

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Хохлов С.В.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Анализ особенностей добычи щебеночной продукции.....	10
1.2 Исследование механизмов разрушения горной породы при взрыве и дроблении.....	12
1.3 Анализ существующих подходов к снижению отсева при добыче щебня	19
1.4 Исследование и определение параметров зоны предразрушения при подготовке горной массы к дроблению на щебень	26
1.5 Задачи диссертационного исследования.....	33
1.6 Выводы по Главе 1	33
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	35
2.1 Методический план организации полевых экспериментов	38
2.1.1 Методика измерения скорости детонации.....	38
2.1.2 Методика измерения напряжений в горной породе	39
2.1.3 Методика отбора образцов горных пород	44
2.1.4 Методика проведения экспериментов по измерению гранулометрического состава щебеночной продукции	45
2.2 Методика проведения лабораторных экспериментов.....	46
2.3 Условия проведения экспериментов	47
2.4 Программа проведения экспериментов.....	48
2.5 Выводы по Главе 2	48
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВВ НА ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ПОРОДЫ.....	50
3.1 Подготовка экспериментальных исследований	50
3.2 Проведение исследований по измерению скорости детонации	53
3.3 Отбор проб.....	56

3.4	Проведение исследований по определению размеров зон предразрушения	57
3.5	Результаты обработки данных по определению размеров зон предразрушения.....	63
3.6	Выводы по Главе 3	74
ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАРЯДА НА ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ		76
4.1	Исследование влияния диаметра заряда на эффект предразрушения	76
4.2	Влияние диаметра заряда на основании расширенного геометрического подобия.....	78
4.3	Прикладные представления о снижении эффекта предразрушения	87
4.4	Выводы по Главе 4	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ		100
СПИСОК ТЕРМИНОВ		101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		102
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА		122
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ		124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ		125
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт внедрения результатов диссертационных исследований в АО «Полюс Алдан»		126
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт внедрения результатов диссертационных исследований в АО «ЭВОБЛАСТ РУС»		127

ВВЕДЕНИЕ

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 веществ (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 зоны 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., Приложение В) и АО «ЭВОБЛАСТ РУС» (акт внедрения от 24.05.2024 г., Приложение 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 (Приложение А) и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680786 «Программа для расчета основных параметров воронки выброса» от 14.12.2021 г. (Приложение Б).

Методология и методы исследований

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 микротрещиноватости. 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 (пункты списка литературы № 24, 51, 103, 149), в

том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ (Приложения А и Б)

Структура диссертации

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ особенностей добычи щебеночной продукции

Горная промышленность – одна из основных в экономике страны, представляет собой комплекс отраслей промышленности по добыче, обогащению и переработке полезных ископаемых [6]. 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. Объемы производства щебеночной продукции, по данным Росстат, ФТС, UN Comtrade, составляют порядка 200 млн м³/год [135], о чем свидетельствует диаграмма, приведенная на рисунке 1.1



Рисунок 1.1 – Производство щебня в РФ [135]

Добыча и переработка полезных ископаемых – весьма капиталоемкий процесс, требующий огромных вложений. Это обусловлено как большой материально-технической производственной базой, так и масштабами производства. [85]. Экономическая эффективность предприятий по производству щебеночной продукции напрямую зависит от объемов производства товарного сырья, подлежащего сбыту 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, определяется всё количество добытого сырья, независимо от его физического состояния и фракции [97]. Приведенное изменение в налоговом расчете свидетельствует как о необходимости повышения качества конечного продукта в виде щебня, так и об увеличении негативного воздействия такого фактора, как повышенный выход отсевов дробления при производстве щебеночной продукции.

Отсев – фракция щебня до 5 мм, не соответствующая стандартам качества для равноценного использования в строительстве и других отраслях. Мелкая фракция практически не находит сбыта даже при минимальной цене, которая на порядок ниже цены на кондиционные фракции, и может быть в основном использована лишь во вспомогательных целях предприятия. При добыче строительного камня в настоящее время сохраняется проблема повышенного выхода (до 30 %) отсева [86, 120, 58]. Это приводит к экономическим потерям предприятия ввиду перераспределения объемов фракций конечного продукта, что способствует уменьшению выхода кондиционных кусков. Также выход отсева приводит к созданию неблагоприятной экологической обстановки из-за организации отсевных отвалов, которые могут стать источником загрязнения почвы, воды и воздуха [62]. Все вышеперечисленное ведет к снижению экономической эффективности как предприятий, так и отрасли по добыче строительного камня.

Так, например, средняя цена кубометра щебня кондиционных фракций (5+ мм) по данным brokenstone.ru [132] составляет 1012 руб., а цена отсева примерно в 10 раз ниже, при этом стоит отметить, что отсев имеет меньший спрос, а при современных объемах производства щебня, снижение выхода мелкой фракции в доле конечного продукта на 1%, может увеличить прибыль предприятий на сумму до 1,8 млрд руб./год по отрасли.

1.2 Исследование механизмов разрушения горной породы при взрыве и дроблении

Разрушение горной породы - это физический и/или химический процесс, в результате которого горная порода теряет свою целостность и структуру, что может включать в себя различные механические, термические, химические или физические воздействия, приводящие к её деформации, трещинам, разрывам или иным изменениям в её структуре и состоянии [56, 128, 150]. В контексте добычи строительного камня, разрушение породы рассматривается с точки зрения механического дробления – разрушение взрывом [17] или с помощью дробильных установок. Разрушение происходит под действием предельных растягивающих, сжимающих и касательных напряжений [137].

На процесс разрушения непосредственно влияют физические, механические и технологические свойства разрушаемой породы [98, 30]. Так, прочность породы — это основное механическое свойство, влияющее на её способность сопротивляться разрушению [107, 145]. Плотность и пористость породы влияют на распространение сейсмозрывных волн в породе. От влажности зависит сцепление между частицами породы, а также с повышением влажности может расти и прочность породы при измельчении [42].

Свойства горных пород зависят от генезиса, и как следствие, от минерального состава и макростроения, иначе от структуры и текстуры [157, 32]. Структура породы определяется зернистостью и размером зерен, имея следующую классификацию [76]:

- крупнозернистые – размер зерен превышает 5 мм;
- среднезернистые – размер зерен от 2 до 5 мм;
- мелкозернистые – зерна размером от 0,5 до 2 мм;
- скрытокристаллические – зерна до 0,5 мм.

Для одного вида породы с разной зернистостью, различаются и прочностные свойства – с увеличением размеров зерен уменьшается прочность породы.

Текстура горной породы определяет положение отдельных зерен в объеме среды, текстурной характеристикой является анизотропия массива или образца, а также проявляются такие свойства, как плотность, пористость, слоистость [27].

Способность породы к разрушению определяется наличием и масштабностью дефектов, которые, в свою очередь, разделены на условные уровни. Так, дефекты кристаллических решеток отдельных минералов, слагающих породу, относятся к пятому уровню. Микротрещины с размерами от 0,01 до 10 см относятся к дефектам четвертого уровня. Макротрещины размером от 0,1 до 1 м, отличимые органолептическим методом, имеют третий уровень. Разломы, разделяющие массив на отдельные части, относятся ко второму уровню и имеют линейные размеры от 100 м до 10 км. Первый уровень – крупные тектонические разрывы [147].

Стоит уделить внимание степени раскрытия трещин, которая характеризуется расстоянием между вновь образованными поверхностями, или же «берегами» трещины. По степени раскрытия трещины классифицируются тремя порядками:

- I. внутрикристаллические с величиной раскрытия 10^{-9} - 10^{-5} м;
- II. межкристаллические с раскрытием до 0,1 мм;
- III. эндогенные трещины, определяющие блочность массива.

Трещины I и II порядков определяют способность породы к бурению, дроблению и измельчению. Наибольшее влияние при рассмотрении переработки строительного камня, оказывают трещины второго порядка. На параметры буровзрывных работ преимущественно влияют трещины III порядка [153].

В.В. Ржевский и Г.Я. Новик [118] выделяют 12 параметров, оказывающих влияние на прочность и разрушение. Среди плотностных характеристик выделяют объемную массу γ , опосредованно влияющую на параметры разрушения, и пористость n , от которой зависит концентрация напряжений и их перераспределение на микро- и макроуровнях. Среди механических параметров выделяются прочность на сжатие $\sigma_{смж}$ и растяжение $\sigma_{раст}$, модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ .

Важным технологическим параметром, введенным М.М. Протодяконовым, является крепость, которая определяет сопротивление технологическому разрушению [114]. Коэффициент крепости пропорционален пределу прочности породы на сжатие и определяется выражением (1.1):

$$f = 0,33 \cdot 10^{-7} \sigma_{сж} + 0,58 \cdot 10 \cdot \sqrt[3]{\sigma_{ср}} \quad (1.1)$$

Коэффициент крепости может быть также получен эмпирическим путем, согласно методике ГОСТ 21153.1-75 (1.2) [92]:

$$f_d = \frac{20n}{l} \quad (1.2)$$

где n – число сбрасываний груза; l – столб получившейся «пыли», мм.

Обширный набор экспериментальных данных обеспечивает представление о воздействии напряженного состояния на механизмы разрушения твердых тел [84, 39, 136]. Тем не менее, существующие математические модели ограничены в своей способности полноценно отразить физическую природу процессов разрушения, и некоторые материалы демонстрируют аномальные свойства, которые обусловлены факторами, такими как физико-химические процессы, температурные условия, воздействие окружающей среды и другие. Процессы разрушения могут быть разделены на два основных типа: хрупкое и вязкое разрушение [47].

Хрупкое разрушение, как правило, проявляется в условиях динамической нагрузки, в результате которой возникают растягивающие напряжения в поперечной плоскости трещины. Характерной особенностью хрупкого разрушения является его низкая энергозатратность, а процесс продолжается до тех пор, пока накопленная деформационная энергия не достигнет уровня, способствующего формированию новых поверхностей разрушения.

Вязкое разрушение сопровождается значительной степенью пластической деформации и относительного скольжения между различными участками среды. Для инициирования вязкого разрушения необходимы значительные энергетические затраты, и данный процесс характеризуется пластичным течением, возникающим при превышении критического значения касательного напряжения.

Разрушение отрывом представляет собой процесс хрупкого разрушения, который обусловлен воздействием растягивающих напряжений. В этом случае разрушение происходит вдоль определенных плоскостей, и поверхность разрушения перпендикулярна направлению растягивающих напряжений. Вязкое разрушение с подавляющим большинством касательных напряжений в случае, когда разрушение осуществляется по плоскостям скольжения отдельностей массива между собой до полного разделения – это разрушение сдвигом. При этом, плоскости скольжения направлены под острым углом, но более 45 градусов относительно направления главных напряжений в массиве. Эти два типа разрушения имеют разные механизмы и характеристики, и их понимание играет важную роль в анализе механического поведения материалов и структур.

Скол — это одна из форм хрупкого разрушения, при которой ориентация плоскости трещины зависит от кристаллической структуры материала и, более конкретно, от положения его кристаллографических плоскостей.

Наличие дефектов и неоднородностей в горной породе определяет преобладание хрупкого разрушения, поэтому стоит рассмотреть теорию хрупкого разрушения Гриффитса [144].

Теория была разработана Аланом Арчибальдом Гриффитсом в 1921 году и представляет собой модель, объясняющую причинно-следственную связь, описывающую разрушение материала даже при небольших напряжениях в результате разрастания небольших трещин и дефектов.

Согласно этой теории, твердое тело имеет природные или приобретенные микродефекты, а начало разрушения определяется наличием критической трещины в объеме тела. Эта трещина будет расширяться, пока скорость высвобождения энергии деформации из поля напряжений вокруг трещины, по крайней мере, равна скорости, с которой она поглощается трещиной. Критическое состояние, при котором происходит разрушение имеет вид (1.3):

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{3E\gamma}{\pi c_0}} \quad (1.3)$$

где σ_p – предел прочности на растяжение, Па; E – модуль Юнга; γ – поверхностная энергия на единицу площади (поверхностное напряжение), Дж/м²; c_0 – длина трещины, мм.

При этом, критическая длина трещины определяется уравнением следующего вида (1.4) [82]:

$$x_g = \frac{2\gamma E}{\pi \sigma^2} \quad (1.4)$$

Приведенные уравнения указывают на то, что предел прочности материала при растяжении зависит от длины трещины. Концепция энергетического баланса представляет собой баланс между энергией, затраченной на создание новой поверхности разрушения, и энергией, доступной из-за внешних механических нагрузок [158]. При расширении трещины в материале необходимо преодолеть силы притяжения молекул материала, чтобы создать новую поверхность. Это требует затрат энергии на разрушение атомных связей и создание дополнительной поверхности. Другими словами, увеличение потенциальной энергии за счет поверхностного натяжения трещины должно быть уравновешено уменьшением потенциала энергии деформации и приложенных сил [151].

Механизм разрушения по Гриффитсу может развиваться только при условии хрупкого разрушения, но поскольку кроме концентрации напряжений у вершины трещины, существуют и пластические деформации в той же вершине, теория Гриффитса недостаточно полно описывает разрушение хрупких пород.

Кроме того, классическое решение А. Гриффитса приводит к бесконечной прочности при нулевой длине трещины [82].

Теория квазихрупкого разрушения получила развитие по причине присутствия как хрупкой, так и пластической составляющей деформации. Величина необратимой работы, необходимой для создания единичной площади свободной поверхности в процессе трещинообразования, представляет собой материальную константу, лишенную зависимости от воздействия нагрузок, геометрии и размеров данного тела. Формулировка К.А. Долгова и Ю.М. Мисника

выглядит следующим образом [93]: «удельная поверхностная энергоемкость является физической константой породы, не зависящей от способа ее разрушения».

Стационарная форма уравнения Фоккера-Планка соответствует статическому нагружению горных пород [156]. Решение этого уравнения позволяет определить свободную энергию F в зависимости от параметра плотности дефектов с увеличением напряжения σ . Задача сводится к определению ориентации дефектов, поскольку вид свободной энергии приближается к виду Гриффитса для дефектов, ориентированных по полю напряжений [96].

Кинетика накопления дефектов при квазихрупком разрушении определяется условием эволюции системы, в которой накопление и рост повреждений являются единственным путем диссипации энергии [108]. Линейная связь между термодинамическим потоком и силой приводит к уравнению движения для параметра плотности дефектов (1.5) [96]:

$$\frac{dp}{dt} = -\Gamma(Ap - Bp^3 - Cp^5 - D\sigma - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\chi \frac{\partial p}{\partial x_2} \right)) \quad (1.5)$$

где Γ – положительный кинетический коэффициент.

Дробление взрывом, как и измельчение породы в дробилке, относится к механическому дроблению и подчиняется единым законам разрушения [56, 17]. Существует несколько законов, описывающих процесс дезинтеграции породы с точки зрения потребления энергии.

Так, например, по закону Риттингера описывается зависимость энергозатрат от площади образованной поверхности (1.6) [38]:

$$E = k(S_1 - S_0) = k \cdot \Delta S, \quad (1.6)$$

где k – коэффициент пропорциональности, МДж/м².

В соответствии с гипотезой Кирпичева-Кика, энергия, используемая для изменения формы геометрически подобных и однородных тел, изменяется пропорционально их объему или массе (1.7) [59]:

$$E = k \cdot l g \frac{D}{d} \cdot Q_0 \quad (1.7)$$

Указанные законы аналогичны, если средний диаметр вычислять с использованием логарифмов, а уравнение примет вид (1.8):

$$E = kQ_0 \left(\lg \frac{1}{d} - \lg \frac{1}{D} \right) \quad (1.8)$$

Законы Риттингера и Кирпичева-Кика могут быть объединены обобщенным законом, предложенным П.А. Ребиндером [116]. Согласно этому закону, полная работа по дроблению состоит из двух компонентов: работы по деформации внутреннего объема ΔV и работы по созданию новых поверхностей ΔS (1.9):

$$E = k_1 \cdot \Delta V + k_2 \Delta S, \quad (1.9)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности, МДж/м² (МДж/м³).

Согласно предположению Бонда, полная работа разрушения принимает вид (1.10):

$$E = kQ \left(\frac{10}{\sqrt{d}} - \frac{10}{\sqrt{D}} \right) \quad (1.10)$$

Р.Т. Хукка определил, что соотношение энергии к разрушению может быть представлено в следующем виде [90] (1.11):

$$dE = -K dx/x^n \quad (1.11)$$

Исходя из выражения, формула Риттингера преобразуется при $n=2$ (1.12):

$$E = 2K \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (1.12)$$

Выражение Кирпичева-Кика при $n=1$ (1.13):

$$E = K \cdot \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (1.13)$$

Уравнение Бонда при $n=3/2$ (1.14):

$$E = 2K \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}}} \quad (1.14)$$

Также Хукка обосновал применимость указанных уравнений к параметрам дробления (измельчения) в дробилках. Выражение Риттингера применимо для процессов тонкого измельчения, уравнение Бонда соответствует механике разрушения при среднем измельчении, а формула Кирпичева-Кика применима для дробления [119].

Построение прогноза гранулометрического состава взорванной горной массы для моделирования процесса разрушения горной породы взрывом, может осуществляться на основе моделей Розина-Раммлера и Вейбулла, а также Kuz-Ram. Модель дробления Розина-Раммлера используется для описания распределения размеров кусков при взрывном дроблении [140] и в дифференциальной форме имеет вид (1.15):

$$\frac{dV}{V_0} = n \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^{n-1} e^{-\left(\frac{x}{x_m}\right)^n} d\left(\frac{x}{x_m}\right) \quad (1.15)$$

При этом для мелких фракций выражение имеет вид (1.16):

$$\frac{x^3 dN}{dx} = \frac{1}{x_m} \quad (1.16)$$

где x_m и N – параметры распределения.

Модель Кузнецова-Раммлера представляет собой эмпирическую зависимость, оценивающую дробление взрывом путем учета проектных параметров и геометрии взрыва, и используется для расчета среднего размера куска и индекса однородности (1.17) [5, 3]:

$$d_{\text{ср}} = \frac{0,15 \cdot (\rho_{\text{п}} \cdot f \cdot d_3)^{0,33} d_{\text{отд}}}{q \cdot e_{\text{ВВ}}} \quad (1.17)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность породы, т/м³; q – удельный расход ВВ, кг/м³; d_3 – диаметр заряда, м; $e_{\text{ВВ}}$ – отношение теплоты взрыва эталонного ВВ к применяемому; $d_{\text{отд}}$ – размер естественного блока массива, м; f – коэффициент крепости породы по шкале М.М. Протождяконова.

1.3 Анализ существующих подходов к снижению отсева при добыче щебня

При взрывном дроблении порядка 10% горной массы уходит в отсев, поскольку это обусловлено спецификой взрывной отбойки горных пород. В первую очередь, на выход мелочи влияет разрушение за счет влияния волн напряжений. А.Н. Колмогоров обосновал закон логнормального распределения, который применим для анализа результата переработки в дробилках горной массы [106]. Этот закон также применим и для репрезентации грансостава взорванной породы, поскольку его положения увязываются с особенностями разрушения в ближней

зоне взрыва до пяти диаметров заряда, где преобладает высокое напряжение, приводящее к увеличенным показателям напряжения сдвига и сжатия [120, 7, 22].

Существующей проблемой повышенного выхода мелкой фракции при дроблении пород на щебень и вопросом разрушения горной породы взрывом занимались многие ученые. Этой теме 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 других. Труды этих ученых внесли значительный вклад как в теоретическую, так и в практическую составляющую производства взрывных работ при добыче нерудных строительных материалов.

Рассматривалось решение проблемы выхода карьерной мелочи при взрывном дроблении пород с точки зрения влияния конструкции заряда и детонационных характеристик ВВ [26], оказывающих влияние на давление в зарядной полости при взрыве [64]. Детонационные и газодинамические процессы были описаны системой уравнений Эйлера, с добавлением в уравнение энергии переменной, описывающей выделение энергии согласно распространению детонации по заряду ВВ [95]. Система была дополнена уравнениями состояния (1.18), построенными по разработанному автором подходу, и имели вид:

$$\begin{aligned} P &= \rho(k - 1)(e - B) \\ k &\approx k_1; B = B_1 \quad \text{при } \rho < \rho_0 \\ k &\approx k_2; B = B_2 \quad \text{при } \rho \geq \rho_0 \end{aligned} \quad (1.18)$$

где $e = E - W^2/2$ – удельная внутренняя энергия; P – давление, Па; k – показатель адиабаты; W – массовая скорость, кг/с.

Предложена конструкция заряда с использованием запирающей газодинамической установки [94]

На основе решений авторов, управление давлением во взрывной полости может быть осуществлено с применением специальных конструкций забоек, что позволяет повысить давление на стенках скважины до двухкратных значений от номинальных.

Принимались решения по уменьшению выхода мелких фракций за счет использования метода, определяющего связь между диссипацией энергии, параметрами волн напряжения и распределением грансостава на различных расстояниях от заряда. Параметры гранулометрического состава определялись на основе оценки максимальных параметров волны напряжения и диссипации энергии [8].

Описан процесс взрывного нагружения с использованием адиабаты разгрузки с применением эмпирического уравнения состояния в форме Тэта (1.19):

$$P = A \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^m - 1 \right], \quad (1.19)$$

где m – постоянный показатель; A – коэффициент, зависящий от энтропии, фактически являющийся константой; ρ – плотность породы под нагрузкой, кг/м³; ρ_0 – плотность породы в исходном состоянии, кг/м³.

Наведенная трещиноватость исследуемой породы обуславливается скоростью прохождения волны объемного сжатия. Для динамического разрушения большое значение имеет наличие дефектов в среде – пор и трещин.

Диаграмма А. Мангунвиджой и Б. Вибенги (1.20) предшествует аппроксимирующей зависимости скорости упругой волны от пористости или трещиноватости:

$$C_P = \frac{B}{a_{\text{тр}}^n}, \quad (1.20)$$

где C_P – скорость продольной волны, м/с; $a_{\text{тр}}$ – нарушенность среды; B , n – эмпирические коэффициенты.

Основываясь на термокинетической теории фазовых переходов, а также на зависимости (1.20) и кинетической теории прочности, предлагалась зависимость для определения скорости экспансии возмущений в волне разгрузки (1.21):

$$C_V = \sqrt{\frac{1+v}{3(1-v)}} \cdot \frac{B}{\left(a_0 \frac{U_0}{U_0 - \gamma \sigma_1} \right)^n}, \quad (1.21)$$

где a_0 – начальная нарушенность среды; U_0 – энергия активации разрушения; σ_1 – напряжение ударной волны.

Уменьшение выхода мелкой фракции при взрыве прочных пород было предложено также и за счет снижения амплитуд напряжений в горной породе от относительного расстояния [14]. Напряжения были рассчитаны на основании эмпирических формул (1.22-1.23) для диапазона относительных расстояний от 4-6 до 12-15 радиусов заряда:

$$\sigma_{r\ max} = \rho_n \cdot C_p \cdot \frac{3540}{\bar{r}^{2.2}}, \quad (1.22)$$

И для относительных расстояний от 12-15 до 80-150 радиусов заряда:

$$\sigma_{r\ max} = \rho_n \cdot C_p \cdot \frac{2250}{\bar{r}^2}, \quad (1.23)$$

где $\sigma_{r\ max}$ – радиальная составляющая волны напряжений, Па; $\rho_n \cdot C_p$ – акустическая жесткость, кг/(м²с); $\bar{r}$ – относительное расстояние в радиусах.

После проведения расчетов и вывода графических материалов, было показано, что в зоне до 10 радиусов заряда на 20-30% ниже значения максимальной амплитуды волны напряжений, а в средней и дальней зонах, в пределах ЛНС напряжения фактически остается такими же, как при использовании ВВ с повышенной бризантностью.

Сделан вывод о том, что повышение эффективности отбойки породы на щебень обеспечивается путем увеличения импеданса продуктов детонации. При этом технологическое решение проблемы на эксплуатационной стадии приводит к тому, что необходимо реконструировать заряд ВВ в скважине, оставляя воздушный или водяной радиальный зазор, обеспечивающий дополнительную границу раздела сред при переходе детонационной волны в ударную.

Авторы [14] также утверждают, что уменьшению выхода мелкой фракции и снижению удельных энергозатрат способствует условие: при сохранении максимального значения амплитуды волны напряжений, уменьшение диаметра заряда сопровождается увеличением скорости спада напряжений на одних и тех же относительных расстояниях.

Накопление микродефектов до критической величины линейно зависит от времени нарастания и действия напряжений в породе, но наблюдается экспоненциальная зависимость от амплитуды волны напряжений [109, 25]. При взрывании зарядов уменьшенного диаметра, уменьшается длительность действия прикладываемых к массиву напряжений и уменьшается доля энергии, проходящей через разрушаемую среду, тем самым уменьшается количество переизмельченной взорванной горной массы.

Кроме того, воздействие диаметра заряда на статистические показатели грансостава разрушенной горной породы, согласно принципу геометрического подобия, предписано аналогичными характеристиками напряженно-деформированного состояния горного массива [71], но при том условии, что равнозначные удельные энергозатраты необходимы для дробления породы [141]. Б.Н. Кутузов, В.А. Ковалев, О.И. Литвин, Л.А. Вареничев, М.Ф. Друкованный, Э.И. Ефремов [73, 61, 41] и многие другие [154, 146] пришли к выводу, что уменьшение диаметра заряда способствует снижению удельного расхода ВВ для одинаковой степени дробления.

Были проведены экспериментальные исследования [21], согласно которым был сделан вывод о том, что преобладающее значение на эффективность дробления горных пород взрывом оказывает периферийная часть заряда. Прирост площади поверхности заряда, эквивалентный приращению его объема, оказывает существенное воздействие по той причине, что увеличение периферийной массы заряда обусловлено центральной частью, которая не способствует производительному дроблению горных пород и фактически тратится на неэффективные цели.

