

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Подпись

Брухавецкая Алина Олеговна

**ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕТОНИРУЮЩЕГО
ШНУРА В СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДАХ ЭМУЛЬСИОННЫХ
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО
КАЧЕСТВА ДРОБЛЕНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ**

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

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный
руководитель:

Доктор технических наук, профессор
Белин Владимир Арнольдович
доктор физико-математических наук, доцент
Винников Владимир Александрович

Москва, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ВЗРЫВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ	11
1.1 Современные методы оценки качества дробления взорванной горной массы при разработке месторождений открытым способом	11
1.2 Параметры, влияющие на качество гранулометрического состава при взрывании в условиях открытых горных работ.....	15
1.3 История промышленных взрывчатых веществ в России с конца XX века по настоящее время	22
1.3.1 Взрывчатые вещества	22
1.3.2 Средства инициирования	30
1.4 Постановка задач исследования	35
ГЛАВА 2 ВЫБОР ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ	38
2.1 Обзор современных программных комплексов для определения и прогнозирования качества дробления взорванной горной массы	38
2.2 Описание применяемого оборудования и принцип его работы.....	49
Выводы по главе 2	56
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ИНИЦИИРОВАНИЯ	58
3.1 Описание горно-геологических условий апатит-нефелинового месторождения	58

3.2	Анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании неэлектрическими системами инициирования в условиях карьера Ньоркпахкский	71
3.3	Анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании неэлектрическими системами инициирования в условиях карьера Коашвинский	75
	Выводы по главе 3	78
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНИРУЮЩИМ ШНУРОМ И ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ДШ И НСИ		80
4.1	Анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании детонирующим шнуром в сочетании с НСИ и при использовании только детонирующего шнура.....	80
	Выводы по главе 4	86
ГЛАВА 5 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ДЕТОНИРУЮЩЕГО ШНУРА ПРИ ВЗРЫВАНИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ В УСЛОВИЯХ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ		88
5.1	Особенности применения детонирующего шнура в условиях рудника «Восточный».....	88
5.2	Рекомендации по использованию детонирующего шнура в скважинных зарядах ЭВВ в условиях рудника «Восточный»	93
	Выводы по главе 5	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		98

Приложение А	111
--------------------	-----

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие обозначения и сокращения:

АС – Аммиачная селитра

БВР – буровзрывные работы

БПЛА – беспилотные летательные аппараты

ВВ – взрывчатые вещества

ВГМ – взорванная горная масса

ВостНИИ – Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли»

ГГИС – горно-геологическая информационная система

ГосНИИ «Кристалл» – Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт «Кристалл»

ГРО – горячий раствор окислителя

ДШ – детонирующий шнур

ЕМИСС – Единая межведомственная информационно-статистическая система

КВЗ – короткозамедленное взрывание

МПЩ – метод предварительного щелеобразования

НСИ – неэлектрическая система инициирования

ПВВ – промышленное взрывчатое вещество

ПО – программное обеспечение

СЗМ – смесительно-зарядная машина

СНГ – содружество независимых государств

ТЭН – Пентаэритриттетранитрат (мощное бризантное взрывчатое вещество)

ЭМ – эмульсионная матрица

ЭВВ – эмульсионные взрывчатые вещества

ANFO – Ammonium Nitrate/Fuel Oil (смесь гранулированной аммиачной селитры и дизельного топлива)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Определение гранулометрического состава взорванной горной массы является одним из важнейших критериев для оценки качества раздробленного массива в результате буровзрывных работ. По степени дезинтеграции массива можно определить, в какой мере произведенный взрыв был управляемым, то есть насколько отличается полученный гранулометрический состав от прогнозируемого. При высоком качестве дробления горной массы достигается результат, который распространяется и на дальнейшие технологические этапы: выемку, погрузку, транспортировку горной массы, дробление, измельчение и обогащение.

На качество дробления влияет множество факторов: горно-геологические условия месторождения, физико-технические свойства пород, слагающих массив, а также параметры буровзрывных работ (далее - БВР). В свою очередь, на параметры, связанные с геологическим строением слагающих пород массива и его свойствами, практически невозможно повлиять, поэтому исходя из них подбираются параметры БВР. В то же время параметры БВР зависят не только от геологии, но и от проектных факторов, а именно с какой целью производится взрыв, близость к объектам застройки и сооружениям, экономические показатели и т.д., а также от используемых на горнодобывающих предприятиях взрывчатых материалов и изделий на их основе. За последние два года прослеживается тенденция применения на предприятиях, производимых взрывные работы, детонирующего шнура (далее – ДШ) в качестве средств инициирования вместо повсеместно применяемых неэлектрических систем инициирования (далее – НСИ). По данным Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) потребление горнодобывающими предприятиями детонирующего шнура и огнепроводного шнура, в первом полугодии 2021 года составляло 105 401,51 км, спустя год ситуация изменилась и потребление средств инициирования данного типа увеличилось, и

стало составлять 113 938,84 км в первом полугодии 2022 года. Обратная ситуация наблюдается при рассмотрении промышленных средств и систем инициирования (кроме детонирующих и огнепроводных шнуров) в аналогичный период. В этом случае расход в первое полугодие 2021 года был больше (60 397,79 км) в сравнении с значением в первом полугодии 2022 года (55 987,28 км). Исходя из этого, возникает вопрос: будет ли отражаться на качестве дробления замена одного средства инициирования на другое при производстве буровзрывных работ в сходных горно-геологических условиях? Поэтому проблема получения гранулометрического состава при взрывании ДШ в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ (далее – ЭВВ), близкого по качеству с применением неэлектрических систем инициирования в условиях нехватки НСИ (в связи со сложной геополитической ситуацией) является актуальной.



Рисунок 1.1 - Статистика расхода детонирующего шнура и других средств и систем инициирования за 2021 и 2022 годы в России

В настоящее время не на всех горнодобывающих предприятиях учитывают вышеперечисленные параметры и отслеживают качество дробления при производстве взрывных работ с помощью специального оборудования и

программного обеспечения, порой оценка качества дробления горной массы производится визуально, но такой результат не всегда информативен. При этом может применяться метод обмера вручную раздробленных кусков породы, который требует больших временных затрат и является не самым безопасным способом по причине нахождения человека в забое, где возможен обвал кусков горной массы. В свою очередь, применение специального оборудования и программного обеспечения (далее - ПО) для оценки качества дробления горной массы взрывом имеет широкое распространение как в мировой, так и в отечественной практике. Проведено достаточное количество исследований по изучению сходимости моделей прогнозирования гранулометрического состава с фактически полученным гранулометрическим составом, при этом часто применяется распределение Swebrec. Поэтому анализ кумулятивных кривых, полученных по закону распределения Swebrec, является достойной альтернативой определения гранулометрического состава вручную (ситовой анализ, поштучный обмер).

Данная работа посвящена определению возможности использования детонирующего шнура в скважинных зарядах ЭВВ в определенных горно-геологических условиях для обеспечения возможности получения такого же гранулометрического состава, как при использовании НСИ, в условиях нехватки неэлектрических систем инициирования по причине сложной геополитической ситуации.

Цель данного исследования заключается в определении комплекса горно-геологических условий и параметров БВР, при которых результат дробления взорванной горной массы с применением детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ будет аналогичен результатам дробления с использованием неэлектрических систем инициирования.

Идея работы заключается в обосновании возможности и оценке условий использования детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ вместо неэлектрических систем инициирования по результатам анализа гранулометрического состава взорванной в различных

условиях горной массы, что имеет важное значение для импортозамещения средств инициирования.

Основные научные положения, защищаемые в работе, и их новизна:

1. Установлено, что при использовании детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ определяющими гранулометрический состав факторами являются сезонность проведения работ, высота уступа, обводненность и степень трещиноватости массива.

2. Установлено, что при взрывании в аналогичных условиях использование НСИ обеспечивает более однородный гранулометрический состав по сравнению с инициированием ДШ внутрискважинных зарядов, но в последнем случае наряду с переизмельчением массива вероятность выхода негабаритов уменьшается.

3. Определено, что результат дробления взорванной горной массы с применением детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ будет аналогичным результатам, полученным при использовании неэлектрических систем инициирования в летний период в необводненном массиве со средней степенью трещиноватости.

Обоснованность и достоверность выдвинутых положений и выводов обеспечивается:

- анализом результатов международных и отечественных исследований;
- применением современных моделей оценки качества гранулометрического состава;
- анализом данных, полученных со специализированного оборудования;
- воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных результатов;
- апробацией результатов на международных конференциях и симпозиумах.

Методы исследований включают анализ и обобщение литературных источников, анализ гранулометрического состава взорванной горной массы фотопланиметрическим методом, анализ кумулятивных кривых, построенных с помощью трехпараметрической функции распределения Swebrec, а также

анализ характера искривления кумулятивных кривых и основных показателей функции.

Теоретическая значимость работы состоит в установлении принципиальной возможности замены неэлектрических средств инициирования детонирующим шнуром при взрывании в условиях апатит-нефелиновых руд эмульсионными ВВ без потери качества дробления взорванной горной массы.

Практическая значимость работы состоит в определении горно-геологических условий и параметров БВР, при соблюдении которых возможно достичь качества дробления горной массы после взрывания с применением ДШ, сопоставимого с получаемым при применении НСИ. Результаты диссертационного исследования представляют интерес для АО «ЭВОБЛАСТ РУС» и предполагаются к практическому использованию при создании проектов на массовые взрывы на карьерах Ньоркпахкский и Коашвинский рудника «Восточный» Мурманской области.

Апробация работы. Основные тезисы и результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и научно-практических семинарах: XXII Международной научно-практической конференции по горному делу 11.09.2022-17.09.2022, г. Москва; 5 Международной научной школе академика РАН К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» 14.11.2022-18.11.2022 г., Москва; XXXI Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка-2023» 30.01.2023-03.02.2023, г. Москва; 16 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 23.10.2023-27.10.2023, г. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, изложенных на 111 страницах, содержит 34 рис., 7 табл., 1 приложение, список использованной литературы из 108 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ВЗРЫВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ

1.1 Современные методы оценки качества дробления взорванной горной массы при разработке месторождений открытым способом

При производстве комплекса буровзрывных работ в условиях открытых горных работ ключевым показателем, согласно которому оценивается качество дробления горной массы, является гранулометрический состав. Благодаря данному показателю оценивается эффективность всего комплекса буровзрывных работ. Гранулометрический состав предопределяет увеличение или уменьшение затрат на последующие технологические процессы, такие как выемка, погрузка, транспортировка, дробление и обогащение. Эти показатели неразрывно связаны с качеством полученного гранулометрического состава, при качественном дроблении массива затраты на последующие технологические процессы уменьшаются, при наличии негабаритов привлекаются дополнительные средства, что приводит к увеличению затрат и на дальнейшие технологические этапы. Автор в своем исследовании [1] заключает, что без обеспечения требуемого качества дробления возникает не только необходимость дополнительного измельчения негабаритных кусков породы, но и такие сложности как неравномерное дробление, нарушение целостности законтурного массива, повышенное сейсмическое воздействие, вследствие чего возникает разлет кусков породы.

Изучением вопросов разрушения горных пород взрывом и качеством дробления массива после данного воздействия, занимались многие исследователи, одни из которых посвятили множество трудов данной тематике. Это такие выдающиеся ученые как В.В. Адушкин, В.Л. Барон, В.А. Белин, А.А. Борисов, С.Д. Викторов, С.А. Вохмин, С.А. Горинов, Д.В. Доможиров, В.А. Дунаев, Э.И. Ефремов, И.Ф. Жариков, В.М. Закалинский, И.М. Игнатенко, Г.Г.

Каркашадзе, Н.Н. Казаков, С.А. Козырев, В.И. Комащенко, С. С. Костылев, Г.М. Крюков, Г.С. Курчин, А.Е. Куттыбаев, Б.Н. Кутузов, М.А. Маринин, В.Н. Мосинец, Г.Я. Новик, Г.С. Нутфуллаев, А.И. Пастухов, В.Д. Петренко, Б.Р. Ракишев, В.В. Ржевский, К.Н. Трубецкой, В.Н. Тюпин, Е.И. Шемякин, Ф.Я. Умаров, А.Е. Франтов и многие другие ученые.

Хотелось бы выделить труды Б.Н. Кутузова, В.А. Белина, А.Ф. Суханова [2, 3, 4], в которых изложены основные требования к качеству произведенного взрыва и введены определения для его качественной оценки.

Согласно [4] существует ряд требований, которым должны соответствовать результаты взрыва, произведенные в условиях открытых и подземных горных работ. Перечень их таков: выход негабаритных и мелких кусков должен сводиться к минимуму ($\leq 5\%$); по результатам взрыва не должны образовываться завывания по подошве и образовываться заколы за последний ряд скважины; развал горной массы должен соответствовать параметрам, обеспечивающим оптимальную погрузку; схема монтажа блока и конструкция заряда должны обеспечивать полноту детонации инициируемого ВВ; при производстве взрывных работ не должно происходить разрушений или повреждений объектов, не предусмотренных проектом.

Качество взрывных работ оценивается по крупности кусков породы, измельченной действием взрыва. Существует термин «степень кусковатости», который измеряет степень крупности взорванной горной массы. Определение гранулометрического состава, которое повсеместно используется, в полной мере характеризует степень дробления и выражается в виде простых или кумулятивных кривых. Для оценки гранулометрического состава используют такие характеристики как относительный выход негабаритных кусков и их гранулометрический состав, относительный выход мелких кусков, средний диаметр куска горной массы [3].

Авторы работ [4, 5, 6] сходятся в едином мнении, что методы определения гранулометрического состава можно разделить на прямые и косвенные. Но граница между прямыми и косвенными методами прослеживается нечетко.

Авторы статей [5, 7], опираясь на работы Л.И. Барона, считают, что к прямым методам относится измерение по поверхности в натуральную величину или путем масштабирования фотографий объема, а также массы единичного куска породы. К косвенному методу относится оценка качества дробления через другие параметры, например, через расход взрывчатых материалов на вторичное дробление или по оценке производительности горной техники. В статье [6] к косвенным методам относятся методы, которые основаны на анализе изображения и эмпирических методах, а к прямым методам относится только ситовой анализ. Воспользуемся наиболее полной классификацией прямых методов, изложенной Б.Н. Кутузовым [2, 3, 4]. Итак, к прямым методам относятся:

- поштучный обмер – замер негабаритных кусков породы по трем взаимно перпендикулярным направлениям;

- ситовой анализ – это метод определения гранулометрического состава путем рассеивания проб на определенные фракции с применением сит разного размера с последующим определением массы и процентного содержания каждой фракции [8]. При проведении ситового анализа средний размер куска горной массы определяется по формуле [4]:

$$d_{\text{ср}} = \frac{\gamma_i d_i}{100}, \quad (1.1)$$

где d_i – диаметр среднего куска данной фракции, см;

γ_i – выход кусков данной фракции, %.

- планиметрический метод – основан на определении отношения суммарной площади негабаритных кусков в плане к их общей площади, на которой производят измерение. Если вместо замеров произвести фотографирование развала горной породы в масштабе, то это будет фотопланиметрический метод. При обработке фотопланов производятся расчет площадей отдельных, размеры которых соотносятся к определенным классам крупности;

- количественный метод – основан на подсчете числа негабаритных кусков, находящихся на анализируемой площади. Например, количество негабаритных кусков породы в штуках на 1 м^3 определяется по формуле:

$$N = \frac{n\sqrt{n}}{S\sqrt{S}}, \quad (1.2)$$

где n – число негабаритных кусков на площади замера S , м^2 .

Используя полученное значение N , можно определить выход негабарита:

$$V_{\text{н}} = NV_{\text{ср}} 100, \quad (1.3)$$

где $V_{\text{ср}}$ – средний объем негабарита, м^3 ;

$V_{\text{н}}$ – выход негабарита, %;

N – число штук негабаритов на 1 м^3 .

- линейный метод – при определении негабаритных кусков породы данным методом необходимо растянуть мерную ленту через определенный интервал. Крупные куски, попавшие на ленту, подлежат замеру. Выход негабарита рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{н}} = \frac{\sum l_{\text{н}}}{\sum L} 100\%, \quad (1.4)$$

где $\sum l_{\text{н}}$ – суммарная длина крупных негабаритных кусков, м

$\sum L$ – общая длина линии, м.

Также одним из современных методов оценки гранулометрического состава является стереометрический метод. Широко применяемый в зарубежных источниках, он основан на анализе трехмерных данных, полученных при анализе стереоизображений или анализе трехмерной информации об объекте, полученной при сканировании объекта из облака точек [9]. С недавних пор и в отечественных научных источниках также стал применяться данный термин. Авторы работ [10, 11, 12] активно занимаются внедрением стереометрического метода в сочетании с нейронными сетями для автоматического измерения гранулометрического состава взорванной горной массы. Метод заключается в съёмке стереоизображения развала взорванной горной массы,

построении объемного рельефа развала, который состоит из набора данных дальности от матрицы стереоскопической камеры до поверхности выбранных участков развала горной породы и соответствующих им координат на изображении. На основе полученных данных с применением алгоритмов машинного обучения определяются геометрические параметры фрагмента развала и гранулометрический состав [11, 12].

К косвенным методам оценки качества гранулометрического состава относятся эмпирические методы и числовые методы. К таким методам относятся модели, построенные по уравнениям Ларссона, формула SveDoFo, модель Kuz-Ram [6], модель КСО и другие. Данные модели находят применение в различных программных продуктах, благодаря чему становится возможным прогнозировать гранулометрический состав. Существующие методы прогнозирования гранулометрического состава, которые реализованы в программных продуктах, рассмотрены в главе 2.

1.2 Параметры, влияющие на качество гранулометрического состава при взрывании в условиях открытых горных работ

На качество дробления горной массива влияет множество факторов. Автор работы [13] предлагает такую градацию параметров, влияющих на получаемое качество гранулометрического состава, с последующим разделением на две группы. Первая группа параметров – природные, к данным параметрам относятся физико-механические свойства, трещиноватость, наличие отдельностей в массиве и их размер, тектонические нарушения и т.д. Вторая группа – техногенные параметры, они задают способ и средства воздействия на массив. Примером техногенных параметров является параметры буровзрывных работ, к которым относятся диаметр, длина заряда, сетка бурения, тип ВВ, способ размещения ВВ в скважине, порядок инициирования, схемы инициирования и применяемые средства инициирования. Эти параметры задаются исходя из природных данных массива.

Также данные параметры можно классифицировать как регулируемые и не регулируемые.

1.2.1 Нерегулируемые параметры: геологические особенности массива горных пород

К природным параметрам относятся следующие параметры: трещиноватость массива, обводненность, крепость пород и другие структурные особенности массива.

Опираясь на современные исследования в области разрушения массива горных пород взрывом [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], можно прийти к выводу, что для получения качественного гранулометрического состава необходимо учитывать физико-механические свойства массива, его геологические особенности при создании проектов БВР, а также при создании моделей для прогнозирования гран. состава. Одним из важных показателей являются структурные особенности массива: степень трещиноватости, направление основных систем трещиноватости и напластования, ширина трещин и материал их заполнения, блочность массива [21]. К физико-механическим свойствам массива относятся пористость, скорость прохождения продольных и поперечных волн в породе, модули упругости, сжатия и сдвига [20]. Также следует учитывать степень обводненности массива, так как данный параметр также влияет на качество дробления.

Авторами [19] было предложено учитывать в проекте БВР структурные неоднородности массива, такие как мощность отдельных слоев, систему и размер трещин, расстояние между трещинами и свойства из заполнителя с целью получения необходимой степени дробления, так как эти параметры, включая величины раскрытия трещин [22], количество систем трещин и их ориентировки, также влияют на качество дробления трещиноватого массива. Механизм разрушения трещиноватого массива отличается снижением эффективности дробления, что приводит к значительным потерям энергии из-за прохождения взрывной волны через трещины, отражения волн от берегов трещин и

распределения газообразных продуктов взрыва по трещинам, приводящего к падению давления газов. При этом массив разрушается по естественным трещинам. Отмечено, что при взрыве две трети массива разрушаются по имеющимся трещинам, а остальная часть по вновь образованным трещинам [1]. Также отмечено [23], что в зависимости от естественной трещиноватости и слоистости, массив обладает отличными друг от друга физико-механическими свойствами и, как следствие, различной диссипацией энергии. Например, в массиве с естественной трещиноватостью, которая превышает параметры сетки, качество дробления обеспечивается уменьшением диаметра скважин, подбором оптимальных параметров сетки скважин и их расположением в массиве. В случае, если массив разбит системой разнонаправленных трещин, такой способ не даст ожидаемого эффекта. Всею виной то, что при дроблении трещиноватого массива в процессе разрушения не происходит образования новых поверхностей, и он разрушается на естественные отдельности. По этой причине в мелкоблочных массивах, в которых размер отдельности не превышает размера кондиционного куска, массив достаточно встряхнуть действием взрыва, чтобы его разрушить, в крупнообломочном массиве необходимо воздействовать непосредственно на каждую отдельность [22].

Поэтому при разрушении трещиноватого массива необходимо учитывать направление трещиноватости и, исходя из этого, подбирать схемы инициирования. Согласно [24], при распространении взрыва вкрест простирания трещин качество гранулометрического состава улучшается.

Трещины могут иметь естественный и искусственный характер происхождения. Естественной трещиноватостью массив обладает в случае, если трещины образовывались при формировании горных пород (генетические трещины) или в процессе перемещения больших объемов массива (тектонические трещины). Дополнительная трещиноватость массива проявляется вследствие ведения горных работ. Трещины, образованные за счет горнотехнических факторов, визуально отличаются от трещин природного происхождения отсутствием минерального заполнителя, а их распространение ограничивается

одной отдельностью массива [2]. При фактической оценке нарушенности контурного массива, которая существенно отличается от естественной трещиноватости, оценивается суммарная трещиноватость после проведения взрывных работ [25].

