // Взрывное дело. – 2021. – № 132-89. – С. 59-76.

2. **Маккоев, В.А.** О целесообразности использования забойки в условиях взрывания разнопрочных горных пород / **В.А. Маккоев**, С.В. Хохлов, Ю.И. Суворов, И.А. Сивцев // Взрывное дело. – 2021. – № 133-90. – С. 137-148.

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

3. Khokhlov, S.V. The Choice of Optical Flame Detectors for Automatic Explosion Containment Systems Based on the Results of Explosion Radiation Analysis of Methane-and Dust-Air Mixtures

/ S.V. Khokhlov, Z.A. Abiev, **V.A. Makkoev** // Applied Sciences (Switzerland). — 2022. — Vol. 12, № 3. — P. 1-11

4. Хохлов, С.В. Влияние скорости детонации взрывчатых веществ на степень предразрушения горной породы при взрыве / С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов, **В.А. Маккоев**, З.А. Абиев // Горные науки и технологии. — 2024. — Т. 9, №2. — С. 85-96.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680786 Российская Федерация. Программа для расчета основных параметров воронки выброса. Заявка № 2021669857: заявл. 07.12.2021: опубл. 14.12.2021 / Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов, **В.А. Маккоев**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». — 1с.: ил.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662255 Российская Федерация. Программа для расчета полей напряжений в массиве горных пород при динамическом воздействии. Заявка № 2023661213: заявл. 01.06.2023: опубл. 07.06.2023 / С.В. Хохлов, С.Т. Соколов, **В.А. Маккоев**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». — 1с.: ил.