Сейсмический эффект взрыва [34], характеризуемый скоростью смещения массива в сейсмовзрывной волне является функцией удельной площади контакта сред заряд-порода, а изменение коэффициента полезного действия (КПД) взрыва устанавливается зависимостью следующего вида (1.24) [21]:

$$\eta_i = \eta_0 \cdot \left(\frac{l_i}{l_0} \cdot \frac{D_0}{D_i} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_i} \right)^{2/3}, \quad (1.24)$$

где l_i , D_i , ρ_i – длина, м; диаметр, м; и плотность, кг/м³ нового заряда соответственно.

Еще один способ уменьшения выхода мелкой фракции, сопряженный с уменьшением также и выхода негабаритной крупной фракции основан на регулировании параметров БВР, способствующем сопряжению зон разрушения от зарядов ВВ [148]. При таком способе расчет радиальных напряжений, возникающих от взрыва заряда ВВ определялся выражением (1.25):

$$\sigma_{r \max} = \frac{A}{r^m} \left(\frac{E_0 - E_{\text{дис}}}{E_0} \right)^n, \quad (1.25)$$

А расчет тангенциальной составляющей напряжений был выражен относительно радиальных в виде (1.26):

$$\sigma_{\varphi \max} = \sigma_{r \max} \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (1.26)$$

где $E_{\text{дис}}$ – энергия диссипации, Дж; E_0 – энергия, выделившаяся при взрыве, Дж; ν – коэффициент Пуассона.

По методике ВНИМИ, прочность массива выражалась исходя из остаточной прочности пород (1.27):

$$\sigma = \sigma_0 \cdot c_w, \quad (1.27)$$

где σ_0 – предел прочности монолитной породы, Па; c_w – показатель интенсивности изменения прочности от степени трещиноватости породы [88].

Идея заключается также и в снижении начального давления газообразных продуктов взрыва на борт скважины. Это объясняется уменьшением потерь и рассеивания энергии и, как следствие, уменьшением наведенной трещиноватости и микротрещиноватости в ближней зоне взрыва ввиду постоянства энергии активации трещин и дефектов в породе. По утверждениям автора, при этом увеличивается полезная доля энергии, что способствует увеличению объема разрушаемой породы и как следствие, снижению удельного расхода ВВ. Снижение давления происходит путем использования низкобризантных ВВ, имеющих меньшую скорость детонации, что способствует сохранению прочности горной массы и уменьшению выхода отсева на стадии получения готовой продукции [48].

Часть решений представлена с точки зрения уменьшения выхода мелких фракций при взрывной отбойке скальных пород, но несмотря на это, проблема носит комплексный характер, стоит упомянуть и о решениях проблемы повышенного выхода отсевов дробления на стадии переработки подготовленной взрывом горной массы в дробилках.

Немалое внимание уделяется форме кусков при производстве щебня, производство стремится к получению конечного продукта кубовидной формы, поскольку именно эта форма дает обеспечение качества продукта [29, 81].

Институтом «Механобр» разработано решение данной задачи путем применения вибрационной технологии дробления. При использовании такой дробилки, которая развивает большое усилие при минимальной нагрузке на привод, отсутствует необходимость в монослойном питании. В объемном слое материала частицы подвергаются импульсному всестороннему сжатию, которое передается от одной частицы к другой. Этот процесс способствует снижению переизмельчения и увеличению выхода кубовидных зерен. [111, 99, 15].

Распространенное применение щековых дробилок приводит к относительно низкой (2,5-4) степени дробления и способствуют увеличению выхода зерен лещадной формы до 60%. Применение лишь другого типа дробилок – конусных, позволяет обеспечить степень дробления 3-5 и снизить лещадность до 25%, но при таком типе оборудования применяется замкнутый цикл дробления, что способствует повышению выхода отсева [129].

Роторные молотковые и центробежные дробилки применимы в основном для «додрабливания» материала [111]. Оптимальное дробление с точки зрения получения зерен более правильной кубовидной формы и сохранения прочности щебеночной продукции достигается путем приложения сдвиговых нагрузок вместо раздавливающих [4], что достигается в условиях работы российских щебеночных предприятий применением конусных дробилок. Несмотря на растущие темпы совершенствования горнотехнического оборудования, остается нецелесообразным увеличивать эксплуатационные расходы на вынужденное производство дешевого класса продукции – отсевов дробления [112].

Вышеизложенное с учетом сохраняющейся тенденции повышенного выхода мелких фракций твердит о том, что существует острая необходимость увеличивать качество подготавливаемого сырья для дробления.

1.4 Исследование и определение параметров зоны предразрушения при подготовке горной массы к дроблению на щебень

Сохранение тенденции повышенного выхода отсева при производстве щебня объясняется тем, что при выборе параметров буровзрывных работ, не достаточно полно учитывают физико-механические свойства пород и характеристики применяемых ВВ. При этом, несмотря на широкий ряд представленных решений в данной области, рациональное использование недр на основе вариации параметров БВР позволит снизить выход некондиционных фракций щебня, что позволит значительно улучшить экономическую эффективность горных предприятий.

Несмотря на большой объем и достигнутые успехи в этом направлении, до настоящего времени не существует подхода к вопросу снижения выхода мелких фракций при дроблении породы на щебень с точки зрения регулирования размеров зоны и снижения эффекта предразрушения. Поэтому разработка новой концепции, основанной на экспериментальных данных, представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Зона предразрушения – часть массива горных пород, в пределах которой его свойства меняются под воздействием внешних сил. Эта зона возникает в массиве при превышении критерия прочности, а границы этой зоны определяются выполнением этого критерия. Такими критериями являются нелокальные и концентрационные критерии прочности [77, 78]. Предразрушение обусловлено нарастанием и развитием микротрещин (преимущественно – микротрещин отрыва [65]), что способствует структурному ослаблению среды.

Рассматривая структурное ослабление прочности массива или отдельных кусков горной массы на различных расстояниях от взрыва, в качестве базовой модели разрушения горных пород используется многостадийная модель разрушения твердых тел. В соответствии с этой моделью, каждый вновь

образованный дефект в массиве предопределяется наличием более мелких дефектов. На первом этапе идет процесс случайного квазиравномерного накопления нарушений первого порядка. Стоит отметить, что массив горных пород, вне зависимости от структурных характеристик, всегда является анизотропной средой [35]. Неоднородность среды, как и наличие локальных разностей во внутренних нагрузках массива, приводит к тому, что на втором этапе формируются области высокой концентрации дефектов первого порядка. На заключительном этапе стадии, когда концентрация дефектов первого порядка превышает критический пороговый уровень, идет слияние нарушений, что приводит к образованию дефектов второго порядка [33]. Накопление дефектов происходит до момента разрушения – разделения исследуемого фрагмента на 2 и более кусков.

Зона структурного ослабления ограничивается областью наведенных взрывом микротрещин [70]. А наведение этих микротрещин (волновое предразрушение) зависит от величины напряжений, возникающих в горной породе [60].

В данной работе рассматривается непосредственно волновое предразрушение массива горных пород, поскольку естественное (природное) нарушение целостности монолита скальной породы наблюдается повсеместно и зависит от горно-геологических условий, а также от строения массива [101]. При проведении полевых исследований, в качестве допущения предполагается принимать изначальное состояние породы до взрыва (не предразрушенной) за условленный монолит по причине невозможности проведения полевых экспериментов в естественной идеально сплошной среде.

Волновое предразрушение скальных пород подразумевает собой развитие микротрещин в условно монолитной среде под действием взрывной волны. Процесс формирования трещин в горных породах происходит в контексте естественной микротрещиноватости и дефектов в их структуре. В случае, когда породы обладают зернистой структурой, длина естественных микротрещин соизмерима с размерами отдельных зерен [10, 31]. При наличии воздействия поля

напряжений возникает индуцированная (наведенная) трещиноватость, которая сопровождается ростом существующих и образованием новых микротрещин [16, 87].

Разрушение породы главным образом зависит от энергии волн напряжения [66], распространяющихся в среде [134, 2]. 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. Влияние взрывного импульса на характер разрушения рассмотрено в работах [54, 12].

При прохождении взрывной волны через массив, идет формирование зон разрушения горной породы, в результате чего в классическом представлении зонной модели разрушения [9, 74] образуются зона переизмельчения, зона регулируемого дробления, зона радиальных трещин, зона предразрушения, а затем область упругого деформирования [68]. В процессе прохождения ударной волны в породе, происходит формирование трещин и других дефектов, которые способствуют появлению вновь образованных поверхностей.

Процесс деструкции твердых тел, включая горные породы, обусловлен не столько единичными разрывами, сколько постепенным образованием мелких трещин и нарушений внутри материала. Нарушения возникают при раскрытии структурных неоднородностей, которые имеют одинаковые статистические размеры.

Но стоит отметить тот факт, что разделение массива в результате взрыва на отдельные слабосвязанные между собой структурные элементы не всегда приводит к их беспрепятственному разделению по вновь образовавшимся поверхностям [1]. Остаточные напряжения в каждом на момент прохождения ударной волны отдельном фрагменте, способствуют наведению микротрещин в каждом из них. Эти наведенные взрывом микротрещины, способствуют снижению структурной прочности и целостности каждого отдельного куска горной породы, что во-первых, способствует лучшему дроблению взорванной горной массы до кондиционного размера при движении и соударении кусков во время формирования развала [51], а

с другой стороны, несут в себе негативный фактор в виде непреднамеренного разламывания взорванной горной массы в процессе механического дробления на мелкие осколки, которые и составляют фракцию отсева при изготовлении строительного материала (щебня).

Авторы [28] различают 4 стадии напряженно-деформированного состояния горной породы при взрыве:

- «поверхностный эффект»;
- упругое или линейное деформирование;
- упруго-пластическое деформирование;
- запредельное деформирование.

Работа авторов связана с основами кинетического разрушения по С.Н. Журкову, которым был сформулирован физический принцип прогнозирования разрушения объекта, находящегося в поле действия механических сил. Согласно теории Журкова [43], время до разрушения тела τ при сжимающем напряжении σ подчиняется уравнению (1.28):

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1.28)$$

где τ_0 – период тепловых атомных колебаний, с; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура с учетом экспериментальных данных.

До разрушения образца горной породы при динамических испытаниях нарастают напряжения в нем, а после разрушения происходит релаксация напряжений в образце. Согласно этой теории, в зоне дробления при взрыве, наведение микротрещиноватости, способствующее структурному ослаблению материала, происходит на этапе как упруго-пластического деформирования, при котором происходит образование новых, а также разветвление и слияние уже имеющихся в породе микротрещин, так и на стадии запредельного деформирования, что говорит о наведении микротрещин в каждом отдельном куске после взрыва.

Исходя из вышеперечисленного, в настоящей работе предлагается рассмотрение зоны предразрушения в качестве зоны, включающей в себя зону

дробления и зону радиальных трещин, поскольку после взрыва отдельные фрагменты в каждой из них также имеют наведенную взрывом микротрещиноватость, то есть после взрыва являются в той или иной степени предразрушенными.

Кинетическая теория прочности способна в должной степени отобразить формирование новых микродефектов (1.29) [117]:

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n^* - n} = \int_0^t \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} \quad (1.29)$$

где n – количество микротрещин в единице объема; t – время от начала нагружения, с; τ – локальная долговечность, подобная в общем случае переменному $\sigma(t)$.

Накопление микротрещин до критических концентраций неизбежно приводит к их слиянию $n_i^* = \frac{1}{k^3 l_i^3}$, где $k = 2,7 \div 6$ – концентрационный критерий. Появление отдельностей в массиве горных пород происходит благодаря объединению трех систем трещин, но если рассматривать более детально, то для слияния достаточно четыре и более трещины [55]. Эффект предразрушения горной породы и каждого отдельного фрагмента после разделения в пределах зоны разрушения при взрыве, может быть объяснен присутствием неслившихся трещин в каждом куске, поскольку попарное слияние микротрещин намного более вероятно, чем развитие и слияние целой группы микродефектов [87].

Из зависимости Гриффитса действительной прочности среды от размера микротрещины или дефекта следует, что увеличение размеров микродефектов способствует уменьшению прочности среды [100, 113]. Авторы [87] предполагают, что за зоной переизмельчения (более пяти диаметров заряда) преобладает раскрытие существующих микротрещин и дефектов, а стадия предразрушения в виде образования новых микродефектов присутствует в ближней зоне.

Прочность горной породы уменьшается пропорционально возрастанию концентрации микротрещин. После взрыва прочность породы может быть определена выражением (1.30):

$$\sigma = [\sigma]_{\text{м}} \varphi_{\text{м}} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right), \quad (1.30)$$

где ω – часть энергии взрыва, затраченная на разупрочнение горной породы; ω_0 – энергоемкость разрушения.

Максимальное число микротрещин на 1 м^3 разрушаемого целика оценивается степенной величиной отношения метра горной породы к микрометру длины трещины со значением степени, равным трем [125]. Соответственно, согласно данной теории, имеет место быть максимальная концентрация микротрещин в предразрушенном массиве или отдельном фрагменте, после превышения которой неизбежно пойдет слияние микротрещин и образование новых свободных поверхностей.

В работе [115] с помощью численных экспериментов были созданы модели трещиноватых горных массивов различных размеров, что позволило детально изучить масштабные особенности прочности массива при двухосном сжатии. Результат проведенного эксперимента подтвердил снижение прочности массива с увеличением концентрации микротрещин, что обуславливает структурную анизотропную нарушенность массива.

В статье [89] авторы рассматривают дополнительное разрушение горной породы на квазистатической стадии действия взрыва [130] в отличие от волновой. Теория основана на термодинамическом подходе к описанию роста трещины по Гриффитсу, который определяет параметры роста трещин на микроуровне. Из приведенных в работе положений следует, что размер каждой трещины неизменно влияет на прочность среды. Это указывает на тот факт, что, в первую очередь, опираясь на кинетику трещинообразования, можно смело считать массив анизотропным, о чем свидетельствует установление связи между идеальной и экспериментальной прочностями (1.31):

$$\sigma_{\text{эксп}}^* = \sigma_{\text{ид}}^* \sqrt{a_0 / l_{\text{тр}}}, \quad (1.31)$$

где $l_{\text{тр}}$ – длина трещины, мм; a_0 – расстояние между атомными плоскостями, перпендикулярными оси растяжения в ненапряженном состоянии, мм.

В результате работы полагается возможность заметного увеличения зоны трещинообразования только за счет концентраций напряжений в вершинах трещин в поле напряжений, обусловленных высокими давлениями продуктов детонации.

В работе [18] авторы приходят к выводу о том, что эволюция трещинообразования, способствующая предразрушению породы имеет место как при квазистатическом, так и при динамическом нагружении. В динамической стадии взрыва формирование зоны предразрушения обусловлено действием волн напряжений в массиве, а в квазистатической стадии взрыва процесс предразрушения описан согласно работе [89].

При добыче строительного камня буровзрывным способом, мелкая фракция непосредственно при взрыве образуется в зоне переизмельчения [19, 44]. Если рассматривать повышенный выход мелкой фракции в конечном продукте после операций дробления и измельчения, то большая часть мелочи получается из кусков горной породы, которые находились в момент взрыва в зоне предразрушения (предразрушенные куски) и при прикладывании к ним дополнительной энергии они рассыпаются на мелкие фрагменты.

В начале нулевых годов XXI века был предложен способ влияния на размеры зон предразрушения на примере горной породы типа гранит. В работе [45] были оценены радиусы зон наведенной взрывом микротрещиноватости. Зона микротрещиноватости, характеризующаяся зоной предразрушения, по результатам исследований, оказалась в несколько раз больше, чем наведенная взрывом зона трещинообразования. После обработки данных эксперимента, был сделан вывод о том, что объемная концентрация ВВ играет немаловажную роль при формировании зон предразрушения на скальных породах. В работе представлено сравнение результатов взрывов зарядов ВВ штатной плотности $1,6 \text{ г/см}^3$ и взрывов зарядов плотности, пониженной до $0,5 \text{ г/см}^3$. Так, при переходе на заряды малой плотности, формируется особый профиль волны напряжений с меньшей амплитудой и более постоянным (равномерным) распределением энергии во времени.

1.5 Задачи диссертационного исследования

Цель диссертационной работы заключается в снижении выхода некондиционной фракции щебня (отсева) при ведении буровзрывных работ на карьерах по добыче щебеночной продукции.

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 ВВ типа Аммонит № 6ЖВ.
5. Апробация полученных результатов путем проведения опытно-промышленных взрывов.

1.6 Выводы по Главе 1

Строительная индустрия в наше время является ресурсоемкой отраслью, что влечет за собой необходимость добычи и переработки строительного камня в колоссальных масштабах. Добыча горных пород на щебень является одной из лидирующих областей промышленности по объемам образования отходов. Если рассматривать полный цикл добычи строительных материалов (щебня), то отходы производства в виде мелкой фракции до 5 мм разделяются на два вида: отсеvy, полученные при ведении буровзрывных работ (карьерная мелочь), и отсеvy дробления, образовавшиеся в ходе переработки подготовленного сырья.

При добыче строительного камня (щебня) большое внимание уделяется качеству конечного продукта. Качество щебня зависит от прочностных и геометрических параметров каждого куска, полученного в результате обогащения.

Зона предразрушения, характеризующаяся как зона, включающая зоны дробления, трещинообразования и зону радиальных трещин, находит свое применение в условиях взрывания одиночных зарядов ВВ или при проведении массовых взрывов на карьерах строительного камня, когда заряды располагаются на расстоянии, учитывающем сопряжение границ зон регулируемого дробления. Эффект предразрушения в таком случае наблюдается как за пределами зон разрушения, так и в отдельных кусках взорванной горной массы. Проведение массовых взрывов на блоках, граничащих с предшествующими взрывами, идет в условиях взрывания предразрушенного массива, что неизбежно с технологической точки зрения. Поэтому рассматриваемое понятие предразрушения со стороны ослабления прочности массива или отдельных фрагментов после взрыва, в том числе и в пределах зоны дробления, предопределяет необходимость влияния в большей степени на интенсивность или степень предразрушения, чем на размеры зон предразрушения, а размеры этих зон могут быть уменьшены при снижении степени предразрушения.

Снижение выхода мелких фракций при дроблении породы на щебень требует решения задач по изменению параметров предразрушения. Размер зоны и степень предразрушения влияют на образование структурно ослабленных кусков породы в зоне регулируемого дробления, а такие параметры волн напряжений, возникающих при взрыве в массиве, как величина амплитуды и продолжительность импульса волны напряжений, являются факторами, влияющими на параметры предразрушения. Снизить эффект структурного ослабления измельчаемой породы для увеличения выхода кондиционных кусков конечного продукта можно путем изменения детонационных характеристик применяемого ВВ и регулированием диаметра заряда.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При добыче строительного камня буровзрывным способом, мелкая фракция непосредственно при взрыве образуется в зоне переизмельчения. Если рассматривать повышенный выход мелкой фракции в конечном продукте после операций дробления и измельчения, то большая часть мелочи выходит с зоны предразрушения при взрывном нагружении, поскольку структурно ослабленные фрагменты с повышенной концентрацией микротрещин имеют сниженные прочностные характеристики, и при относительно малых воздействиях, склонны рассыпаться на мелкие куски.

Предразрушение породы – начальная стадия эволюции внутренней структуры, накопление и развитие микродефектов в рассматриваемом объеме, приводящее к структурному ослаблению породы. Понятие предразрушения касается не только части массива, находящейся за зоной регулируемого дробления, а также и отдельных фрагментов горной породы после взрыва из зоны дробления. Необходимость определения размеров зоны предразрушения обуславливается тем, что увеличение ее размеров способствует повышению выхода конечного продукта (щебня) фракцией менее 5 мм.

Влияние на волновое предразрушение при дроблении горных пород взрывом оказывают такие составляющие, как диаметр заряда и скорость детонации взрывчатого вещества.

Результаты, представленные в работах [49, 40, 105, 83], показывают, что КПД взрыва уменьшается при снижении относительного объема разрушения, чему способствует увеличение диаметра заряда ВВ. Малый диаметр бурения следует применять в связи с улучшением качества проработки горного массива взрывом при идентичном уровне удельного расхода взрывчатых веществ [80].

Снижение диаметра заряда на 8-14%, дает эффект, при котором объем породы мелкой фракции может быть сокращен на 7-12% [75]. Это объясняется уменьшением размеров зоны предразрушения при уменьшении диаметра заряда.

Изменение детонационных характеристик ВВ оказывает непосредственное влияние на параметры предразрушения. Результаты проведенных ранее

экспериментов [69] показывают, что с увеличением скорости детонации ВВ увеличивается зона предразрушения, в которой происходят изменения упругих и прочностных характеристик свойств массива горных пород с расстоянием от заряда ВВ. Эффект предразрушения получает преимущественное развитие в скальных породах, что неблагоприятно влияет на экономическую эффективность добычи строительного камня.

Основной задачей экспериментальных исследований является определение влияния таких параметров, как диаметр заряда и детонационные характеристики применяемого ВВ [126, 23] на размеры зоны и интенсивность предразрушения и в конечном итоге на формирование гранулометрического состава фракционного щебня, в частности, выход фракции размером менее 5 мм, после всех основных технологических процессов.

Для определения параметров волнового предразрушения необходимо проведение промышленных испытаний, что сопряжено с рядом трудностей, которые заключаются в невозможности отделения сопутствующих факторов, перемена которых также оказывает влияние на результаты исследований. При смене диаметра заряда и постоянной скорости детонации ВВ, меняется конструкция заряда или свойства взрывчатого вещества [103].

Это говорит в первую очередь о том, что существует необходимость решения поставленных задач при помощи сравнения результатов различных серий экспериментов, в каждой из которых рассматривается влияние ограниченного числа факторов.

Идеальный случай, при котором изменяется лишь один исследуемый параметр практически невозможно организовать. По этой причине предполагается проведение серий полигонных экспериментальных взрывов при соблюдении некоторых условий в каждой из них:

- замер скорости детонации всех типов ВВ, применяемых в условиях разработки Куранахского рудного поля (Аммонит № 6ЖВ, Эмульсолит А-20, Гранулит РП) при проведении каждого экспериментального и опытно-промышленного взрыва;

- измерение гранулометрического состава щебня на месторождении «Бурное» после всех стадий переработки;
- проведение экспериментальных взрывов с применением различных диаметров зарядов ВВ и замером ускорений смещения горного массива датчиками пьезоакселерометрами;
- проведение экспериментальных взрывов с вариацией применяемого взрывчатого вещества и замером ускорений смещения горной массы датчиками пьезоакселерометрами.

Должно быть проведено несколько серий экспериментов каждого типа для рассмотрения влияния ограниченного числа факторов, влияющих на взрывное разрушение горной породы, учитывая конечные условия после взрыва. Выбор участка для проведения экспериментальных взрывов определяется постоянством структурной и прочностной характеристики массива горных пород.

После серий полигонных экспериментов необходимо провести лабораторные испытания образцов горной породы, отобранных с места проведения полевых экспериментов в соответствии с излагаемой методикой, в результате которых будут сопоставлены данные о трещиноватости образца с приложенными напряжениями на определенном расстоянии от взрыва.

По полученным эмпирическим характеристикам будет определена корреляционная зависимость между напряжениями (в исследовании под напряжениями предусматривается радиальная составляющая волны напряжений), возникающими в горной породе на различных расстояниях при взрыве, и концентрацией микротрещин в образце. Определение корреляционной зависимости способствует определению размеров зон предразрушения, что необходимо для регулирования степени предразрушения при ведении взрывных работ на карьерах строительных материалов. Это приведет к решению поставленной задачи.

2.1 Методический план организации полевых экспериментов

2.1.1 Методика измерения скорости детонации

Цель эксперимента – получение фактических (реальных) значений скоростей детонации ВВ в условиях промышленного применения для последующих расчетов зависимости величины напряжений, возникающих в горной породе на различных расстояниях при взрыве от детонационных характеристик ВВ. Во вторую очередь идет уточнение табличных значений скорости детонации для промышленных ВВ, применяемых в условиях рассматриваемого месторождения.

Для проведения последующих расчетов необходимо измерить скорости детонации применяемых взрывчатых веществ (Аммонит №6ЖВ, Эмульсолит, Гранулит РП).

Измерение должно осуществляться в условиях взрывания технологического или экспериментального блока. Для замеров применялось регистрирующее устройство DataTrap II с соответствующим модулем, позволяющим проводить измерения.

В данном случае скорость детонации измерена резистивным методом, при котором прибор измеряет и записывает величину электрического сопротивления специального зондового кабеля, уменьшающегося по мере распространения детонационной волны в заряде.

Измерительный кабель представляет собой специальный коаксиальный кабель с центральной жилой и экранированием. Кабель размещается по всей длине скважины до начала заряжения. Обязательным условием является натянутое состояние кабеля при зарядке ВВ для исключения недостоверных результатов.

Регистрация значений сопротивления линии осуществляется с частотой 2,5 МГц. С известным собственным сопротивлением измерительного кабеля 10,8 Ом/м, штатное программное обеспечение осуществляет построение графика зависимости расстояния (м) от времени (мс).

Скорость детонации определяется по формуле (2.1):

$$D = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (2.1)$$

где D – скорость детонации, м/с; Δl – расстояние между концами средней линии замера на графике, м; Δt – разница значений времени, соответствующих взятым значениям расстояния, сек.

Резистивный метод измерения скорости детонации взрывчатых веществ можно использовать при измерении скорости распространения детонационных волн в ВВ в том случае, если величина ударного импульса, воздействующего на кабель будет больше учетверенного значения коэффициента динамической вязкости материала внутренней изоляционной оболочки измерительного кабеля [46]. Данное условие соблюдается при правильном расположении кабеля по протяженности столба заряда ВВ.

Измерительный прибор устанавливается на безопасном расстоянии для минимизации риска его повреждения. Установка элементов Прибора приведена на рисунке 2.1.