Помимо этого, во взрываемом массиве горных пород можно выделить две зоны дробления: зону регулируемого и нерегулируемого дробления. Зона регулируемого дробления находится в непосредственной близости от заряда, и в ней разрушение отдельностей происходит за счет действия волн напряжений и давления газов взрыва. Размер этой зоны регулируется путем увеличения диаметра заряда, в этом случае происходит увеличение зоны. Те участки массива, которые не попали под данное воздействие, разрушаются в результате динамического воздействия расширяющегося объема породы зоны регулируемого дробления. Разрушение отдельностей в данной зоне имеет вероятностный характер, и эта зона именуется как зона практически нерегулируемого дробления [2, 3]. Автор [26] предлагает определять гранулометрический состав взорванного массива в зонах нерегулируемого дробления путем введения коэффициента фракционности K_f , при определении которого необходимо учитывать категорию трещиноватости пород.

Ко всему прочему отмечается [27], что при наличии трещин происходит проникновение продуктов взрыва в краевые зоны массива, тем самым изменяются механические свойства пород, что негативно сказывается на эффективности взрывных работ вследствие увеличения выход негабарита.

Увеличение объёмов открытых горных работ приводит к росту глубины карьеров, в свою очередь это приводит к усложнению горно-геологических условий разрабатываемых месторождений. В связи с увеличением глубины карьеров повышаются объемы добычи обводненных и крепких пород [10, 28, 29, 30]. Разброс значений свойств массива отражается на качестве буровзрывных работ не всегда в лучшую сторону. Во избежание ухудшения гранулометрического состава требуется внесение изменений в типовые проекты БВР. Для того, чтобы вносить изменения, необходимо понимать, как влияет

обводненность на механизм разрушения горных пород. Этой проблемой занимались многие ученые, известно достаточное количество исследований, но мнения по данному вопросу разделяются. Авторы исследований [31, 32, 33] глубоко изучили данную тематику и сделали вывод, что возможно как улучшение, так и ухудшение гранулометрического состава горных пород при взрывании в обводненных условиях. Это объясняется тем, что горная порода имеет набор сугубо индивидуальных свойств, таких как трещиноватость, пористость, структурно-текстурные признаки, которые по-разному изменяются при водонасыщении пород. Исходя из этого, рекомендуется индивидуально рассматривать условия взрывания в обводненных породах во избежание ухудшения качества дробления. Но, вопреки этому заявлению, на основе проведенных экспериментов все-таки были выявлены некоторые закономерности. В основной массе исследований отмечается, что выход среднего куска преобладает над выходом мелкой фракции. Автор исследования [28] рассматривает влияние обводненности массива с позиции изменения механизма разрушения обводненной горной породы взрывом. При взрывании в обводненной среде, когда имеется водяная прослойка между зарядом ВВ и массивом, при детонации ВВ часть энергии ударной волны расходуется на нагревание, испарение и вытеснение воды, также при этом сценарии газообразные продукты детонации хуже проникают в массив, что приводит к ухудшению дробления. При этом в сильнотрещиноватом массиве наблюдается противоположный эффект, так как вода заполняет трещины, тем самым задерживая газообразные продукты взрыва, вследствие чего увеличивается время их воздействия.

В ходе исследований механизма разрушения обводненных апатит-нефелиновых руд автором [32] отмечено, что зона переизмельчения увеличивается, а зона разрушения радиальными трещинами уменьшается по сравнению с взрыванием пород с естественной влажностью.

Затрагивая вопрос обводненности массива, не стоит забывать, что происхождение воды в горной породе может быть различным. Автор [31] выделяет обводненность, обусловленную атмосферными осадками,

гидрогеологией месторождения, понижением уровня разработки, наличием трещиноватых пород, а также гидромеханическим влиянием массовых взрывов на массив.

Переменная обводненность трещиноватого массива, вызванная атмосферными осадками, также влияет на механизм разрушения массива, так как в период повышенных осадков вода смешивается со средой заполнителя трещин и смерзается, тем самым заполняя пустоты и предотвращая процесс трещинообразования. Но этот процесс не долгосрочный, и при наличии кратковременной динамической нагрузки может привести к противоположному эффекту, спровоцировав процесс заколообразования [34].

1.2.2 Регулируемые параметры: параметры БВР

Известно, что типовой проект буровзрывных работ разрабатывается с учетом физико-механических свойств массива. Согласно п. 154 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» от 3 декабря 2020 № 494, организации, ведущие взрывные работы с применением массовых взрывов, должны иметь типовой проект буровзрывных работ. Типовой проект буровзрывных работ утверждается с учетом проекта отработки месторождения и результатов промышленных и экспериментальных взрывов, а также научно-технических разработок. Исходя из этого, не установлено обязательное требование вносить корректировки в типовой проект при изменении горно-геологических условий разрабатываемого месторождения, то есть данное решение остается на усмотрение организации, ведущей взрывные работы.

Во избежание получения неравномерного качества дробления массива необходимо составлять проект буровзрывных работ с учетом физико-механических свойств массива, о чем было сказано в разделе 1.2.1. К тому же ведение буровзрывных работ с перспективой получения качественного гранулометрического состава помогает избежать негативных последствий, таких как

вибрация, образование пыли, разлет кусков породы, шум и взрывное разрушение вглубь массива [13].

Размер кондиционного куска и выход негабарита зависит от множества показателей, регулируемых параметрами БВР. Известно [2], что к параметрам, которые позволяют управлять качеством дробления, относятся расчетный удельный расход ВВ; диаметр заряда; тип применяемого ВВ; конструкция заряда; направление инициирования сплошного заряда; порядок инициирования частей рассредоточенного заряда; качество забойки и ее длина. Современные авторы также солидарны с вышеперечисленным и подтверждают этот перечень в своих исследованиях [29, 35], дополняя длиной перебура [27].

С целью регулирования качества дробления в практически нерегулируемых зонах дробления требуется изменять сетку расположения скважин, число их рядов, интервал замедления и последовательность взрывания зарядов, высоту уступа, схемы расположения скважин на уступе [2]. Авторы современных исследований дополняют этот перечень следующими показателями: уменьшение длины взрывного блока, обеспечение такого направления фронта отбойки, при котором трещины основной системы создают отраженную волну напряжений [1, 36].

В своих исследованиях авторы описывают, как изменение тех или иных параметров может сказываться на качестве дробления. Например, благодаря лабораторным исследованиям авторы выявили закономерность возрастания степени дробления материала при увеличении диаметра заряда по причине увеличения продолжительности взрывчатого превращения ВВ [35]. Также одним из методов снижения выхода негабарита в трещиноватом массиве, помимо увеличения удельного расхода ВВ, является уменьшение диаметра взрывных скважин в сочетании с оптимизацией сетки скважин [1].

Судя по расширенному перечню параметров, влияющих на качество грансостава, изменение конструкции заряда, его характеристик и способа его инициирования также отражается на результатах дробления массива. Одним из эффективных способов улучшения качества дробления является реализация

метода короткозамедленного взрывания (КЗВ), который отмечается авторами [22, 37]. Этот метод основан на принципе «одна скважина – одно замедление», который способствует образованию дополнительных поверхностей обнажения, в сочетании с увеличением количества интервалов замедлений повышается качество дробления массива [38]. Данные схемы возможно реализовать при монтаже взрывной сети детонирующим шнуром, неэлектрическими системами инициирования, а также электронными системами инициирования. Сложнее всего данные схемы реализовать при применении детонирующего шнура: автор [37] утверждает, что схемы КЗВ при совместном применении ДШ и пиротехнического реле с увеличенным расстоянием между одновременно взрываемыми скважинами малоэффективны. Другие авторы [1, 22] опасаются давать рекомендации по реализации способа с использованием детонирующего шнура по причине возможного подбития соседних скважин в момент взрыва, что может привести к потенциальным отказам. Поэтому для реализации данных схем рекомендуется применять НСИ или электронные детонаторы, так как имеется возможность реализовать широкий спектр степеней замедления.

Перечень регулируемых параметров довольно велик, как и сочетание горно-геологических условий месторождений, поэтому сложно стандартизировать условия, при изменении которых качество гранулометрического состава будет гарантированно оптимальное, поэтому рекомендуется рассматривать каждый случай индивидуально.

1.3 История промышленных взрывчатых веществ в России с конца XX века по настоящее время

1.3.1 Взрывчатые вещества

Применение взрывчатых веществ для разрушения массива горных пород на сегодняшний день является наиболее эффективным способом рыхления и

подготовки горной массы к выемке. По мнению авторов [39] тенденция использования данного способа сохранится ещё на протяжении 35-50 лет.

В настоящее время благодаря техническому прогрессу доступны различные типы промышленных взрывчатых веществ (далее – ПВВ). Номенклатура ПВВ представлена широким перечнем взрывчатых веществ, используемых в горном деле, при прокладке тоннелей, нефте-и газопроводов, прокладке авто- и железнодорожных магистралей и т.д [40]. База промышленных взрывчатых веществ постоянно пополняется, поэтому необходимо вести актуальный реестр всей представленной номенклатуры. Ведение баланса производства, распространения, применения промышленных взрывчатых веществ и его движения от одного юридического лица к другому осуществляется Министерством промышленности и торговли Российской Федерации [41].

Взрывчатые вещества по физическому состоянию подразделяются на: порошкообразные, шнековые, прессованные, литые, гранулированные [42], а также на водосодержащие, эмульсионные. В свою очередь данные типы можно сгруппировать по содержанию или отсутствию основных взрывчатых компонентов, например, порошкообразные и водосодержащие ВВ разделяются на безнитроглицериновые и нитроэфирсодержащие, гранулированные на бестротилосодержащие гранулиты и тротилосодержащие граммониты [43].

Такой разнообразный ассортимент ПВВ, как сейчас, был не всегда. Чтобы отследить хронологическую последовательность появления новых взрывчатых веществ в России, необходимо обратиться к научным работам тех лет.

Долгое время на советских горнодобывающих предприятиях применяли тротилосодержащие взрывчатые вещества, такие как гранулотол [44], граммонит, акватол [45], акванал и др. В конце 90-х годов в России еще применялись тротилосодержащие ВВ, в основном это гранулированные и порошкообразные гранулированные аммиачно-селитренные взрывчатые вещества, сенсibiliзиро-ванные тротилом, что является отличительной особенностью в сравнении с мировой тенденцией отказа от тротила. Причиной этому является то, что

тротил обладает такими положительными характеристиками, как высокие бризантные свойства, сравнительно невысокая чувствительность к механическим воздействиям, химическая нейтральность и высокая химическая стойкость даже спустя долгое время [43, 46]. Но в то же время тротил обладает и негативными особенностями, а именно высокой стоимостью и высокой токсичностью, канцерогенностью, что отрицательно влияет на здоровье взрывперсонала и негативно сказывается на экологии. Автором [46] отмечено, что при зарядании скважин тротилосодержащим ВВ разрешён только ручной способ, путём высыпания из мешка в скважину ВВ, тем самым возможно возникновение просыпей, а также пыление тротила, что небезопасно для персонала, выполняющего работы, и может наносить вред окружающей среде.

ВостНИИ были произведены замеры выделения ядовитых газов в окружающую среду при производстве взрывных работ, в ходе которых было установлено, что при взрывании с использованием гранулола выделяется в 20 раз больше оксидов азота, чем при взрывании эмульсионного взрывчатого вещества порэммит [46]. Также другой веской причиной постепенного отказа от применения тротилосодержащих взрывчатых веществ является его резкое удорожание, в 90-х годах стоимость тротила увеличилась почти в 10 раз [47]. На их замену пришли ВВ следующих типов: гранулит, игданит, ANFO, горячельющиеся ВВ, ЭВВ порэммит [45, 46]. Об этих типах ВВ речь пойдёт ниже.

Но несмотря на то, что постепенно наблюдался уход от применения тротила в основном заряде ВВ, данное ВВ до сих пор используется в качестве основного компонента в шашках-детонаторах, таких как: тротиловая шашка-детонатор Т-400Г, тротило-гексогеновая шашка-детонатор ТГ-500, тротиловая шашка-детонатор ТП-200 [44] и другие, что обусловлено вышеперечисленными технологическими свойствами тротила.

Коренное изменение ассортимента промышленных взрывчатых веществ в мире произошло в 80-е годы прошлого века в связи с появлением эмульсионных взрывчатых веществ. В свою очередь, в России был отличный от мировой практики вектор развития ПВВ, направленный на использование

гранулированных и порошкообразных патронированных аммиачно-селитренных веществ, сенсibilизированных тротилом [48].

Взрывчатые вещества с содержанием тротила подразделяются на гранулированные ВВ, которые содержат гранулированный и чешуйчатый тротил; и порошкообразные патронированные аммониты, которые содержат в себе тротил в порошкообразном виде от 15-20 % [49].

Гранулотол и граммонит использовали повсеместно на территории СССР и на территории постсоветского пространства. Например, автор статьи [50] приводит следующую статистику: объем гранулотолов и тротилосодержащих ВВ в качестве водоустойчивого ВВ на карьерах Украины в 2002 году составлял 90% от всех применяемых ВВ. Даже на сегодняшний день некоторые крупные предприятия по производству промышленных взрывчатых веществ выпускают гранулотол по ГОСТ 25857-83 и граммонит различных марок по ГОСТ 21988-76. Такой долгий период применения взрывчатых веществ, содержащих в качестве основного компонента тротил, обосновывается главным преимуществом данного ВВ – водоустойчивостью: известно, что гранулотол возможно применять даже в скважинах с проточной водой.

Взрывчатые вещества данного типа преимущественно отгружаются с завода-изготовителя, что влияет на стоимость доставки и время доставки, а также делает зависимыми горные предприятия-потребители, так как имеется необходимость долгосрочного планирования производства взрывных работ в зависимости от остатков ВВ с учётом будущих поставок, что влечёт за собой необходимость размещения большого объёма ВВ в складских помещениях. Предприятием изготовителем ВВ [51] было предложено выпускать концентрат граммонитов–К (ТК) и КЗ (ТКЗ), с содержанием тротила 30% для дальнейшего его разбавления потребителями, но это не нашло широкого применения из-за начавшегося производства невзрывчатых компонентов эмульсионных взрывчатых веществ на местах применения, о котором будет сказано дальше.

Резкий переход от гранулированных тротилосодержащих ВВ к бестротильным гранулированным ВВ по типу Аммиачная селитра + дизельное топливо (ANFO), более известное как игданит, случился в момент резкого удорожания тротила, который произошёл в 90-е года на горнодобывающих предприятиях стран бывшего Советского Союза. Например, за рубежом уже в 50-х годах активно внедряли ANFO, при этом предпосылки к созданию ВВ такого типа были сделаны проф. Г. П. Демидюком ещё в 30-х годах прошлого столетия в СССР, оно представляло из себя смесь кристаллической аммиачной селитры и керосина, но его формула была несовершенной [45].

Также к данному шагу подталкивали и другие моменты: совершенствование взрывных работ в направлении развития механизации производимых процессов заряжания, организация производства ВМ на местах их применения. Данная практика продемонстрировала свои положительные результаты на рудниках Жезгазгана при переходе от патронированных ВВ к взрывчатым веществам местного приготовления. Именно в 1990-1993 года стала проявляться экономическая выгода применения гранулита А-6 в подземных условиях [52].

Преимущества ANFO заключается в следующем: низкая себестоимость сырья, возможность изготовления на местах применения, механизация процессов заряжания, что значительно облегчает труд взрывников, даёт возможность регулирования компонентного состава, снижает класс опасности ВВ. Игданит классифицируется как менее опасный при транспортировке в сравнении с тротил содержащим ВВ граммонитом 79/21, основным компонентом которого также является аммиачная селитра. Игданит относится к классу 1, подкласс 1.5 группе совместимости D, а граммонит 79/21 относится к классу 1, подкласс 1.1 группе совместимости D по хранению и транспортировке согласно техническому регламенту Таможенного союза «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» ТР ТС 028/2012 от 20.07.2012.

При этом переход к новому типу ВВ происходил с устранением несовершенств нового состава и адаптацией в условиях постсоветской сырьевой базы

и геологических особенностей карьеров. Использование гладкой аммиачной селитры взамен гранулированной приводило к расслоению состава; кроме того, такие ВВ неводоустойчивы и малопригодны для пород высокой крепости [47]. Проблема расслоения составов наиболее многогранная, так как включает в себя несколько факторов, а именно в первую очередь это отсутствие химических связей компонентов. Так как ANFO является механической смесью компонентов, в них может происходить расслоение состава и миграция дизельного топлива. Изменение впитывающей способности гранул АС за счёт переизмельчения приводит к слеживаемости селитры. Но есть методы, которые могут помочь стабилизировать составы это - введение в состав ВВ специальных поверхностно-активных веществ, а именно добавление специальных добавок в дизельное топливо, и применение пористой селитры взамен гранулированной [53].

Усовершенствование технологий изготовления взрывчатых веществ промышленного назначения произошло с появлением водосодержащих или водонаполненных взрывчатых веществ. Основной компонент водосодержащих ВВ – нитрат аммония, пластифицированный водным желатином. Это текучее ВВ, которое пригодно для механической подачи по шлангу. Данный тип ВВ подразделяется по физическому состоянию на суспензии (сларри) и эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) [54]. Появление данного типа ВВ датировано 80-е годами прошлого столетия, когда в развитых странах стало развиваться производство простейших и водосодержащих ВВ, изготавливаемых вблизи мест применения [55].

Как таковые, суспензии являются загущенным раствором аммиачной селитры, в которой равномерно распределена твёрдая фаза с добавлением загустителя. В качестве твёрдой фазы использовались такие сенсibiliзаторы, как тротил, дисперсный алюминий, бездымный порох, твёрдые ракетный топлива и др. [47]. Подвидом суспензий являются горячельющиеся ВВ.

Горячельющиеся ВВ представляет из себя смесь горячего раствора окислителя (ГРО), загустителя и тротилосодержащего ВВ, данное ВВ

производилось на местах применения путём смешения компонентов в смеси-тельно-зарядной машине (СЗМ) [56]. Разработка данного типа ВВ началась в 70-х годах прошлого столетия, и выделялась среди технологий тех времён тем, что при повышенных температурах ($t = 80^{\circ}\text{C}$) горячельющиеся ВВ было подвижным, но при остывании затвердевало. Главным компонентом, отвечающим за это свойство, является загуститель гуаргама (Индия). При замене оригинального загустителя на его аналоги основное свойство терялось и ВВ растекалось по трещинам через стенки скважины [45], также наблюдалось расслоение заряда. Примером горячельющихся ВВ является Акватол. По сведениям авторов [57], с 1996 на карьерах с сульфидсодержащими рудами применялся акватол, стоимость которого была в два раза ниже штатных заводских ВВ. Но акватол имел короткий срок хранения в скважине, порядка 3-5 суток, и содержал в себе 20% канцерогенного гранулозола, поэтому в 1998 было принято решение переходить на бестротиловые эмульсионные взрывчатые вещества.

Эмульсионные взрывчатые вещества возникли при устранении некоторых недостатков суспензионных водосодержащих ВВ типа «сларри».

ЭВВ представляет из себя смесь высококонцентрированного раствора нитрата аммония (окислитель) с невзрывчатым горючим (нефтепродуктом) [58]. Иными словами, это сенсibilизированная обратная эмульсия, где окислительная фаза является дисперсной фазой, а топливная фаза – дисперсионной средой [59].

В 80-х годах прошлого столетия в ГосНИИ «Кристалл» были начаты исследования по созданию ЭВВ, сенсibilизированного газовыми пузырьками [45]. Образующиеся при газогенерации пузырьки являются горячими точками, которые поддерживают нормальный процесс детонации, также иногда вместо химической сенсibilизации используют стеклянные микросферы. Первым отечественным ЭВВ является Порэмит.

Главным преимуществом эмульсионных взрывчатых веществ является высокая безопасность производства, так как невзрывчатые компоненты ЭВВ

изготавливаются на местах применения механизированным способом, а ВВ образуется непосредственно в скважине при смешении компонентов, благодаря этому освобождаются места хранения на складах взрывчатых материалов. Также при применении данного типа ВВ автором [60] отмечается видимый экономический эффект, который складывается из низкой стоимости, возможности полной механизации приготовления, транспортирования, заряжения на местах применения, повышенной безопасности и нормального качества дробления горной массы. Авторы [61, 62] дополняют перечень преимуществ эмульсионных взрывчатых веществ следующими положительными качествами: высокая водоустойчивость, возможность изменения энергетических характеристик для разных условий применения, возможность регулирования составов ЭВВ в зависимости от физико-механических свойств массива, а также улучшение экологической обстановки в местах ведения взрывных работ. Согласно данным [63], в 2020 году в России из общего израсходованного количества взрывчатых веществ 67 % приходилось на эмульсионные ВВ, изготавливаемые на местах их применения. Но, несмотря на вышеперечисленные факторы, имеются слабые места, такие как уход колонки заряда в сильно-трещиноватых породах, зарядание в скважинах, которые могут быть завалены, в следствии чего возникает потенциальное заземление зарядного шланга, ограничение применения в породах с высокой крепостью. При добавлении в ЭВВ сухой аммиачной селитры или смеси аммиачной селитры с дизельным топливом (ANFO) недостатки ЭВВ компенсируются, тем самым данный тип ВВ становится мощнее за счёт уменьшения в составе массовой доли воды. Кроме того, удешевление состава достигается путём снижения доли дорогих компонентов (эмульгаторов) [64].

Для повышения энергетических характеристик эмульсионного взрывчатого вещества на этапе образования ЭВВ непосредственно в скважине в эмульсионную матрицу (далее – ЭМ) добавляют смесь ANFO или аммиачную селитру. Опыт применения таких добавок показывает, что при этом снижается

вязкость эмульсии и возможно использовать данную смесь при взрывании в трещиноватых горных породах [54].