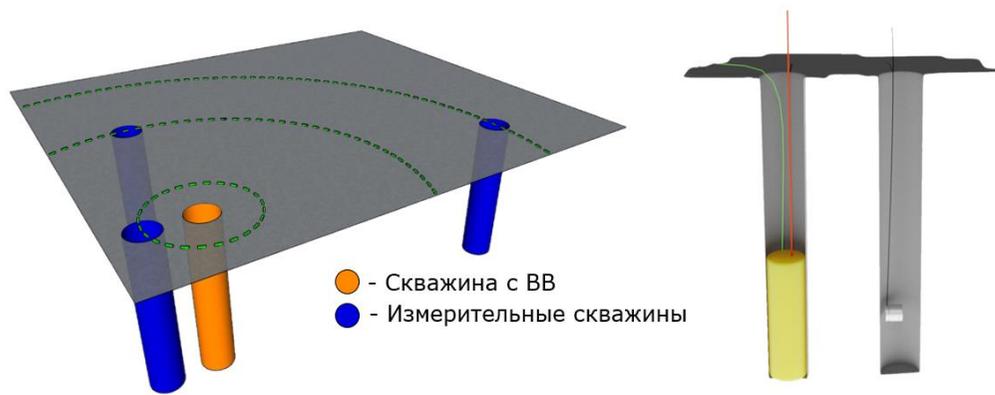


Рисунок 1 - Схема расположения скважин

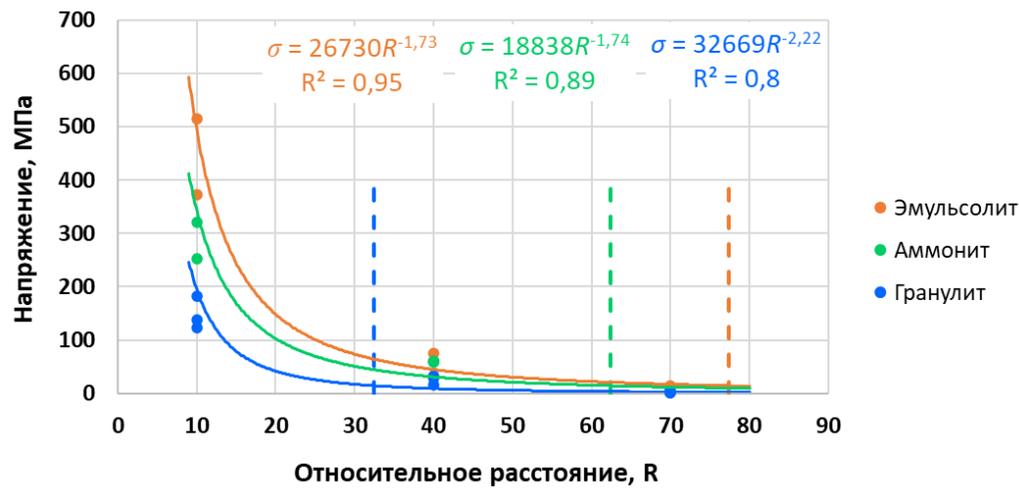


Рисунок 2 – Напряжения в горной породе для различных типов ВВ

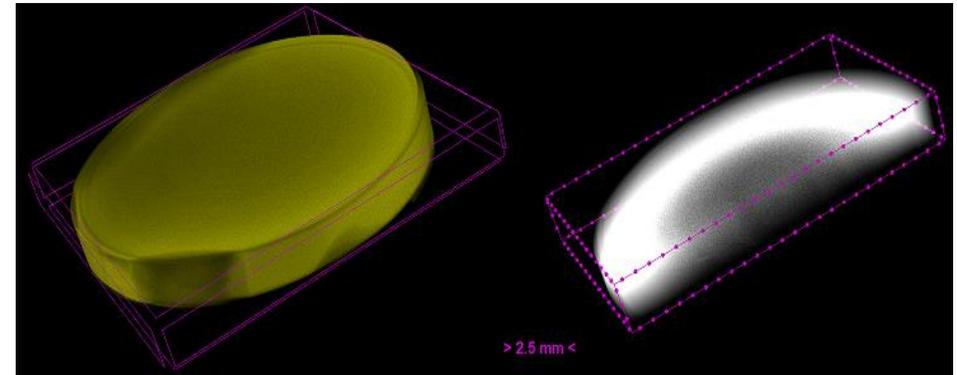


Рисунок 4 – Объемная модель образца

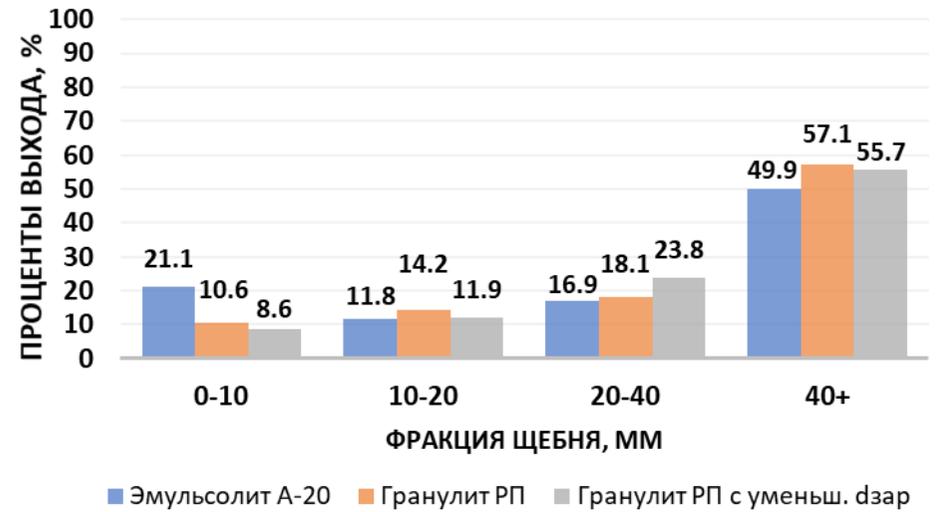


Рисунок 6 – Выход фракций щебня при изменении типов ВВ и параметров БВР