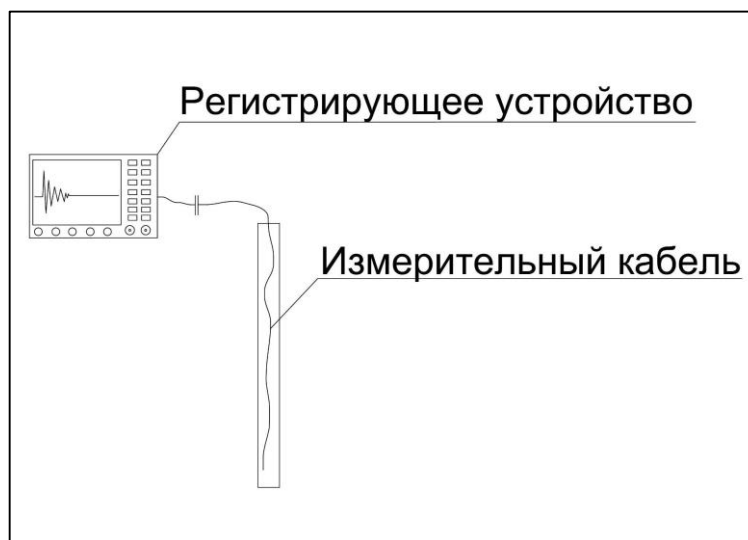


Рисунок 2.1 - Измерение скорости детонации (составлено автором)

2.1.2 Методика измерения напряжений в горной породе

Измерение ускорений смещения частиц массива при взрыве обусловлено необходимостью получения данных для их преобразования в значения напряжений. Прямое измерение напряжений пьезоэлектрическими датчиками не может быть осуществлено вследствие невозможности воссоздания необходимой аппаратуры и датчиков-акселерометров с пьезоэлементом из титана бария [91]. Метод косвенного измерения напряжений в горной породе при взрыве через замер

ускорений смещения был выбран по причине возможности его реализации – технология проведения замеров позволяет провести тарирование пьезоакселерометров в лабораторных условиях (без применения ВВ), а также размещение, установку датчиков и проведение измерений в промышленных условиях с использованием имеющихся на предприятии средств и оборудования [149].

Измерение напряжений, возникающих в горной породе при взрыве на различных расстояниях необходимо для определения корреляционной зависимости между определенными напряжениями и пределом прочности породы на сжатие, а также энергетическими характеристиками ВВ.

Для косвенного измерения напряжений, необходимо провести прямые замеры ускорений смещения частиц массива при взрыве на различных расстояниях, используя измерительные преобразователи – датчики пьезоакселерометры. Выбраны и применены одноосные пьезоакселерометры деформационно-защищенной конструкции, которые хорошо себя зарекомендовали для проведения натурных исследований.

Схема пьезоакселерометра приведена на рисунке 2.2.

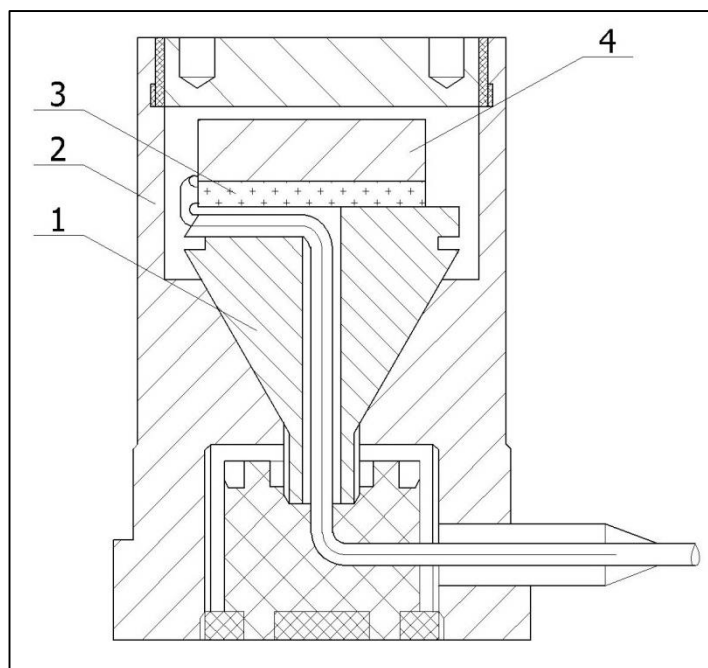


Рисунок 2.2 - Схема акселерометра. (1 – стальной сердечник; 2 – основание корпуса; 3 – пьезоэлектрические пластины; 4 – инерционная масса) [123]

При интенсивных нагрузках у пьезоматериалов наблюдается эффект последствия или «дрейф нуля», что есть смещение нулевой отметки сигнала акселерометра после окончания воздействия. Физически это явление объясняется для пьезокерамики тем, что после удара домены не возвращаются в исходное состояние. По этой причине в условиях проведения экспериментов были использованы акселерометры с кварцевыми элементами, поскольку пьезокварц обладает существенно меньшим эффектом последствия, а механизм его появления связан с дефектами кристаллической структуры, что свидетельствует о возможности градуировки акселерометров на тарировочном стенде в ударном режиме без негативных последствий в виде нарушения структуры пьезоматериала.

Градуировка акселерометров заключается в определении коэффициента преобразования механического воздействия (давления) в электрический аналог [79]. Изготовленные акселерометры подвергались динамическому тарированию на ударном стенде со строго одинаковыми ударными нагрузками средней интенсивности при каждом этапе калибровки. Градуировка акселерометров осуществлялась путем сравнения показаний каждого пьезоакселерометра с эталонным образцом BRUEL & KJAER 8340.

Основными элементами стенда являются волновод (стальной цилиндр, в верхней части которого закреплены датчики, а по нижней части осуществляется удар), механический возбудитель (баллистический маятник) и спусковой механизм. Технические характеристики ударного стенда приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Технические характеристики ударного стенда [123]

№	Параметры	Диапазон
1	Амплитуда ускорения, ед. «g»	100 –3000
2	Длительность полуволны ускорения, мкс	50-250
3	Воспроизводимость: по амплитуде, % по длительности	5 10
4	Точность положения угла начального отклонения маятника (в градусах)	$\pm 0,5$
5	Неравномерность поля ускорения по торцу волновода, %	Менее 5

При градуировке акселерометров методом сравнения градуируемый и образцовый преобразователи устанавливались в посадочные гнезда, расположенные на верхнем торце механического волновода.

Волновод стенда нагружался ударным импульсом при помощи механического возбудителя маятникового типа. Каждый датчик подвергался тарированию как самостоятельно, так и с каждым из трех удлинительных проводов, что необходимо для уменьшения погрешностей при измерении в полевых условиях. Запись показаний осуществлялась с помощью прибора DataTrap II, частота регистрации данных – 500 кГц.

Итогом тарирования датчиков является получение переводных коэффициентов для каждого из них. Эти коэффициенты являются величиной для перехода к значениям эталонного акселерометра.

Для этих целей была использована программа для тарирования датчиков, пример которой приведен на рисунке 2.3.

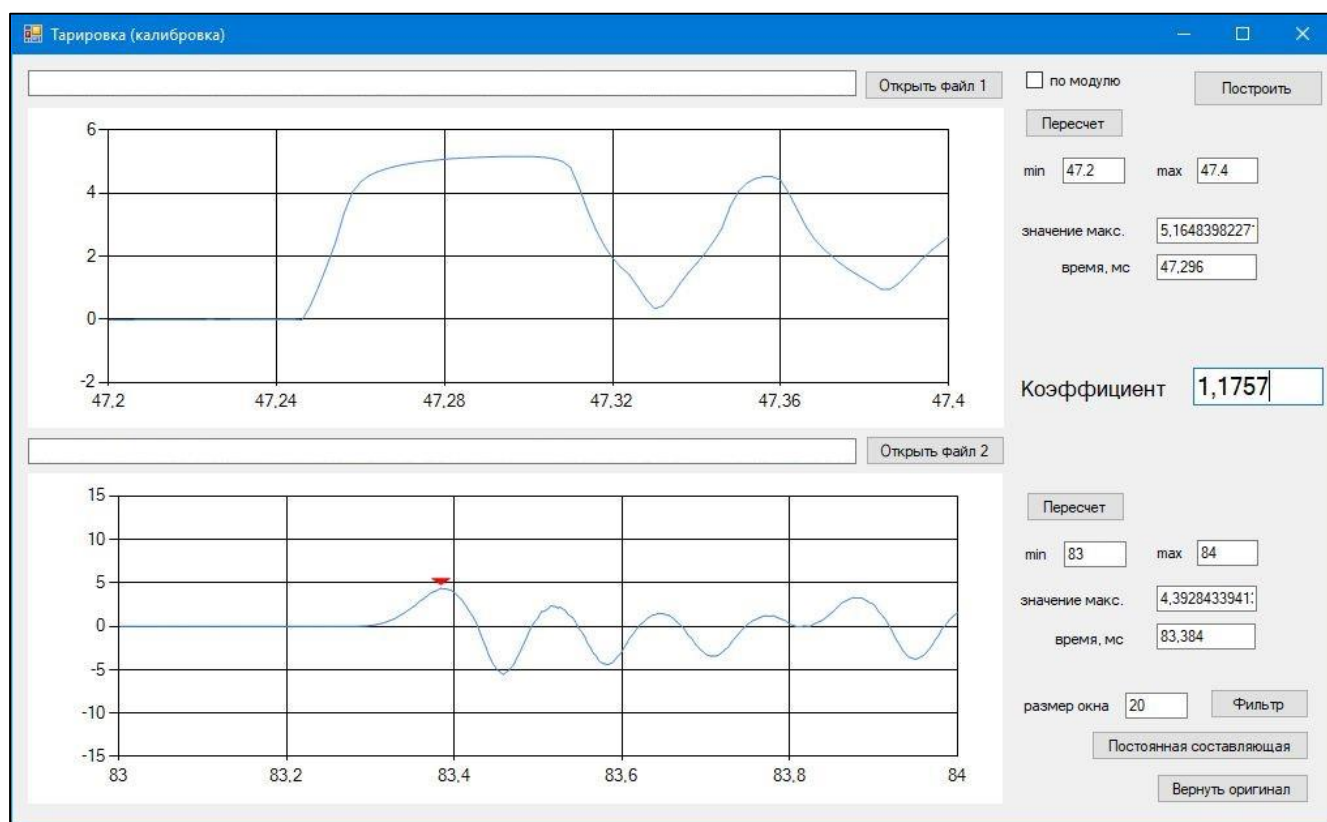


Рисунок 2.3 – Тарирование пьезоакселерометров (составлено автором)

При наличии белого шума и выпадающих случайных значений на графике, к тарлируемому датчику применялся фильтр «скользящее среднее» с размером

фильтрационного окна от 1 до 20. Критерием необходимости увеличения окна фильтрации является белый шум, случайные выпадающие значения и нелинейность графика до начала показаний датчика. При завышении/занижении нуля графика или заваливании прямой, было применено вычитание постоянной составляющей.

Данные после тарирования представляют собой ускорения, выраженные единицами измерения a (м/с²). Интегрирование в скорость колебаний u осуществляется посредством расчета производной от ускорений по формуле (2.2):

$$u(t) = \int a(t) \cdot dt \quad (2.2)$$

где u – скорость колебаний, м/с; a – ускорение смещения, м/с².

Для интерпретации данных выбран такой показатель, как звуковое давление (напряжение). Звуковое давление представляется в виде разности между мгновенным давлением на пути распространения волны и собственно статическим. Звуковое давление в каждой точке волнового поля распространяется так же, как и колебательная скорость частиц в этой же точке. Связующим параметром между давлением и скоростью колебания частиц является волновое сопротивление среды или ее акустическая жесткость [133]. Приведенные параметры связаны между собой соотношением (2.3):

$$P/U = \rho C \quad (2.3)$$

где P – звуковое давление, Па; U – скорость колебаний, м/с; ρC – акустический импеданс.

Напряжения, возникающие в горной породе при воздействии сейсмовзрывной волны, рассчитывались по формуле (2.4):

$$\sigma_0 = \rho_0 \cdot C_p \cdot U_x \quad (2.4)$$

где σ_0 – напряжения, возникающие в горной породе (давление сейсмовзрывной волны), Па; ρ_0 – плотность материала, кг/м³; C_p – скорость распространения продольной волны в массиве, м/с; U_x – скорость колебаний горной породы, м/с.

При измерении ускорений смещения частиц массива, необходимо для размещения датчиков пробурить скважины диаметром не менее 110 мм для

обеспечения размещения акселерометров на уровне центра заряда. При измерении на различных расстояниях от взрыва следует предусмотреть не соосное расположение измерительных скважин для минимизации границ раздела сред на пути следования волны напряжений от взрыва до каждого из акселерометров. Также при установке датчиков обязательным условием является горизонтирование и расположение датчика строго по направлению к взрывной скважине по той причине, что конструкция датчиков предусматривает выполнение измерений по одной оси.

Для закрепления акселерометров в массиве следует использовать щуп для погружения, центрирования и горизонтирования с возможностью жесткого закрепления датчика и фиксации проводов для недопущения их падения в скважину. В качестве заполняющего материала был выбран алебастр с замешанной буровой мелочью, поскольку по своим механическим свойствам такая смесь будет близка к свойствам породного массива.

Данный способ крепления датчиков, безусловно, имеет ряд недостатков в виде создания дополнительной границы раздела сред, увеличения метража бурения скважин, но монолитное закрепление датчика в массиве на уровне размещения ВВ невозможно без нарушения целостности самого массива.

2.1.3 Методика отбора образцов горных пород

После завершения полевых экспериментов предусматривается проведение лабораторных исследований, для которых необходимо отобрать образцы горной породы в виде керна на различных расстояниях как до взрыва, так и после проведения взрывных работ.

Перед проведением взрывных работ в каждой серии экспериментов, но после бурения взрывных и технологических скважин, необходимо рядом с каждой технологической скважиной, на таком же расстоянии от скважины с ВВ пробурить по одной инженерно-геологической скважине глубиной, соответствующей глубине взрывной и технологических скважин станком колонкового бурения для извлечения керна. Также необходимо пробурить еще по одной инженерно-

геологической скважине рядом с каждой технологической после проведения взрывных работ.

Отбор образцов горных пород для проведения лабораторных испытаний будет проводиться в соответствии с ГОСТ 21153.0-75 «Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний». Согласно данному документу пробы горных пород для физических испытаний отбирают в виде керна буровых скважин или кусков породы произвольной формы [36].

Количество керна или кусков, отбираемых в пробу, и их линейные размеры зависят от вида испытания пород и должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Требования к отбираемым образцам [36]

Виды испытания горных пород	Диаметр керна, мм, не менее	Длина куска керна, мм, не менее	Суммарная длина керна в пробе, мм, не менее	Линейный размеры кусков породы, мм, не менее	Количество кусков в пробе, шт., не менее
Определение коэффициента крепости	Общий объём керна не менее 3000 см ³			150x150x150	1-2*
Одноосное сжатие	40-50	60-70	600-700	200x200x200	2
Одноосное растяжение	40-50	60-70	600-700	200x200x200	2
Метод раскалывания-сжатия	75	60-70	120-140	100x100x100	1-2
Срез	45	60-70	1800-2000	200x200x200	3-4
Изгиб	90-100	60-70	120-140	150x150x150	1-2

Знак «*» означает, то количество кусков в пробе должно обеспечивать при ручном раскалывании выход материала крупностью 20-40 мм не менее 2 кг.

2.1.4 Методика проведения экспериментов по измерению гранулометрического состава щебеночной продукции

Цель эксперимента – определение формирования гранулометрического состава щебня после процесса обогащения для проведенных массовых взрывов с различными типами ВВ и диаметрами зарядов.

В связи с тем, что преобладающей задачей является оперативное получение данных наибольшей точности, использованы метод ситового анализа и метод подсчета объемов с помощью маркшейдерского оборудования.

При ситовом анализе, разделение на фракции (грохочение) щебня происходит при помощи системы грохотов. После прохождения раздробленной горной массы через грохот и обработки результатов, становится известно содержание объемов каждой фракции в пределах достаточно узкого интервала. Также возможен ручной отбор кусков по крупности в качестве ситового анализа, но в этом случае высок риск ошибки (человеческий фактор) икратно возрастает трудоемкость операций. Ситовой анализ выбран в качестве основного метода контроля, поскольку способен обеспечить ошибку измерения до 1% [124]. В данном исследовании в качестве метода ситового анализа будет применено разделение кусков по классам крупности посредством штатного оборудования месторождения, а именно мобильный трехдечный грохот MOBISCREEN MS 20 D, который включен в штатную обогатительную цепь после дробления сырья и перед выходом конечного продукта - щебня. В результате грохочения будут получены следующие фракции, предусмотренные проектом:

- 40+ мм;
- 20-40 мм;
- 10-20 мм;
- отсев крупностью 0-10 мм.

Также необходимо проводить замеры гранулометрического состава конечного продукта, разделенного по фракциям, что можно осуществить посредством обмера объемов полученных конусов, разделенных по фракциям.

Каждая серия взрывов должна быть проведена на породах, постоянных по структурной и прочностной характеристикам.

2.2 Методика проведения лабораторных экспериментов

Цель данного этапа заключается в определении изменений концентрации микротрещин в образцах горных пород.

Лабораторные исследования проводились методом рентгеновской компьютерной микротомографии, что необходимо для оценки количественного параметра микротрещиноватости исследуемых образцов.

Образцы горной породы с разных участков до и после взрыва подготавливаются для микротомографии путем распила до необходимых размеров. Затем, после проведения микротомографии, в объеме полученных образцов проводится поштучный пересчет трещин и определяется степень микротрещиноватости через концентрацию трещин. Далее, сравниваются значения, полученные до и после взрыва.

В результате проведения лабораторных экспериментов, данные о количестве образованных взрывом микротрещин в образце сопоставляются с изначальной степенью трещиноватости, а степень наведенной взрывом микротрещиноватости соотносится с напряжениями на расстоянии взятия образца от взрыва.

По полученным эмпирическим характеристикам определяется корреляционная зависимость между напряжениями, возникающими в горной породе при взрыве, и количеством образованных взрывом микротрещин на единицу объема породы.

2.3 Условия проведения экспериментов

Для получения точных результатов необходимо соблюдать следующие условия:

- соблюдение последовательности предлагаемой методики;
- бурение необходимого метража технологических скважин;
- бурение необходимого объема инженерно-геологических скважин станком или перфоратором колонкового бурения;
- исправность оборудования бурового станка и станка геологоразведочного бурения;
- наличие в достаточном объеме минимум трех типов взрывчатого вещества различной скорости детонации;
- полное соответствие техническим условиям при местном производстве взрывчатого вещества типа Гранулит;
- исправность систем инициирования при проведении экспериментальных и промышленных взрывов;

- возможность отслеживания условной единицы объема взорванной горной массы от развала до конечного продукта;
- для проведения однотипных экспериментов необходим участок, имеющий постоянство структурных и прочностных характеристик;

2.4 Программа проведения экспериментов

1. Поиск подходящего по параметрам участка, соответствующего следующим критериям: горизонтальная ровная поверхность; монолитные, не разрушенные предыдущими взрывами скальные породы; 10x10 м - параметры участка для одного эксперимента (один взрыв).

2. Бурение скважин (для размещения зарядов ВВ и технологических) диаметром не менее 110 мм.

3. Бурение инженерно-геологических скважин станком колонкового бурения до взрыва.

4. Извлечение образцов горной породы (керн).

5. Монтаж измерительного оборудования, датчиков.

6. Заряжание скважин и проведение взрывных работ.

7. Бурение инженерно-геологических скважин станком колонкового бурения после взрыва.

8. Извлечение образцов горной породы (керн).

9. Проведение лабораторных испытаний образцов горной породы методом рентгеновской компьютерной микротомографии.

10. Определение корреляционной зависимости между напряжениями, возникающими в горной породе при взрыве и наведенной взрывом микротрещиноватостью.

2.5 Выводы по Главе 2

Составлена программа проведения экспериментов, которая включает в себя методику проведения измерений скорости детонации применяемых взрывчатых веществ и измерения напряжений в горной породе при взрыве, методику измерения гранулометрического состава, отбора проб (керна) до и после проведения

взрывных работ, а также методику проведения лабораторных исследований изъятых образцов.

Всего планируется провести 12 однотипных экспериментов, каждый из которых включает в себя бурение скважины с последующим размещением в ней ВВ, бурение трёх технологических скважин на расстояниях 10-70 радиусов заряда для размещения датчиков, бурение инженерно-геологических скважин станком колонкового бурения на расстояниях 10-70 радиусов заряда (половина из которых бурится до ведения взрывных работ). В ходе проведения каждого экспериментального взрыва необходимо измерение скорости детонации ВВ.

Во второй главе также представлены условия проведения эксперимента и подробно описана программа проведения испытаний.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВВ НА ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ПОРОДЫ

3.1 Подготовка экспериментальных исследований

По данным инженерно-геологических изысканий и результатам визуального осмотра, выбрана площадка для проведения экспериментальных взрывов. Полигон для испытаний зачищен от вскрышных пород до обнажения массива известняка. Участок для проведения натурных экспериментов приведен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Подготовленное место для проведения экспериментальных работ
(фото автора)

Бурение скважин (рисунки 3.2, 3.3) осуществляется в соответствии с утвержденным проектом на бурение и ведение специальных видов взрывных работ на карьере строительных материалов «Бурное» АО «Полюс Алдан».

В каждом «блоке» размещены одна взрывная и 3 технологических скважины. Технологические скважины, пробуренные на различных расстояниях (10, 40, 70 радиусов заряда) от взрывной скважины предназначены для расположения в них датчиков пьезоакселерометров.



Рисунок 3.2 – Бурение скважин по проекту (фото автора)

Расположение скважин представлено на рисунке 3.3.

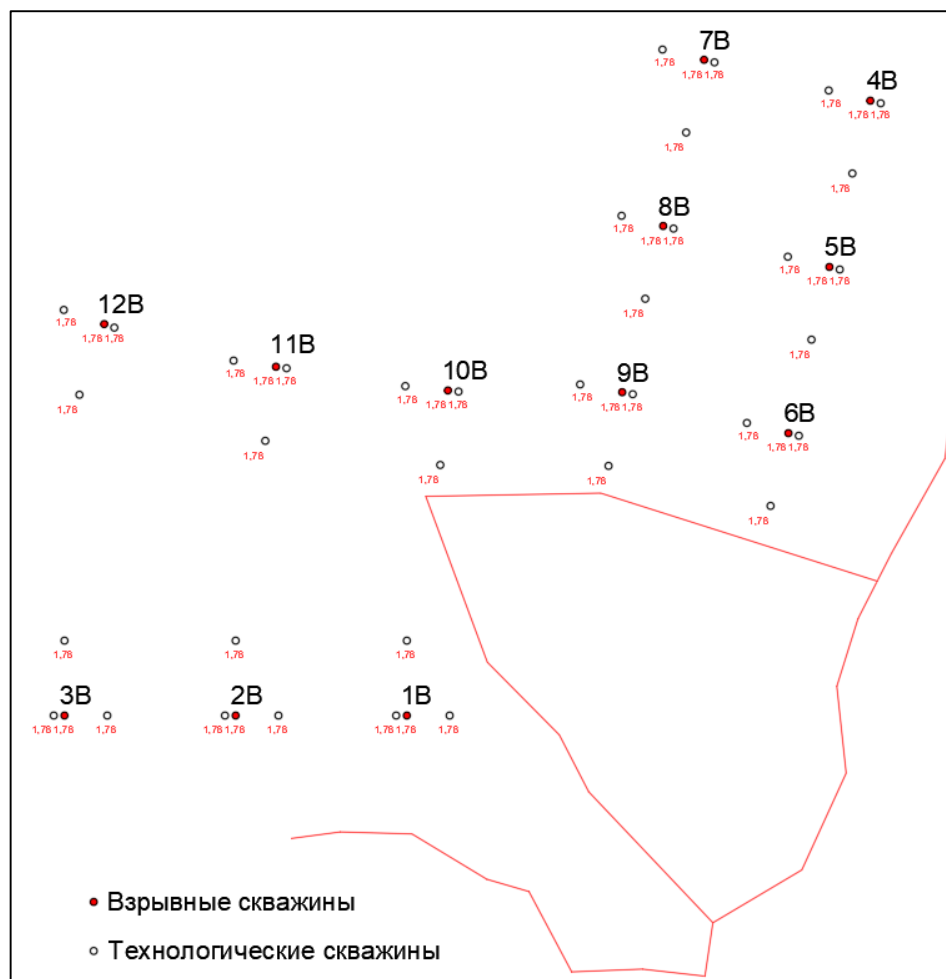


Рисунок 3.3 – Схема расположения взрывных и технологических скважин
(составлено автором)

Схема расположения скважин в каждом блоке эксперимента представлена на рисунке 3.4.