Существуют различные компонентные соотношения эмульсионной матрицы и сухой селитры (гладкой и пористой) или смеси АС+ДТ, например 30/70 (30 аммиачной селитры или ANFO и эмульсионной матрицы) [65].

1.3.2 Средства инициирования

Существует несколько способов инициирования колонки заряда: огневой с применением огнепроводного шнура, электроогневой, электрической, детонирующим шнуром, неэлектрическими системами инициирования [66], а также инициирование с применением электронных систем инициирования. Рассмотрим наиболее распространённые на сегодняшний день способы инициирования: инициирование детонирующим шнуром и неэлектрическими системами инициирования.

Детонирующий шнур предназначен для передачи детонации взрывчатым веществам и различным системам инициирования, допущенным к применению в установленном порядке, при проведении взрывных работ на земной поверхности и в подземных выработках рудников и шахт, не опасных по газу и (или) пыли согласно ГОСТ РО 1375-001-2010.

Первый прототип современного детонирующего шнура был предложен в 1879 году, он представлял из себя хлопчатобумажную оболочку, которая была начинена гранулированным пироксилином [67].

Современный детонирующий шнур представляет собой сердцевину из сыпучего бризантного взрывчатого вещества ТЭНа, реже гексогена, с направляющими нитями или без, заключённую в обмотки из нитей и водоизолирующую оболочку, оболочка состоит из трех слоёв – внутреннего, внешнего и наружного. Скорость детонации детонирующего шнура составляет в среднем 6,5 км/с [67].

Детонирующий шнур инициируется детонаторами любого типа, при этом в случае инициирования заряда отрезком ДШ детонатор непосредственно

в заряде не размещается, инициирование происходит за счёт поступления инициирующего импульса через взрывную сеть (бескапсюльный способ инициирования).

Для осуществления короткозамедленного взрывания применяются пиротехнические реле-замедлители типа РТ или КЗДШ, РП-Д [68].

Причины, по которым детонирующий шнур применяется при производстве взрывных работ по настоящее время, следующие: сравнительная простота использования; возможность одновременно взрывать большое число зарядов любой конструкции в сухих и обводнённых условиях; безопасность по отношению к блуждающим токам [66].

Из недостатков применения детонирующего шнура следует отметить такие: отсутствие контроля с помощью специализированных приборов исправности взрывной сети [69], невозможность дистанционной проверки взрывной сети [66]. Несмотря на то, что ДШ к удару и трению практически не чувствительны и от огня не взрываются, навеска взрывчатого вещества на 1 погонный метр значительно больше по сравнению с неэлектрическими системами инициирования, что представляет опасность при обращении с ДШ.

Детонирующий шнур применяют совместно с взрывчатыми веществами, допущенными к постоянному применению. В статье [43] описаны примеры совместного применения детонирующего шнура с эмульсионным взрывчатым веществом Порэммит взамен ранее применяемых игданита и гранулолола. По результатам опытно-промышленных испытаний было установлено, что при этом гранулометрический состав взорванной горной массы аналогичен полученному при использовании гранулолола.

В тоже время, если брать во внимание тот факт, что содержание взрывчатого вещества в детонирующем шнуре довольно высокое (для наиболее распространенной марки детонирующего шнура ДШЭ-12 этот показатель составляет 12 грамм взрывчатого вещества на погонный метр), возможно воздействие детонационного импульса на заряд, что приводит к схлопыванию

пузырьков в колонке заряда ЭВВ, тем самым повышается вероятность возникновения отказов.

В работах [70, 71] было отмечено, что при инициировании детонирующим шнуром нечувствительных взрывчатых веществ, таких как эмульсионные взрывчатые вещества, ДШ может способствовать нежелательному уплотнению и выжиганию ЭВВ, что снижает эффективность последнего.

При использовании детонирующего шнура возможны отказы. Причины отказов могут следующие: скрытые дефекты и брак при производстве детонирующего шнура, по причине пониженной чувствительности, которая приводит к отказам при передаче детонации на соединениях ДШ, а также приводит к пониженной детонационной способности, вследствие этого происходит затухание детонации по длине шнура [72]. Также отказы в детонирующем шнуре могут быть не только по причине заводского брака, но и неправильного обращения на местах применения, а именно: механическое нарушение целостности сетей ДШ, флегматизация взрывчатой сердцевины водой и нарушение правил монтажа взрывной сети. Все эти причины можно разделить на три группы: конструкционные, производственные и эксплуатационные [73].

Для того, чтобы снизить вероятность возникновения отказа при взрывании с использованием ДШ, внутрискважинную сеть дублируют, то есть применяют две нити ДШ, также к этому отсылает пункт 179 Федеральных норм и правил № 494 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения», гласящий, что внутрискважинная сеть должна дублироваться при глубине скважин более 15 метров. Рекомендуется прокладывать сдвоенные нити как можно на большем протяжении [66].

Требования, которым должен отвечать детонирующий шнур во избежание отказов, следующие: скорость детонации ДШ не должна отклоняться больше чем на $\pm 10\%$ от заявленной в технической документации; концы ДШ должны быть герметизированы; сердцевина ДШ должна быть выполнена

равномерной и непрерывной; эластичность детонирующего шнура должна сохраняться после четырехкратного изгиба; 200 г прессованная тротиловая шашка должна детонировать от двух витков ДШ на боковой поверхности шашки [69].

При использовании двух ниток детонирующего шнура в два раза увеличивается количество взрывчатого вещества на один погонный метр сети. Это приводит к повышению вероятности выгорания скважинного заряда при обратном и многоточечном инициировании от высокомошных детонирующих шнуров [74]. Выбор способа инициирования при взрывании скважинных зарядов детонирующим шнуром является ключевым фактором. Авторы статьи [75] подробно изучали вопрос обратного способа инициирования детонирующим шнуром и установили, что при данном способе инициирования у части ВВ (АС-ДТ, эмульсионного, водногелевого ВВ) в месте контакта с детонирующим шнуром происходит потеря энергии первого за счёт процесса дефлаграции или переуплотнения ВВ. Поэтому при инициировании скважинных зарядов ДШ применяют прямое инициирование.

Неэлектрические системы инициирования были разработаны в начале 80-х годов в Швеции и назывались НСИ NONEL. НСИ состоит из капсуля-детонатора, соединённого с ударно-волновой трубкой. Трубка состоит из нескольких слоёв, внутренний слой которой покрыт реактивным веществом. В момент получения инициирующего импульса ударная волна проходит по всей длине трубки, инициируя капсуль-детонатор, но при этом не разрушая волновод.

Навеска реактивного состава в волноводе может варьироваться, но в среднем составляет 18 мг/м. Детонация при такой низкой концентрации ВВ достигается за счёт канального эффекта внутри трубки. Также благодаря этому эффекту не происходит наружного энерговыделения и колонка заряда вокруг ударно-волновой трубки не выгорает [66]. Скорость распространения ударной волны в среднем составляет 2 км/с. Имеются различные интервалы замедлений.

Неэлектрические системы инициирования имеют существенные преимущества: возможность создавать внутрискважинное замедление, за счёт этого поверхностная сеть и внутрискважинная сети срабатывают в разное время, что позволяет исключить отказы зарядов из-за обрывов подводящих участков взрывной магистрали в скважинах (подбой скважин). За счёт этого взрывы становятся более управляемыми, а также снижается сейсмическое воздействие на близлежащие объекты. Кроме того, отмечается нечувствительность к электрическим и электромагнитным воздействиям [69]; уменьшение временных затрат на монтаж взрывной сети; разбор отказавших зарядов становится более безопасным, так как волновод нечувствителен к механическим воздействиям по сравнению с детонирующим шнуром.

Наряду с положительными аспектами использования НСИ, также имеются и недостатки, например такие, как невозможность проведения приборного контроля правильности монтажа взрывной сети.

Внедрение в производство первых НСИ в России началось в 1995 году, в тот момент отмечались недостатки работы с новой системой: для проведения монтажа взрывной сети требовались квалифицированные специалисты инженерно-технического состава, в противном случае возникали отказы по причине неправильного монтажа взрывной сети [76], проблемы с термической устойчивостью внутрискважинных волноводов в месте перегиба при зарядании горячельющихся ВВ (Акватол) с температурой 85°С. Исходя из этого, некоторые предприятия применяли комбинированную схему монтажа, используя одновременно НСИ и ДШ, при этом сохранялось преимущество НСИ – создание внутрискважинного замедления и ДШ – закольцовывание поверхностной сети [77].

На сегодняшний день отказы при производстве взрывных работ с применением НСИ встречаются гораздо реже, но если они происходят, то чаще всего по причине заводского брака или человеческого фактора при монтаже взрывной сети. Есть несколько видов дефектов, которые возникают при производстве НСИ и их комплектующих. Возможные дефекты при производстве

волновода таковы: пропуски или разрывы во внешнем слое волновода; наличие пустот в волноводе (отсутствие напыления ВВ); наличие влаги во внутреннем слое волновода. Капсюли-детонаторы признаются дефектными в случае, если выявлены следующие показатели: дефекты при запрессовке первичного или основного ВВ; отсутствие основного заряда или повышенное содержание основного заряда ВВ; наличие трещин или ржавчины на корпусе капсюля. В процессе сборки НСИ также могут быть допущены технологические ошибки или неточности, которые также могут повлиять на иницирующую способность изделия, например, неправильная установка волновода, неправильный обжим капсюля и т.д.

Все вышеперечисленные характеристики должны контролироваться заводом-изготовителем, и при их обнаружении партия должна отбраковываться во избежание отказов при производстве взрывных работ.

1.4 Постановка задач исследования

Проведённый анализ научной литературы, результатов экспериментальных и аналитических исследований показал, что имеющиеся исследования по подбору параметров БВР при взрывании детонирующего шнура в скважинных зарядах ЭВВ с целью получения качественного гранулометрического состава не в полной мере учитывают все необходимые факторы.

В существующих исследованиях раскрыта тематика по имеющимся методам оценки гранулометрического состава. Анализируя работы различных исследователей, следует отметить различные подходы авторов по разграничению прямых и косвенных методов определения гранулометрического состава. Ориентируясь на проведённый обзор всех методов, для оценки гранулометрического состава взорванной горной массы нами был выбран фотопланиметрический метод.

Путём анализа имеющихся литературных источников выделено две группы параметров, влияющих на качество гранулометрического состава это природные и техногенные параметры. Авторы современных исследований

солидарны, что для получения качественного гранулометрического состава при создании проектов БВР необходимо учитывать физико-механические свойства массива, его геологические особенности.

В то же время имеются неоднозначные мнения учёных по поводу влияния на качество дробления таких свойств горных пород, как трещиноватость и обводненность. В сочетании с различными условиями может наблюдаться как ухудшение, так и улучшение гранулометрического состава. Рекомендуется индивидуально рассматривать каждый сценарий во избежание получения негабаритных кусков породы.

Параметры БВР, которые могут влиять на качество гранулометрического состава, представлены в полном объёме, но в силу того, что параметры БВР неразрывно связаны с геологическими особенностями месторождения, то и в данном случае не может быть дано универсальных рекомендаций по получению качественного гранулометрического состава, такие параметры подбираются индивидуально для каждого месторождения, основываясь на закономерностях, выявленных авторами. Среди рекомендаций выделяется регулирование степени дробления с помощью схем инициирования, а именно метод короткозамедленного взрывания. Авторами отмечается затруднение реализации данного метода с использованием детонирующего шнура в связи с невозможностью создания широкого перечня интервалов замедления с помощью ДШ, поэтому данный метод с целью улучшения качества дробления массива в данном исследовании рассматриваться не будет.

Исторический экскурс по внедрению взрывчатых веществ и изделий на их основе показал, что совместное применение эмульсионных взрывчатых веществ и детонирующего шнура имело место быть, но в силу давности проведённых экспериментов не имеется конкретных результатов по полученному качеству дробления, в исследованиях оно было охарактеризовано как удовлетворительное в сравнении с результатами взрыва с применением гранулированных ВВ. Некоторыми авторами выдвинуты предположения касательно

влияния ДШ на колонку заряда ЭВВ в сравнении с отсутствием данного влияния при использовании неэлектрических систем инициирования.

Основываясь на вышесказанном, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить перечень горно-геологических условий и параметров БВР в условиях разработки апатит-нефелинового месторождения открытым способом, наиболее сильно влияющих на качество гранулометрического состава при взрывании с применением неэлектрических систем инициирования, а также ДШ, путём анализа графиков кумулятивных кривых гранулометрического состава;

2. Сравнить характер распределения гранулометрического состава при взрывании неэлектрическими системами инициирования и детонирующим шнуром в аналогичных горно-геологических условиях и параметрах БВР;

3. Выявить горно-геологические условия и параметры БВР, при которых качество дробления взорванной горной массы при взрывании ДШ сопоставимо с получаемым качеством с применением НСИ;

4. Выявить условия, при которых взрывание с ДШ не рекомендуется применять по причине некачественного гранулометрического состава взорванной горной массы.

ГЛАВА 2 ВЫБОР ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

2.1 Обзор современных программных комплексов для определения и прогнозирования качества дробления взорванной горной массы

Применение специализированных программных комплексов с целью определения и прогнозирования гранулометрического состава взорванной горной массы выводит горнодобывающие предприятия на качественно новый уровень, это выражается в следующих критериях: повышение эффективности производимых работ; рост автоматизации процессов, вследствие чего снижается проявление человеческого фактора в производстве, тем самым повышается уровень безопасности производимых работ [78]. При аккумулировании статистической информации о качестве гранулометрического состава в рамках одного горнодобывающего предприятия существует возможность мониторинга влияния физико-механических свойств пород и параметров БВР на дробление массива [79].

В связи с развитием научно-технического прогресса выбор программных продуктов довольно широкий. На российском рынке программных комплексов для анализа степени раздробленности горных пород и прогнозирования гранулометрического состава представлена продукция как российского, так и иностранного производства. В силу того, что многие иностранные производители прекратили свою деятельность на территории Российской Федерации по причине сложной геополитической ситуации, применение программных комплексов зарубежного происхождения осложняется в связи с рядом возникших препятствий, таких, как отсутствие сервисной и лицензионной поддержки, ограничение в поставке оборудования и комплектующих, прекращение деятельности иностранных компаний [80]. Автор [11] также отмечает, что сложившаяся ситуация с повсеместным применением иностранных продуктов привела к контролю российского рынка высокотехнологичной

продукции зарубежными производителями, что повлекло к вытеснению отечественной продукции и к приостановке развития технологий. Но несмотря на имеющиеся сложности на российском рынке специализированного программного оборудования для горнодобывающей отрасли, отечественные изготовители адаптировались к изменившимся условиям и стали активно развиваться в данном направлении.

В силу вышеуказанных причин, а также потому, что тематика изучения методов оценки и прогнозирования качества гранулометрического состава на данный момент является динамично развивающимся, перспективным и актуальным как никогда направлением, занимались и продолжают заниматься изучением данных вопросов следующие учёные: А. В. Баженова, Ю. И. Виноградов, С. Д. Викторов, В.С. Великанов, Н. Н. Казаков, В. М. Кузнецов, П. С. Симонов, С. Т. Соколов, С. В. Хохлов, А. В. Шляпин, С. А. Шустерман, Q. Guo, Q. Liu, F., Ouchterlony F., Shi, X. Wang, Y. Wang, Z. Xiang, S. Yang, M. Zhao и другие.

Для выбора системы анализа гранулометрического состава автор [78] рекомендует обращать внимание на следующие критерии: погрешность измерения; информативность полученных данных; скорость обработки данных; ресурсы персонала; визуализация полученных результатов; совместимость с другими программными комплексами.

Как было отмечено выше, ведущую роль в разработке программных комплексов по анализу гранулометрического состава занимают мировые производители. Авторы [6, 13, 81] отнесли к этому перечню наиболее распространённые программные продукты такие как: канадская Wipfrag, Split и CIAS разработки США, IPACS (Швеция), FragScan (Франция), Tuscips (Германия), Power Sieve (Австралия), Fragalyst 3.0 (Индия). Рассмотрим некоторые из них, а также другие существующие программные продукты.

Прежде всего рассмотрим программные комплексы, основанные на фотопланиметрическом методе. Как было подчёркнуто ранее, фотопланиметрический метод заключается в определении количественных соотношений

фракции различной крупности по поверхности, в предположении, что это соотношение характерно для всего объёма.

К таким программам относится PowerSieve разработки компании Orica. Для получения гистограммы распределения гранулометрического состава (рисунок 2.1) необходимо произвести съёмку откалиброванным фотоаппаратом или сфотографировать активный забой с предметом, размер которого известен, для того чтобы задать масштаб. Важно соблюдать угол фотографирования, он не должен отклоняться от 90° , в противном случае будет возникать погрешность. В процессе обработки фотография преобразовывается в черно-белое изображение, где белый – порода, черный – пустота. Размер куска определяется по расстоянию между черными пикселями, перед определением крупности кусков породы необходимо удалить лишнее во избежание неправильного расчёта.

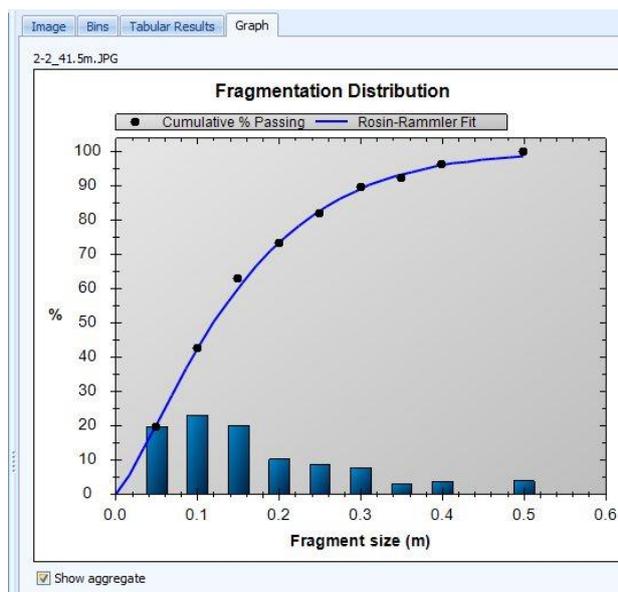


Рисунок 2.1 – Визуализация распределения гранулометрического состава в виде графика и гистограммы в программе PowerSieve

Аналогичный программный модуль представлен группой компаний КАИ. Модуль «Гранулометрический состав» входит в геоинформационную систему К-Mine [82]. С помощью данной программы возможно анализировать фотографии, полученные в забое, в кузове самосвала, а также на конвейерной ленте и получать статистические показатели гранулометрического состава по

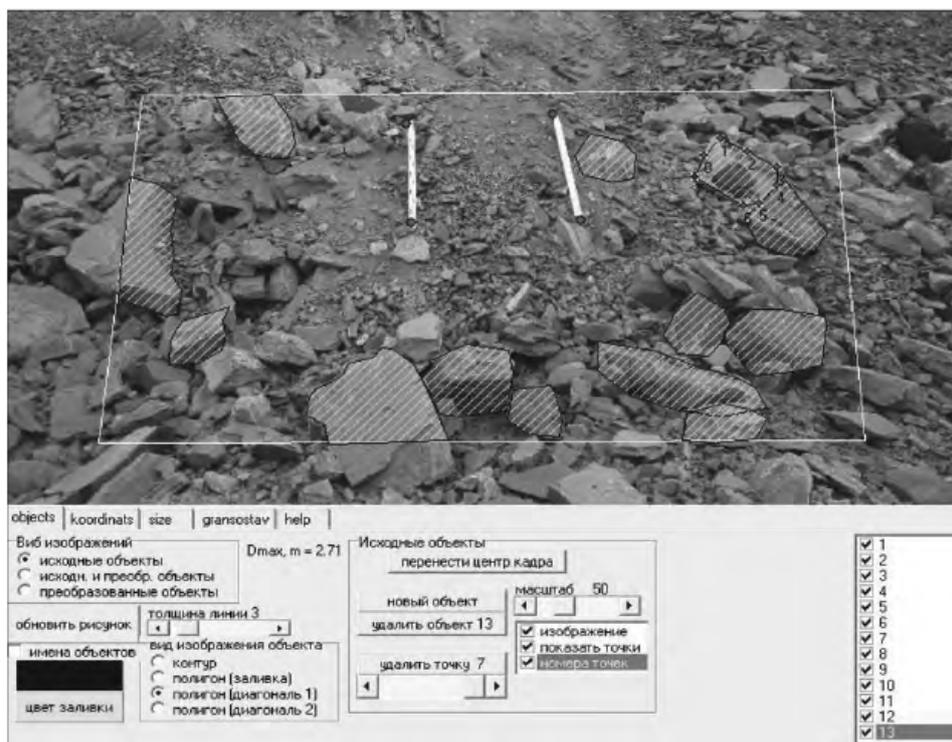


Рисунок 2.3 – Обработка фотопланграмм в программе «Грансостав-2008»

Преимуществом использования фотопланиметрического метода является отсутствие необходимости приобретать специализированное оборудование для анализа, так как можно использовать фотоаппарат; оперативное получение данных по сравнению с ситовым анализом; привычный порядок обработки материалов, так как данный способ уже используется несколько лет. Из недостатков можно выделить то, что фотографии могут быть сняты с искажениями из-за наклонной стенки уступа, возможны небезопасные условия при выполнении фото забоя, большие затраты времени на проведение замеров и их обработку по сравнению с более современными методами [87].

Далее рассмотрим программные продукты, реализующие фотопланиметрический метод с использованием специализированного оборудования. Последовательность обработки изображений имеет схожий принцип для аналогичных программных продуктов. Последовательность действий такова [13, 79, 88]:

- фотографирование забоя с использованием специализированного оборудования;

- загрузка изображений в персональный компьютер (если используется планшет, то этот шаг не требуется);
- предварительная обработка изображений, а именно, выделение контуров объектов, ручная корректировка;
- масштабирование (если применимо);
- выгрузка статистического распределения;
- корректировка статистического распределения (если требуется).

Пример такого продукта является программа Wip Frag – разработка компании Wipware Inc. Вместо специализированного устройства используется планшет или планшет, на который необходимо установить приложение. Результат анализа может быть выражен несколькими способами:

- построение кумулятивной кривой с процентным содержанием подрешетного продукта;
- построения кумулятивной кривой с процентным содержанием надрешетного продукта;
- таблица со сводными данными;
- гистограмма [89].

На рисунке 2.4 изображена выкопировка из программы Wip Frag, представленная в инструкции [89].

Программный комплекс Wip Frag для описания распределения гранулометрического состава применяет две функции Розина-Раммлера и Swebrec.

Перейдём к рассмотрению другого продукта, в котором для описания распределения гранулометрического состава также применяются функции Розина-Раммлера и Swebrec и реализуется фотопланиметрический метод. Это портативный прибор PortaMetrics разработка канадской корпорации Weir Motion Metrics. С помощью данного планшета можно фотографировать развал горной массы, а также производить обработку и получать отчёт о результатах анализа гранулометрического состава. В процессе фотографирования забоя отображается угол наклона и расстояние до забоя, для того чтобы минимизировать оптические искажения при фотографировании. Также фотографиям

задаются метки, для идентификации места забоя и группировки фото с одного места съёмки. Результат анализа гранулометрического состава представлен в виде графика распределения крупности и приведён на рисунке 2.5.

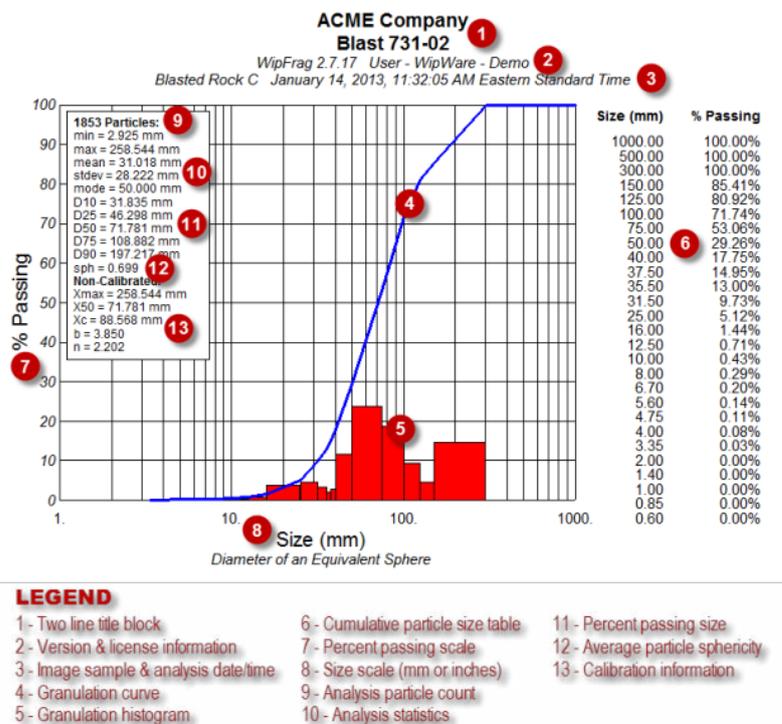


Рисунок 2.4 – График кумулятивной кривой при анализе результатов в программе Wip Frag [89]. В легенде цифрами обозначены:

- 1 – идентификация блока по двум значениям; 2 - версия программы и информация о лицензии; 3 – фотография пробы, дата и время анализа;
- 4 – кривая, описывающая гранулометрический состав; 5 – гистограмма;
- 6 – таблица с процентным содержанием частиц определенного размера;
- 7 – шкала прохождения материала, %; 8 – шкала с размерами, мм; 9 – количество анализируемых частиц; 10 – статистический анализ; 11- процент прохождения частиц; 12 – средняя степень сферичности частиц; 13 – данные о калибровке.

Многие российские горнодобывающие предприятия и предприятия стран СНГ использовали данный продукт для анализа качества производимых взрывов как в условиях опытно-промышленных испытаний, так и при проведении массовых взрывов [78, 90, 91, 92].

При рассмотрении положительных аспектов анализа гранулометрического состава с применением специализированного оборудования отмечается следующее: наличие специализированных функций для получения

фотографий с минимальным искажением изображения, таких как: угол наклона, расстояние до забоя; метки с координатами фото; возможность настройки автоматического масштабирования. Данному методы также при- сущи недостатки, так как человек все ещё выполняет работы в активном забое, где ведётся погрузка горной массы, тем самым работник может быть подвер- жен опасным факторам, также затраты по времени, так как обработка фотогра- фий выполняется в полуавтоматическом режиме.

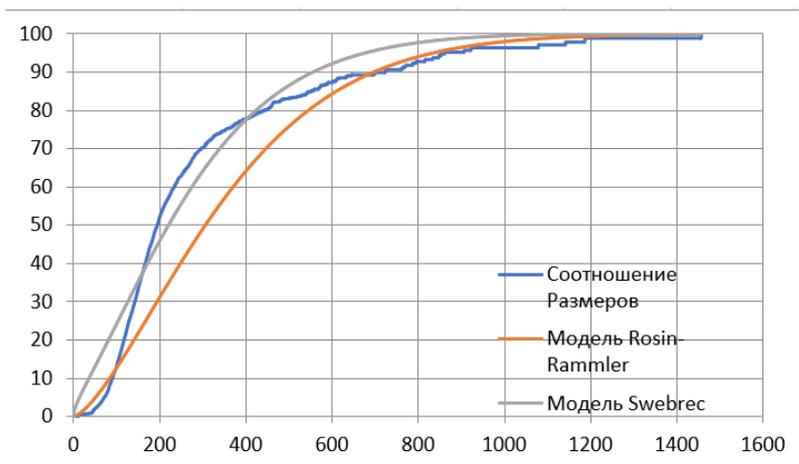


Рисунок 2.5 – График распределения крупности в выгруженном отчёте с устройства PortaMetrics

Для видеосъёмки массовых взрывов, а также для фотографирования развала взорванной горной массы все чаще на горнодобывающих предприятиях используют беспилотные летательные аппараты (БПЛА) или дроны. Этот способ называется аэрофотосъёмка, его можно отнести к фотопланиметрическому методу, так как полученные фотоматериалы загружаются в программные продукты такие как PoverSieve, Wip Frag, ГГИС Геомикс Granulometric (Грансостав). О большинстве из них было написано ранее, кроме ГГИС Геомикс Granulometric (Грансостав). Данный программный комплекс отечественного производства входит в состав модуля горно-геологической информационной системы Геомикс. Данный программный модуль используется для анализа гранулометрического состава взорванной горной массы при аэрофотосъёмке [14].

При выполнении аэрофотосъёмки развала горной массы с целью получения качественного фотоматериала нужно руководствоваться правилами

сбора данных. Автор [24] отмечает, что необходимо учитывать перекрытие между фотографиями, расстояние до объекта съёмки, а также освещённость и погодные условия, технические возможности камеры, а именно фокусное расстояние объектива и разрешение камеры, также немаловажным является полётное задание. Преимуществом съёмки с использованием БПЛА является то, что съёмку можно проводить с труднодоступных ракурсов, куда сложно попасть при ведении съёмки в ручном режиме.

Одним из технологичных методов оценки качества гранулометрического состава является применение стереометрического метода.

Автор [93] обобщил последовательность действий при оценке качества гранулометрического состава стереометрическим методом, в различных программных комплексах некоторые пункты могут быть пропущены или заменены другими:

- получение стереоизображения развала породы путём использования стереокамеры;
- трёхмерный анализ для всего развала;
- объем блока и анализируемые диаметры кусков породы на блоках в условиях ведения открытых горных работ;
- частотный анализ блоков;
- статистический анализ;
- распределение гранулометрического состава.

В силу того, что с применением стереокамеры сбор данных осуществляется автоматически, возможности выбора места сбора стереоизображений расширяются по сравнению с фотопланиметрическим способом.

Имеются разработки, в которых стереокамеры устанавливаются на различное оборудование, участвующее в технологическом процессе транспортирования раздробленной горной массы. В зависимости от расположения стереокамеры могут быть установлены:

- на погружной ковш, работающего экскаватора (FRAGTrack™ разработка компании Orica);

- на П-образную раму, через которую проезжают самосвалы (TruckMetrics разработка компании MotionMetrics);

- над конвейерной лентой (Solo™ разработка компании Wipware Inc, FRAGTrack™, TruckMetrics) с целью осуществления мониторинга крупности кусков породы;

- над первичной дробилкой (Reflex™ разработка компании Wipware Inc) с целью обнаружения и предупреждения о негабаритных кусках породы [78].

Стереометрический метод, реализуемый с использованием специального программного обеспечения и оборудования, обладает следующими преимуществами перед вышеперечисленными методами: возможность получать трёхмерные данные о размерах кусков породы и их пространственном расположении; проведение съёмки в автоматическом режиме в недоступных местах для человека, тем самым опасный фактор нахождения человека в забое исключается; непрерывность получения информации, способность анализировать большие объёмы данных и получение этих данных в режиме реального времени, благодаря этому возможно устранять недостатки в ходе проведения взрывных работ как можно скорее [94]. Из недостатков можно выделить то, что перечисленные программные комплексы иностранного производства, что приводит к ограничению использования данными продуктами при их высокой стоимости.

Благодаря импортозамещению в России стали появляться отечественные программные продукты для оценки гранулометрического состава, основанные на стереометрическом методе в сочетании с методами нейросетевого анализа. Компании, которые предлагают программные комплексы на основе компьютерного зрения и нейронного анализа, следующие: Mallenom system (система оценки гранулометрического состава горной массы - ВИСКОНТ.Гранулы), Piklema Predictive (автоматизированная система мобильного мониторинга гранулометрического состава в забое – Piklema CVision.PitFace и автоматизированная система определения гранулометрического состава руды и мониторинга состояния конвейерной ленты – Piklema CVision.Belt), Davtech

(программно-аппаратный комплекс для анализа гранулометрического состава горных пород – Гравикс).

Рассмотрим принцип оценки качества гранулометрического состава на примере программно-аппаратного комплекса Гравикс. Компания ООО «Дав-тех» активно ведёт внедрение способа автоматического анализа гранулометрического состава и публикуют результаты своих исследований в работах [10, 11, 12, 13, 95]. Определение гранулометрического состава осуществляется, посредством получения изображения со стереометрической камеры для дальнейшего проведения анализа с применением нейросетевых технологий. Под стереоизображением понимается стереопара плоских изображений одной и той же сцены, полученной в результате смещения угла [11].

Для проведения анализа выполняются следующая последовательность действий [10, 12]:

- стереосъёмка с использованием специализированного планшета;
- получение стереоизображений развала горной массы со стереометрической камеры;
- построение объёмного рельефа развала, который состоит из набора данных расстояния от матрицы камеры до объекта съёмки (участка развала горной массы) и соответствующих им номеров строк и столбцов в матрице изображений;
- определение параметров кусков породы исходя из данных объёмного рельефа по средствам машинного обучения (нейронного анализа);
- исходя из геометрических параметров кусков породы определяется грансостав для всего развала.

Данный метод не подразумевает размещение реперных элементов на развале породы, поэтому оператор не находится в опасной зоне осыпи [95]. Также минимизируется человеческий фактор при обработке полученных материалов, так как анализ производится с использованием нейронных сетей.

2.2 Описание применяемого оборудования и принцип его работы

В данном исследовании применялся способ оценки гранулометрического состава с применением специализированного портативного планшета PortaMetrics. Ранее упоминалось, что данный прибор применялся на многих российских горнодобывающих предприятиях, что свидетельствует о его широком распространении.

С целью сбора данных проводится фотосъёмка активного забоя с использованием портативного прибора. Это является первым этапом анализа гранулометрического состава. Активным забоем считается часть забоя, взорванной горной массы, в которой начата экскавация или идёт на момент сбора данных. Фотография активного и неактивного забоя представлены на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Активный (справа) и неактивный (слева) забои

В целях обеспечения безопасности персонала, выполняющего съёмку забоя, необходимо оповестить машиниста экскаватора при входе в забой, для того чтобы работы по экскавации блока были приостановлены на время съёмки.

При фотографировании важно подбирать режим фокусировки в зависимости от расстояния до забоя, при съёмке с близкого расстояния (до 2 м) необходимо выбрать режим ближней съёмки, при съёмке с расстояния более 2

метров необходимо выбирать режим дальней съёмки. В случае неправильного выбора режима съёмки анализ изображения будет некорректным. О корректности выбранного режима информирует шкала в нижнем левом углу, при правильном режиме съёмки она должна быть зелёного цвета.

Пример отображения интерфейса планшета PortaMetrics в момент фотографирования представлен на рисунке 2.7.

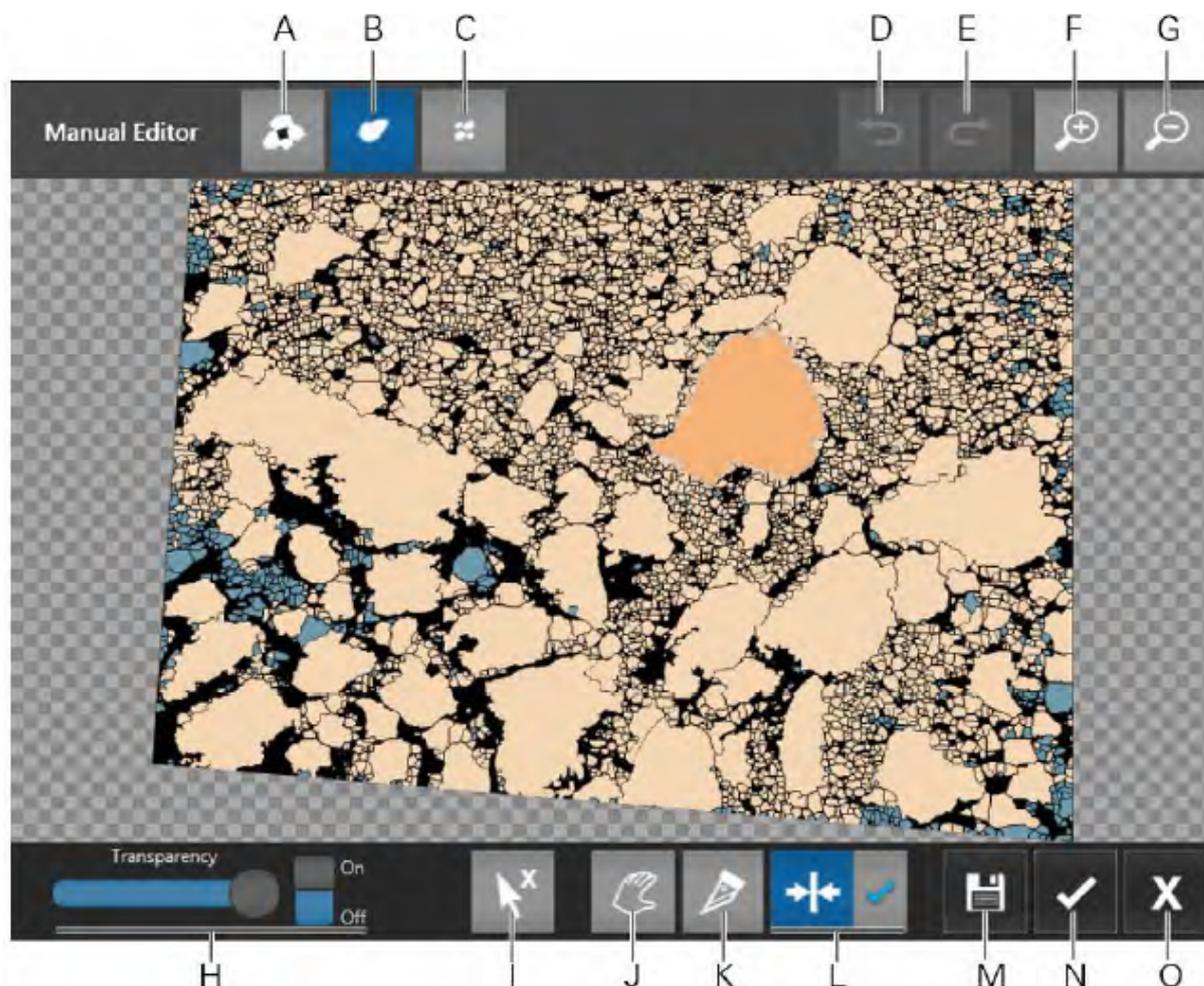
Также для удобства дальнейшей обработки фото указываются метки с обозначением горизонта и названия экскаватора. В дальнейшем для точного определения номера блока необходимо данные меток сопоставить с маркшейдерской съёмкой.



Рисунок 2.7 – Пример отображения интерфейса в планшете PortaMetrics при фотографировании активного забоя

Второй этап - непосредственно обработка изображений. Интерфейс редактора изображений представлен на рисунке 2.8. Как видно из рисунка, исходная фотография преобразовывается в бинарный вид, участки бежевого цвета характеризуют породу, а участки черного цвета характеризуют пустоту. Также в нижней части интерфейса представлены инструменты для ручного редактирования изображения, например, имеется возможность объединить куски горной массы или наоборот разъединить. Эти инструменты необходимы

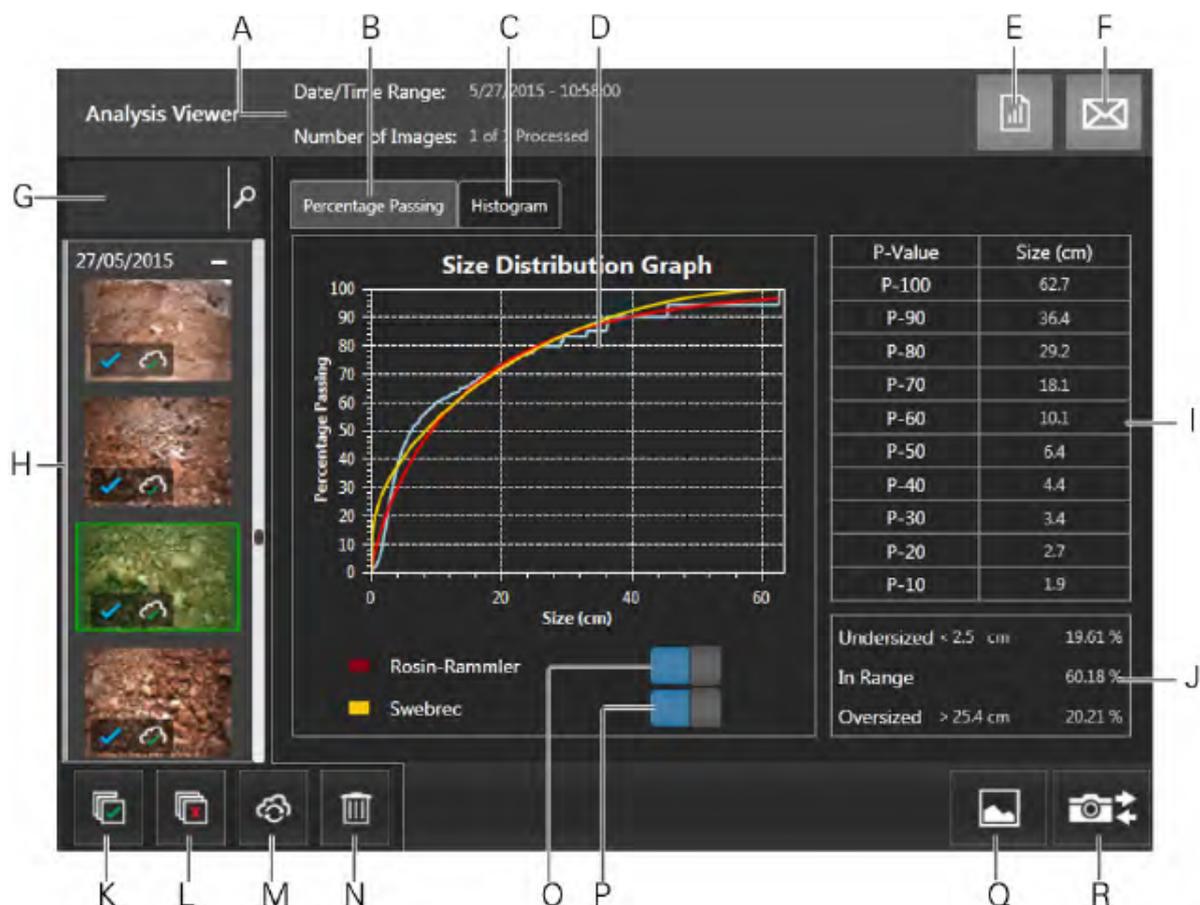
в случае, если при автоматической обработке фотографии куски горной массы были некорректно идентифицированы камерой. Также для облегчения процесса идентификации границ пустота-порода имеется опция регулирования прозрачности изображения, с её помощью можно быстро вернуться к исходному изображению для проверки границ кусков.



A	Пустота	■	Отмечает выделение как пустое пространство.
B	Область породы	■	Отмечает выделение как куски породы.
C	Область мелкой фрак.	■	Отмечает выделение как мелкую фракцию.
D	Отменить		Отменить действие.
E	Повторить		Повторить действие.
F	Увеличить		Увеличить изображение.
G	Уменьшить		Уменьшить изображение.
H	Прозрачность		Настройка прозрачности слоя сегментации.
I	Очистить выбор		Отменить выбор области.
J	Перемещение		Перемещение вида на увел. изображении, пролистывайте в любом направлении
K	Разрезать		Разделите область надвое.
L	Объединить		Выбрать и объединить области.
M	Сохранить		Сохранить изменения.
N	Применить		Сохранить изменения, обновить результаты и вернуться к Просмотру изображений.
O	Отменить изменения		Отменить изменения и вернуться к Просмотру изображений

Рисунок 2.8 – Интерфейс редактора фотографии в PortaMetrics

После обработки изображений можно приступить к финальному этапу формирования отчёта о гранулометрическом составе. Для этого необходимо выбрать изображения с одинаковой меткой произведённого взрыва и сформировать общий отчёт. В результате получаем график распределения крупности, пример которого представлен на рисунке 2.9.