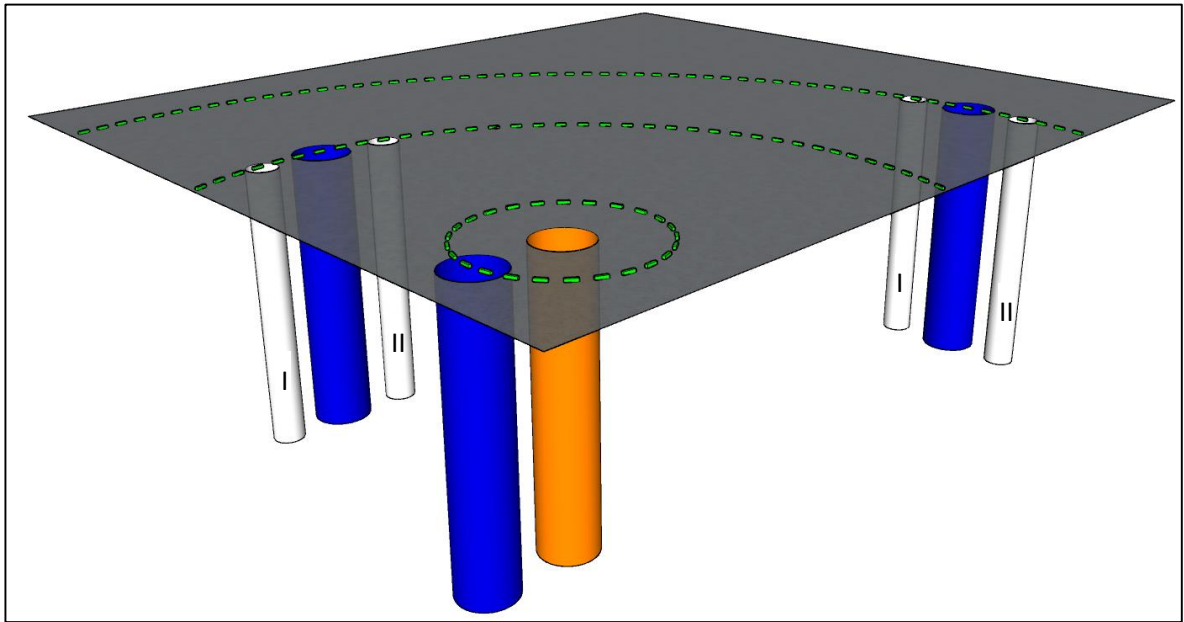


Рисунок 3.4 – Схема расположения скважин (составлено автором)

Оранжевым цветом отмечена взрывная скважина, синим цветом обозначены скважины для измерительной аппаратуры (пьезоакселерометров). Белым цветом представлены инженерно-геологические скважины. Инженерно-геологические скважины (I) бурятся с извлечением керна до проведения взрывных работ, а бурение скважин (II) с извлечением керна проводится после взрывных работ, что необходимо для получения образцов до и после взрыва для последующего сравнительного анализа в рамках лабораторных исследований.

Созданная классификация и нумерация скважин была использована для исключения ошибок при планировании и проведении экспериментов. В полевых условиях скважины также были пронумерованы с помощью изготовленных маркеров, представленных на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Маркеры для определения скважин (фото автора)

3.2 Проведение исследований по измерению скорости детонации

Для повышения точности дальнейших измерений была проведена калибровка прибора DataTrap II. Процесс осуществлялся за счет измерения скорости детонации отрезка детонирующего шнура (ДШ) с известной постоянной скоростью детонации. Отрезок ДШ длиной 2 метра соединялся с измерительным кабелем по всей длине и был закреплен на доске скотчем (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Крепление отрезка ДШ с измерительным проводом (фото автора)

В соответствии с методикой измерения, конец измерительного кабеля был скручен и заизолирован. Так как прибор начинает вести запись с момента разрыва триггерного провода, его конец был тщательно изолирован и помещен в крепление детонатора (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Крепление триггерного провода (фото автора)

Прибор и сопутствующее оборудование было размещено за укрытием (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Оборудование для измерения скорости детонации (фото автора)

После двухкратного повторения эксперимента и обработки полученных данных, была рассчитана скорость детонации ДШЭ-12, которая составила 6,5 км/с, пример графика приведен на рисунке 3.9.

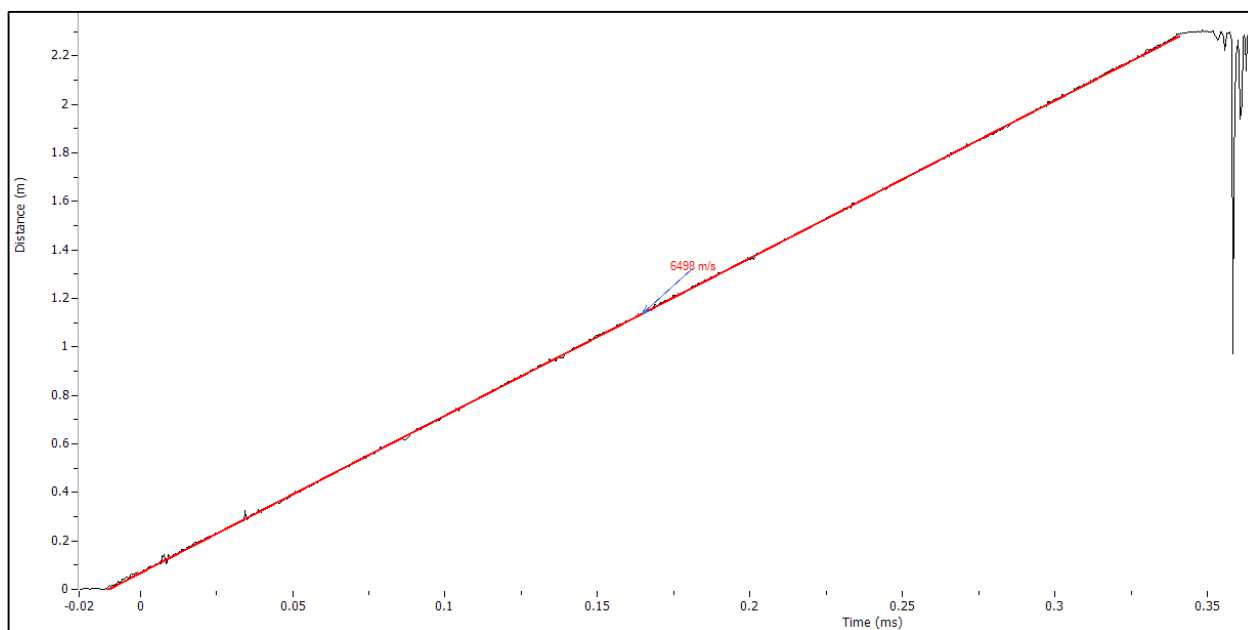


Рисунок 3.9 – График скорости детонации ДШЭ-12 (составлено автором)

Для наибольшей точности дальнейших измерений, был поставлен эксперимент по измерению скорости детонации с дублированием внутрискважинной измерительной сети с параллельным подключением двух измерительных кабелей в два канала прибора.

Исследование проводилось на экспериментальном блоке при взрыве Аммонита № 6ЖВ в шпурах.

По два отрезка кабеля для измерения скорости детонации размещались в двух соседних шпурах. Триггерный провод для активации прибора был размещен в одном шпуре, поскольку осуществлялось единовременное взрывание исследуемых шпуров. Было сооружено укрытие для приборов и удлинительных проводов во избежание нарушения их целостности падающими отдельными кусками взорванной горной массы.

Эксперимент показал, что дублирование измерительных кабелей дает более точную и достоверную информацию (на случай обрыва одного из кабелей), в связи с чем принято решение использовать дублирование при проведении дальнейших экспериментов.

3.3 Отбор проб

После обуривания всех технологических скважин, в соответствии с методикой, необходимо бурение инженерно-геологических скважин с отбором проб (керна) горной массы до проведения взрывных работ, а затем после. Для бурения был использован буровой станок с диаметром колонки 100 мм (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Станок для бурения инженерно-геологических скважин
(фото автора)

Бурение осуществлялось на расстоянии 0,5 м от технологических скважин. Это расстояние обусловлено исключением обрушения за счет сближения скважин. Отбор проб (керна) до взрыва получилось осуществить со скважин 7.2И, 7.3И, 4.2И. После взрыва были взяты пробы со скважин 7.2И и 7.3И. Малое число проб обусловлено ограниченным временем работы бурового станка вследствие большой нагрузки на производственных процессах. Также были отобраны образцы кусков взорванной горной массы из воронок, получившихся после проведения взрывных работ. Фотографии отобранных образцов керна представлены на рисунках 3.11-3.14.



Рисунок 3.11 – Керн 7.2И до взрыва (фото автора)



Рисунок 3.12 – Керн 4.2И до взрыва (фото автора)



Рисунок 3.13 – Керн 7.2И после взрыва (фото автора)



Рисунок 3.14 – Керн 7.3И после взрыва (фото автора)

3.4 Проведение исследований по определению размеров зон предразрушения

Эксперимент проводился на подготовленной ранее площадке (был выбран и зачищен блок, обураны и пронумерованы скважины). Измерительные датчики

(пьезоакселерометры) были заранее распределены по технологическим скважинам в соответствии с чувствительностью датчиков.

Датчики размещались в технологических (измерительных) скважинах путем закрепления их на конце отрезка арматуры длиной 2 метра с помощью изоленды или скотча (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Размещение датчика в скважине (фото автора)

Глубина измерительных скважин регулировалась подсыпкой буровой мелочью до меньшей глубины, чем взрывная скважина. Это необходимо для выполнения условия, при котором датчик располагается на одной горизонтали с центром взрываемого заряда ВВ. После размещения датчика в скважине и его центрирования относительно взрывной скважины, для создания монолитного слоя, для передачи волны напряжений к датчику с минимальными потерями, измерительная скважина заливалась алебастром вперемешку с буровым шламом (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Алебастр для заливки датчиков (фото автора)

Два отрезка кабеля для измерения скорости детонации размещались во взрывной скважине, как и триггерный провод. Все три кабеля закреплялись на боевике, который опускался в забой скважины (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17 – Размещение кабелей в скважине (фото автора)

Другой конец триггерного провода был раздвоен для возможности подключения к двум приборам, что необходимо для их одновременной активации. Два прибора DataTrap II были использованы для раздельного измерения (с помощью первого проводилось измерение скорости детонации по двум каналам, с помощью второго проводилось измерение напряжений с датчиков пьезоакселерометров по трем каналам). Подключение удлинительных проводов для измерения показаний датчиков представлено на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Подключение проводов к прибору (фото автора)

Приборы были удалены от взрыва на максимально возможное расстояние (до 20 м) и находились под укрытием (рисунок 3.19). Провода также были защищены от падающих отделинностей при взрыве с помощью пластиковых труб (рисунок 3.20).



Рисунок 3.19 – Укрытие для приборов (фото автора)



Рисунок 3.20 – Укрытие для проводов (фото автора)

При проведении экспериментов предусматривалось применение трех типов ВВ – Аммонит №6ЖВ, Гранулит РП, Эмульсолит П-А-20. Проводилось взрывание скважин с конструкцией заряда, представленной на рисунке 3.21.

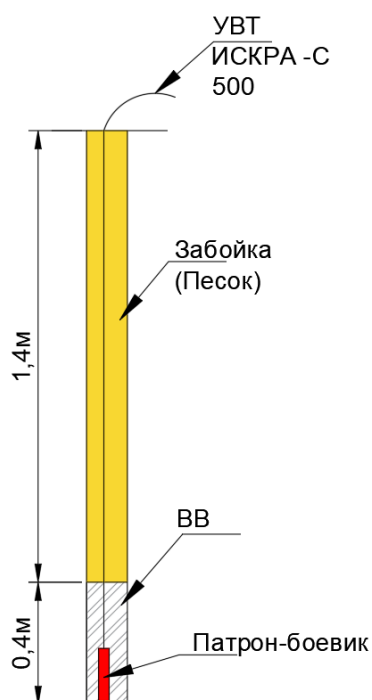


Рисунок 3.21 – Конструкция скважинных зарядов (составлено автором)

Боевик – патрон аммонита № 6 ЖВ.

Диаметр патрона аммонита № 6 ЖВ $d_{\text{патр}}$ – 32 мм.

Масса патрона аммонита № 6 ЖВ $m_{\text{патр}}$ – 250 г.

Инициирование осуществлялось с помощью неэлектрической системы инициирования ИСКРА.

Взрывание зарядов проводилось по отдельности, с интервалом времени, обеспечивающим переподрключение и перенос оборудования.

Длина заряда в скважине была определена по формуле (3.1):

$$l_{\text{зар}} = \frac{V}{S} = \frac{\frac{m}{\rho}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4m}{\rho \pi d^2} = 0,4 \text{ м}, \quad (3.1)$$

где ρ – насыпная плотность ВВ, кг/м³.

Распределение ВВ по скважинам представлено в таблице 3.1. В скважине №10 произошел отказ (взорвался только патрон Аммонита) и, следовательно, полученные данные не могут подвергаться дальнейшей обработке.

Таблица 3.1 – Распределение ВВ по скважинам (составлено автором)

№ скважины	Масса ВВ в скважине, кг	Масса ВВ (Гранулит РП), кг	Масса ВВ (Эмульсолит), кг	Масса ВВ (Аммонит № 6 ЖВ), кг
3	4	3,75+1л ППС	-	0,25
4	4	3,75	-	0,25
5	4	-	3,75	0,25
6	4	-	-	4
7	4	-	-	4
8	4	-	3,75	0,25
10	4	3,75	-	0,25
11	4	3,75	-	0,25
12	4	3,75	-	0,25

3.5 Результаты обработки данных по определению размеров зон предразрушения

Взрывное воздействие на многокомпонентное твердое тело сопровождается сложными явлениями, связанными с распространением волн напряжений в многокомпонентной среде, предопределяющими селективное разупрочнение материала. Учитывая высокую степень управляемости взрывным воздействием и возможность использования его для селективного разупрочнения минералов в породе, следует предположить, что именно в процессах взрывной отбойки следует

искать резервы увеличения производительности дробильно-измельчительного оборудования, снижения энергозатрат на эти переделы обогащения руд.

Количественными критериями степени разупрочнения породы после воздействия взрыва могут быть параметры трещиноватости породы или ее компонентов. В связи с этим, необходима разработка количественной оценки микротрещиноватости породы после воздействия взрыва.

По результатам эксперимента, с датчиков (одноосных пьезоакселерометров) были получены данные – графики напряжения (В) от времени (мс), пример представлен на рисунке 3.22.

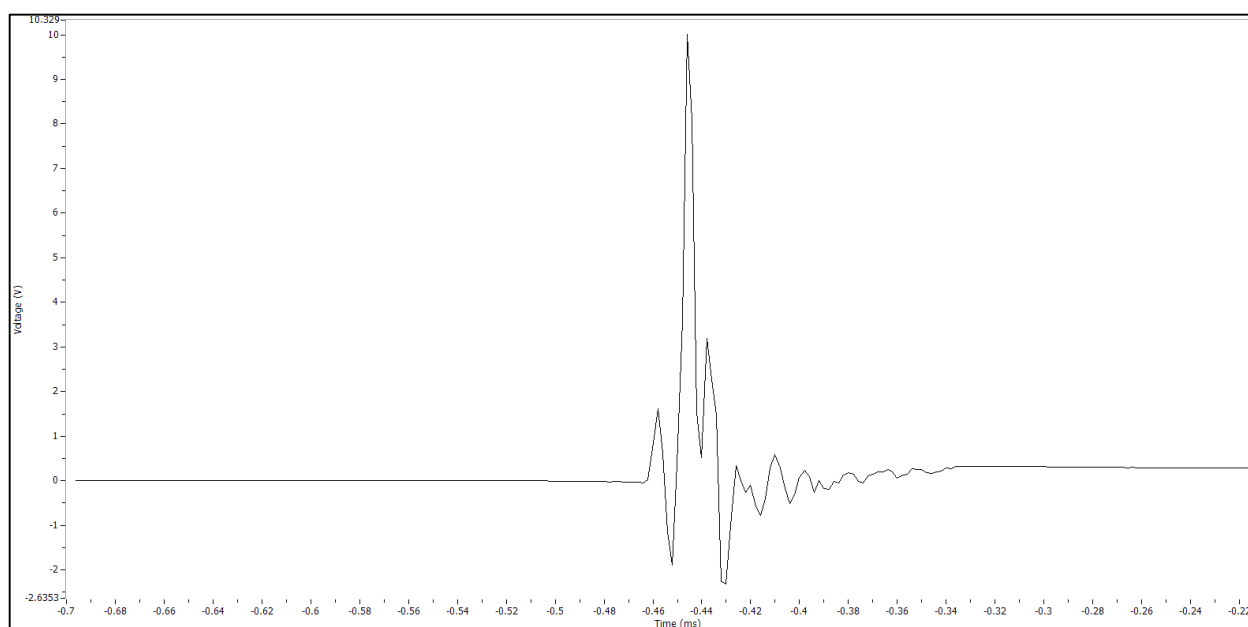


Рисунок 3.22 – Исходные данные (составлено автором)

Импортированные с приборов исходные данные были дополнительно обработаны вследствие необходимости перевода полученных значений в значения скорости по уравнению (2.2), затем в значения напряжений (МПа) по формуле (2.4).

Для обработки данных с эксперимента было использовано программное обеспечение [122], способное фильтровать график посредством фильтра «скользящее среднее», вычитать постоянную составляющую. Возможности программы позволяют регистрировать максимальное значение в исследуемом диапазоне с учетом переводного коэффициента, точно определять время срабатывания датчика, а также рассчитать скорость продольной волны.

Пример обработки данных представлен на рисунке 3.23.

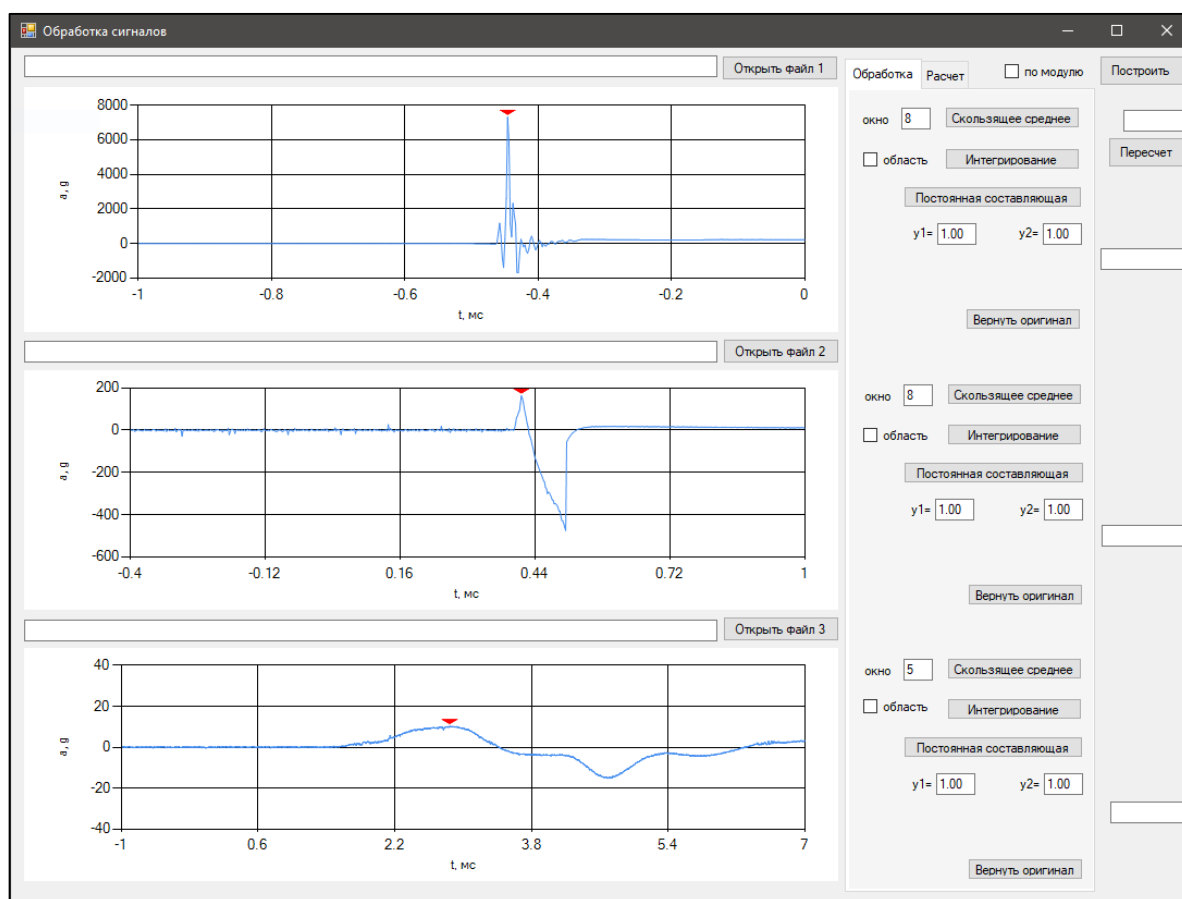


Рисунок 3.23 – Обработка данных эксперимента (составлено автором)

Определенная плотность, применяемая в расчетах для известняка на месторождении «Бурное» Куранахского рудного поля, составляет 2000 кг/м^3 . Скорость продольной волны в образцах и в массиве составляет 2800 м/с .

В таблице 3.2 представлены результаты расчетов напряжений.

Таблица 3.2 – Расчет напряжений в горной породе (составлено автором)

№	Тип ВВ	Скорость детонации, м/с	Скорость колебаний, а·10 ³ (м/с)			Напряжения, МПа		
			0,6м	2,5м	4,3м	0,6м	2,5м	4,3м
7	Аммонит 6ЖВ	4231	0,045	0,0107	0,0010	252,07	59,90	5,84
6		4429	0,0574	0,0103	0,0016	321,63	57,58	9,18
Среднее значение:						286,85	58,74	7,51
4	Гранулит РП	1957	0,0221	0,0028	0,0005	123,72	15,95	2,97
11		2170	0,0245	0,0052	0,0001	137,06	29,05	0,38
12		1800	0,0325	0,0059	0,0003	181,88	32,81	1,72
Среднее значение:						147,56	25,94	1,69
3	Гранулит РП+20%ППС	2470	0,034	0,0069	-	190,60	38,52	-
5	Эмульсолит П-А-20	5578	0,0919	0,0134	0,0019	514,39	74,99	10,87
8		4852	0,0666	0,0109	0,0026	373,21	60,92	14,58
Среднее значение:						443,80	67,95	12,73

Результат проведенных ранее исследований с взрыванием эталонного ВВ типа Аммонит № 6ЖВ [20] показал, что зависимость скорости смещения горной массы на различных расстояниях при взрыве от относительного расстояния имеет вид степенной функции (рисунок 3.24). При этом стоит отметить, что работы были выполнены в условиях железистых кварцитов Оленегорского карьера. В диссертационном исследовании были проведены полевые эксперименты по схожей методике, а значит, полученные зависимости должны иметь также степенной вид.

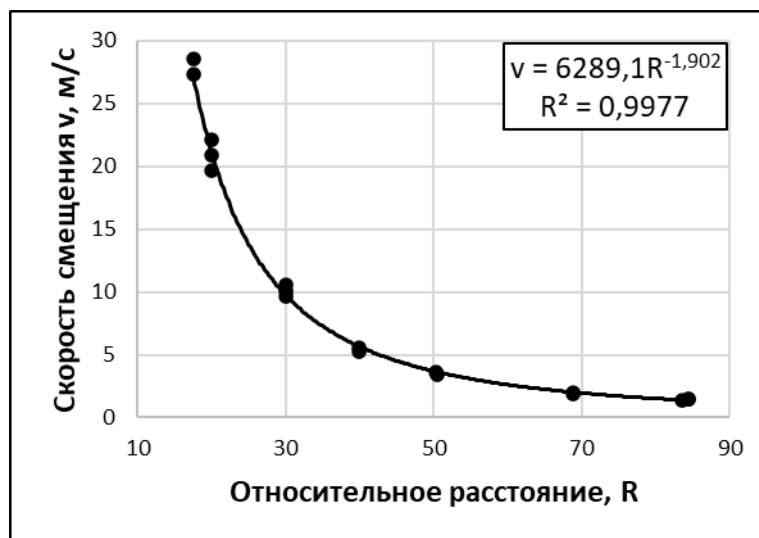


Рисунок 3.24 – График зависимости скорости смещения горной массы от относительного расстояния (составлено автором)

Образование микротрещин в породе начинается при превышении некоторого значения напряжения в массиве. Поскольку начало процесса наведения микротрещин не зарегистрировать в полевых условиях, необходимо воспользоваться существующими методиками. Для определения величины давления (напряжения) в горной породе, необходимого для начала накопительной стадии – образования микротрещин, использовался метод анализа акустической эмиссии (АЭ) [52]. Метод АЭ обеспечивает время регистрации с минимальной задержкой [138, 63], что способствует получению достоверных данных по началу образования микротрещин [50]. Подход хорошо себя зарекомендовал не только при статических испытаниях [110, 155], но также и при динамической нагрузке образцов [11, 142].

В процессе механического разрушения образцов горной породы отличительной особенностью является стадийность разрушения [139]. В неоднородном материале, которым является порода, закономерность смены стадий обусловлена увеличением уровня дефекта согласно многостадийной концепции разрушения [143]. Исследователи [139, 131] различают 4 стадии деформирования образцов: I – начальная, при которой закрывается часть имеющихся дефектов; II – стадия линейных деформаций, на которой заново раскрываются «схлопнувшиеся» дефекты и образуются новые дефекты первого порядка; III – стадия упругопластических деформаций, при которых происходит интенсификация процесса формирования дефектов первого порядка (микротрещин) и начинается образование дефектов второго порядка; IV – стадия предразрушения, которая обусловлена накоплением макротрещин и предшествует разрушению образца [131].

В приведенном ключе стадия предразрушения отличается от понятия предразрушения в нашем исследовании, поскольку определяется с точки зрения начала неизбежного разрушения образца. В нашем же исследовании предразрушенная порода рассматривается как структурно ослабленная.

В породах типа мрамор, известняк и гранит, активность эмиссии, свидетельствующая о начале процесса образования микротрещин, появляется при напряжении 15-38% от предела прочности породы на одноосное сжатие [131]. Близкие значения приводятся другими авторами [102], которые демонстрируют величину порядка 25-30% от предела прочности на одноосное сжатие. Накопление и развитие микродефектов, в соответствии со снижением скорости продольных волн, начинается при напряжениях 10-15 МПа [18]. Превышение сжимающих нагрузок свидетельствует о разрушении (необратимым деформационным изменениям структуры части массива) горной породы.