A	Панель информации	Диапазон дат/времени для выбранных изображений и их количество.
B	Процент прохождения	График распределения размеров и P-значения.
C	Гистограмма	Показывает данные о размере бункера и гистограмму.
D	График распр. по разм.	График распределения по размерам (процент прохождения к размеру).
E	Сохранить отчет	Сохранить отчет на основе выбранных изображений. См. стр. 20.
F	Отправить отчет по почте	Отправить отчет на основе выбранных изображений по эл.почте. См.стр.20.
G	Фильтр	Отфильтровать изображения по тэгу (метке).
H	Выбор изображения	Выберите одно или несколько изображений для включения в отчет.
I	Таблица P-значений	P-значения для выбранного изображения.
J	Проц. соотношение разм.	Процентное соотношение размеров: маломерные, в диапазоне и крупные.
K	Выбрать все	Выбрать все изображения в списке. <i>Примечание:</i> фильтруйте по тэгу для уточнения списка.
L	Очистить выбор	Отменить выбор всех изображений.
M	Синхронизация	Выбор синхронизации в Облаке для доступа через Интернет.
N	Удалить	Удалить выбранные изображения.
O	Розин-Раммлер	График наиболее подходящей кривой с использованием модели Розина-Раммлера.
P	Swebrec	График наиболее подходящей кривой с использованием модели Swebrec®.
Q	Просмотр изображений	Перейти к Просмотру изображений (Image Viewer). См. стр. 13.
R	Камера	Перейти к Камере. См. стр. 10.

Рисунок 2.9 – Создание отчётов по распределению гранулометрического состава с применением устройства PortaMetrics

Как было упомянуто ранее, в портативном приборе PortaMetrics имеется возможность описывать распределение гранулометрического состава ВГМ двумя функциями – Розина-Раммлера и Swebrec. Это наиболее совершенные функции, которые довольно точно описывают распределение гранулометрического состава. С целью выбора уравнения, с помощью которого будет оценён грансостав, необходимо произвести сравнительный анализ и определить, какая модель окажется наиболее подходящая для наших условий.

В первую очередь рассмотрим уравнение Розина-Раммлера.

Изначально кривая Розина-Раммлера предназначалась для описывания материала, измельчённого вследствие механического воздействия, а потом была адаптирована для описания гранулометрического состава ВГМ [96].

Выражение, описывающее кумулятивную кривую Розина-Раммлера, имеет вид [36]:

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_c} \right)^n \right], \quad (2.1)$$

где y – процент прошедших через сито кусков горной массы, %;

x – размер куска взорванной горной массы, мм;

x_c – характерный (средневзвешенный) размер куска взорванной горной массы, который является размером куска при прохождении 63,2% на кумулятивной кривой, мм;

n – параметр, описывающий однородность распределения.

Основными параметрами, описывающими данную функцию, являются средневзвешенный размер куска (x_c) и параметр однородности распределения (n) [97]. Кривая Розина-Раммлера подходит для описания крупных кусков породы от 300 до 2500 мм.

Уравнение Розина-Раммлера легло в основу модели дробления Kuz-Ram, которая учитывает проектные параметры, а также характеристики и количество взрывчатого вещества и взрываемости [6] на это указывает формула 2.2 [32].

$$d_{\text{ср}} = \frac{0,15 * (\rho_{\text{П}} * f * d_{\text{з}})^{0,33} * d_{\text{отд}}}{q * e_{\text{ВВ}}} \quad (2.2)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний размер куска взорванной горной массы, м;

$\rho_{\text{П}}$ – плотность породы, т/м³;

$d_{\text{з}}$ – диаметр заряда, м;

f – коэффициент крепости по шкале М.М. Протодьяконова;

$d_{\text{отд}}$ – диаметр естественной отдельности в массиве, м;

q – удельный расход ВВ, кг/м³;

$e_{\text{ВВ}}$ – переводной коэффициент, как отношение теплоты взрыва эталонного (граммонит 79/21) к применяемому ВВ.

С точки зрения теоретического обоснования модели предполагается, что грани кусков породы плоские, вследствие воздействия взрыва образовывается две плоские трещины, при этом вероятность того, что эти трещины будут располагаться на бесконечно малом расстоянии равна нулю, в то же время вероятность возникновения трещины на отрезке равна длине данного отрезка. В массиве после прохождения волны напряжения возникают трещины отрыва вследствие разгрузки [36, 97].

Несмотря на то, что модель Kuz-Ram широко применяется последние 30 лет, у неё имеются некоторые недостатки. В связи с тем, что данная функция подходит для описания крупных кусков породы, выход мелкой фракции ею описывается не так точно [96].

Перейдём к рассмотрению функции Swebrec. Она была предложена Оучтерлони в 2005 [98]. Данная функция является составляющей модели КСО, названной в честь Кузнецова–Каннинггема–Оучтерлони (Kuznetsov–Cunningham–Ouchterlony). Функция Swebrec описывается следующим выражением [98, 99, 100, 101]:

$$P_{\text{Swebrec}}(x) = 1 / \left\{ 1 + \left[\frac{\ln(x_{\text{max}}/x)}{\ln(x_{\text{max}}/x_{50})} \right]^b \right\}, \quad (2.3)$$

где $P(x)$ – количество материала, проходящего через сито размером x , %;

x – размер сита, мм;

x_{max} – максимальный размер куска взорванной горной массы, мм;

x_{50} – размер сита, через который проходит 50 % раздробленного массива;

b – степенной показатель, определяющий степень однородности кривой распределения (волнистость кривой).

Функция Swebrec представляет собой трехпараметрическую функцию; основными параметрами, характеризующие данную функцию являются: максимальный размер куска (x_{max}); класс крупности для прохождения 50% раздробленной горной массы (x_{50}); степень однородности кривой распределения (степень волнистости кривой) (b) [98]. Благодаря этому существует возможность аппроксимировать экспериментальную кривую, это означает, что увеличение числа параметров приводит к увеличению числа комбинаций, в данном случае это три факториала комбинаций [36]. Кривая Swebrec может описывать распределение как для мелких, так и для крупных ВГМ, то есть ею возможно оценить гранулометрический состав в различных зонах. Также Оучтерлони [98] было установлено, что коэффициент детерминации при применении этой функции составляет более 0,99, что свидетельствует о том, что гранулометрический состав характеризуется довольно точно.

Если говорить об имеющихся недостатках данной функции, то это отсутствие предложенного автором физического обоснования [36, 97].

При сопоставлении двух функций Swebrec и Розина-Раммлера было установлено, что с помощью функции Swebrec возможно описывать распределение как для мелких, так и для крупных фракций, таким образом данное распределение является более универсальным. Функция Swebrec является трехпараметрической (x_{max} , x_{50} , b), благодаря этому распределение близко к фактическим размерам кусков взорванной горной массы. По этой причине анализ кумулятивных кривых нами в дальнейшем будет производиться с помощью функции Swebrec.

Выводы по главе 2

По результатам проведённого анализа специализированных программных комплексов для оценки качества гранулометрического состава как российского, так и зарубежного производства, можно сделать вывод, что вследствие сложившейся геополитической ситуации выбор программных комплексов иностранного производства сократился; что касается российских компаний - здесь произошёл противоположный эффект, отечественные изготовители заняли освободившуюся нишу и предлагают новые технологичные решения.

При проведении обзора существующих программных комплексов был сделан анализ методов оценки качества гранулометрического состава, в ходе которого было выявлено 4 метода оценки: фотопланиметрический метод, фотопланиметрический метод с использованием специализированного оборудования, метод аэрофотосъёмки (с использованием БПЛА), стереометрический метод. Автором был выбран фотопланиметрический метод с использованием специализированного портативного планшета PortaMetrics. В работах других исследователей неоднократно встречается упоминание об использовании данного прибора для анализа грансостава, что свидетельствует о его распространённости и надёжности.

Описан принцип действия и требования к выполнению работ при использовании прибора PortaMetrics. Представлена методология проведения анализа фото развала взорванного массива, а именно: настройка оборудования, принцип обработки фотоматериалов, статистический анализ, оценка результатов статистического распределения. Так как данный прибор реализует анализ грансостава посредством построения кумулятивных кривых с применением функций распределения Swebrec и Розина-Раммлера, был проведён сравнительный анализ данных функций, в ходе которого было установлено, что с использованием функции Swebrec возможно описывать распределение как для мелких, так и для крупных фракций, тем самым данное распределение является более универсальным. Функция Swebrec является

трехпараметрической (x_{\max} , x_{50} , b) благодаря этому распределение близко к фактическим размерам кусков взорванной горной массы.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Все натурные эксперименты проводились в условиях карьеров Коашвинский (месторождение Коашвинское) и Ньоркпахкский (месторождение Ньоркпахкское) рудника «Восточный» Мурманской области. Ниже приведено краткое описание горно-геологических условий и дан анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании неэлектрическими системами инициирования.

3.1 Описание горно-геологических условий апатит-нефелинового месторождения

Ниже представлены данные о геологическом строении апатит-нефелинового месторождения, расположенного в Мурманской области. Информация взята из источников, представленных в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Российский федеральный геологический фонд».

Месторождение Коашвинское и Ньоркпахкское входит в состав юго-восточного рудного поля. В рудных телах встречаются различные генерации апатита, которые отличаются морфологией (форма, размер) и физическими свойствами (цвет). Рассмотрим несколько таких генераций.

Пятнистая руда в большей части состоит из апатита (порядка 50-90%), с крупными вкраплениями нефелина, пироксена и сфена, которые придают руде пятнистый облик. Если содержание апатита составляет более 90%, то данную руду можно отнести к сплошной руде. На рисунках 3.1 и 3.2 представлены примеры пятнистой и сплошной руды. Если пятна имеют удлинённо-овальную форму, то такой вид руды именуется как пятнисто-полосчатая руда (рисунок 3.3), содержание апатита в таких рудах составляет 50-85%.

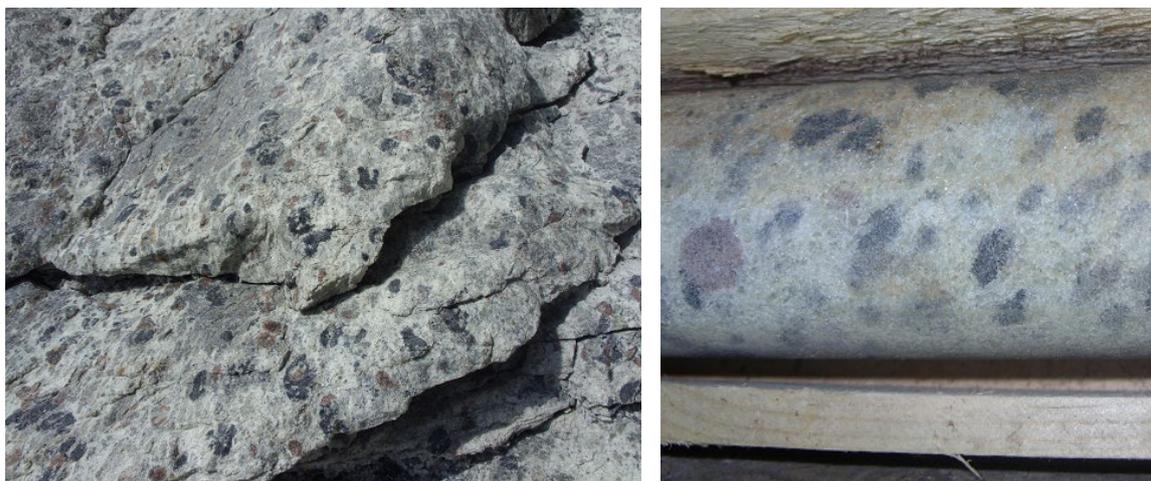


Рисунок 3.1 – Пятнистая руда



Рисунок 3.2 – Сплошная руда

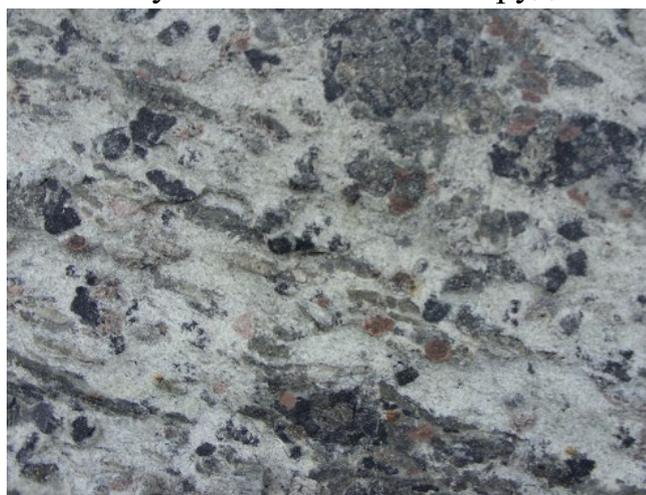


Рисунок 3.3 – Пятнисто-полосчатая руда

Следующий вид руд сочетает в себе прослой апатит-нефелинового состава (субстрат) и линзообразные обособления (шлиры) мелкозернистого ийолита. Такие руды называются линзовидно-полосчатые руды содержание

апатита, в которых варьируется от 25% до 60%, а содержание ийолита составляет от 20% до 70%. Внешний вид линзовидно-полосчатых руд представлен на рисунке 3.4.

Блочные руды состоят из округлых кристаллов нефелина чередующиеся с полосами средне-крупнозернистого апатита, содержание последнего составляет 50-90%. Пример таких руд представлен на рисунке 3.5.

Массивные руды сложены массивными средне-крупнозернистыми уртами, обогащенные апатитом, процентное содержание которых составляет 20-75%. На рисунке 3.6 представлено фото массивных руд, на котором прослеживаются неправильной формы скопления, гнезда, ветвящиеся прожилки апатита.



Рисунок 3.4 – Линзовидно-полосчатая руда



Рисунок 3.5 – Блочная руда



Рисунок 3.6 – Массивная руда

Сфеновая зона характеризуется крайней неоднородностью состава: наряду со сфен-апатитовыми рудами в ней присутствуют массивные уртиты и трахитоидные ийолит-уртиты, в различной степени обогащённые сфеном и апатитом, встречаются маломощные участки богатых апатит-нефелиновых руд. Все эти различия обнаруживают частое закономерное чередование в разрезе, характеризуются тесным парагенезисом сфена, апатита и титаномагнетита, широким развитием трахитоидно-полосчатых текстур, отсутствием интрузивных контактов с покрывающими ийолитами и подстилающими апатит-нефелиновыми рудами. На рисунках 3.7 и 3.8 представлены примеры руд с развитыми сфеновыми зонами, а именно апатит-сфеновая руда (рисунок 3.7) и уртит апатит-сфеновая руда (рисунок 3.8).

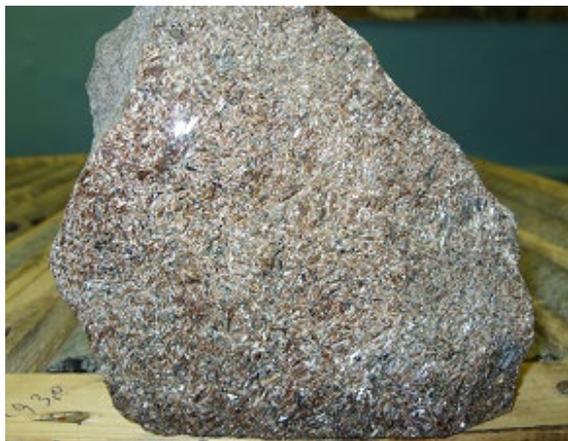


Рисунок 3.7 – Апатит-сфеновая руда Рисунок 3.8 – Уртит апатит-сфеновая руда

Определяющим фактором в формировании прочностных свойств для апатит-нефелиновых руд является содержание апатита и размер его зёрен, а в линзовидно-полосчатых рудах – направление полосчатости. В таблице 3.1 приведены механические свойства кристаллических пород на руднике «Восточный».

Согласно типовому проекту производства буровзрывных работ рудника «Восточный» выделяют 4 системы трещин: трещины пластовой отдельности, пологопадающие тектонические трещины, крутопадающие поперечные трещины и вертикальные продольные трещины. Трещиноватость изменяется от

участка карьера и разрушенных зон. Также выделяются следующие участки трещиноватости:

- интенсивной трещиноватости (более 20 трещин на 1 пог.м);
- средней трещиноватости (от 10 до 20 трещин на 1 пог.м);
- слабой трещиноватости (менее 10 трещин на 1 пог.м).

В таблицах 3.2 и 3.3 представлена классификация горных пород карьеров Коашвинский и Ньоркпахкский по трещиноватости и взрываемости.

Таблица 3.1 – Механические свойства кристаллических пород

Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа		Прочность при растяжении σ_r , МПа		Скорость продольных волн V_p , м/с		Модуль продольной упругости $E \times 10^4$, МПа	
пределы variaц.	среднее	пределы variaц.	среднее	пределы variaц.	среднее	пределы variaц.	среднее
1	2	3	4	5	6	7	8
Апатит-нефелиновые руды							
50-190	128	1-9	4,2	2000-6500	4500	2-10	6,2
Вмещающие породы							
110-350	225	5-17	10,4	2700-7000	5500	1,6-16,0	8,3

Перейдём к рассмотрению гидрогеологических особенностей Хибинского массива. Для Коашвинского месторождения характерна обводненность массива за счёт трещинных и трещиножилных вод, а также подземных вод, уровни которых поднимаются в период таяния снегов и снижаются с наступлением зимы. На глубинах с абсолютными отметками +220 +150 м наблюдается сильная и средняя степень трещиноватости пород, к этим же зонам приурочены зоны наибольших водопритоков.

Таблица 3.2 – Картограмма Северо-Западного борта Коашвинского карьера

Номер картограммы	Название пород	Глубина от поверхности, м	Прочность пород, МПа			Объемный, вес кг/м ³	Угол внутреннего трения, град.	Категория пород			Коэфф. крепости по Протодьякову
			на сжатие	на разрыв	на срез			по буримости	по трещиноватости	по взрываемости	
I	Покрывающие рудную зону ийолиты необводненные, уртиты выветренные, ювиты трахитоидные породы.	до 20 м	39,2-29,4	2,4-12,3	9,8-19,6	2750 2760 2780	38 39 39	XY-XYI	I-II	II	16-18
II	Покрывающие разрез ийолиты необводненные, уртиты монолитные, ювиты трахитоидные породы.	Более 20м	65,7-275,5	4,3-15,2	Более 19,6	2750 1760 2780	38 39 39	XVII-XVI	IV	III	12-19

Таблица 3.3 – Картограмма Ньюркапхкского карьера

Номер картограммы	Название пород	Глубина от поверхности, м	Прочность пород, МПа			Объёмный, вес кг/м ³	Угол внутреннего трения, град	Категория пород			Коэфф. крепости по Протодьякову
			на сжатие	на разрыв	на срез			по буримости	по трещиноватости	по взрываемости	
I	Покрывающие и подстилающие трахитоидные ийолиты, ювиты, рихсчорриты выветренные, необводненные.	до 200 м	39,2-813,9	2,4-12,2	9,8-19,6	2800	39	XV-XVI	II	II	12-19
II	То же, неветренные.	200 м и более	65,7-275,5	4,3-15,2	Более 19,6			XVI-XVII	III	IV	16-18
III	Апатит-нефелиновые руды, выветренные, необводненные.	до 20 м	39,2	1,4-5,6	14,7	2900	30-35	XIII-XIV	III-IV	IV	7-13
IV	То же, неветренные.	20 м и более	65,7-162,7	2,4-12,2	Более 14,7				IV-V		7-13

Для осушения карьерного поля используются водопонижительные скважины, перехватывающие примерно 40% общего водопритока, и установки внутреннего карьерного водоотлива, на них приходится соответственно 60% общего водопритока. По прогнозным оценкам водопритоки в карьер Коашвинский на ближайшие годы составят 18 – 19 млн. м³.

В месторождение Ньоркпахкское также поступает питание водоносного горизонта за счёт инфильтрации талых и дождевых вод. Для отвода вод на отметке +230 м пройден зумпф. Ожидаемые водопритоки в Ньоркпахкский карьер составят 1,5 – 1,75 млн. м³.

Факторы, определяющие гидрогеологические условия Хибинского массива в целом, и Коашвинского месторождения, таковы:

- сильно расчлененный рельеф;
- хорошая обнажённость массива, а также интенсивная трещиноватость, обеспечивающая беспрепятственную инфильтрацию атмосферных осадков через зону аэрации;
- близость областей питания и разгрузки подземных вод, обеспечивающих достаточно высокие скорости фильтрации;
- влажный климат (количество выпадающих осадков составляет 700-1100 мм).

В связи со сложными гидрогеологическими условиями Коашвинского месторождения наблюдаются случаи осыпания и оплывания пород (рисунок 3.9). Горно-маркшейдерской службой Восточного рудника были отмечены случаи образования оползней на уступах, сложенными четвертичными отложениями. Такие сложные инженерно-геологические условия отработки месторождения обусловлены следующими факторами:

- низкими прочностными свойствами рыхлых пород и верхней части толщи скальных пород;
- высокой степенью трещиноватости скальных пород;
- обводненностью рыхлых и скальных пород.

Для предотвращения деформации бортов и уступов карьеров проводятся следующие мероприятия:

- заоткоска и постановка уступов и бортов карьера под проектными параметрами, обеспечивающими их устойчивость;
- применение специальной методики буровзрывных работ в скальных породах при подходе к предельному контуру (предварительное щелеобразование);
- выполнение мероприятий по осушению карьера;
- организация и проведение систематических геолого-маркшейдерских наблюдений за устойчивостью пород в откосах;
- выполнение научно-исследовательских работ по уточнению прочностных характеристик пород и определению оптимальных, устойчивых параметров бортов и уступов карьера на глубоких горизонтах.



Рисунок 3.9 – Коашвинский карьер

Рассмотрим подробнее методы постановки уступов и бортов карьера в предельное положение, такие как: метод завершающего контурного взрывания и метод предварительного щелеобразования.

Метод завершающего контурного взрыва подразумевает под собой доработку массива до проектного контура путём выполнения взрыва контурных скважин [39].

Предварительное щелеобразование выполняется в случае постановки борта или уступа карьера в предельное положение с целью снижения сейсмического воздействия взрывов на законтурное пространство и дальнейшее образование трещин в нем [102]. При формировании отрезной щели пробуривают несколько типов скважин, такие как контурные скважины, основные технологические и буферные скважины [39]. Особенностью данного вида взрывания является отсутствие свободной поверхности [103, 104]. При формировании отрезной щели в обводнённых условиях наблюдается снижение экранирующего эффекта [103].

На рассматриваемых карьерах применяется метод предварительного щелеобразования (МПЩ).

При формировании отрезной щели необходимо определить параметры скважинных зарядов, расстояние между скважинами, конструкцию заряда и тип применяемого ВВ [103, 104]. В качестве ВВ обычно применяется гирляндовая конструкция, имеющая радиальный зазор между зарядом и стенкой скважин [105]. Для формирования контурного заряда на Восточном руднике применяются одиночные гирлянды ЗКВГ-60, которые представляют собой полиэтиленовые шланги длиной 10 м и диаметром 60 мм, заполненные аммонитом 6ЖВ и имеющие пережимы металлическими клипсами по длине шланга через каждые 0,5 м. Инициирование зарядов производится дублированным детонирующим шнуром, который пропускается вдоль всего заряда и крепится к каждому звену заряда шпагатом в двух местах. На рисунке 3.10 представлена конструкция контурного заряда из штатного ЗКВГ-60. Взрывание контурных скважин производится без забойки.

В зависимости от принимаемых технологических решений по конструкции бортов карьера формирование отрезной щели может производиться на

высоту одного уступа (одинарные уступы) (рисунок 3.11) или двух смежных уступов (сдвоенные уступы) (рисунок 3.12).

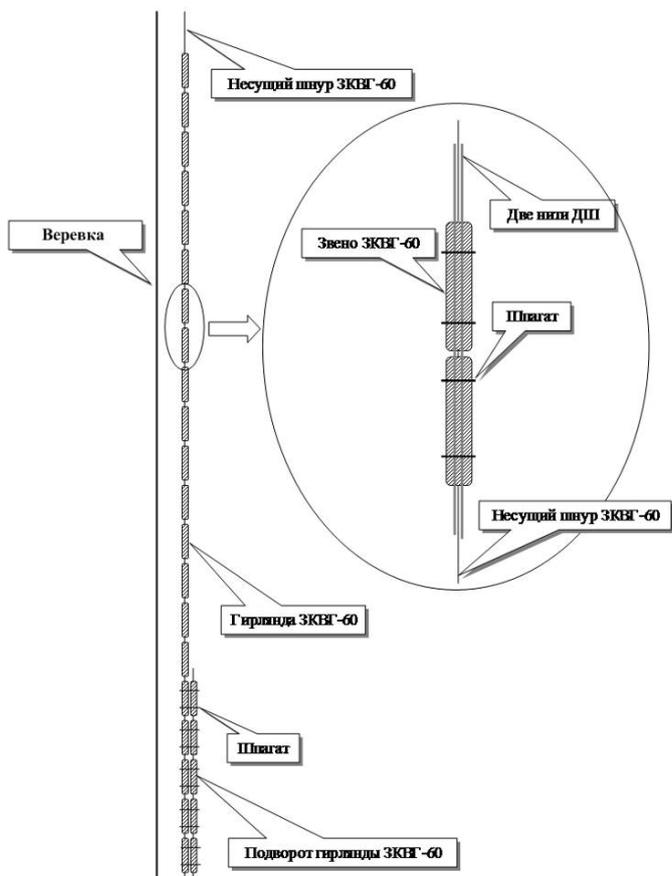


Рисунок 3.10 – Конструкция контурного заряда из штатного ЗКВГ-60

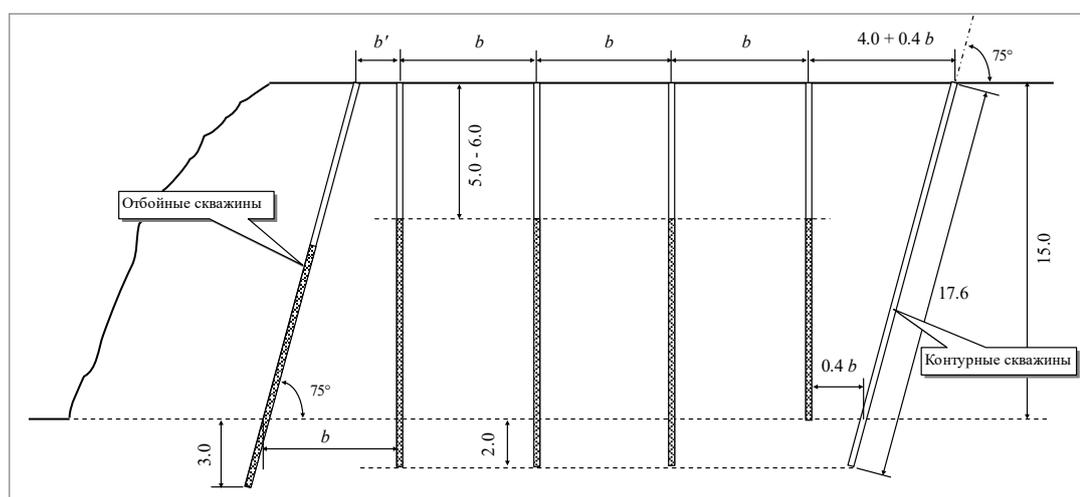


Рисунок 3.11 – Типовая схема размещения отбойных скважин на блоке при угле наклона контурных скважин 75 град., где b - проектное расстояние между соседними рядами вертикальных отбойных скважин на блоке (на высоту одного уступа).

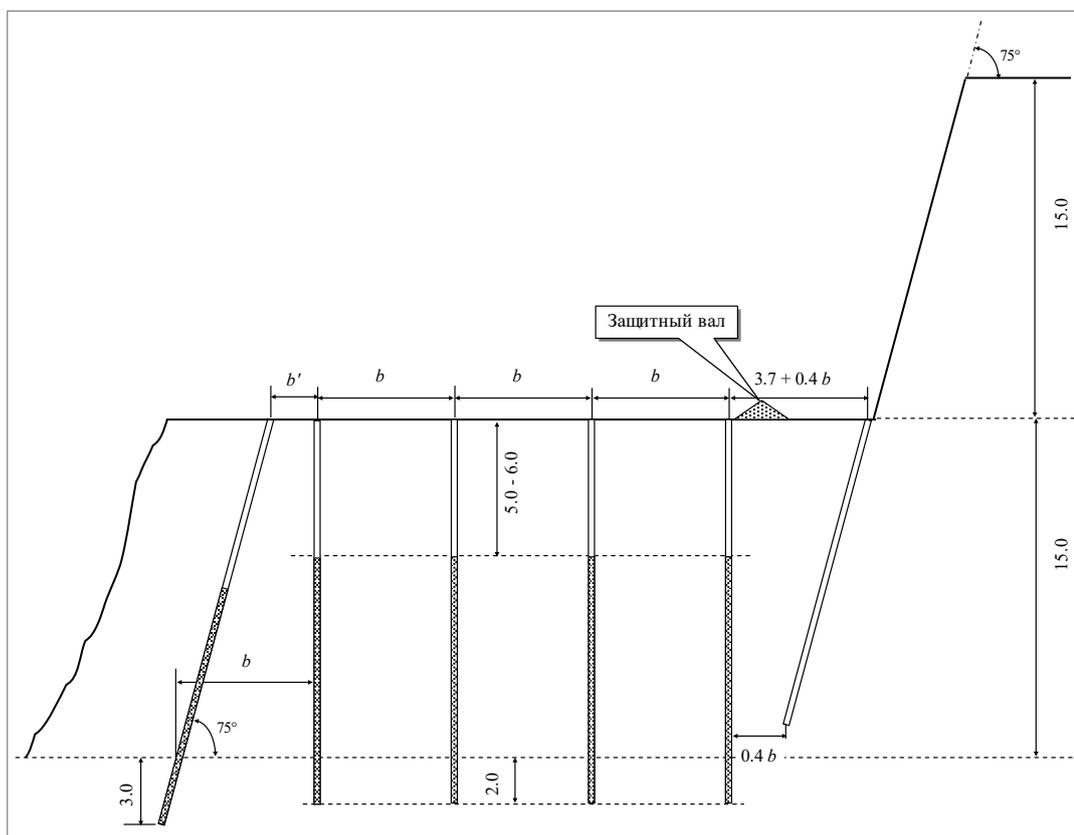


Рисунок 3.12 – Типовая схема размещения отбойных скважин при обработке нижнего уступа в условиях наклона отрезной щели с наклоном 75 град. (сдвоенные уступы)

Основываясь на вышеприведённой информации, а также опираясь на данные, взятые из проектов на массовый взрыв карьеров Ньоркпахкский и Коашвинский, были сформированы исходные данные для анализа распределения гранулометрического состава взорванной горной массы.

Краткая характеристика карьеров, а также необходимые для анализа гранулометрического состава параметры представлены в таблице 3.4.

На карьерах Ньоркпахкский и Коашвинский применяется шахматная сетка взрывания, диаметр пробуренных скважин составляет 230 мм и 250 мм. Как было ранее упомянуто, при постановке бортов карьеров в конечное положение применяется метод предварительного щелеобразования, поэтому при указании высоты уступа 30 м или 20 м подразумевается формирование отрезной щели на высоту сдвоенного уступа.

Таблица 3.4 – Анализируемые данные для карьеров Ньоркпахкский и Коашвинский

Параметры	Карьер Ньоркпахкский	Карьер Коашвинский
Обводненность массива	не обводнен	обводнен
Трещиноватость	средняя трещиноватость (от 10 до 20 трещин на 1 пог.м)	интенсивная трещиноватость (более 20 трещин на 1 пог.м)
Коэффициент крепости	16,15 по шкале М.М. Протодяконова	
Средняя высота уступа	15 м	10 м/12 м

В качестве взрывчатого вещества применяется эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Фортис», изготовленное согласно техническим условиям ТУ 7276-001-23308410-2006 производства компании АО «Орика СиАйЭс».

Как было упомянуто выше, особенностью Хибинского массива является влажный климат, поэтому при анализе гранулометрического состава необходимо учитывать такой показатель, как сезонная обводненность. Для определения сезонов, при которых обводненность массива максимальна в связи с сезонными осадками и, наоборот, достигает минимальных значений, рассмотрим график изменения грунтовых вод Хибинского массива в зависимости от времени года (рисунок 3.13). Исходя из этих данных, принимаем как более засушливый период с ноября по январь включительно, для удобства далее по тексту обозначим его как зимний период. Напротив, пик осадков приходится на осенне-летний период с августа по октябрь, который принимаем как летний период.

При анализе гранулометрического состава во внимание бралось четыре переменные: обводненность массива; сезонность (зима/лето); высота уступа; трещиноватость.

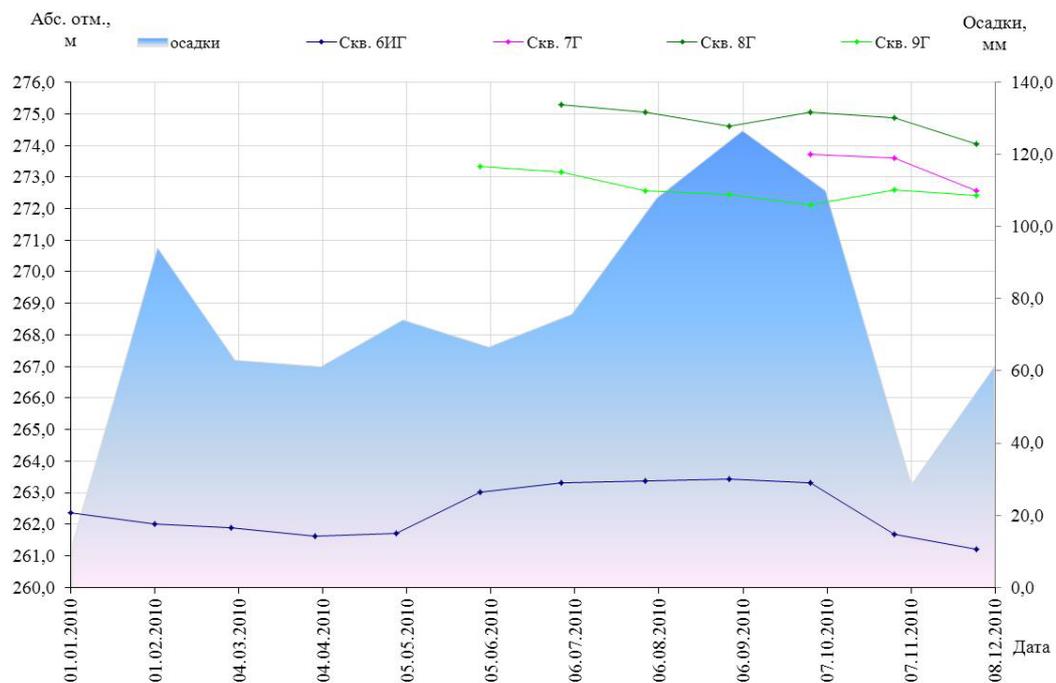


Рисунок 3.13 - Изменение уровня грунтовых вод в зависимости от количества осадков

3.2 Анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании неэлектрическими системами инициирования в условиях карьера Ньоркпахкский

Представлен анализа распределения гранулометрического состава взорванной горной массы путем рассмотрения характера искривления кумулятивных кривых, построенных с использованием функции Swebrec при производстве массовых взрывов с применением НСИ в различных условиях, приведенных в таблицах 3.5 и 3.6.

В рамках проведенного анализа стояла задача определить, как и в какой степени влияют параметры БВР (высота уступа) и горно-геологические условия (обводненность массива, сезонная обводненность, трещиноватость) на качество гранулометрического состава взорванной горной массы в условиях месторождений Ньоркпахкское и Коашвинское, разрабатываемых открытым способом, и исходя из выявленных закономерностей предложить условия, при

которых достигается наилучшее качество гранулометрического состава при взрывном дроблении апатит-нефелиновых руд.

Оценка качества взрывных работ проводится по характеру искривления кумулятивной кривой и анализу параметров функции Swebrec, таких как: x_{50} , критерий $P_{97\%}$. Критерий $P_{97\%}$ принимается по причине того, что недропользователем был установлен допустимый показатель по выходу негабаритных кусков породы 3% при размере негабарита от 1200 мм.

Также принимаем во внимание фактор сезонности ведения буровзрывных работ. Этот параметр отражает сезонный водопроток в породах. С сезонностью тесно связана обводненность массива, так как в периоды таяния снегов или интенсивного выпадения осадков, даже массив, который не обладает естественным водопритоком от грунтовых вод, может быть обводнен. В данном исследовании принимаем такой характер обводненности, как сезонная обводненность [106]. В ранее проводимых исследованиях автор отмечает [28], что обводненность массива влияет на механизм разрушения горной массы в худшую сторону, за счёт потери части энергии в результате столкновения с водной средой и преломления сред вода/твёрдая среда. В то же время в сильно-трещиноватом массиве наблюдается улучшение дробления при дополнительной обводненности, так как вода заполняет трещины и задерживает газообразные продукты.

Представлены результаты 12 замеров гранулометрического состава взорванной горной массы в условиях средне-трещиноватого необводненного массива при инициировании НСИ в условиях карьера Ньюкпахкский (таблица 3.5).

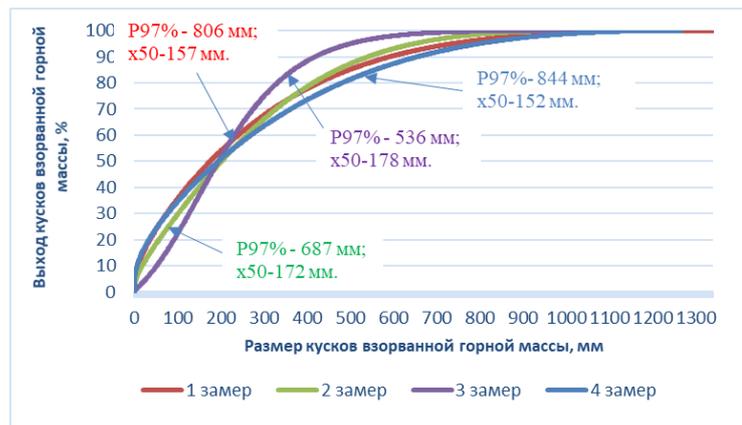
При анализе группы замеров 1-4 (рисунок 3.14 а) можно наблюдать следующее: три из четырех кривых отражают неоднородное распределение гранулометрического состава, так как линии покатые, но при этом показатель $P_{97\%}$ по всем четырем массовым взрывам не превышает 844 мм, также медианное значение x_{50} не превышает 178 мм, что свидетельствует об отсутствии крупных кусков породы.

Таблица 3.5 – Результаты исследования грансостава взорванной горной массы с применением НСИ в условиях карьера Ньюркахкский.

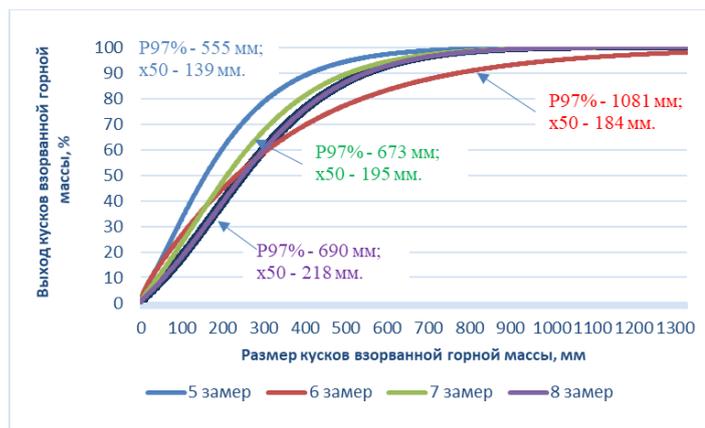
№ замера	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа, м	Модуль трещиноватости, м ⁻¹	Показатели закона распределения Swebrec	
					P97%, мм	x ₅₀ , мм
1	не обводнен	зима	15/30	10	806	157
2	не обводнен	зима	15/30	10	687	172
3	не обводнен	зима	15/30	10	536	178
4	не обводнен	зима	15/30	10	844	152
5	не обводнен	зима	15	10	555	139
6	не обводнен	зима	15	10	1081	184
7	не обводнен	зима	15	10	673	195
8	не обводнен	зима	15	10	690	218
9	не обводнен	лето	15	10	1206	316
10	не обводнен	лето	15	10	907	234
11	не обводнен	лето	15	10	846	253
12	не обводнен	лето	15	10	868	231

Анализ гранулометрического состава замеров 5-8 (рисунок 3.14 b) выявляет схожий характер кривых, но стоит выделить синюю кривую, которая описывает наиболее однородный характер гранулометрического состава по сравнению с другими линиями. Значения параметра P97% по всем четырём кривым не превышают предельного значения в 1200 мм, то есть выход негабарита не выявлен.

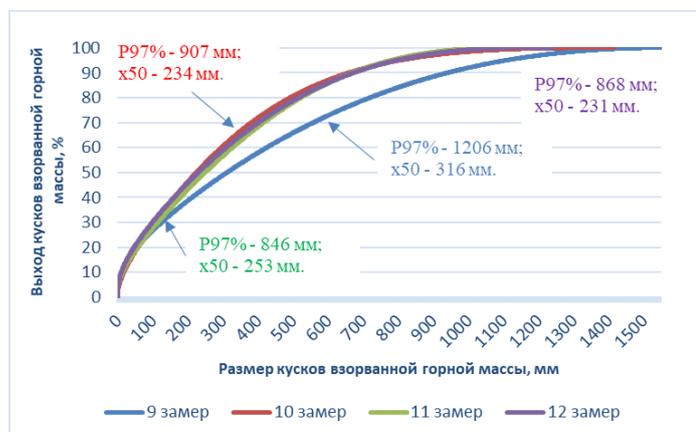
Кривые на рисунке 3.14 c (результаты замеров 9-12) имеют покатый характер, что свидетельствует о неоднородном распределении гранулометрического состава, также отмечается пограничное значение по критерию P97% для синей кривой, что можно оценивать как возможность образования негабаритных кусков породы.



а) Замеры 1-4



б) Замеры 5-8



с) Замеры 9-12

Рисунок 3.14 – Кумулятивные кривые, полученные при анализе грансостава в условиях карьера Ньюоркпахкский: а) график кумулятивных кривых при условии формирования отрезной щели в зимний период; б) график кумулятивных кривых при высоте уступа 15 м, в зимний период; с) график кумулятивных кривых при высоте уступа 15 м, в летний период

Анализ полученных результатов позволил установить следующие закономерности: наиболее благоприятные условия для получения качественного гранулометрического состава в необходимом среднетрешиноватом массиве

при взрывании НСИ возникают в зимний период при стандартной высоте уступа и при формировании отрезной щели, при этом в случае постановки борта карьера в конечное положение возникает меньшая вероятность образования негабаритных кусков и выхода более мелкой фракции с возможным переизмельчением массива. В летний период при дополнительной сезонной обводненности наблюдается тенденция ухудшения гранулометрического состава, которая выражается в неоднородности и увеличении выхода более крупных кусков породы [106].