Согласно вышеизложенному, минимальное значение напряжения в горной породе, при котором начинается формирование и слияние микротрещин, находится на уровне 15% от разрушающей нагрузки или 10-15 МПа. Примем минимальное значение 15% от разрушающего давления для начала формирования микротрещин,

так как у исследуемой горной породы предел прочности на одноосное сжатие составляет 95 МПа, а 15% от этого напряжения находятся в диапазоне 10-15 МПа и составляют 14,25 МПа.

Результаты, приведенные в графическом исполнении, представлены на рисунке 3.25. Зависимость напряжений при взрыве в горной породе от относительного расстояния, обозначаемого величиной радиуса заряда ВВ, принимает вид степенной функции. Вертикальными линиями на графике обозначены границы зон образования микротрещин (зон предразрушения), которые находятся в пределах от 33 (для Гранулита) до 77 (для Эмульсолита) радиусов заряда. Эти границы определены, исходя из величин напряжений (давления волны напряжения), представленных на графике, в соответствии с пределом прочности породы на одноосное сжатие 95 МПа. Максимальное зарегистрированное напряжение на 10 радиусах заряда – 515 МПа, а минимальное на 70 радиусах заряда – 0,4 МПа.

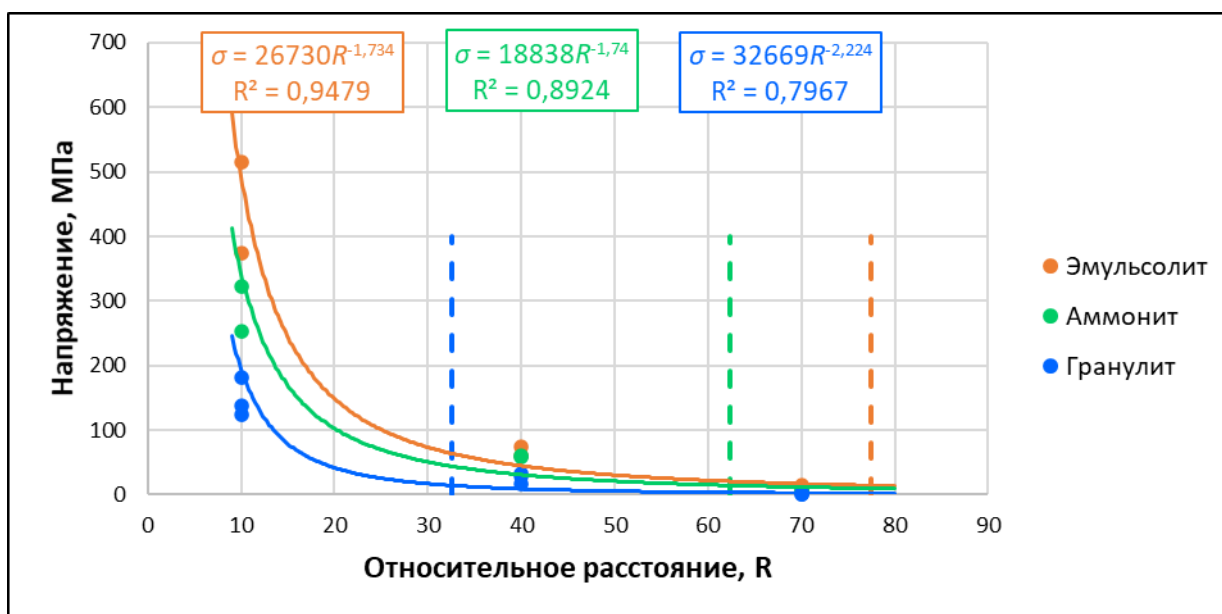


Рисунок 3.25 – Зависимость возникающих напряжений от расстояния
(составлено автором)

Результаты показывают, что в ближней зоне взрыва на расстоянии до 10 радиусов заряда разрушающие нагрузки (напряжения) превышают предел прочности породы на сжатие, что подтверждается образованием воронок рыхления

при взрывании каждого заряда, а с увеличением расстояния, величина напряжения снижается в виде графика степенной функции.

Размеры зоны предразрушения $R_{пред}$ для исследуемого известняка определяются диаметром заряда d и скоростью детонации взрывчатого вещества D по зависимости, представленной ниже (3.2) при ($\sigma_{мин} \geq 0,15 \cdot \sigma_{сж}$).

$$R_{пред} = \left(\frac{d}{2}\right) \cdot (0,014 \cdot D + 4,56) \quad (3.2)$$

График зависимости размера зоны предразрушения $R_{пред}$ от скорости детонации взрывчатого вещества D представлен на рисунке 3.26.

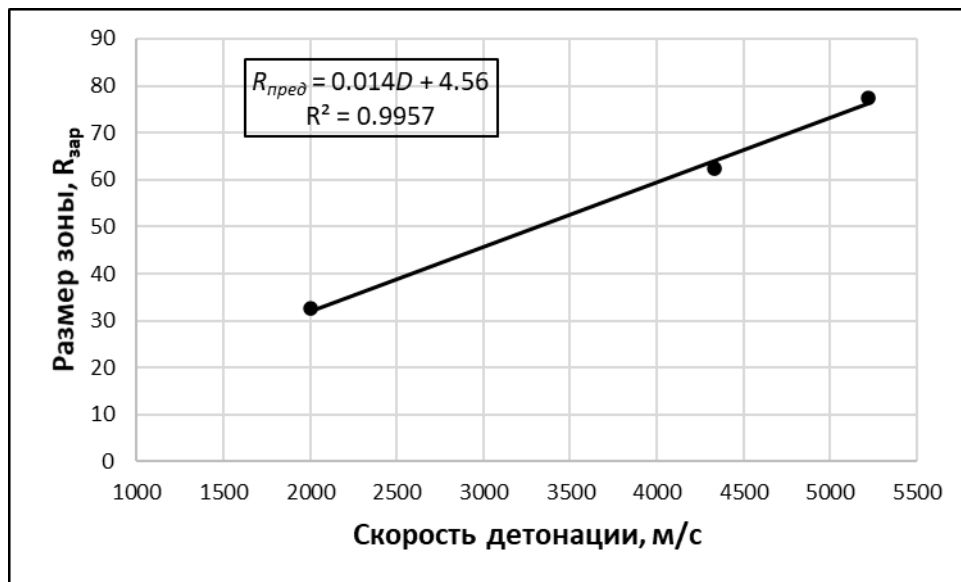


Рисунок 3.26 – Зависимость размера зоны предразрушения от скорости детонации ВВ (составлено автором)

Образцы, изъятые до и после взрыва, были просканированы для получения объемной модели и последующего расчета концентрации трещин. Для проведения данного исследования был использован томограф SkyScan 1173, а данные были обработаны в специализированном программном обеспечении. Результаты реконструкции бинарных моделей рентгеновских изображений образцов представлены на рисунке 3.27.

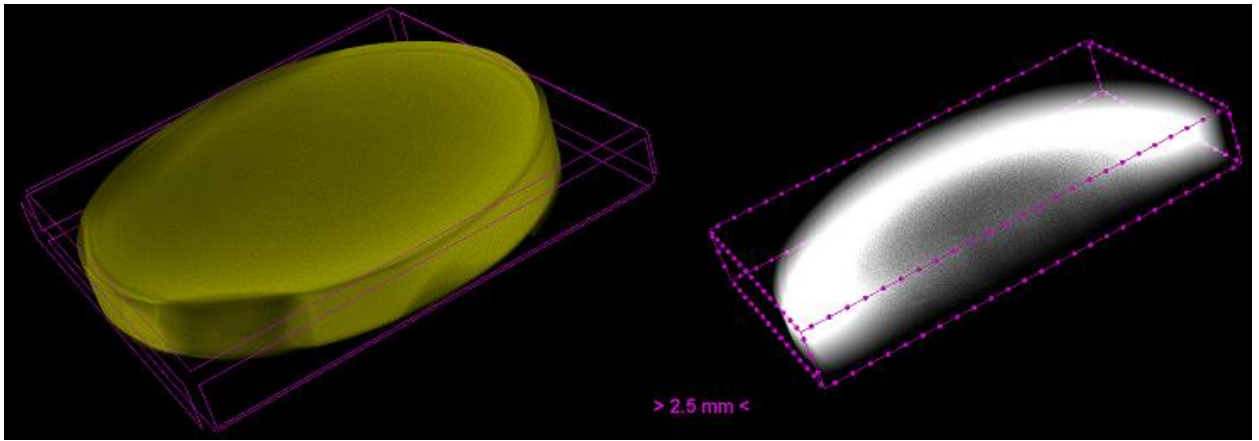


Рисунок 3.27 – Объемная модель образца (составлено автором)

Данные по рентгеновской компьютерной микротомографии представлены в виде набора сечений по каждому образцу. Материал снимался со всего объема образца с частотой слоя 20 мкм. Пересчет микротрещин позволил определить разницу их концентрации до и после взрыва. На рисунке 3.28 представлен пример обработки (определения количественных данных концентрации микротрещин) для слоя образца.

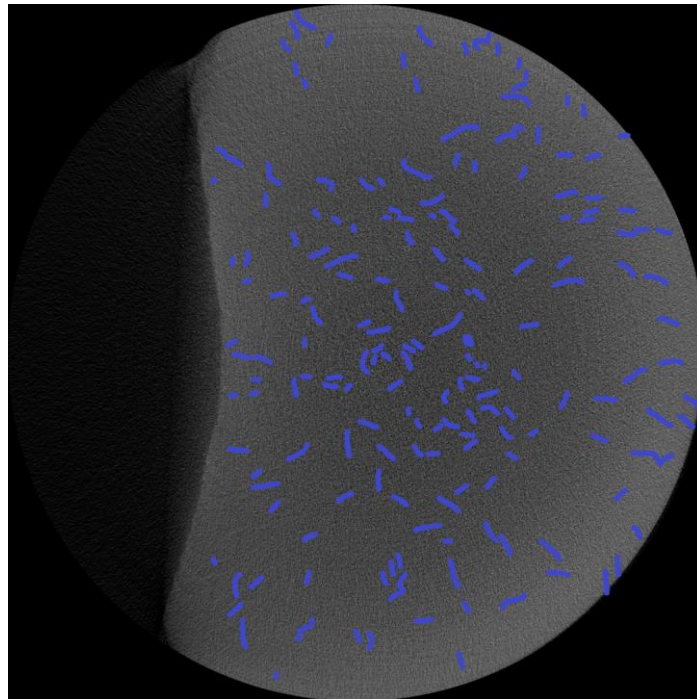


Рисунок 3.28 – Микротрещины на образце, изъятном после взрыва на относительном расстоянии 40R (отмечены синим) (составлено автором)

Согласно данным эксперимента, до взрыва средняя концентрация трещин составляла 1678 шт/см³. Приведенное значение было принято за относительный ноль. Зависимость концентрации наведенных взрывом микротрещин N от

напряжений σ , возникающих в породе, представлена на рисунке 3.29 и определяется выражением (3.3) [24]:

$$N = 37,44\sigma - 641,2 \quad (3.3)$$

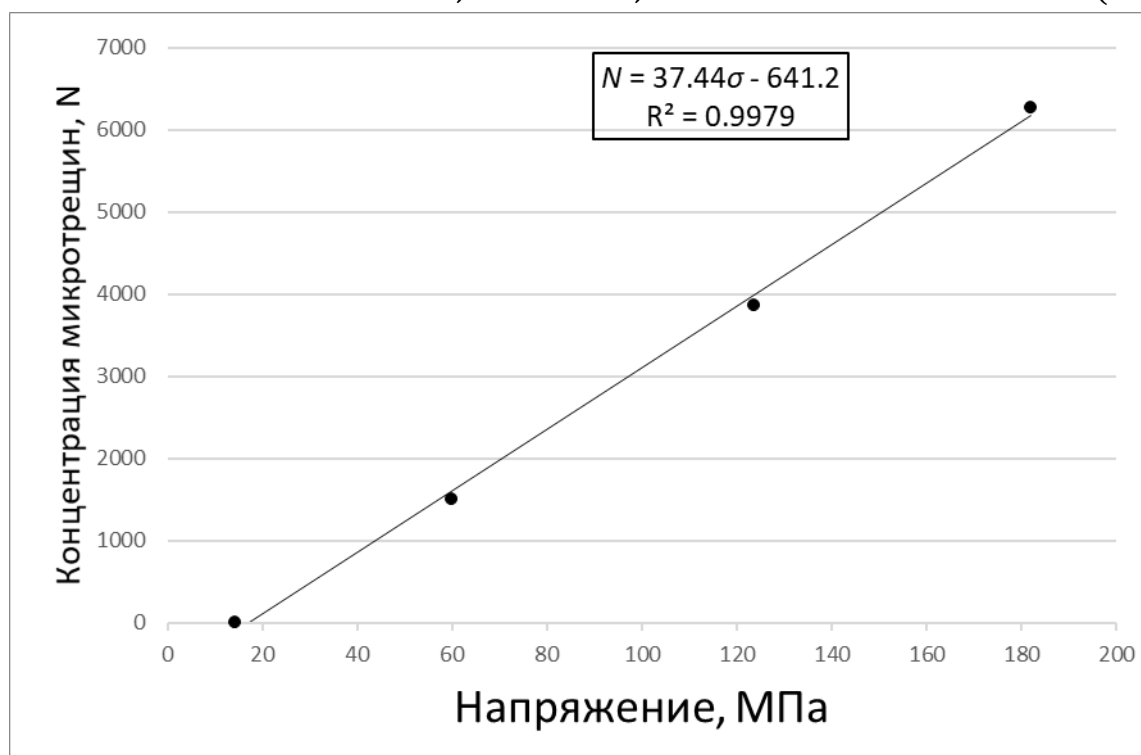


Рисунок 3.29 – График зависимости количества трещин в породе от напряжений
(составлено автором)

Полученные зависимости представлены по значениям взрывов Аммонита № 6ЖВ, Гранулита РП и Эмульсолита А-20 для горной породы типа известняк с пределом прочности на одноосное сжатие 95 МПа. Были использованы различные типы ВВ со скоростью детонации, отличающейся минимум на 20% для возможности объективного сравнения полученных результатов.

Зависимость напряжений в породе, вызванных взрывом от относительного расстояния для каждого типа ВВ имеет вид степенной функции, что согласовывается с полученными ранее другими авторами данными. Граница зоны предразрушения при взрывании Эмульсолита находится на 77 радиусах заряда от взрывной скважины и уменьшается до 33 радиусов при взрывании Гранулита, что подтверждает факт влияния скорости детонации ВВ на размеры зон предразрушения. За пределами этих границ не наблюдается наведенной взрывом микротрещиноватости, о чем свидетельствуют результаты лабораторных

исследований по определению концентрации микротрещин на различных расстояниях. Этот факт обуславливает качественное определение предразрушения в массиве известняка, но большая часть исследования посвящена количественному определению концентрации микротрещин в пределах зоны предразрушения.

На малых расстояниях (10 радиусов заряда) функции зависимости напряжений и концентрации трещин от скорости детонации ВВ имеют экспоненциальный вид, а на средних и дальних (40 и 70 радиусов) – зависимость линейная. Это может говорить о том, что скорость детонации ВВ оказывает наибольшее воздействие на предразрушение породы преимущественно на ближних расстояниях. При этом, с увеличением расстояния увеличивается и время нарастания импульса напряжения. Высокоамплитудный импульс напряжения малой продолжительности способствует переизмельчению породы на ближних расстояниях, но с отдалением от взрыва, волна напряжения выполаживается, что ведет к более качественному дроблению с точки зрения добычи строительного камня.

Определение количественного показателя микротрещиноватости породы необходимо для расчета степени волнового предразрушения как массива целиком, так и отдельных кусков после взрыва. Безусловно, накопление микродефектов носит стохастический характер, но прослеживается нарастание концентрации микротрещин во всем объеме образцов. Полученная зависимость концентрации микротрещин от возникающих в породе напряжений от взрыва имеет линейный вид. В работах [68, 67] и [16, 152] было определено, что величина напряжений от взрыва влияет на величину структурного ослабления рассматриваемого фрагмента, что объясняется ростом концентрации трещин. Но в приведенных исследованиях авторы не рассматривали количественные показатели трещиноватости, а значит, результаты настоящего исследования являются дополнением предшествующих работ.

Естественная микротрещиноватость также влияет на прочностные свойства породы [53], но в данной работе был рассмотрен вопрос волнового предразрушения породы взрывом. Концентрация естественных микротрещин учитывалась как

относительный ноль, поскольку существующие в породе микродефекты до взрыва влияют на параметры волны напряжений в породе, а эти параметры были измерены фактически.

3.6 Выводы по Главе 3

При отработке скальных пород на щебень наведенная взрывом микротрещиноватость оказывает негативное воздействие на качество конечного продукта.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению количественных и качественных параметров предразрушения горной породы при взрыве. Были определены значения напряжений σ , возникающих при взрывном нагружении в горной породе на различных расстояниях R от скорости детонации D применяемого ВВ. Результаты показывают, что в ближней зоне взрыва на расстоянии до 10 радиусов заряда разрушающие нагрузки (напряжения) превышают предел прочности породы на сжатие, что подтверждается образованием воронок рыхления при взрывании каждого заряда. Так, при увеличении скорости детонации ВВ с 2 до 5,2 км/с зона предразрушения увеличивается с 33 до 77 радиусов заряда. Зависимость количества вновь образованных микродефектов от скорости детонации ВВ принимает вид экспоненты для ближней зоны и имеет линейную зависимость для дальних расстояний от взрыва. 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 ≈ 14.2 тыс. шт/см³. На средних (40R) расстояниях значение N растет с ≈ 350 до ≈ 2000 шт/см³ соответственно.

Зависимость концентрации микротрещин N от напряжений σ представлена выражением $N=37.44\sigma-641.2$.

Применение ВВ с пониженной скоростью детонации позволяет снизить «излишнее» воздействие на массив и тем самым уменьшить интенсивность предразрушения в зоне регулируемого дробления при взрыве. Это объясняется тем,

что отдельные куски после взрыва будут в меньшей степени ослаблены, и в результате выход отсева при переработке скальных горных пород на щебень должен быть уменьшен.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАРЯДА НА ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

4.1 Исследование влияния диаметра заряда на эффект предразрушения

В соответствии с принципом подобия, влияние диаметра заряда на параметры гранулометрического состава разрушенной горной массы обусловлено совпадением параметров напряженного состояния массива при равных значениях удельных энергозатрат на процесс фрагментации [141].

Ранее были проведены эксперименты в условиях разработки железистых кварцитов Оленегорского карьера методом воронкообразования [121]. На специально подготовленном участке карьера проводились взрывы скважинных зарядов различных диаметров – 76, 105 и 132 мм. Условием являлось сохранение высоты заряда, его массы и типа ВВ. В качестве эталонного ВВ был использован Аммонит № 6ЖВ, масса зарядов составляла 1,6 кг. Для сохранения высоты и массы применяемых зарядов, был использован метод погружения инертного заполнителя в центральную часть заряда объемом порядка 70% от сплошного заряда, с расположением взрывчатого вещества коаксиально в радиальном зазоре. Согласованность удельного объема в кольцевом заряде взрывчатых веществ, его массы и геометрической формы приводит к равенству давлений внутри зарядной полости, а также к соответствию амплитуд и продолжительности ударного импульса.

В качестве инертного заполнителя были использованы бетонные стержни в бумажных гильзах. Заряды каждой конструкции были расположены в скважинах различной глубины – 0,6; 0,9; 1,2; 1,6; 2,0 м.

Были измерены ускорения смещения при взрыве на различных относительных расстояниях, а также замерены объемы полученных воронок с определением гранулометрического состава взорванной горной массы.

Основная цель экспериментов заключалась в определении характера изменения скорости и ускорения смещения частиц горной массы при изменении удельной поверхности контакта «заряд-порода». Эксперимент показал, что заряды

постоянной массы и переменного диаметра создают равные значения ускорений и скоростей смещения массива на одинаковых относительных расстояниях от заряда ВВ [20]. Также важно отметить, что при измерении ускорений смещения на идентичных расстояниях в метрической системе от центров зарядов, необходимо привести значения показаний к фактическим геометрическим параметрам заряда. В этом случае значения измеренных параметров будут идентичны тем значениям из контрольной серии опытов, которые получены для сплошного заряда взрывчатого вещества.

Этот факт свидетельствует о том, что заряд коаксиальной формы с полостью в центре, заполненной инертным материалом, работает подобно сплошному заряду подобного ВВ аналогичного диаметра, что может говорить о неработоспособности центральной части заряда. Когда речь идет о подобии распределения энергии во время взрыва, следует отметить, что это не является гарантией подобия в процессе разрушения горных пород. Важным моментом в этом случае является увеличение общей площади новых поверхностей при уменьшении диаметра заряда. Этот эффект, в свою очередь, приводит к увеличению удельного расхода ВВ при применении больших диаметров в сравнении с установленными стандартами для меньших диаметров зарядов. Это является подтверждением теории о том, что важен не диаметр заряда, а площадь удельной поверхности контакта заряда с породой. [21].

Дополнительно был сделан вывод о том, что площадь контакта заряд-порода, увеличивается прямо пропорционально диаметру и сопровождается повышением КПД взрыва и расширением области, где значения скорости и ускорения в горной породе остаются равными, пропорционально квадрату диаметра заряда.

Как итог, эффективность взрывного дробления горной породы определяется площадью контакта заряд ВВ-порода эквивалентной приращению объема ВВ, поскольку рост объема центральной части заряда способствует росту объема и площади контакта с породой периферийной части заряда ВВ. Изменение КПД взрывного дробления породы может быть описано функцией (4.1) удельной поверхности контакта заряд-порода следующего вида:

$$\eta_i = \eta_0 \cdot \left(\frac{l_i}{l_0} \cdot \frac{D_0}{D_i} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_i} \right)^{2/3}, \quad (4.1)$$

где l_i , D_i , ρ_i – длина, м; диаметр, м; и плотность, кг/м³ нового заряда ВВ, соответственно.

Как при ранее проведенных исследованиях, для измерения ускорения смещения частиц горной массы были использованы пьезоэлектрические акселерометры, обладающие большой прочностью и линейностью измерительных характеристик. Пьезоакселерометры были разработаны для измерений в лабораторных и натурных условиях [57]. В отличие от предыдущих экспериментов, в наших исследованиях пьезодатчики были закреплены в технологических скважинах при помощи алебаstra, перемешанного с буровой мелочью, что обеспечивает наиболее близкое совпадение с характеристиками массива и способствует увеличению точности проведенных измерений.

Эксперименты, проведенные ранее, с точки зрения обоснования принципов геометрического подобия, показали, что расстояния равных действий волн напряжений в массиве пропорциональны геометрическим параметрам заряда ВВ, но условия выполнения данного подобия это есть результат произвольного использования энергии центральной части ввиду увеличения периферийной части заряда ВВ. Энергетическое подобие было обосновано соответствием эталонного заряда ВВ применяемому (реальному) эквивалентной энергией, но с отличием объема реального заряда от эталонного пропорционально квадрату диаметра.

4.2 Влияние диаметра заряда на основании расширенного геометрического подобия

Однородные параметры напряженного состояния массива, при условии равенства удельных затрат энергии на процесс фрагментации, обуславливают зависимость гранулометрического состава разрушенной горной массы от диаметра заряда ВВ согласно принципу полного геометрического подобия. Равенство удельных энергозатрат – идентичные значения напряжений соответствуют одинаковым относительным расстояниям, выраженным в радиусах (диаметрах)

заряда. При увеличении массы заряда одного и того же типа ВВ, принципы подобия сохраняются за счет соответствующего изменения объема модели пропорционально массе заряда.

Изменение геометрических параметров, таких как диаметр заряда, при одинаковых значениях энергии, соответствует принципу энергетического подобия. В этом контексте заряду взрывчатых веществ с увеличенным энергетическим эквивалентом приписывается соответствие с зарядом эталонного взрывчатого вещества, у которого энергия соизмерима с энергией эталонного заряда. При этом размеры условного заряда уравниваются с размерами эталонного.

Тот же принцип применялся и для расчета параметров волн напряжений. Несмотря на многообразие эмпирических коэффициентов, присутствующих в различных зависимостях, применяемых для конкретных исследуемых условий, общим для таких зависимостей приходится использование принципа расширенного геометрического подобия, включающего в себя принцип энергетического подобия. Принцип расширенного геометрического подобия, включающий в себя энергетические аспекты, говорит о том, что при учете относительных расстояний, выраженных в радиусах заряда, эквивалентных по энергии взрыва, наблюдается равенство основных параметров волн напряжений в соответственных точках пространства в определенные моменты времени.

Эпюра радиальной составляющей волны напряжений в диапазоне относительных расстояний от 20 до 100 радиусов заряда, может быть описана зависимостью (4.2) вида:

$$\sigma_2(r, t) = \sigma_{r_{max}}(r) e^{-a(\tau - \tau_n)} \frac{\sin \beta \tau}{\sin \beta \tau_n} [\varepsilon_0(\tau) - \varepsilon_0(\tau - \tau_+)], \quad (4.2)$$

где $\tau = t - t_{пр}$ – время с момента прихода волны напряжения в заданную точку r , с; t – текущее время с момента взрыва заряда ВВ, с; $t_{пр}$ – время прихода волны в заданную точку r с момента взрыва, с.

Максимальное напряжение (Па) в волне в заданной точке r (4.3):

$$\sigma_{r_{max}}(r) = \rho_{п} c_{п} 2,25 \cdot 10^3 / \bar{r}^2, \quad (4.3)$$

где $\rho_{\Pi} c_{\Pi}$ – акустическая жесткость породы, Н·с/м³; $\bar{r} = r/R_{03}$ – относительное расстояние.