3.3 Анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании неэлектрическими системами инициирования в условиях карьера Коашвинский

Проводился анализ гранулометрического состава при инициировании блока неэлектрическими системами инициирования в условиях трещиноватого обводненного массива. Горно-геологические условия Коашвинского карьера и результаты 12 замеров гранулометрического состава представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты исследования грансостава взорванной горной массы с применением НСИ в условиях карьера Коашвинский

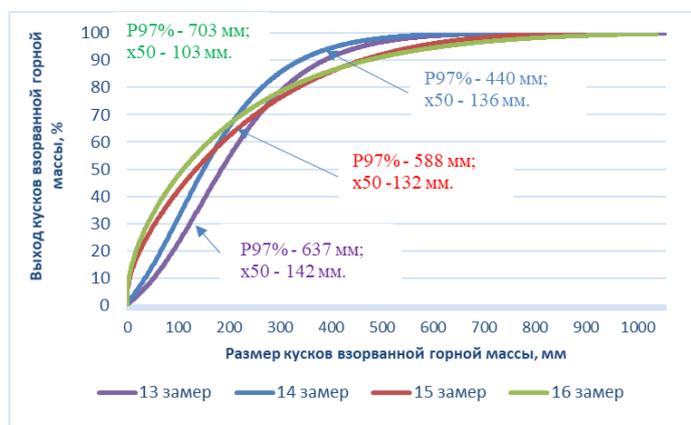
№ замера	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа, м	Модуль трещиноватости, м ⁻¹	Показатели закона распределения Swebrec	
					P97%, мм	X50, мм
13	обводнен	зима	10/20	20	637	142
14	обводнен	зима	10/20	20	440	136
15	обводнен	зима	10/20	20	588	132
16	обводнен	зима	10/20	20	703	103
17	обводнен	зима	10	20	958	329
18	обводнен	зима	10	20	669	267
19	обводнен	зима	10	20	846	253
20	обводнен	зима	10	20	453	161
21	обводнен	лето	10	20	921	197

№ замера	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа, м	Модуль трещиноватости, м ⁻¹	Показатели закона распределения Swebrec	
					P97%, мм	X50, мм
22	обводнен	лето	10	20	456	173
23	обводнен	лето	10	20	446	133
24	обводнен	лето	10	20	442	134

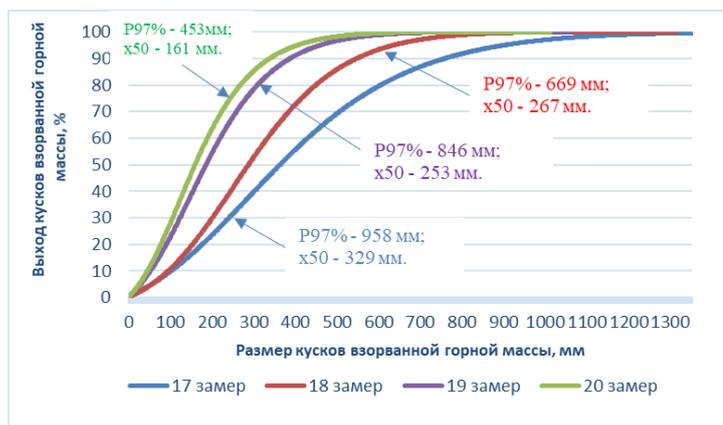
В группе замеров 13-16 (рисунок 3.15 а) наблюдается парность линий, с преобладанием более однородного гранулометрического состава (синяя и фиолетовая линии) и менее однородного состава (зелёная и красная кривые). В то же время, основываясь на данных критерия P97%, интервал распределения крупности кусков породы не расширен.

При замерах 17-20 (рисунок 3.15 б) кумулятивные кривые имеют разный характер кривизны, красная и синяя линии описывают наиболее неоднородное распределение, также по характеру синей кривой можно судить о возникновении потенциального негабарита.

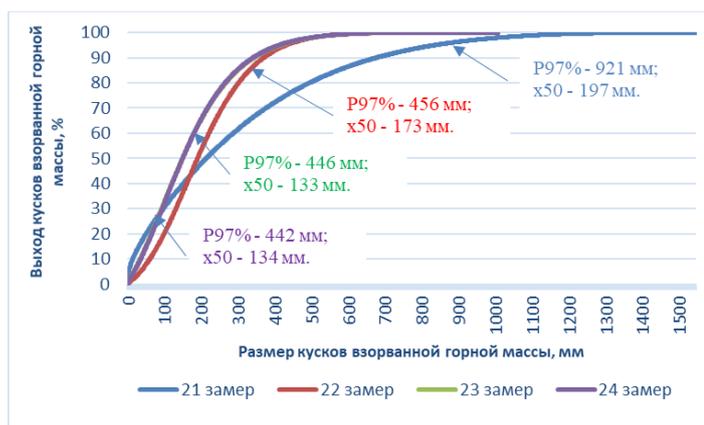
На рисунке 3.15 с (замеры с 21 по 24) три кривые, кроме синей линии, описывают однородный гранулометрический состав с преобладанием мелкой фракции, это подтверждается значениями X50, синяя кривая в свою очередь описывает неоднородное распределение.



а) замеры 13-16



б) замеры 17-20



с) замеры 21-24

Рисунок 3.15 – Кумулятивные кривые, полученные при анализе грансостава на карьере Коашвинский: а) график кумулятивных кривых при формировании контурной щели, в зимний сезон; б) график кумулятивных кривых при высоте уступа 10 м, сезон зима; с) график кумулятивных кривых при высоте уступа 10 м, в летний сезон

По результатам 12 массовых взрывов в обводненном трещиноватом массиве в условиях Коашвинского карьера были выявлены следующие закономерности: при формировании отрезной щели в зимний период однородность гранулометрического состава имеет переменчивый характер, но прослеживается такая же закономерность, как на Ньоркпахкском карьере: медианный размер куска имеет малые значения, негабариты не наблюдаются, возможно переизмельчение пород. Что касается взрывания в зимний период 10-ти метровыми уступами, то при отсутствии сезонной обводненности качество дробления ухудшается. При проведении замеров гранулометрического состава при повышенной обводненности в связи с летним водопритоком наблюдается

улучшение качества дробления на карьере Коашвинский, что является полной противоположностью результатам полученных при аналогичных условиях на карьере Ньоркпахкский.

Выводы по главе 3

В результате исследований горно-геологических и гидрогеологических условий Коашвинского и Ньоркпахкского месторождений было определено, что месторождения сложены аналогичными по геологическому строению породами, но трещиноватость и гидрогеологические условия месторождений различны.

Анализ параметров БВР показал, что постановка бортов карьеров в конечное положение производится методом предварительного щелеобразования при взрывании сдвоенных уступов. В качестве эмульсионного взрывчатого вещества применяется ЭВВ «Фортис».

С целью выявления параметров и их влияния на получаемое качество гранулометрического состава взорванной горной был произведён анализ влияния следующих параметров: обводненность массива; сезонность проведения работ; высота уступа; трещиноватость.

Исходя из анализа результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы в условиях карьеров Коашвинский (месторождение Коашвинское) и Ньоркпахкский (месторождение Ньоркпахкское) при инициировании блоков неэлектрической системой инициирования, установлены различные закономерности для рассматриваемых карьеров.

Для Ньоркпахкского карьера характерно получение равномерного гранулометрического состава при условии взрывания в зимний период при отсутствии сезонной обводненности и при формировании отрезной щели, во втором случае отмечается уменьшение выхода негабаритных кусков и повышение выхода мелкой фракции. Что касается летнего периода, то с появлением сезонной обводненности качество гранулометрического состава в первоначально необводненном среднетрещиноватом массиве карьера Ньоркпахкский,

ухудшается. Это выражается в появлении более крупных кусков породы, а также в неравномерности гранулометрического состава.

При проведении взрывных работ в условиях Коашвинского месторождения наблюдается равномерный гранулометрический состав при проведении взрывных работ в летний период, когда присутствует фактор сезонной обводненности массива. Напротив, при производстве БВР в зимний сезон в условиях обводненного трещиноватого массива наблюдается ухудшение качества гранулометрического состава. Как и в Ньоркпахкском карьере, при формировании отрезной щели в условиях карьера Коашвинский наблюдается уменьшение медианного размера куска породы, что свидетельствует о выходе более мелкой фракции.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНИРУЮЩИМ ШНУРОМ И ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ДШ И НСИ

4.1 Анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава взорванной горной массы при инициировании детонирующим шнуром в сочетании с НСИ и при использовании только детонирующего шнура

Согласно [107, 108] в 2022 году на российском рынке средств инициирования возник кризис, который проявился в нехватке неэлектрических систем инициирования. В связи с этим потребление детонирующего шнура горнодобывающими предприятиями возросло. Эту тенденцию можно проследить при анализе данных, полученных из Единой межведомственной информационно-статистической системы, которые в свою очередь формируются исходя из оборота промышленных взрывчатых материалов в России, а именно по результатам ведения баланса производства, распространения и применения взрывчатых материалов промышленного назначения и пиротехнических изделий, который проводится раз в полгода Министерством промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) (см. рис. 1.1).

На сегодняшний день данная проблема до конца не урегулирована, так как в связи с введёнными санкциями до сих пор не найдены бесперебойные источники поставки НСИ, комплектующих и компонентов для их производства.

Данное исследование направлено на проведение сравнительного анализа результатов массовых взрывов в аналогичных условиях с применением различных средств инициирования, а именно неэлектрической системы инициирования и детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ.

В ранее проводимых исследованиях [106] были выявлены следующие закономерности: при проведении взрывных работ в карьере изначально с водообильным массивом, дополнительная сезонная обводненность в виде осадков не сказывается отрицательным образом на качестве гранулометрического состава, напротив, при взрывании в необводненном массиве, сезонная обводненность ухудшает качество гранулометрического состава взрываемого массива.

Был проведён анализ результатов взрывного дробления при вышеописанных горно-геологических условиях и параметрах БВР с учётом закономерностей, выявленных в главе 3 в условиях рудника «Восточный», только в качестве средств инициирования применялись неэлектрические системы инициирования в сочетании с детонирующим шнуром и при использовании только ДШ. Был осуществлён поиск условий, при которых качество дробления при взрывании с применением ДШ будет аналогичным результатам с использованием НСИ. При комбинировании неэлектрических систем инициирования и детонирующего шнура принимается, что НСИ применяется в качестве внутрискважинной линии, а ДШ – для монтажа поверхностной сети. Особенностью применения детонирующего шнура в скважинных зарядах является то, что порядок инициирования прямой, это связано с тем, что при прохождении инициирующего импульса по ДШ возникает воздействие на колонку заряда ЭВВ с возможным схлопыванием пузырьков газогенерации. При использовании комбинированной схемы ДШ+НСИ применяется обратное инициирование.

Возможные конструкции зарядов с применением ДШ и комбинировании ДШ +НСИ представлены на рисунке 4.1.

Оценка качества дробления проводилась по нескольким критериям: по характеру искривления кумулятивных кривых, а также по параметрам функции Swabrec (x_{max} , x_{50} , критерий P97% и степенного показателя b).



Рисунок 4.1 – Схема конструкции заряда ЭВВ, инициированного средствами инициирования а) НСИ в сочетании с ДШЭ-12; б) ДШЭ-12.

Были проанализированы 12 массовых взрывов, произведенные в двух карьерах Ньюоркпахкский и Коашвинский. Как и было написано выше условия были аналогичные, как и в главе 3 за исключением высоты уступа Коашинского карьера, в данном случае высота уступа составляет 12 м.

Ниже представлена сводная таблица 4.1, в которой отображены основные показатели функции Swebrec при анализе полученного грансостава на рассматриваемых карьерах.

Замеры гранулометрического состава 25-28 (рисунок 4.2 а) были проведены в условиях карьера Ньюоркпахкский в летний период (сезонная обводненность) при высоте уступа 15 м с применением детонирующего шнура (замеры 25-26) и при совместном использовании НСИ и ДШ (замеры 27-28). Все линии на графике имеют схожее искривление пологого характера, что характерно для неоднородного распределения, наблюдается повышение максимального размера куска x_{max} для всех кривых, что указывает на выход укрупненной фракции, что особенно характерно при совместном использовании НСИ и ДШ.

Таблица 4.1 - Основные показатели по 12 массовым взрывам при взрывании ДШ и ДШ+НСИ в условиях рассматриваемых карьеров

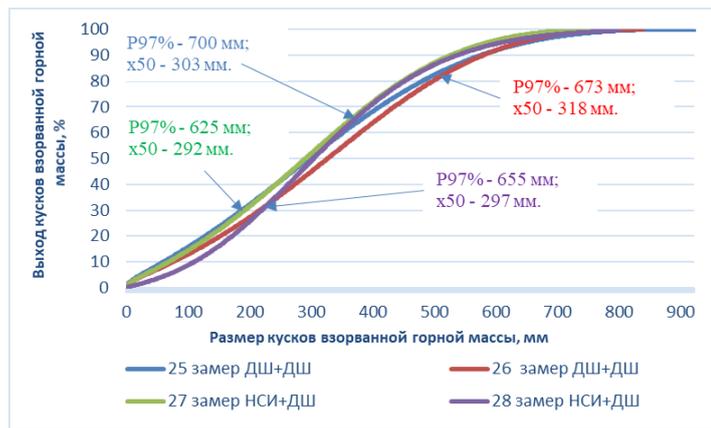
№ замера	Карьер*	Средства инициирования (внутрискважинные; поверхностные)	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа	Порядок инициирования	Показатели закона распределения Swebrec			
							P97%, мм	X _{max} , мм	X ₅₀ , мм	b
25	НК	ДШ; ДШ	не обводнен	лето	15	прямое	700	923	303	2,499
26	НК	ДШ; ДШ	не обводнен	лето	15	прямое	673	838	318	2,340
27	НК	НСИ; ДШ	не обводнен	лето	15	обратное	625	800	292	2,476
28	НК	НСИ; ДШ	не обводнен	лето	15	обратное	655	1110	297	3,790
29	НК	ДШ; ДШ	не обводнен	зима	30, сдвоенный уступ	прямое	899	1166	280	2,059
30	НК	ДШ; ДШ	не обводнен	зима	15	прямое	963	1397	315	2,521
31	НК	НСИ; ДШ	не обводнен	лето	30, сдвоенный уступ	обратное	840	1573	339	3,882
32	НК	НСИ; ДШ	не обводнен	лето	15	обратное	1128	1405	403	2
33	НК	ДШ; ДШ	обводнен	зима	15	прямое	646	691	260	1,315
34	КК	ДШ; ДШ	обводнен	лето	24, сдвоенный уступ	прямое	1224	1628	412	2,211
35	НК	НСИ; ДШ	не обводнен	лето	15	обратное	814	985	303	1,921
36	КК	НСИ; ДШ	обводнен	лето	24, сдвоенный уступ	обратное	605	734	245	2

* где НК – Ньоркпахкский карьер, КК – Коашвинский карьер.

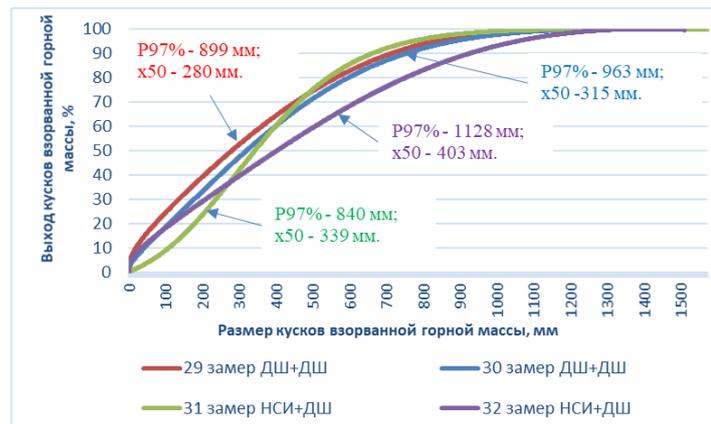
На рисунке 4.2 б, соответствующему замерам 29-32, представлены результаты проведения взрывных работ с учётом сезонности при образовании

отрезной щели в условиях карьера Ньюкпахкский. В первую очередь сравним кривые 31 и 32 соответствующие взрыванию НСИ в сочетании с ДШ. Несмотря на то, что оба массовых взрыва были произведены в летний период, зеленая линия, соответствующая взрыву с контурной щелью, показывает наилучший результат среди всех кривых по однородности, в то время как фиолетовая кривая подтверждает, что в летний период в условиях карьера Ньюкпахкский результаты дробления ухудшаются; в обоих случаях наблюдается выход негабарита. При анализе кумулятивных кривых, характеризующие гранулометрический состав с использованием ДШ, наблюдается схожий характер кривых, соответствующим замерам 29-30, но показатели функции Swebrec для красной кривой (замер 29) лучше, чем для синей кривой (замер 30), а именно $x_{50} - 280$ мм, $P_{97\%} - 899$ мм – замер 29, $x_{50} - 315$ мм, $P_{97\%} - 963$ мм – замер 30. Из этого следует, что при взрывании ДШ в качестве внутрискважинной линии в данных условиях показатели медианного размера меньше по сравнению с показателями, полученными при взрывании НСИ, но это достигается в ущерб однородности состава при использовании ДШ.

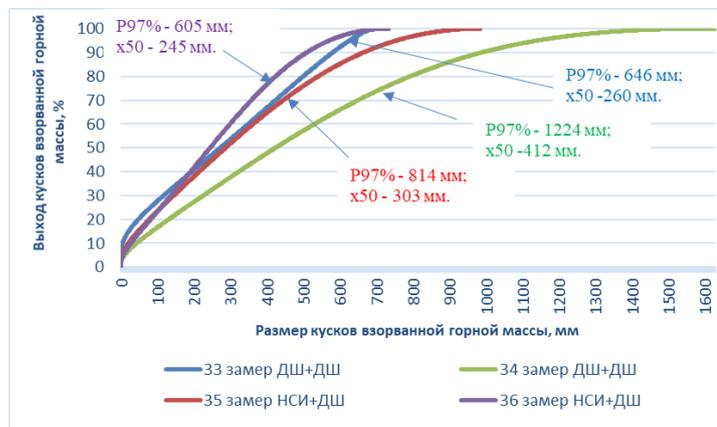
При замерах 33-36 (рисунок 4.2 с) варьировались несколько сравнительных параметров - горно-геологические условия, различные высоты уступов с контурной щелью/без контурной щели, а также сезонность проведения работ. Сравним кумулятивные кривые в условиях карьера Коашвинский, массив которого характеризуется обводненностью и трещиноватостью в период сезонной обводненности (лето) при формировании отрезной щели. Кривая 34 описывает взрывание с применением ДШ, она сравнивается с кривой, соответствующей замеру 36 (НСИ), в данном случае зеленая линия №34 описывает наихудшее распределение грансостава с выходом негабарита, напротив при взрывании с НСИ в сочетании с ДШ (замер 36) описывает наилучший результат по однородности для данной группы замеров, тем самым подтверждается выявленная ранее закономерность, что при взрывании в обводненном массиве в период сезонной обводненности качество дробления улучшается [104].



а) замеры 25-28



б) замеры 29-32



с) замеры 33-36

Рисунок 4.2 – Кумулятивные кривые при взрывании в условиях карьеров Ньюоркпахкский и Коашвинский с применением ДШ и при сочетании ДШ и НСИ

Проверим ранее выявленную закономерность, что в зимний период в необводненном массиве качество дробления лучше, чем при проведении взрывных работ в летний сезон в тех же горно-геологических условиях, но с разным типом средств инициирования. Сравним замер 33, который соответствует

взрыванию ДШ в зимний период и замер 35 при взрывании с использованием НСИ в летний период в аналогичных условиях карьера Ньоркпахкский. Синяя кривая, имеет более крутой наклон, что свидетельствует о более равномерном грансоставе, также значение x_{\max} (691 мм) меньше, чем для замера 35 ($x_{\max} = 985$ мм), что свидетельствует о более измельчённом массиве.

По результатам анализа подтверждается факт, что сезонная обводненность массива в летний период отрицательно сказывается на показателях гранулометрического состава для карьера Ньоркпахкский с менее трещиноватым и необводненным массивом. Поэтому применение ДШ в данном случае рекомендуется, так как характер распределения гранулометрического состава при использовании НСИ и ДШ в данном случае имеет схожий характер.

При взрывании в аналогичных условиях установлено, что при использовании НСИ гранулометрический состав более однородный по сравнению с использованием ДШ. При инициировании ДШ внутрискважинных зарядов происходит переизмельчение массива, но при этом вероятность выхода негабаритов уменьшается. Вероятно, переизмельчение происходит в верхней части массива за счет прямого инициирования.

При взрывании МПЩ с применением НСИ гран. состав лучше, чем с использованием ДШ, возможной причиной этому являются сложные схемы монтажа и малый диапазон замедлений при взрывании ДШ, а также близкое расположение скважин друг к другу при формировании отрезной щели, что при использовании ДШ может привести к подбитию скважины, поэтому при заоткоске бортов рекомендуется применять НСИ [107].

Выводы по главе 4

В ходе исследований было установлено, что тенденция применения детонирующего шнура или сочетания детонирующего шнура с неэлектрическими системами инициирования при взрывании массива горных пород имеет место быть в нынешних реалиях, так как геополитическая ситуация не изменилась с 2022 года и предыдущие источники поставки НСИ уже нерелевантны,

а новые источники поставки комплектующих НСИ характеризуются непостоянством.