Время нарастания амплитуды напряжения (с) до его максимального значения $\tau_{\text{н}}$ (4.4):

$$\tau_{\text{н}} = (\alpha_1 + \alpha_2 \bar{r}) R_{03}. \quad (4.4)$$

Коэффициент β , характеризующий продолжительность τ_+ положительной фазы волны напряжений (1/с) (4.5):

$$\beta = \pi/\tau_+ = (b_1 + b_2 \bar{r})/R_{03}. \quad (4.5)$$

Коэффициент a , характеризующий крутизну нарастания и спада амплитуды волны напряжений во времени (1/с) (4.6):

$$\alpha = \beta c t g(\beta \tau_{\text{н}}). \quad (4.6)$$

В выражениях (4.4) и (4.5) величины α_1 (с/м), α_2 (с/м), b_1 (м/с), b_2 (м/с) представляют собой численные размерные коэффициенты, зависящие от типа породы в соответствии с выражениями (4.7):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (0,02 + 0,87 \cdot 10^{-8} \rho_{\Pi} c_{\Pi}) 10^{-3}, \\ \alpha_2 &= (0,19 + 0,122 \cdot 10^{-7} \rho_{\Pi} c_{\Pi}) 10^{-4}, \\ b_1 &= 150 + 27 \cdot 10^{-6} \rho_{\Pi} c_{\Pi}, \\ b_2 &= -0,2 \cdot 10^{-7} \rho_{\Pi} c_{\Pi}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Тангенциальная составляющая эпюры волны напряжения может быть вычислена по зависимостям (4.8-4.9):

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi}(r, t) = \sigma_{\varphi_{\text{max}}}(r) \left\{ \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\pi \tau}{\tau_{\text{н}}}\right) [\varepsilon_0(\tau) - \varepsilon_0(\tau - \tau_{\text{н}})] \right. \\ \left. - e^{-a(\tau - 2\tau_{\text{н}})} \frac{\sin[\beta(\tau - \tau_{\text{н}})]}{\sin(\beta \tau_{\text{н}})} [\varepsilon_0(\tau - \tau_{\text{н}}) - \varepsilon_0(\tau - \tau_{\text{н}} - \tau_+)] \right\}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{\varphi_{\text{max}}}(r) = \left[1 - 2 \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^2 \right] \sigma_{r_{\text{max}}}(r) = \frac{v}{1 - v} \sigma_{r_{\text{max}}}(r), \quad (4.9)$$

где C_s , C_p – скорости распространения поперечной и продольной волны (м/с) в изучаемой породе соответственно.

В приведенных выше выражениях $\varepsilon_0(\tau)$ является единичной разрывной функцией нулевого порядка (4.10):

$$\varepsilon_0(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau \geq 0 \\ 0 & \text{при } \tau < 0. \end{cases} \quad (4.10)$$

Скорость смещения частиц горной массы (массовая скорость) (4.11):

$$v(r, t) = \sigma(r, t)/(\rho_{\text{п}} c_{\text{п}}). \quad (4.11)$$

Определение максимального смещения частиц породы в волне напряжения осуществляется через интегрирование эпюры скорости смещения частиц по времени в пределах от момента начала воздействия волны ($r = 0$) до времени достижения максимального значения ($\tau = \tau_+$) (4.12):

$$u_{r_{\text{max}}}(r) = \int_0^{\tau_+} v_r(r, t) dt. \quad (4.12)$$

Приближенно она может быть оценена по формуле (4.13):

$$u_{r_{\text{max}}}(r) \approx \frac{1}{2} v_{r_{\text{max}}}(r) \tau_+. \quad (4.13)$$

Для взрыва удлиненного заряда ВВ приближенно используются те же зависимости (4.2), (4.4) – (4.6), (4.8), однако значения коэффициентов в формулах (4.7) будут отличны, и будут вычисляться на основе соответствующих зависимостей [13]:

$$a_1 = (0,325 + 0,161 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}) 10^{-3},$$

$$a_2 = (0,47 + 0,113 \cdot 10^{-7} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}) 10^{-4},$$

$$b_1 = 178 + 3,49 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}},$$

$$b_2 = -0,125 - 0,218 \cdot 10^{-7} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}.$$

Максимальные амплитуды $\sigma_{r_{\text{max}}}$ (4.14) и $\sigma_{\varphi_{\text{max}}}$ (4.15):

$$\sigma_{r_{\text{max}}}(r) = 545 \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} / \bar{r}^{1,1}; \quad (4.14)$$

$$\sigma_{\varphi_{\text{max}}}(r) = (c_1 + c_2 r) \sigma_{r_{\text{max}}}(r), \quad (4.15)$$

где c_1 и c_2 – безразмерные коэффициенты, которые определяются зависимостями (4.16):

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 0,09 + 0,228 \cdot 10^{-7} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} \\ c_2 &= -(0,07 - 0,224 \cdot 10^{-7} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}) 10^{-2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Важно уточнить, что упомянутые зависимости (4.3) и (4.9) были получены при взрыве зарядов тротила с определенными характеристиками, а именно плотностью $1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и теплотой взрывчатого превращения 4440 кДж/кг . При использовании других взрывчатых веществ следует определить их эквивалентный радиус заряда, что осуществляется путем нахождения соотношения теплот взрывчатого превращения между тротилом и выбранным ВВ (4.17):

$$R_{03}^* = R_{03} \left(\frac{\rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{тр}} Q_{\text{тр}}} \right)^{1/3}, \quad (4.17)$$

где $\rho_{\text{ВВ}}$, $Q_{\text{ВВ}}$ и $\rho_{\text{тр}}$, $Q_{\text{тр}}$ – плотность (кг/м^3) и теплота взрыва (кДж/кг) используемого ВВ и тротила; R_{03} – радиус заряда используемого ВВ, мм.

Полученный эквивалентный радиус заряда используется при расчете относительных расстояний и всех соответствующих величин, которые определяют параметры волны напряжения.

Точно так же, при использовании формул (4.14) и (4.15) для удлиненного заряда, полученных для зарядов тэна с $\rho_{\text{т}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $Q_{\text{т}} = 5860 \text{ кДж/кг}$. Поэтому при расчете по этим формулам следует найти радиус заряда взятого ВВ, эквивалентного по энергии взрыва заряду тэна (4.18):

$$R_{03}^* = R_{03} [\rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} / (\rho_{\text{т}} Q_{\text{т}})]^{1/2}, \quad (4.18)$$

где $\rho_{\text{т}}$, $Q_{\text{т}}$ и $\rho_{\text{ВВ}}$, $Q_{\text{ВВ}}$ – плотность (кг/м^3) и теплота взрывчатого превращения (кДж/кг) тэна и используемого ВВ; R_{03} – радиус заряда используемого ВВ, мм.

Вышеуказанные зависимости, полученные экспериментально и теоретически обработанные, охватывают среднюю зону взрыва, где относительные расстояния составляют $r=20 \div 100$. Дополнительно, они справедливы для удлиненных зарядов в областях, параллельных оси и приблизительно посередине их длины. В других точках пространства вокруг удлиненного заряда максимальные амплитуды и эпюры напряжение-время будут иметь отличные значения амплитуд и форму. Тем не менее, для качественной оценки воздействия волны напряжений в горных

породах, вызванной взрывом удлиненных зарядов, предложенные зависимости предоставляют приемлемую точность и демонстрируют удовлетворительные результаты при прогнозировании последствий промышленных взрывов. Отсюда идет принцип использования обработанных данных во второй раз, но с дифференцированной интерпретацией.

При расчете эквивалентного радиуса заряда эмульсионного ВВ необходимо определить теплоту взрыва, а поскольку теплота взрыва является расчетным параметром и, согласно ГОСТ 21984-76, относится к неконтролируемым взрывчатым и физико-химическим характеристикам, существует необходимость привести вышеописанные зависимости к виду функции скорости детонации, как к натурно измеряемому параметру. Также данный переход необходим при учете того, что рассматриваются максимальные амплитуды волн напряжений, возникающих в породе при взрыве заряда ВВ, что тесно связано с кинетической составляющей взрыва, нежели с энергетической.

В общем виде скорость детонации ВВ представляет собой сочетание энергетической и кинетической составляющей, а в физическом представлении является скоростью высвобождения энергии ВВ во времени (4.19-4.20):

$$D = U + C, \quad (4.19)$$

где C – объемная скорость звука в продуктах взрыва, м/с; U – массовая скорость истечения продуктов взрыва, м/с.

$$U = \frac{D}{n+1} = \frac{D}{4} \quad (4.20)$$

где n – показатель политропы, который для большинства промышленных ВВ равен трём.

Выражение (4.19) выражается линейной функцией, а также в виде обобщенной ударной адиабаты (4.21):

$$D = 4490 + 1.5C_0 = 1.2C_0 + 1.7U \quad (4.21)$$

где C_0 – скорость звука в ВВ, находящемся в исходном состоянии, м/с.

Коэффициенты обусловлены тем, что массовая скорость в плоскости Чепмена-Жуге примерно в 1,5 раза ниже, чем на фронте волны [37].

Встречается обратный расчет скорости детонации промышленных ВВ от энергетического параметра ВВ (4.22) [127]:

$$D = \sqrt{2Q(n^2 - 1)}, \quad (4.22)$$

где Q – теплота взрыва, кДж/кг; n – показатель политропы.

Состояние продуктов взрыва в виде политропы, предложенное Л.Д. Ландау и К.П. Станюковичем описывает показатели политропы продуктов взрыва согласно плотности ВВ, выраженные в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Показатель политропы от плотности ВВ [13]

n	1,3	1,6	2,2	2,8	3,0	3,2	3,4
Плотность ВВ, г/см ³	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,75

Используя это отношение, можно получить (4.23):

$$Q = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}, \quad (4.23)$$

Полученная теплота взрыва Q при постоянном объеме дает приблизительные результаты, которые могут быть уточнены отнесением к энергетическим и кинетическим характеристикам эталонного ВВ выражением (4.24):

$$D = D_{\text{эт}} \sqrt{\frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{эт}}}}, \quad (4.24)$$

где D – скорость детонации ВВ, м/с; $D_{\text{эт}}$ – скорость детонации ВВ при соответствующей плотности заряжания, м/с; $Q_{\text{ВВ}}$ – теплота взрыва ВВ, кДж/кг; $Q_{\text{эт}}$ – теплота взрыва эталонного ВВ, кДж/кг.

Преобразование уравнения (4.24) для определения теплоты взрыва Q (4.25):

$$Q = Q_{\text{эт}} \left(\frac{D}{D_{\text{эт}}} \right)^2, \quad (4.25)$$

Максимальное значение скорости детонации при заданной плотности ВВ может быть вычислено по формуле (4.26):

$$D_{\text{и}} = 2641 + 3,231 \rho_{\text{ВВ}} \sqrt{Q_{\text{ВВ}} \cdot V_{\text{ПВ}}}, \quad (4.26)$$

где $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ, г/см³; $V_{\text{ПВ}}$ – объем продуктов взрыва, л/кг.

При существующем расчете кинетических (детонационных) параметров взрывчатых веществ при заданной плотности, стоит воспользоваться формулой Кука (4.27) [72]:

$$D_{\rho_0} = D - \mu(\rho - \rho_0), \quad (4.27)$$

где D_{ρ_0} – скорость детонации при плотности заряда ρ_0 , м/с; ρ – максимальная плотность заряда ВВ, при которой возможна детонация, г/см³; μ – постоянный коэффициент, определяемый по формуле (4.28):

$$\mu = 1,2C_0 \left(1 - \frac{\rho - 1}{\rho} \right) + 2,55 \left(\sqrt{\frac{\alpha + 1,65}{5,5} \rho_0 Q_m} - \sqrt{\frac{\alpha + 1,65}{5,5} (\rho - 1) Q_m} \right). \quad (4.28)$$

где α – кислородный коэффициент; Q_m – максимальная теплота взрыва, кДж/кг.

Расчет эквивалентного радиуса заряда проводился по формуле (4.17) при использовании характеристик Аммонита № 6ЖВ в качестве эталонных, поскольку при проведении полигонных испытаний каждый взрыв аммонита показал стационарную скорость детонации на уровне 4330 м/с с отклонением не более 99 м/с, что обеспечивает табличные характеристики данного ВВ согласно ГОСТ 21984-76. Ввиду вышеизложенного и обширной информации по данному ВВ, Аммонит № 6ЖВ может быть использован в качестве эталонного ориентира.

В таблице 4.2 приведены эквивалентные радиусы зарядов и напряжения для Аммонита № 6ЖВ, Гранулита РП и Эмульсолита П-А-20, возникающие на различных относительных расстояниях от взрыва заряда, энергетически эквивалентного эталонному:

Таблица 4.2 – Расчет эквивалентных радиусов заряда (составлено автором)

ВВ	Эквивалентный радиус заряда, мм	σ при $r'=10r_{\text{ЭКВ}}$, МПа	σ при $r'=40r_{\text{ЭКВ}}$, МПа	σ при $r'=70r_{\text{ЭКВ}}$, МПа
Аммонит № 6ЖВ	62,5	343	30,74	11,61
Гранулит РП	57,9 (62,5)	392,35 (195,15)	35,16 (8,94)	13,28 (2,58)
Эмульсолит А-20	73 (62,5)	261,78 (439,76)	23,46 (44,62)	8,86 (16,91)

В первом случае (без скобок) указаны значения, рассчитанные по зависимости напряжений от расстояния для эталонного ВВ – Аммонита № 6ЖВ (4.29), а именно:

$$\sigma_{\text{амм}} = 151,4 \cdot r^{-1,74}, \quad (4.29)$$

В скобках указаны значения, рассчитанные в соответствии с каждым типом ВВ по номинальным параметрам заряда, для гранулита (4.30):

$$\sigma_{\text{гран}} = 68,612 \cdot r^{-2,224}, \quad (4.30)$$

Для эмульсолита (4.31):

$$\sigma_{\text{эмульс}} = 218,56 \cdot r^{-1,734}, \quad (4.31)$$

Результаты для эмульсионного взрывчатого вещества были получены при обработке данных с учетом скорости детонации, плотности и теплоты взрыва каждого ВВ, приведенных в таблице 4.3:

Таблица 4.3 – Расчетные и измеренные параметры ВВ (составлено автором)

	Аммонит № 6ЖВ	Гранулит РП	Эмульсолит А-20
Плотность, г/см ³	1,0	0,9	1,1
Скорость детонации, м/с	4330	1958	5215
Теплота взрыва, кДж/кг	4312	3800	6255
Теплота взрыва, ккал/кг	1030	907	1494

На графике (рисунок 4.1) представлены напряжения, возникающие на различных расстояниях от взрыва вне зависимости от используемого ВВ, но с условием приведения к эталону:

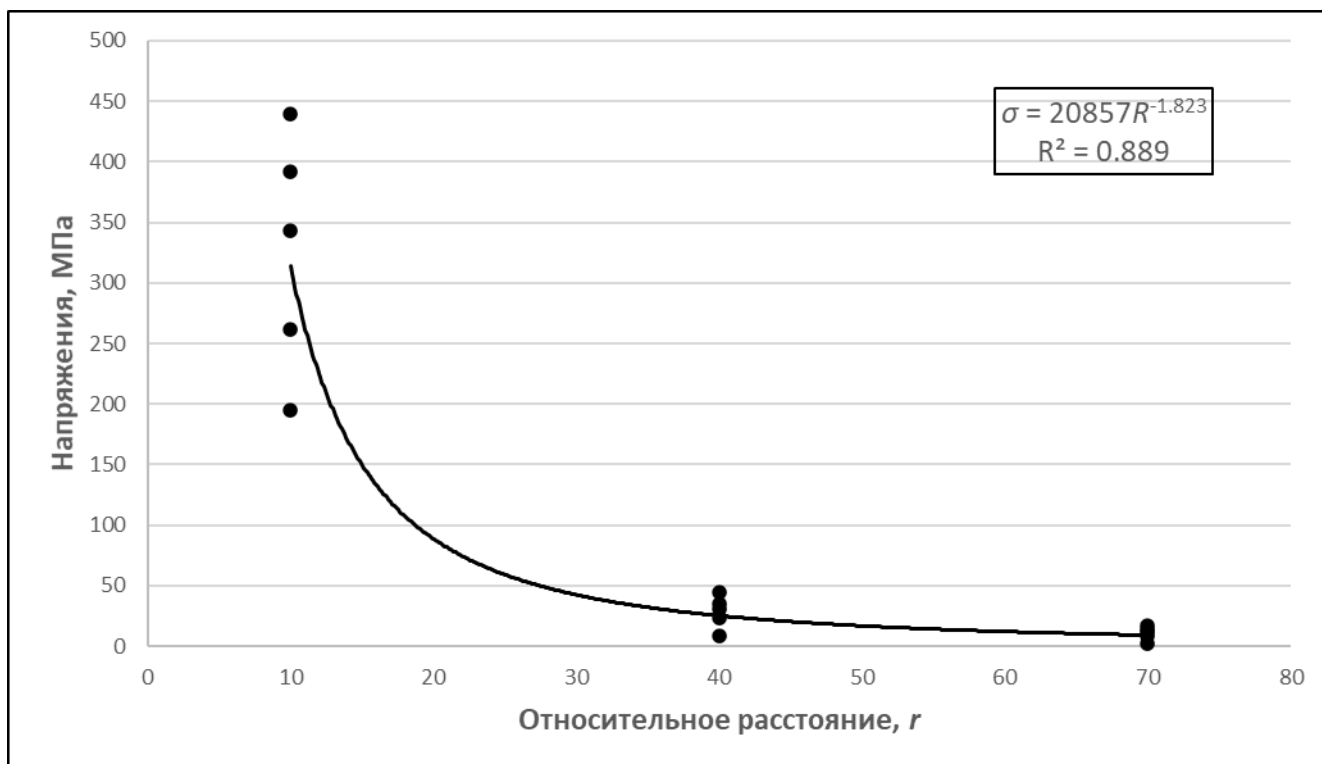


Рисунок 4.1 – Зависимость напряжений от относительного расстояния
(составлено автором)

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что в соответствии с принципом расширенного геометрического подобия, значения напряжений, возникающих в горной породе при взрыве на различных расстояниях, могут быть оценены путем перевода энергетических и кинетических параметров ВВ в эквивалентный заряд относительно эталона. Энергетически приведенные заряды будут оцениваться как эталонный, а геометрические параметры будут приведены пропорционально квадрату отношений кинетических параметров ВВ в соответствии с энергетической характеристикой эталона.

4.3 Прикладные представления о снижении эффекта предразрушения

Рассмотрим существующие параметры БВР на месторождении «Бурное». Основные применяемые взрывчатые вещества – Гранулит РП и Эмульсолит П-А-20. ЛНС рассчитывается по формуле (4.32):

$$W = \frac{\sqrt{0,56P^2 + 4g * P * H_y * L_c - 0,75P}}{2g * H_y} \quad (4.32)$$

где L_c – длина скважины, м; P – вместимость 1 м скважин, кг/м; g – удельный расход ВВ, кг/м³; H_y – высота уступа, м.

Так, для диаметра 233 мм при взрывании Гранулита расчет выглядит следующим образом (4.33):

$$W = \frac{\sqrt{0,56 \cdot 38^2 + 4 \cdot 0,72 \cdot 38 \cdot 5 \cdot 6} - 0,75 \cdot 38}{2 \cdot 0,72 \cdot 5} = 4,93 \text{ м}, \quad (4.33)$$

для диаметра 233 мм при взрывании Эмульсолита расчет имеет вид (4.34):

$$W = \frac{\sqrt{0,56 \cdot 47^2 + 4 \cdot 0,76 \cdot 47 \cdot 5 \cdot 6} - 0,75 \cdot 47}{2 \cdot 0,76 \cdot 5} = 5,14 \text{ м} \quad (4.34)$$

Длина скважины с учетом перебура – 6 м. Удельный расход, принятый в проекте для Гранулита составляет 0,72 кг/м³, для эмульсионного ВВ – 0,76 кг/м³. Высота уступа – 5 м.

Расстояние между скважинами в ряду приравнивается к значению ЛНС. С учетом применения квадратных сеток бурения скважин, расстояние между рядами скважин равняется расстоянию между скважинами в ряду, следовательно, применяемая сетка бурения 5х5 м для диаметра 233 мм.

Необходимо принять во внимание тот факт, что скважины на блоке располагаются таким образом, чтобы границы зон трещинообразования каждой скважины соприкасались с этой границей соседней скважины, а размеры границы этих зон находятся в пределах 20-30 радиусов заряда [104].

Так, с учетом опыта ведения буровзрывных работ на месторождении и принятой сеткой бурения 5х5 м, удельный объем разрушения каждой скважины $V_{разр}$ составляет 125 м³. Данный объем соответствует размеру зоны регулируемого дробления величиной 21,5 радиус заряда (21,5 радиус заряда – 2,5 метра, что равняется половине сетки бурения). При этом, с учетом выявленных зависимостей для эмульсолита, размер зоны предразрушения $R_{пред}$ которого составляет порядка 77 радиусов заряда, объем предразрушенной породы $V_{пред}$ составит 1609 м³, что почти в 13 раз больше объема разрушенной породы. Для гранулита предразрушенный объем породы $V_{пред}$ – 295 м³, что немного более, чем в 2 раза превышает объем разрушения одной скважины $V_{разр}$. Графическое отображение

наложения зон предразрушения представлено на рисунке 4.2, где синим обозначена площадь пересечения зон предразрушения, а объем этой зоны составляет 55 м^3 .

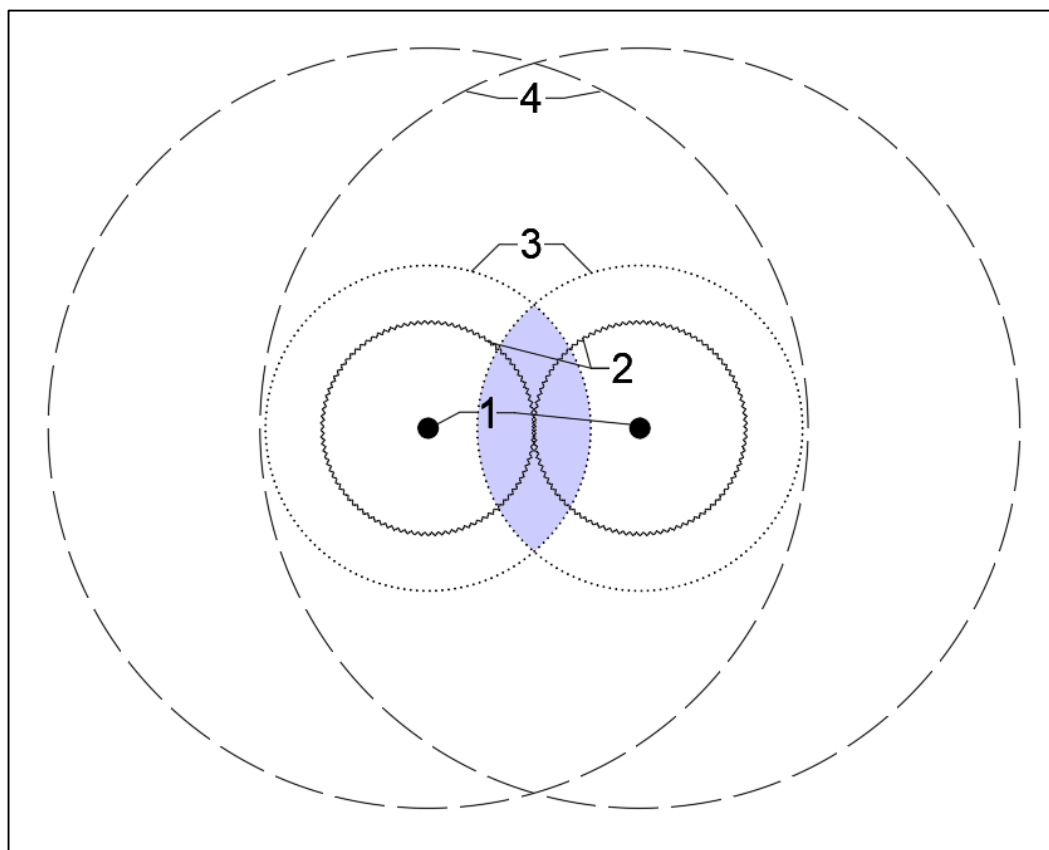


Рисунок 4.2 – Зоны разрушения и предразрушения для соседних зарядов $d=233 \text{ мм}$: 1 – скважины диаметром 233 мм; 2 – границы зон регулируемого дробления ($r=2,5 \text{ м}$); 3 – границы зон предразрушения для Гранулита (33R; $r=3,8 \text{ м}$); 4 – границы зон предразрушения для Эмульсолита (77R; $r=9 \text{ м}$).

(составлено автором)

Как видно из рисунка 4.2, границы зон предразрушения существенно расширяются при выборе ВВ с повышенной скоростью детонации, вследствие чего воздействие от каждой взрывающейся скважины на больший объем массива при взрыве приводит к повышению степени предразрушения. Степень предразрушения определяется, исходя из графика на рисунке 3.25.

При проектировании буровзрывных работ на карьерах строительных материалов не учитываются размеры зон предразрушения $R_{пред}$, что приводит к повышению выхода отсевных фракций при переработке предразрушенных кусков горной массы на щебень.

Ниже представлены расчеты величины ЛНС для диаметра заряда 155 мм, для Гранулита (4.35):

$$W = \frac{\sqrt{0,56 \cdot 16^2 + 4 \cdot 0,72 \cdot 16 \cdot 5 \cdot 6} - 0,75 \cdot 16}{2 \cdot 0,72 \cdot 5} = 3,76 \text{ м}, \quad (4.35)$$

для Эмульсолита (4.36):

$$W = \frac{\sqrt{0,56 \cdot 19^2 + 4 \cdot 0,76 \cdot 19 \cdot 5 \cdot 6} - 0,75 \cdot 19}{2 \cdot 0,76 \cdot 5} = 3,91 \text{ м} \quad (4.36)$$

Так, для диаметра заряда Гранулита 155 мм, на карьере будет применена сетка бурения 3,7х3,7м при прочих равных параметрах. В этом случае объем отбиваемой горной породы одной скважиной $V_{разр}$ составит 68,5 м³, что соответствует 23,9 радиусам заряда для зоны регулируемого дробления при взрыве. Объемы предразрушения $V_{пред}$ составят в этом случае 712 м³ и 130 м³ для эмульсолита и гранулита соответственно, а отношение объемов предразрушения к объему разрушения $V_{пред}/V_{разр}$ будет 10,4 и 1,9 соответственно. Графическое отображение наложения зон предразрушения для диаметра 155 мм представлено на рисунке 4.3, где синим обозначено перекрытие зон предразрушения от соседних зарядов при взрывании Гранулита РП, объем перекрытия составляет 17 м³.

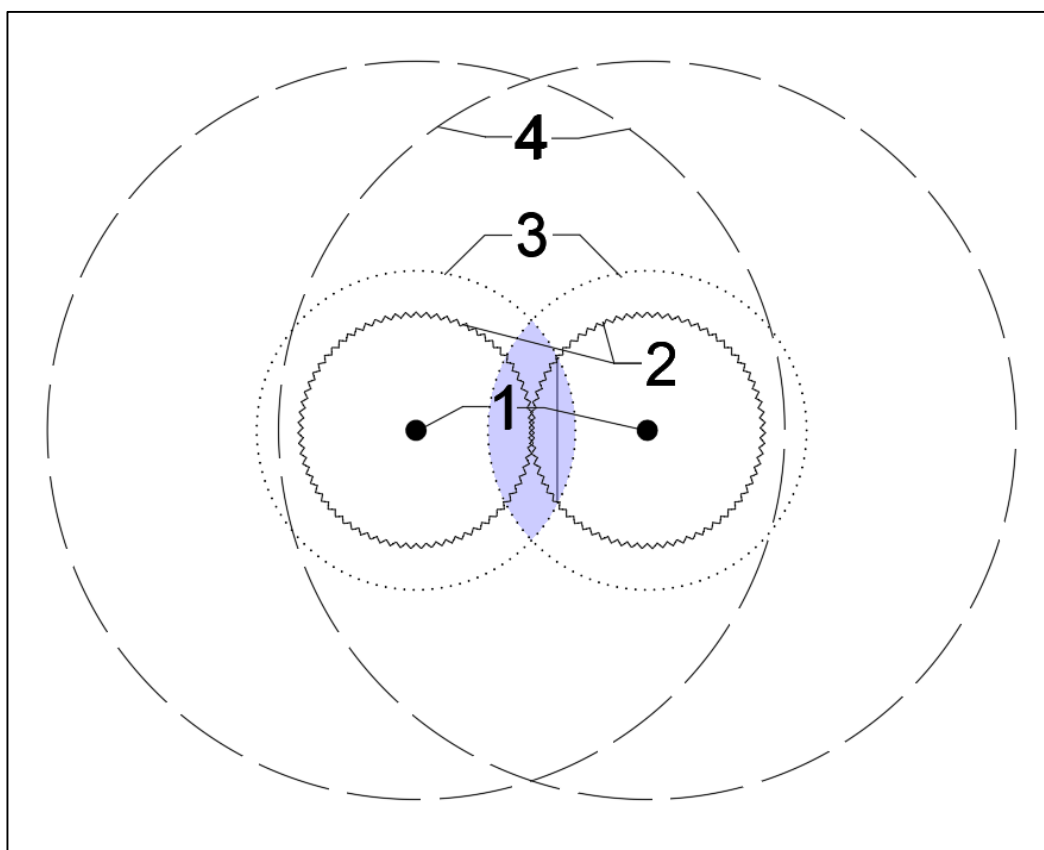


Рисунок 4.3 – Зоны разрушения и предразрушения для соседних зарядов $d=155$ мм: 1 – скважины диаметром 155 мм; 2 – границы зон регулируемого дробления ($r=1,85$ м); 3 – границы зон предразрушения для Гранулита (33R; $r=2,5$ м); 4 – границы зон предразрушения для Эмульсолита (77R; $r=5,9$ м)
(составлено автором)

Как видно из рисунков 4.2 и 4.3, площадь перекрытия зон предразрушения $R_{пред}$ от соседних зарядов уменьшается при уменьшении диаметра заряда. Также при снижении эквивалентного диаметра заряда, уменьшается отношение объема предразрушенной породы к объему разрушения.

Наилучший эффект достигается, когда соотношение $V_{пред}/V_{разр}$ близко к единице. В этом случае уменьшается площадь и объем перекрытия зон предразрушения $R_{пред}$ от соседних зарядов, а суммарный эффект предразрушения в пределах взрываемого участка уменьшается, что благоприятно влияет на формирование гранулометрического состава щебня после переработки взорванной горной массы в дробилке.

Но идеальный случай, когда соотношение $V_{\text{пред}}/V_{\text{разр}} = 1$, невозможен. Так, из графиков на рисунках 3.25, 4.1, 3.33, следует то, что тем выше концентрация микротрещин, а следовательно, и степень предразрушения отдельных кусков горной массы после взрыва, чем меньше расстояние от заряда. 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, большем, чем радиус зоны предразрушения. Необходимо уменьшать объемы предразрушенной взрывом породы, соблюдая соотношение $W = R_{\text{пред}} \cdot (1,3 \div 1,7)$, которое было получено путем расчетов ЛНС относительно размеров зоны предразрушения при взрывании Гранулита РП для диаметров 100-233 мм. Это соотношение обеспечивает меньшую концентрацию микротрещин в отдельных кусках взорванной горной массы при ведении буровзрывных работ в условиях разработки месторождения «Бурное».

Для наглядного сравнения разницы применения ВВ с различными детонационными и энергетическими характеристиками, был выбран блок объемом 45000 м³, часть которого была заряжена с применением Эмульсолита А-20, а другая часть заряжалась Гранулитом РП.

10% объема экспериментального блока в последствии были отправлены на дробильно-сортировочный комплекс (ДСК) (рисунок 4.4) для отслеживания формирования гранулометрического состава конечного продукта в виде щебня.



Рисунок 4.4 – Дробильно-сортировочный комплекс (фото автора)

После вторичного дробления и расситовки на грохоте, были замерены объемы фракций щебня (рисунок 4.5) относительно общего объема вторичного дробления.



Рисунок 4.5 – Распределение щебня по фракциям (фото автора)

Были получены объемы щебня фракций 0-10, 10-20, 20-40, 40+ мм.

Преобладающая часть данных по взрывам с Эмульсолитом была получена с других массовых взрывов с аналогичными параметрами БВР. Данный шаг предоставляет возможность выборки большего объема экспериментальных данных, что положительно сказывается на точности результатов проводимых исследований.

Результаты замеров представлены в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4 – Результаты замера объемов фракций при взрывании Гранулита РП (составлено автором)

Фракция, мм	Ковш, шт	Объем ковшей, м ³	Объем по марк. замерам	% от объема
0-10	34	130,7	97,7	10,6
10-20	39	157,7	130,8	14,2
20-40	35	120	167,1	18,1
40+	68	279,8	526,7	57,1
Итого:	176	688,2	922,3	100

Таблица 4.5 – Результаты замера объемов фракций при взрывании Эмульсолита А-20 (составлено автором)

Фракция, мм	Объем, м ³	% от объема
0-10	888,3	21,1
10-20	499,7	11,8
20-40	715,1	16,9
40+	2103,1	49,9
800+ (негабарит)	11,3	0,3
Итого:	4217,5	100

Также был проведен массовый взрыв с зарядом Гранулита РП, но с диаметром заряда 155 мм и сеткой скважин 3,7х3,7 м. В таблице 4.6 представлены результаты замера объемов фракций конечного продукта при взрывании Гранулита РП уменьшенного диаметра:

Таблица 4.6 – Результаты замера объемов фракций при взрывании Гранулита РП с уменьшенным диаметром заряда (составлено автором)

Фракция, мм	Ковш, шт	Объем ковшей, м ³	Объем по марк. замерам	% от объема
0-10	25	137,5	98,72	8,6
10-20	28	154	135,59	11,9
20-40	43	236,5	272,41	23,8
40+	52	286	637,27	55,7
Итого:	148	814	637,27	100

Сводная информация представлена на рисунке 4.6.

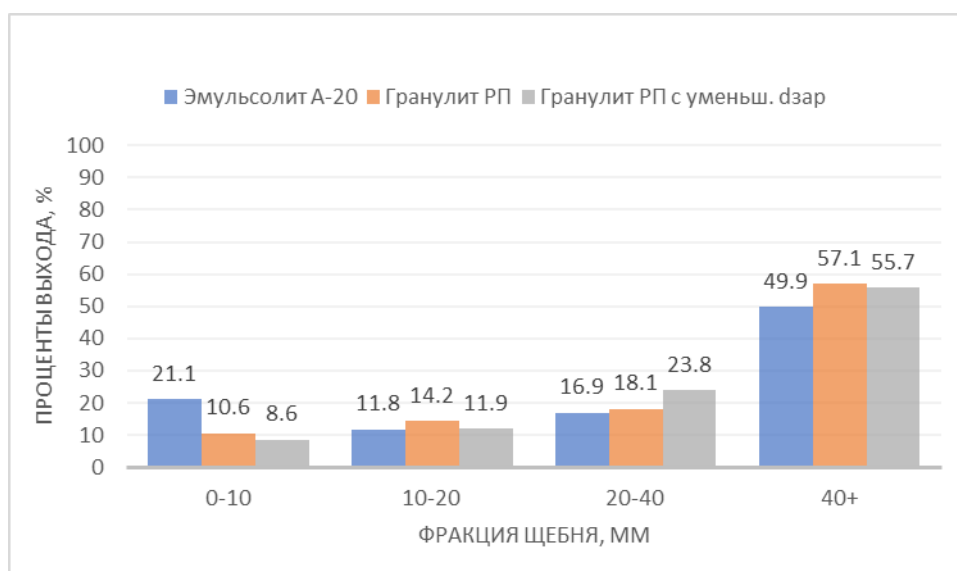


Рисунок 4.6 – Выход фракций щебня при изменении типов ВВ и параметров БВР
(составлено автором)

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 взрывааемых 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 концентрация микротрещин в отдельностях после взрыва может быть уменьшена путем регулирования размера зоны предразрушения при ведении буровзрывных работ на карьере по добыче строительного материала.

4.4 Выводы по Главе 4

Изменение детонационных характеристик ВВ, как и диаметра заряда, влияет на параметры предразрушения. При сохранении диаметра заряда ВВ размер зоны и степень предразрушения массива увеличиваются при росте скорости детонации применяемого ВВ. Это обусловлено скоростью высвобождения энергии ВВ и более интенсивным формированием фронта ударной волны, распространяющейся в массиве. Согласно теории полного подобия, подразумевается фиктивное увеличение диаметра заряда при росте энергетических параметров применяемого ВВ до уравнения плотности энергии с эталонным ВВ.

При пересчете данных, полученных в ходе экспериментов с замером скоростей детонации различных ВВ и напряжений, возникающих в горной породе при взрыве, напряжения на равных относительных расстояниях становятся близкими, что приводит к тому, что основное влияние на параметры предразрушения породы оказывает именно диаметр заряда при соблюдении принципа полного энергетического подобия.

При проектировании буровзрывных работ не учитываются размеры зон предразрушения, что не позволяет оценить и влиять на выход отсевных фракций при переработке предразрушенных кусков горной массы на щебень. Так, при уменьшении размера зоны предразрушения в 3,6 раза выход отсевных фракций после переработки уменьшается в 2,5 раза.

Проектирование буровзрывных работ необходимо вести с учетом размеров зон предразрушения как основного источника формирования мелких фракций щебня при вторичном дроблении. Предложенное 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. При этом выход кондиционных фракций остается как минимум на прежнем уровне.

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, возникающими 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 отсеков 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 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, акты внедрения представлены в Приложениях В, Г. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (Приложения А, Б).

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЖБИ – железобетонные изделия;

НК – налоговый кодекс;

ВВ – взрывчатое вещество;

БВР – буровзрывные работы;

ФТС – федеральная таможенная служба;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛНС – линия наименьшего сопротивления;

ДШ – детонирующий шнур;

АЭ – акустическая эмиссия;

ДСК – дробильно-сортировочный комплекс.

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Предразрушение породы: начальная стадия эволюции внутренней структуры, накопление и развитие микродефектов в рассматриваемом объеме, приводящее к структурному ослаблению породы.

Зона предразрушения: часть массива горных пород, в пределах которой его свойства меняются под воздействием внешних сил.

Разрушение породы: физический и/или химический процесс, в результате которого горная порода теряет свою целостность и структуру, что может включать в себя различные механические, термические, химические или физические воздействия, приводящие к её деформации, трещинам, разрывам или иным изменениям в её структуре и состоянии.

Прочность породы: основное механическое свойство, влияющее на её способность сопротивляться разрушению.

Отсев: фракция щебня до 5 мм, не соответствующая стандартам качества для равноценного использования в строительстве и других отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин, В.В. Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 6. – С. 15-26.
2. Аленичев, И.А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера / И.А. Аленичев, Р.А. Рахманов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 334-341. – DOI 10.31897/PMI.2021.3.2.
3. Аленичев, И.А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учетом обводненности апатит-нефелиновых руд / И.А. Аленичев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 7. – С. 364-373.
4. Аминов, В.Н. Моделирование дробления горных пород для производства щебня / В.Н. Аминов, Е.Е. Каменева, И.Д. Устинов // Обогащение руд. – 2017. – № 4(370). – С. 3-6. – DOI 10.17580/or.2017.04.01.
5. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование / А. Саадун, М. Фредж, Р. Букарм, Р. Хаджи // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 822-832. – DOI 10.31897/PMI.2022.84.
6. Андреев, Д.В. Роль горной промышленности в экономике страны / Д.В. Андреев // Московский экономический журнал. — 2020. — № 12. — С. 175-185.
7. Афанасьев, П.И. Изменение среднего размера куска в зоне дробления на основе расчета диссипации энергии / П.И. Афанасьев, М.Г. Менжулин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 4. – С. 408-419.
8. Афанасьев, П.И. Метод расчета диссипации энергии и ее влияние на максимальные параметры волн напряжения и грансостав разрушенной гранитной горной массы : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Афанасьев Павел

Игоревич ; Санкт-Петербургский горный университет. — Санкт-Петербург, 2012. — 21 с.

9. Барон, Л.И. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке / Л.И. Барон, Г.П. Личели. — Москва : Недра, 1966. — 136 с.

10. Бетехтин, В.И. Проблемы прочности и пластичности твердых тел / В.И. Бетехтин, Б. Владимиров // К 100-летию со дня рождения Н.Н. Давиденкова. — Ленинград : Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. — С. 142-154.

11. Бехер, С.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении / С.А. Бехер, А.А. Попков // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. — 2019. — Т. 22, № 1. — С. 62-71. — DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-62-71.

12. Боровиков, В.А. Особенности детонации гранулитов, включая малоплотные полистиролсодержащие составы / В.А. Боровиков, А.А. Андреев, Н.Н. Ефремовцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № S8. — С. 53-62.

13. Боровиков, В.А. Техника и технология взрывных работ / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин. — Ленинград : ЛГИ, 1985. — 89 с.

14. Боровиков, В.А. Физические основы технологии щадящего взрывания при добыче кристаллосырья / В.А. Боровиков, А.М. Лесковский, Т.В. Стоянова // Труды конференции "ETER" 7-10 октября 1996 года.

15. Вайсберг, Л.А. Оценка технологических возможностей управления качеством щебня при дезинтеграции строительных горных пород / Л.А. Вайсберг, Е.Е. Каменева, В.Н. Аминов // Строительные материалы. — 2013. — № 11. — С. 30-34.

16. Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями / Е.Б. Шевкун, А.В. Лещинский, Ю.А. Лысак, А.Ю. Плотников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 10. — С. 29-41. — DOI 10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41.

17. Викторov, С.Д. Взрывное разрушение массивов горных пород - основа прогресса в горном деле / С.Д. Викторov // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № S1. — С. 63-75.

18. Викторов, С.Д. Предразрушение горных пород как стадия процесса разрушения при квазистатическом и динамическом нагружении / С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов, В.Н. Одинцев // Записки Горного института. – 2007. – Т. 171. – С. 153-157.
19. Викторов, С.Д. Экспериментальное изучение закономерностей образования субмикронных частиц при разрушении горных пород / С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 5. – С. 76-83.
20. Виноградов, Ю.И. Влияние диаметра заряда на коэффициент полезного действия взрыва / Ю.И. Виноградов, В.А. Артемов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 170-173.
21. Виноградов, Ю.И. Влияние поверхности контакта заряда ВВ с породой на эффективность дробления массива горных пород / Ю.И. Виноградов, С.Я. Жихарев, С.В. Хохлов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 132-141.
22. Виноградов, Ю.И. Методика оценки эффективности дробления массива горных пород различными типами ВВ / Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов, В.В. Аникин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 2. – С. 214-221.
23. Влияние параметров БВР на скорость детонации заряда взрывчатых веществ / А.А. Галимьянов, Д.Е. Герасимов, В.И. Мишнев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 268-274. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-9-268-274.
24. 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. – DOI: 10.17073/2500-0632-2023-11-177.
25. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатии / Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, А.Г. Кадомцев, О.Б. Наймарк // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59, № 5. – С. 920-930.

26. Влияние эмульсионных взрывчатых веществ на скорость детонации скважинного заряда / В.И. Мишнев, А.Ю. Плотников, А.А. Галимьянов [и др.] // Горная промышленность. – 2022. – № 6. – С. 69-73. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-6-69-73.

27. Вознесенский, А.С. Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics / А.С. Вознесенский, Л.К. Кидима Мбомби // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 65-72. – DOI 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

28. Волков, М.А. Моделирование кинетики трещинообразования разрушаемых горных пород на разных этапах деформирования / М.А. Волков, А.Г. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2007. – № 6(64). – С. 99-105.

29. Газалеева, Г.И. Механизм разрушения горных пород в процессе дробления материала "в слое" / Г.И. Газалеева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 95-100.

30. Галимьянов, А.А. Повышение эффективности процесса подготовки горной массы к выемке за счет применения новых параметров технологии буровзрывных работ / А.А. Галимьянов, А.А. Соболев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 3. – С. 107-121.

31. Гелазов, М.А. Фибриллярная структура и субмикроскопические трещины в ориентированных кристаллических полимерах / М.А. Гелазов, В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер // Физика твердого тела. – 1970. – Т. 12. – №. 1. – С. 100.

32. Геомеханическая оценка применяемых технологий разработки для обеспечения безопасных условий освоения подкарьерных рудных месторождений / М.И. Потапчук, И.Ю. Рассказов, А.В. Сидляр [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 1. – С. 84-96. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_1_0_84.

33. Герман, В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга / В.И. Герман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 99-109.

34. Господариков, А.П. Математическое моделирование воздействия сейсмовзрывных волн на горный массив, включающий выработку / А.П. Господариков, Я.Н. Выходцев, М.А. Зацепин // Записки Горного института. – 2017. – Т. 226. – С. 405-411. – DOI 10.25515/PMI.2017.4.405.

35. Господариков, А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения / А.П. Господариков, А.В. Трофимов, А.П. Киркин // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 539-548. – DOI 10.31897/PMI.2022.87.

36. ГОСТ 21153.0-75 Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 25 сентября 1975 г. № 2491 : дата введения 1976-07-01. – Москва: Госстандарт СССР, 1975. – 3 с.

37. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов, К.К. Шведов ; Отв. ред. академики Н.Н. Семенов, Я.Б. Зельдович ; АН СССР. Ин-т хим. физики. - Москва : Наука, 1970. - 163 с.

38. Ельникова, С.П. Определение удельных энергозатрат при дроблении «в слое» в конусных дробилках с учётом закономерностей разрушения частиц : специальность 25.00.13 «Обогащение полезных ископаемых» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ельникова Светлана Павловна ; ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет". — Екатеринбург, 2020. — 22 с.

39. Еренков О.Ю. Влияние теплового и механического воздействия на напряженно-деформированное состояние полимерных материалов в процессе разрушения / О.Ю. Еренков, А.В. Гаврилова // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2006. – №. 5. – С. 37-40.

40. Ефремов, Э.И. Взрывание с внутрискважинными замедлениями / Э.И. Ефремов. — Киев : Наукова думка, 1971. — 166 с.

41. Ефремов, Э.И. Влияние конструкции скважинных зарядов и обводненности горных пород на эффективность их взрывной отбойки / Э.И.

Ефремов, А.В. Пономарев, В.В. Баранник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. – № 6-1(41). – С. 111-113.

42. Жуков, В.С. Динамика физико-механических свойств горных пород (динамическая петрофизика) / В. С. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 9. – С. 59-63.

43. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. — 1968. — Т. 3. — С. 46-52.

44. Закалинский, В.М. Буровзрывные работы в сложных условиях/ Закалинский В.М., Шиповский И.Е., Мингазов Р.Я. // Взрывное дело. – 2022. – № 134-91. – С. 44-53.

45. Зона поврежденности высококомодульных материалов при взрывном нагружении гранита / А.М. Лексовский, В.А. Боровиков, Н.С. Бозоров [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2002. – Т. 28, № 16. – С. 90-94.

46. Иляхин, С.В. Элементарная теория измерительного кабеля при резистивном методе измерения скорости детонации взрывчатых веществ / С.В. Иляхин, И.Ю. Маслов, П.А. Брагин // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 4(56). – С. 104-108. – DOI 10.21440/2307-2091-2019-4-104-108.

47. Ионов, В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Ионов, В.В. Селиванов. – Москва : Научно-техническое издательство "Машиностроение", 1987. – 272 с.

48. Использование связи между энергией диссипации параметрами распределения гранулометрического состава в технологии взрывного разрушения горной породы / М.Г. Менжулин, А.Ю. Казьмина, П.И. Афанасьев, А.А. Бульбашев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 5. – С. 93-96.

49. Исследование влияния диаметра скважин на степень дробления трещиноватых пород взрывом / Н.Я. Репин, И.А. Паначев, М.И. Потапов, А.С. Ташкинов // Известия вузов. Горный журнал. — 1968. — № 8. — С. 70-74.

50. Исследование волновых свойств имитационных импульсов во вмещающих породах Николаевского месторождения / А.А. Терешкин, М.И. Рассказов, Д.И. Цой [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 321-326. – DOI 10.15372/FPVGN2021080149.

51. 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.

52. Исследование параметров удаленности сигналов акустической эмиссии с помощью прибора локального контроля "Prognoz-1" / А. . Терешкин, Д.И. Цой, М.И. Рассказов, А.В. Константинов // Глобальная наука и инновация 2021: центральная Азия. – НУР-СУЛТАН : «Общенациональное движение «Бобек», 2021. – С. 29-34.

53. Ишейский, В.А. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываеваемого массива / В.А. Ишейский, Д.Э. Рядинский, Г.С. Магомедов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9-1. – С. 79-95. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.

54. Кабетенов, Т. Определение рациональных параметров скважинной отбойки с учетом времени действия взрывного импульса / Т. Кабетенов, Х.А. Юсупов, С.Т. Рустемов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 2. – С. 75-81.

55. Кадомцев, А.Г. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования / А.Г. Кадомцев, Е.Е. Дамаскинская, В.С. Куксенко // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, № 9. – С. 1777-1782.

56. Каркашадзе, Г.Г. Механическое разрушение горных пород : учеб. пособие / Г.Г. Каркашадзе. – Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 222 с.

57. Карпунов, Е.Г. Методика измерений параметров сейсмозрывных волн в горных породах пьезоакселерометрами / Е.Г. Карпунов, Ю.М. Мисник, М.А.

Нефедов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1977. — № 5. — С. 103-108.

58. Кахаров, З.В. Бетоны с заполнителями из продуктов дробления вторичного бетона / З.В. Кахаров, А.С. Исломов // Вестник науки. — 2023. — № 5 (62). — С. 820-825.

59. Ким, В.А. Определение энергоемкости процесса дробления в валковой дробилке с выпукло-вогнутой формой валков / В.А. Ким, Г.А. Гурьянов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2017. — Т. 1. — С. 23-25.

60. Кинетика накопления наведенной трещиноватости в гранитах под действием взрывных нагрузок / М.Г. Менжулин, А.Н. Шишов, Г.П. Парамонов, А.Н. Уваров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1999. — № 1. — С. 143-146.

61. Ковалев, В.А. Рациональный диаметр скважин при подготовке вскрышных пород к экскавации обратными гидравлическими экскаваторами / В.А. Ковалев, О.И. Литвин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2012. — № 5(93). — С. 15-17.

62. Коваленко, Д.С. Перспективы использования техногенного сырья Луганского региона в строительной индустрии / Д.С. Коваленко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2017. — № 2(124). — С. 71-75.

63. Константинов, А. В. Математические и программные средства оценки распределенной сети геофонов системы геомеханического мониторинга Prognoz-ADS / А. В. Константинов, М. И. Рассказов, Д. И. Цой // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 2. — С. 26-33. — DOI 10.21440/0536-1028-2021-2-26-33.

64. Конструктивные решения запираания продуктов взрыва во взрывной полости / Д.В. Молдован, В.И. Чернобай, С.Т. Соколов, А.В. Баженова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 6-2. — С. 5-17. — DOI 10.25018/0236_1493_2022_62_0_5.

65. Корнев, В.М. Обобщенный достаточный критерий прочности. Описание зоны предразрушения / В.М. Корнев // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 5(255). – С. 153-161.

66. Коршунов, В.А. Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами / В.А. Коршунов, А.А. Павлович, А.А. Бажуков // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 606-618. – DOI 10.31897/PMI.2023.16.

67. Кочанов А.Н. Некоторые результаты исследований в области взрывного разрушения горных пород : Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: сборник статей 5-й конференции Международной научной школы академика РАН КН Трубецкого //Москва. – 2022. – С. 14-18.

68. Кочанов, А.Н. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве / А.Н. Кочанов, В.Н. Одинцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 38-48.

69. Кочанов, А.Н. Изучение параметров зон предразрушения массива как основа совершенствования технологии взрывных работ / А.Н. Кочанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1996. – № 5. – С. 49-52.

70. Кочанов, А.Н. Теоретическая оценка радиуса области предразрушения пород при камуфлетном взрыве / А.Н. Кочанов, В.Н. Одинцев // Взрывное дело. – 2015. – № 113-70. – С. 41-54.

71. Кривошеев, И.А. Информационная система контроля состояния массива горных пород / И.А. Кривошеев, А.И. Шамурина // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4(34). – С. 69-74.

72. Кривченко, А.Л. Метод расчёта параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ / А.Л. Кривченко // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 3. — С. 83-86.

73. Кутузов, Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Часть 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности. Учебник / Б.Н. Кутузов. – Москва : Горная книга, 2011. – 84 с.

74. Кутузов, Б.Н. Определение размера зоны регулируемого дробления при взрыве заряда в трещиноватом массиве / Б.Н. Кутузов, В.Н. Тюпин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. — 1974. — № 8. — С. 30-35.

75. Кучерявый, Ф.И. Разрушение горных пород / Ф.И. Кучерявый, Ю.М. Кожушко. — Москва : Недра, 1972. — 240 с.

76. Латышев, О.Г. Неоднородность трещинной структуры и прочность горных пород / О.Г. Латышев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2014. — № 6. — С. 152-159.

77. Левин, В.А. Геомеханическое моделирование роста трещин при конечных деформациях. Зоны предразрушения / В.А. Левин, К.М. Зингерман, А.В. Вершинин // Технологии сейсморазведки. — 2014. — № 4. — С. 34-39.

78. Левин, В.А. Нелокальные критерии для определения зоны предразрушения при описании роста дефекта при конечных деформациях / В.А. Левин, Е.М. Морозов // Доклады Академии наук. — 2007. — Т. 415, № 1. — С. 52-54.

79. Лелянов, Б.Н. Информационная система для контроля характеристик сейсмоакустических датчиков / Б.Н. Лелянов, В.И. Мирошников, И.А. Кривошеев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2021. — № 1(60). — С. 23-28.

80. Макарьев, В.П. Методика выбора диаметра скважины по минимуму себестоимости горной массы / В.П. Макарьев. // Разработки новых видов горного оборудования для предприятий цветной металлургии. — Ленинград : Л., Тр. Гипроникель, 1975. — № 61. — С. 91.

81. Макеев, А.И. Научно-техническое обоснование технологии глубокой переработки отсеков дробления гранитного щебня / А.И. Макеев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. — 2011. — № 3(23). — С. 56-67.

82. Маркочев, В.М. О теории хрупкого разрушения Я. Френкеля и А. Гриффитса / В.М. Маркочев, М.И. Алымов // Чебышевский сборник. — 2017. — Т. 18, № 3(63). — С. 381-393. — DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-381-393.

83. Марченко, Л.Н. Энергия взрыва и конструкция заряда / Л.Н. Марченко, Н. В. Мельников. — Москва : Недра, 1964. — 138 с.
84. Матвиенко, Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г. Матвиенко. — Москва : Физматлит, 2006. — 328 с.
85. Мелешко, Ю.В. Специфика горной промышленности как вида экономической деятельности / Ю.В. Мелешко // Экономическая наука сегодня. — 2020. — № 11. — С. 105-116.
86. Мелкодисперсная составляющая отсеков горных пород в тяжелых цементных бетонах / Э.Н. Хафизова, В.Ф. Ахтямов, Ю.Ф. Панченко, Д.А. Панченко // Инновации и инвестиции. — 2019. — № 9. — С. 261-266.
87. Менжулин, М.Г. Влияние естественной и наведенной трещиноватости на взрывное разрушение и предразрушение горных пород / М.Г. Менжулин, А.В. Юровских // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 1. — С. 90-94.
88. Менжулин, М.Г. Разработка мер по снижению выхода мелких фракций и негабаритов при взрывном разрушении горных пород / М.Г. Менжулин, А.Ю. Казьмина, П.И. Афанасьев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 4. — С. 333-336.
89. Метод расчета дополнительного разрушения горных пород на квазистатической стадии действия взрыва / М.Г. Менжулин, Г.П. Парамонов, Ю.А. Миронов, А.В. Юровских. // Записки Горного института. — 2001. — Т. 148. — № 1. — С. 138.
90. Методика оценки адгезионной прочности полимерных покрытий путем индентирования / С.В. Смирнов, М.В. Мясникова, А.В. Пестов [и др.] // Физическая мезомеханика. — 2023. — Т. 26. — №. 3. — С. 39-49.
91. Методы и средства регистрации действия взрыва в горных породах / М.Ф. Друкованый, В.П. Билоконь, Г.В. Кузнецов, Л.Ф. Петрашин. — Киев : Наукова думка, 1971. — 162 с.

92. Мирошниченко, Д.В. Размолоспособность углей. Сообщение 3. Метод определения коэффициента крепости по Протодяконову / Д.В. Мирошниченко, В.В. Коваль, С.В. Фатенко // Кокс и химия. – 2021. – № 1. – С. 2-7.

93. Мисник, Ю.М. Удельная поверхностная энергия—новый показатель дробимости горной породы и его применение в расчетах параметров взрывных пород / Ю.М. Мисник, К.А. Долгов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1967. — Т 2. — С. 104-106.

94. Молдован, Д.В. Анализ гранулометрического состава взорванной горной массы / Д.В. Молдован // Записки горного института. – 2005. – Т. 167 – № 1 – С. 83-85.

95. Молдован, Д.В. Управление качеством развала горной массы при взрывных работах на карьерах строительных материалов / Д.В. Молдован // Взрывная технология. Эмпирика и теория. Достижения. Проблемы. Перспективы : Материалы международной научно-практической конференции, Тула, 27-28 октября 2011 года – Тула : Тульский государственный университет, 2011. – С. 59-64.

96. Наймарк, О.Б. О нелинейной динамике квазихрупкого разрушения (экспериментальное и теоретическое исследование) / О.Б. Наймарк // Вестник Пермского государственного технического университета. Математическое моделирование систем и процессов. – 2001. – № 9. – С. 93-102.

97. Налоговый кодекс Российской Федерации. Части первая и вторая. Текст с изменениями и дополнениями на 1 марта 2023 года (+ путеводитель по судебной практике) / В.А. Обручев – М. Эсмо. 2023 г. – 1087 с.

98. Нескромных, В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин : учеб. пособие / В.В. Нескромных. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 336 с.

99. Новые технологии производства высококачественного кубовидного щебня мелких фракций / Л.А. Вайсберг, А.Д. Шуляков, С.Л. Орлов [и др.] // Горная промышленность. – 2010. – № 3(91). – С. 10-13.

100. Нотт, Д. Механика разрушения / Д. Нотт // Атомистика разрушения. — М : Мир, 1987. — С. 145-176.

101. О влиянии генетических особенностей сырья и технологии на морфологию продуктов дробления / Р.В. Лесовик, Е.И. Ходыкин, Д.М. Сопин, Н.В. Ряпухин // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 8. – С. 22-23.

102. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении / В.Н. Опарин, О.М. Усольцева, В.Н. Семенов, П.А. Цой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 5. – С. 3-19.

103. 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.

104. Обзор существующих методик расчёта параметров зон разрушения породного массива / С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, А.К. Кирсанов, Д.А. Грибанова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 401.

105. Опыт взрывания крупноблочных пород сплошными и рассредоточенными зарядами с воздушными промежутками на Красногорском угольном карьере / В.З. Зольников, В.А. Ерофеев, М.В. Бодрцов, Г.Т. Фазалов // Взрывное дело. — 1964. — № 55/12. — С. 20-24.

106. Орлов, А.И. Вероятностно-статистические методы в работах А.Н. Колмогорова / А.И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 98. – С. 96-104.

107. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом / А.А. Павлович, В.А. Коршунов, А.А. Бажуков, Н.Я. Мельников // Записки Горного института. — 2019. — № 239. — С. 502-509.

108. Пантелеев, И.А. Некоторые автомодельные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твёрдых тел / И.А. Пантелеев, О.А. Плехов, О.Б. Наймарк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 90-100.

109. Пантелеев, И.А. Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясения / И.А. Пантелеев, О.А. Плехов, О.Б. Наймарк // Физика Земли. – 2012. – № 6. – С. 43-55.

110. Потокин, А.С. Исследования акустической и электромагнитной эмиссий при одноосном сжатии образцов скальных горных пород / А.С. Потокин, А.К. Пак // Наукосфера. – 2020. – № 11-2. – С. 86-91.

111. Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок / В.А. Арсентьев, Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский, А.Д. Шуляков. – Санкт-Петербург : Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 2004. – 112 с.

112. Прокопенко, В.С. Анализ оборудования для производства кубовидного щебня / В.С. Прокопенко, Е.А. Шатохин, И.А. Журбенко // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях - 2023 : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 21–23 сентября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 208-212.

113. Протасов, Ю.И. Разрушение горных пород / Ю.И. Протасов ; Ю. И. Протасов. – Изд. 4-е, стер. – Москва : Горная кн., 2009. – 453 с.

114. Протодяконов, М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве / М.М. Протодяконов, С. Е. Чирков. — М : Недра, 1964. — 69 с.

115. Протосеня, А.Г. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А.Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 51-57. – DOI 10.18454/PMI.2017.1.51.

116. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения / П.А. Ребиндер, Е.Д. Щукин // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108. – №. 9. – С. 3-42.

117. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский // Успехи физических наук. — 1972. – Т. 106. – №. 2. – С. 193-228.

118. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород : учебник для студентов горных специальностей вузов / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик ; В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – Изд. 5-е. – Москва : URSS. – 2010. – 390 с.

119. Романович, А.А. Методы повышения износостойкости рабочих органов роторно-вихревой мельницы / А.А. Романович, С.А. Духанин, М.А. Романович // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 4. – С. 116-123. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123.

120. Самуков, А.Д. Комплексная переработка отходов щебеночных производств / А.Д. Самуков // Экология и промышленность России. — 2019. — № 7. — С. 15-19.

121. 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». – 1 с.: ил.

122. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662255 Российская Федерация. Программа 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». – 1 с.: ил.

123. Соколов, С.Т. Прогнозирование сейсмического воздействия взрывных работ при проходке траншеи в зоне действующего газопровода : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук / Соколов Семен Тарасович ; Санкт-Петербургский горный университет. — Санкт-Петербург, 2021. — 23 с.

124. Сухотин, А.П. О разрушении твердой среды взрывом / А.П. Сухотин, В.В. Адушкин // Прикладная механика и техническая физика. — 1961. — Т. 2. — № 4. — С. 94-101.

125. Тамбиев, П.Г. К теории трещинообразования при взрыве горных пород / П.Г. Тамбиев // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 22–24 мая 2013 года / Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет". — Бийск: Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова", 2013. — С. 111-116.

126. Факторы, влияющие на скорость детонации заряда взрывчатого вещества / А.А. Галимьянов, Д.Е. Герасимов, К.В. Гевало [и др.] // Уголь. — 2022. — № 11(1160). — С. 55-61. — DOI 10.18796/0041-5790-2022-11-55-61.

127. Физика взрыва : В 2 томах / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум [и др.]. Том 1. — 3-е издание, переработанное. — Москва : ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2004. — 832 с.

128. Хрупкое разрушение горных пород / В.И. Дунаев, А.Е. Нижник, Н.Г. Титов [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2020. — № 6(330). — С. 18-20. — DOI 10.33285/0130-3872-2020-6(330)-18-20.

129. Шамаев, М.К. Добыча щебня и требования предъявляемые к их качеству / М.К. Шамаев, У. Т. Тоштемиров // Ta'lim va Rivojlanish Tahlili. — 2022. — Т. 2. — №. 10. — С. 131-137.

130. Шемякин, Е.И. О разрушении горных пород в ближней зоне подземного взрыва / Е.И. Шемякин, А.Н. Кочанов // Взрывное дело. — 1999. — № 92/49. — С. 7-19.

131. Шкуратник, В.Л. Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении / В.Л. Шкуратник, Е.А. Новиков, Р.О. Ошкин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 69-76.

132. Щебень России : [сайт]. — 2024. — URL: <http://brokenstone.ru/market/price.aspx> (дата обращения: 15.02.2024).

133. Ямщиков, В.С. Волновые процессы в массиве горных пород / В.С. Ямщиков. — Москва : Недра, 1984. — 271 с.

134. A fracture model for assessing tensile mode crack growth resistance of rocks / M. Wei, F. Dai, Yi. Liu, R. Jiang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – P. 395-411. – DOI 10.1016/j.jrmge.2022.03.001.

135. Advis.ru : [сайт]. — URL: https://www.advis.ru/php/view_news.php?id=17FE4009-6F1C-4E4F-BBAE-6B7DB3FE8D5A (дата обращения: 15.02.2024).

136. Ashby, M.F. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states / M.F. Ashby, S.D. Hallam // Acta metallurgica. – 1986. – Vol. 34. – №. 3. – pp. 497-510.

137. Bogusz, A. Stress-strain characteristics as a source of information on the destruction of rocks under the influence of load / A. Bogusz, M. Bukowska // Journal of Sustainable Mining. – 2015. – Vol. 14, № 1. – pp. 46-54.

138. Collaborative localization method using analytical and iterative solutions for microseismic/acoustic emission sources in the rockmass structure for underground mining / L. Dong, W. Zou, X. Li [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. — 2019. — Vol. 210. — pp. 95-112.

139. Crack evolution in damage stress thresholds in different minerals of granite rock / Sh. Ghasemi, M. Khamsehchiyan, A. Taheri [et al.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2020. – Vol. 53, No. 3. – pp. 1163-1178. – DOI 10.1007/s00603-019-01964-9.

140. Delagrammatikas, G. Grinding process simulation based on Rosin-Rammler equation / G. Delagrammatikas, S. Tsimas // *Chemical Engineering Communications*. – 2004. – Vol. 191. – №. 10. – pp. 1362-1378.

141. Esen, S. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole / S. Esen, I. Onederra, H. A. Bilgin // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2003. – Vol. 40, No. 4. – pp. 485-495. – DOI 10.1016/S1365-1609(03)00018-2.

142. Experiment on rockburst process of borehole and its acoustic emission characteristics / X. Hu, G. Su, G. Chen [et al.] // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – Vol. 52, No. 3. – pp. 783-802. – DOI 10.1007/s00603-018-1613-z.

143. Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests / K. Du, X. Li, M. Tao, S. Wang // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2020. – Vol. 133. – P. 104411. – DOI 10.1016/j.ijrmms.2020.104411.

144. Griffith, A.A. VI. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*. – 1921. – Vol. 221. – №. 582-593. – pp. 163-198.

145. Hawkins, A.B. Aspects of rock strength / A.B. Hawkins // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 1998. – Vol. 57, No. 1. – pp. 17-30.

146. Hieu, C.K. Experimental research and estimate of influence of borehole charge design on seismic intensity of largescale blasting in open-pit coal mines in Vietnam / C.K. Hieu // *Gornyi Zhurnal*. — 2014. — № 9. — pp. 118-120.

147. Kachanov, M.L. A microcrack model of rock inelasticity part I: Frictional sliding on microcracks / M.L. Kachanov // *Mechanics of Materials*. – 1982. – Vol. 1. – №. 1. – pp. 19-27.

148. Kazmina, A.J. Die Einwirkung der Sprengarbeiten auf den Erhaltungszustand des Massivs ausserhalb der Sprengzone mit und ohne Vorspaltenbildung / M.G. Menjulin, A.J. Kazmina, P.I. Afanasew // *Scientific reports on*

resource issues. Freiberg: International University of Resources. - 2011. - Vol. 1. - pp. 184-187.

149. Khokhlov, K. 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. Khokhlov, Z. Abiev, **V. Makkoev** // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12, No. 3. – pp. 1-11. – DOI: 10.3390/app12031515.

150. Kononenko, M. New theory for the rock mass destruction by blasting / M. Kononenko, O. Khomenko // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – Vol. 15, No. 2. – pp. 111-123. – DOI 10.33271/mining15.02.111.

151. Lawn, B. Fracture of brittle solids / B. Lawn. — 2. — Cambridge [etc.] : Cambridge University Press, 2010. — 378 p.

152. Local stress distribution and evolution surrounding flaw and opening within rock block under uniaxial compression / X. Fan, X. Jiang, Y. Liu [et al.] // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2021. – Vol. 112. – P. 102914. – DOI 10.1016/j.tafmec.2021.102914.

153. Microcracks in ultrabasic rocks under uniaxial compressive stress / I. Rigopoulos, B. Tsikouras, P. Pomonis, K. Hatzipanagiotou // Engineering Geology. – 2011. – Vol. 117. – №. 1-2. – pp. 104-113.

154. Mohanty B., Zhu Z., Paventi M. Numerical simulation of explosion induced fractures in rocks // Proceedings of the 14th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES and the 5th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries. CAMI. 2005.

155. Rodríguez, P. Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks / P. Rodríguez, T. B. Celestino // Engineering Fracture Mechanics. – 2019. – Vol. 210. – pp. 54-69. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2018.06.027.

156. Stationary solution and H theorem for a generalized Fokker-Planck equation / M. Jauregui, A. L. F. Lucchi, J. H. Y. Passos, R. S. Mendes // Physical Review E. – 2021. – Vol. 104. – №. 3. – pp. 34-130.

157. White, A.J.R. Ultrametamorphism and granitoid genesis / A.J.R. White, B.W. Chappell // Tectonophysics. – 1977. – Vol. 43. – №. 1-2. – pp. 7-22.
158. Zhang, Z.X. Rock fracture and blasting: theory and applications / Z.X. Zhang. — Butterworth-Heinemann : Elsevier, 2016. — 487 p.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

РИСУНКИ

Рисунок 1.1 – Производство щебня в РФ

Рисунок 2.1 - Измерение скорости детонации

Рисунок 2.2 - Схема акселерометра.

Рисунок 2.3 – Тарирование пьезоакселерометров

Рисунок 3.1 – Подготовленное место для проведения экспериментальных работ

Рисунок 3.2 – Бурение скважин по проекту

Рисунок 3.3 – Схема расположения взрывных и технологических скважин

Рисунок 3.4 – Схема расположения скважин

Рисунок 3.5 – Маркеры для определения скважин

Рисунок 3.6 – Крепление отрезка ДШ с измерительным проводом

Рисунок 3.7 – Крепление триггерного провода

Рисунок 3.8 – Оборудование для измерения скорости детонации

Рисунок 3.9 – График скорости детонации ДШЭ-12

Рисунок 3.10 – Станок для бурения инженерно-геологических скважин

Рисунок 3.11 – Керн 7.2И до взрыва

Рисунок 3.12 – Керн 4.2И до взрыва

Рисунок 3.13 – Керн 7.2И после взрыва

Рисунок 3.14 – Керн 7.3И после взрыва

Рисунок 3.15 – Размещение датчика в скважине

Рисунок 3.16 – Алебастр для заливки датчиков

Рисунок 3.17 – Размещение кабелей в скважине

Рисунок 3.18 – Подключение проводов к прибору

Рисунок 3.19 – Укрытие для приборов

Рисунок 3.20 – Укрытие для проводов

Рисунок 3.21 – Конструкция скважинных зарядов

Рисунок 3.22 – Исходные данные

Рисунок 3.23 – Обработка данных эксперимента

Рисунок 3.24 – График зависимости скорости смещения горной массы от относительного расстояния

Рисунок 3.25 – Зависимость возникающих напряжений от расстояния

Рисунок 3.26 – Зависимость размера зоны предразрушения от скорости детонации ВВ

Рисунок 3.27 – Объемная модель образца

Рисунок 3.28 – Микротрещины на образце, изъятom после взрыва на относительном расстоянии 40R (отмечена синим)

Рисунок 3.29 – График зависимости количества трещин в породе от напряжений

Рисунок 4.1 – Зависимость напряжений от относительного расстояния

Рисунок 4.2 – Зоны разрушения и предразрушения для соседних зарядов $d=233$ мм

Рисунок 4.3 – Зоны разрушения и предразрушения для соседних зарядов $d=155$ мм

Рисунок 4.4 – Дробильно-сортировочный комплекс

Рисунок 4.5 – Распределение щебня по фракциям

Рисунок 4.6 – Выход фракций щебня при изменении типов ВВ и параметров БВР

ТАБЛИЦЫ

Таблица 2.1 - Технические характеристики ударного стенда

Таблица 2.2 – Требования к отбираемым образцам

Таблица 3.1 – Распределение ВВ по скважинам

Таблица 3.2 – Расчет напряжений в горной породе

Таблица 4.1 – Показатель политропы от плотности ВВ

Таблица 4.2 – Расчет эквивалентных радиусов заряда

Таблица 4.3 – Расчетные и измеренные параметры ВВ

Таблица 4.4 – Результаты замера объемов фракций при взрывании Гранулита РП

Таблица 4.5 – Результаты замера объемов фракций при взрывании Эмульсолита А-20

Таблица 4.6 – Результаты замера объемов фракций при взрывании Гранулита РП с уменьшенным диаметром заряда

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662255

**Программа расчета полей напряжений в массиве
горных пород при динамическом воздействии**

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

Авторы: *Хохлов Сергей Владимирович (RU), Соколов Семен
Тарасович (RU), Маккоев Вячеслав Алексеевич (RU)*



Заявка № 2023661213

Дата поступления 01 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 июня 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

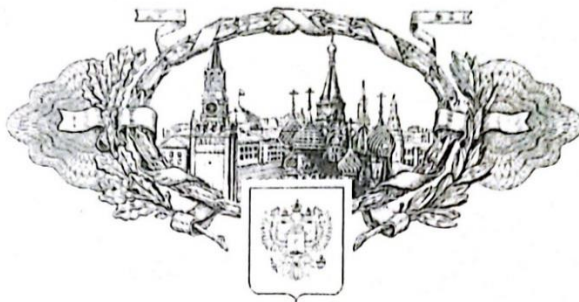
Документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b6a00f91551164ba196183b73b4aa7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 19.06.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021680786

Программа для расчета основных параметров воронки
выброса

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

Авторы: *Виноградов Юрий Иванович (RU), Хохлов Сергей
Владимирович (RU), Маккоев Вячеслав Алексеевич (RU)*



Заявка № 2021669857

Дата поступления 07 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 декабря 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Израиль

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения результатов диссертационных исследований в АО «Полюс Алдан»

Утверждаю:

Главный горняк

АО «Полюс Алдан»


 _____ А.Я. Яковлев
 «05» _____ 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Макоева Вячеслава Алексеевича

по научной специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Комиссия в составе:

Председатель

Илья Андреевич Сивцев – Главный инженер рудника

Члены комиссии:

Каверин Олег Сергеевич – Начальник рудника «Куранах»

Копылов Семен Евгеньевич – Начальник участка буровзрывных работ

Плесакова Анастасия Сергеевна – Старший инженер по контролю качества и развития БВР

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование параметров буровзрывных работ на карьерах строительных материалов с учетом волнового предразрушения при взрыве», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, внедрены в деятельность АО «Полюс Алдан» при разработке Куранахского рудного поля для совершенствования проектных решений при ведении буровзрывных работ на карьерах строительных материалов.

Использование представленных в диссертационной работе результатов позволяет повысить качество добываемого сырья в виде щебеночной продукции за счет регулирования параметров буровзрывных работ и выбора взрывчатого вещества с необходимой скоростью детонации, что способствует снижению выхода мелкой фракции в конечном продукте.

Результаты внедрялись при выполнении НИР по темам:

1. «Обоснование параметров БВР, обеспечивающих формирование оптимального развала взорванной горной массы», 2021 г.
2. «Определение параметров буровзрывных работ, обеспечивающих эффективную работу щебеночного карьера АО «Полюс Алдан», 2022 г.

Председатель комиссии

Главный инженер рудника

И.А. Сивцев

Члены комиссии

Начальник рудника «Куранах»

О.С. Каверин

Начальник участка буровзрывных работ

С.Е. Копылов

Старший инженер по контролю качества и развития БВР

А.С. Плесакова

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения результатов диссертационных исследований в АО
«ЭВОБЛАСТ РУС»

АО «ЭВОБЛАСТ РУС»
Россия, 125315, Москва, Ленинградский проспект 72, в. 1, эт. 8,
помещ. XIV, ком. 1.2.3.4.5.6.8.9,
+7 495 641 11 64, info@evoblast.ru, www.evoblast.ru
ОГРН: 1027700126134, ИНН: 7725054253

Утверждаю:



Регистрационный директор ОП
АО «ЭВОБЛАСТ РУС»
И.И. Павлов
2024 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Маккоева Вячеслава Алексеевича

по научной специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Комиссия в составе:

Председатель

Сидоров Евгений Юрьевич – Руководитель ОП.

Члены комиссии:

Миронов Евгений Сергеевич – Начальник по буровзрывным работам;

Редин Игорь Олегович – Заместитель начальника по буровзрывным работам.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование параметров буровзрывных работ на карьерах строительных материалов с учетом волнового предразрушения при взрыве», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, используются в деятельности АО «ЭВОБЛАСТ РУС» для совершенствования проектных решений при ведении буровзрывных работ на карьерах строительных материалов.

Использование представленных в диссертационной работе результатов позволяет повысить качество добываемого сырья в виде щебеночной продукции за счет регулирования параметров буровзрывных работ и выбора взрывчатого вещества с необходимой скоростью детонации, что способствует снижению выхода мелкой фракции в конечном продукте.

Председатель комиссии:

Руководитель ОП

Члены комиссии:

Начальник по буровзрывным
работамЗаместитель начальника по
буровзрывным работам

Сидоров Евгений Юрьевич

Миронов Евгений Сергеевич

Редин Игорь Олегович