В результате исследований были выявлены параметры, влияющие на качество гранулометрического состава при взрывании детонирующим шнуром и при комбинировании ДШ и НСИ: обводненность массива (в том числе сезонная); высота уступа; трещиноватость.

По результатам анализа вышеприведенных замеров можно установить следующие закономерности:

- при взрывании в условиях сезонной обводненности, то есть в летний период, в среднетрещиноватом необводненном массиве в условиях карьера Ньюоркпахкский применение детонирующего шнура возможно, так как установлено, что распределения гранулометрического состава при использовании НСИ и ДШ имеют схожий характер.
- при аналогичных горно-геологических условиях и параметрах БВР, грансостав при взрывании неэлектрическими системами инициирования имеет более однородный характер, нежели чем при использовании детонирующего шнура. В свою очередь, большую часть гранулометрического состава, полученного при применении ДШ, составляет мелкая фракция, и случаи выхода негабаритной фракции встречаются реже. Вероятно, переизмельчение породы происходит по причине прямого способа инициирования внутрискважинной сети с применением ДШ.
- контурное взрывание лучше всего производить с применением НСИ, так как по результатам анализа выявлено, что в этом случае качество дробления лучше, чем при использовании детонирующего шнура. Этот факт можно объяснить тем, что при построении вскрытия контурной щели необходимо реализовать сложные схемы монтажа в сочетании с различными диапазонами замедлений, что проблематично осуществить при использовании ДШ в приконтурной зоне. К тому же при применении детонирующего в данных целях возможно «подбитие» соседних скважин, что приведет к потенциальным отказам.

ГЛАВА 5 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ДЕТОНИРУЮЩЕГО ШНУРА ПРИ ВЗРЫВАНИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ В УСЛОВИЯХ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

5.1 Особенности применения детонирующего шнура в условиях рудника «Восточный»

В главах 3 и 4 был проведен анализ результатов замеров распределения гранулометрического состава при взрывании НСИ, ДШ и при их комбинирование. При подготовке рекомендаций по применению детонирующего шнура в тех или иных условиях рассмотрим особенности применения детонирующего шнура при монтаже взрываемого блока.

Применение детонирующего шнура, до того момента как сложилась ситуация на рынке с нехваткой неэлектрических систем инициирования, было распространено более 10-15 лет назад, поэтому поколение взрывперсонала за это время сменилось и некоторые из них никогда не работали с данным видом средства инициирования. Поэтому не мало важно упомянуть характерные особенности применения детонирующего шнура в условиях рудника «Восточный».

Как было сказано в главе 1, навеска взрывчатого вещества в 1 погонном метре детонирующего шнура для самой распространённой марки ДШЭ-12 составляет 12 г/пог.м, также детонирующие шнуры относятся к классу 1, подкласс 1.1 группе совместимости D по хранению и транспортировке согласно техническому регламенту Таможенного союза «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» ТР ТС 028/2012 от 20.07.2012, в связи с этим при обращении с детонирующим шнуром стоит избегать механических воздействий, трения, открытого огня и нагрева свыше температуры, указанной в технических параметрах ДШ.

При монтаже поверхностной сети с применением ДШ не допускается образования узлов и петель. Соединение детонирующего шнура необходимо производить прямым морским узлом или в накладку как на рисунке 5.1 согласно требованиям ГОСТ РО 1375-001-2010. Недопустимые соединения детонирующего шнура, которые приведут к отказу, представлены на рисунке 5.2 согласно требованиям ГОСТ РО 1375-001-2010.

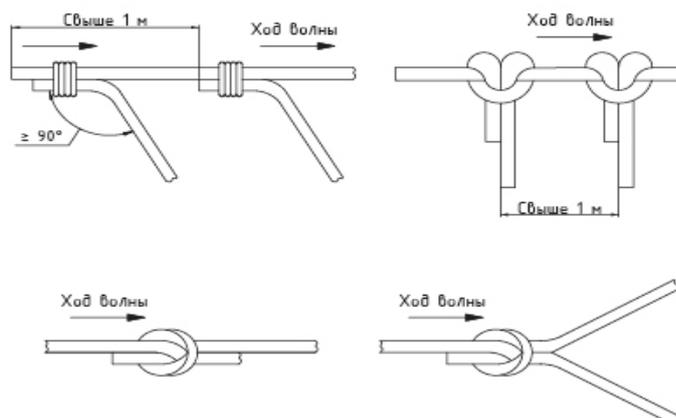


Рисунок 5.1 – Допустимые способы соединения детонирующего шнура

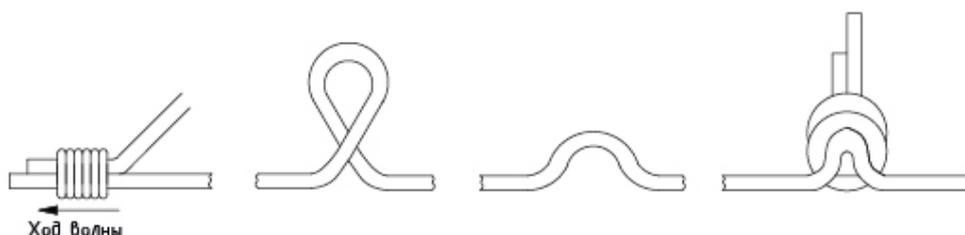


Рисунок 5.2 – Недопустимые способы соединения детонирующего шнура

Для создания замедлений в блоке используются пиротехнические реле РП-Д, с их помощью можно создать замедление между группой зарядов 20, 30, 45, 60, 80, 100 мс. При создании поверхностной сети с применением ДШ используются такие схемы как: диагональная порядно-последовательная; врубовая клиновья технологическая; врубовая трапецеидальная технологическая; врубовая клиновья траншейная. Схемы инициирования с применением детонирующего шнура представлены на рисунках 5.3 – 5.6.

При монтаже взрывной сети с применением детонирующего шнура в зимний период затрачивается дополнительное время и ресурсы взрывников, так как при пониженной температуре окружающей среды оплетка шнура из ПВХ начинает плохо гнуться. Эта проблема актуальна для месторождений, находящихся за полярным кругом, так как в такой местности зима длится продолжительное время.

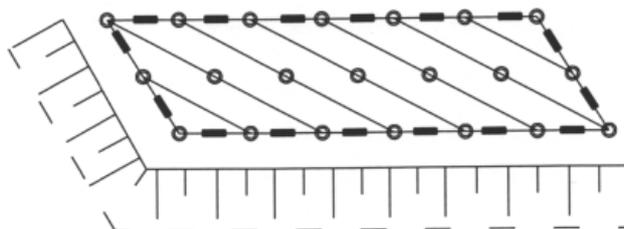


Рисунок 5.3 – Диагонально порядно – последовательная схема

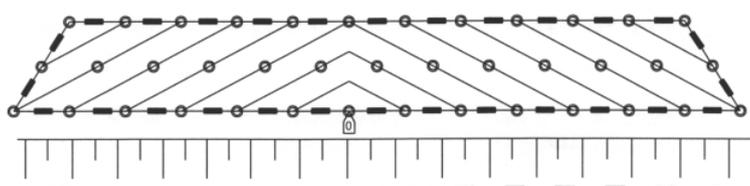


Рисунок 5.4 – Врубовая клиновья технологическая схема

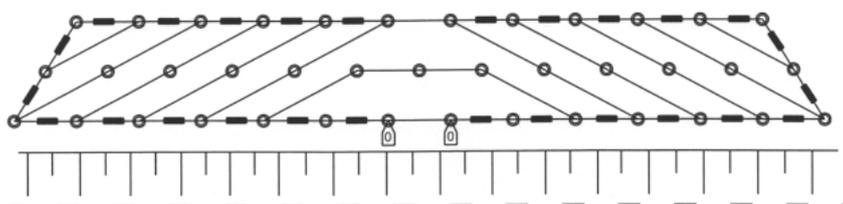


Рисунок 5.5 – Врубовая трапецидальная технологическая схема

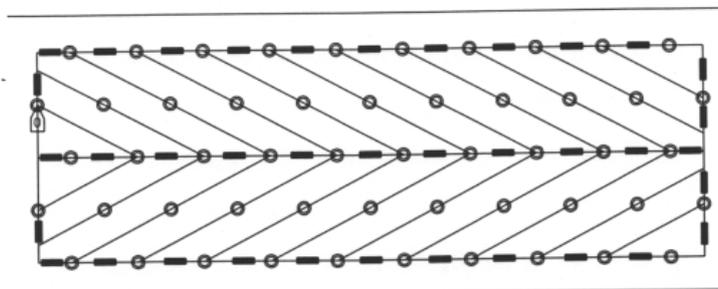


Рисунок 5.6 – Врубовая клиновья траншейная схема

Согласно информации, приведённой в главе 3, в качестве эмульсионного взрывчатого вещества на руднике «Восточный» применяется ЭВВ «Фортис».

В связи особенностью совместного применения детонирующего шнура и эмульсионных взрывчатых веществ, а именно оказание воздействия детонационного импульса при инициировании ДШ на колонку заряда ЭВВ, об этом упомянуто в главе 1, в 2022 году были внесены изменения в ТУ 7276-001-23308410-2006, согласно которым при использовании детонирующего шнура в качестве внутрискважинной сети инициирование скважинного заряда ЭВВ «Фортис» необходимо производить только с расположением промежуточного детонатора в верхней части скважинного заряда, то есть прямое инициирование.

При взрывании детонирующим шнуром увеличивается сейсмическое воздействие на близлежащие сооружения. Это происходит потому, что при взрывании детонирующим шнуром увеличивается количество одновременно взрываемых скважин, так как при использовании пиротехнических реле, в частности РП-Д, можно создать только шесть степеней замедлений (20, 30, 45, 60, 80, 100 мс) .

Но несмотря на данные факторы для каждого проекта на массовый взрыв производится индивидуальный расчет безопасных расстояний по разлету кусков горной массы, сейсмически безопасных расстояний до охраняемых объектов и безопасные расстояния по действия ударно-воздушной волны для каждого проекта. Исходя из этого за безопасное расстояние принимается наибольшее из установленных по различным поражающим факторам для предотвращения повреждений и нарушения функционирования инфраструктуры.

При возникновении отказов при взрывании детонирующим шнуром, порядок ликвидации аналогичен, как и при использовании других систем инициирования, единственное отличие в том, что разрешено производить вымывание заряда из скважины, инициируемого с использованием детонирующего шнура, согласно п. 203 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» от 3 декабря 2020 № 494.

На руднике «Восточный» детонирующий шнур применяется при дроблении негабаритов методом шпуровых и накладных зарядов. Пример схемы дробления негабаритов методом шпуровых зарядов представлен на рисунке 5.7.

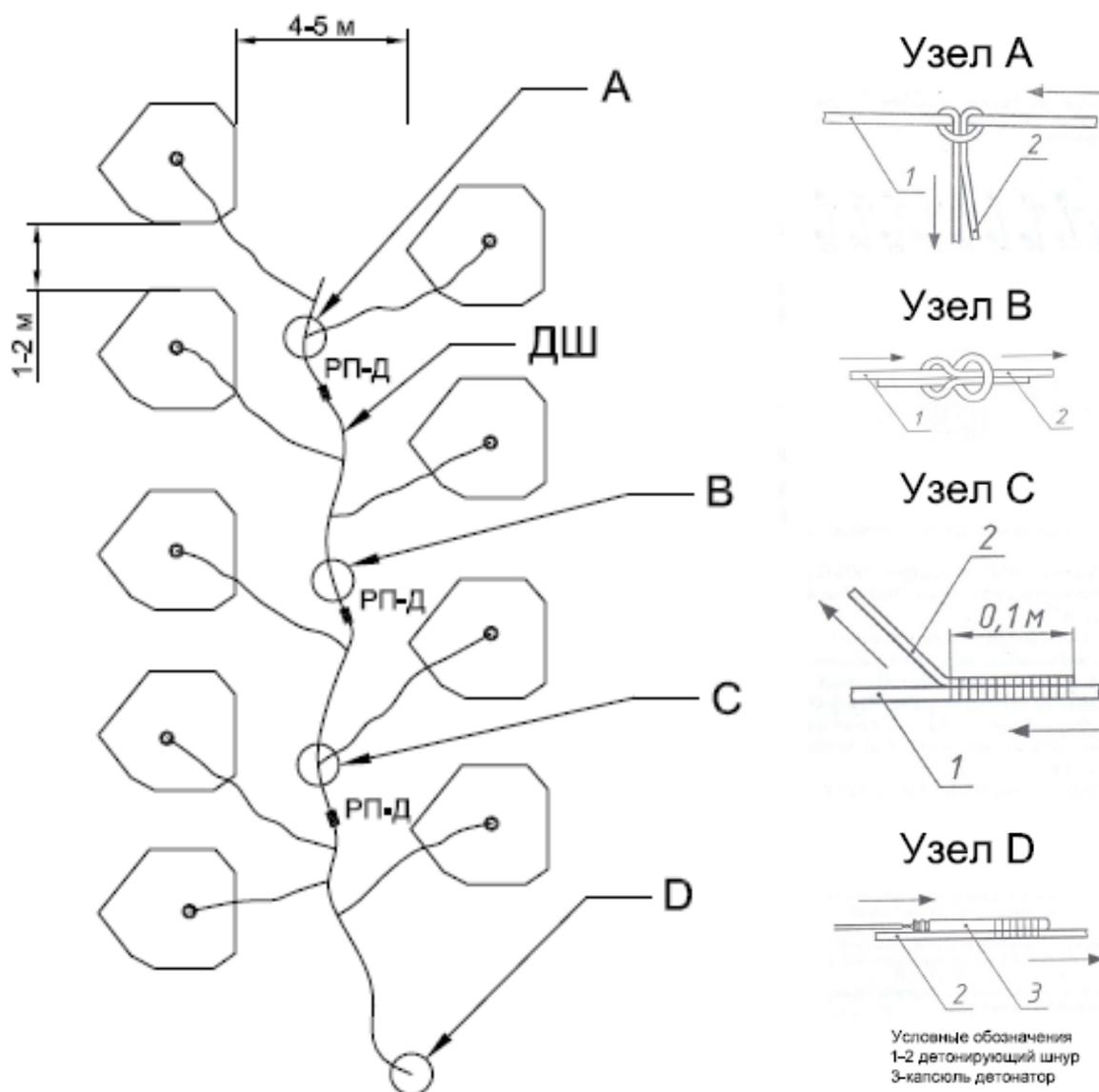


Рисунок 5.7 – Расположение и монтаж групп шпуровых зарядов при дроблении негабарита с использованием ДШ

5.2 Рекомендации по использованию детонирующего шнура в скважинных зарядах ЭВВ в условиях рудника «Восточный»

По результатам проведённого анализа в главе 3 и 4 выявлены условия, при которых применение детонирующего шнура в качестве внутрискважинной и поверхностной линии обеспечивает аналогичное качество гранулометрического состава как при использовании НСИ.

По результатам анализа при взрывании в условиях необводненного средне-трещиноватого массива в летний период при высоте уступа 15 м в условиях Ньюркапхкского карьера рекомендуется применение детонирующего шнура, так как качество дробления такое же, как и с применением НСИ. Это происходит по причине того, что при данных горно-геологических условиях при взрывании с использованием НСИ наблюдается удовлетворительный результат дробления, который не ухудшается с применением ДШ.

В условиях необводненного массива Ньюркапхкского карьера в зимний период, когда параметр сезонной обводненности отсутствует не рекомендуется применение детонирующего шнура при взрывании необводненного среднетрещиноватого массива, так как данные условия характеризуются наиболее благоприятными по получаемому качеству дробления при использовании НСИ. При использовании детонирующего шнура гранулометрический состав весьма неоднороден. Данный факт можно объяснить тем, что в зимний период использование детонирующего шнура становится неудобным при монтаже взрывной сети, в силу того что при отрицательных температурах ДШ теряет свою гибкость, что замедляет работу персонала, тем самым потенциально ведет к ухудшению качества производимых работ.

Не рекомендуется монтировать внутрискважинную и поверхностную сети с применением детонирующего шнура при формировании отрезной щели в горно-геологических условиях апатит-нефелинового месторождения в обводненном и необводненном массиве в летний и зимний периоды, по причине того, что возможно «подбитие» соседней скважины, так как при взрывании с

ДШ нет возможности использовать широкий диапазон замедлений при формировании контурной щели.

Выводы по главе 5

В главе 5 описаны условия применения детонирующего шнура в карьерах Коашвинский и Ньюкпахкский. На руднике «Восточный» при монтаже поверхностной сети с использованием ДШ осуществляются такие схемы как: диагональная порядно-последовательная; врубовая клиновья технологическая; врубовая трапецидальная технологическая; врубовая клиновья траншейная.

Основные моменты, на которые стоит акцентировать внимание при выполнении работ с применением детонирующего шнура, это: способ монтажа, так как при неправильном соединении ДШ могут возникнуть отказы; увеличение сейсмического воздействия в связи с малым диапазоном степеней замедлений, реализуемых с помощью РП-Д; возможность ликвидации отказа методом вымывания скважинного заряда; применение с целью разделки негабаритов.

Приведены рекомендации по применению детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ как альтернативы при нехватке неэлектрических систем инициирования, заключающиеся в применении детонирующего шнура в летний период в необводненном массиве со средней степенью трещиноватости в условиях карьера Ньюкпахкский.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача обоснования возможности и оценки условий использования детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ вместо неэлектрических систем инициирования, что имеет важное значение для импортозамещения средств инициирования.

Основные научные и практические результаты, полученные автором, заключаются в следующем:

1. В ходе анализа результатов массовых взрывов было определено, что в условиях апатит-нефелинового месторождения при взрывании с применением НСИ в наибольшей мере на качество гранулометрического состава влияют трещиноватость, обводненность, высота уступа, сезонность ведения взрывных работ.

2. По результатам анализа графиков кумулятивных кривых установлено, что при взрывании с использованием НСИ в условиях необводненного среднетрещиноватого массива в условиях карьера Ньюоркпахкский в зимний период при отсутствии сезонной обводненности гранулометрический состав описывается однородным распределением и характеризуется как оптимальный.

3. По результатам анализа графика кумулятивных кривых установлено, что при взрывании с использованием НСИ в условиях обводненного трещиноватого массива в условиях карьера Коашвинский в летний период при наличии сезонной обводненности гранулометрический состав описывается однородным распределением и характеризуется как оптимальный.

4. При постановке борта карьера в конечное положение в условиях обводненного и необводненного массива в летний и зимний периоды при взрывании с использованием НСИ установлена закономерность получения

преимущественно однородного грансостава удовлетворительного качества с переизмельчением массива.

5. При взрывании в аналогичных условиях установлено, что при использовании НСИ гранулометрический состав более однородный по сравнению с использованием ДШ. При инициировании ДШ внутрискважинных зарядов происходит переизмельчение массива, но при этом вероятность выхода негабаритов уменьшается. Вероятно, переизмельчение происходит в верхней части массива за счет прямого инициирования.

6. Определено, что при взрывании детонирующим шнуром в условиях необводненного среднетрещиноватого массива в летний период гранулометрический состав аналогичен получаемому при взрывании с применением неэлектрических систем инициирования.

7. Не рекомендуется применять детонирующий шнур в зимний период, в необводненном среднетрещиноватом массиве, а также монтировать внутрискважинную и поверхностную сети с применением детонирующего шнура при взрывании с целью формирования отрезной щели в горно-геологических условиях апатит-нефелинового месторождения в обводненном и необводненном массиве в летний и зимний периоды, так как в вышеописанных условиях по результатам анализа кумулятивных кривых гранулометрический состав хуже, чем с применением НСИ в аналогичных условиях. Данный факт можно обосновать сложностью монтажа взрывной сети, малыми диапазонами замедлений при взрывании ДШ, а также близкое расположение скважин друг к другу при формировании отрезной щели.

8. Результаты диссертационного исследования представляют интерес для АО «ЭВОБЛАСТ РУС» и предполагаются к практическому использованию при создании проектов на массовые взрывы на карьерах Ньоркпахкский и Коашвинский рудника «Восточный» Мурманской области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева Л. А., Жариков С. Н., Кутуев В. А. О влиянии трещиноватости на качество дробления горных пород и сохранность законтурного массива // Проблемы недропользования. – 2022. – № 3. – С. 66-72.
2. Суханов А. Ф., Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом. Учебник для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. – М: Недра, 1983. – 344 с.
3. Б. Н. Кутузов Взрывное и механическое разрушение горных пород – Москва: Издательство Недра. 1973. – 312 с.
4. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом: Учебник для вузов. – 2-е издание стереотипное. – М.: Издательство «Горная книга», 2009. – 471 с.
5. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Баженова А. В., Соколов С. Т. Методические принципы измерения кусковатости горной массы // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2020. – № 3. – С. 112–123.
6. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 822-832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84
7. Симонов П. С. Особенности определения размера среднего куска и выхода негабарита при взрывных работах на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 320–327.
8. Ломтадзе В. Д. Словарь по инженерной геологии. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный институт, 1999. – 360 с.
9. Liu Q., Shi F., Wang X., Zhao M. Statistical Estimation of Blast Fragmentation by Applying 3D Laser Scanning to Muck Pile. Shock and Vibration. – 2022. – С.1-15. <https://doi.org/10.1155/2022/3757561>
10. Великанов В. С., Дремин А. В., Чернухин С. А., Ломовцева Н. В. Технологии нейронных сетей в интеллектуальном анализе данных

гранулометрического со-става взорванных пород // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С.90-94. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>.

11. Дремин А. В., Великанов В. С. Цифровые технологии для взрывных работ: интеллектуальный автономный программно-аппаратный комплекс компании «Давтех» для анализа гранулометрического состава горных пород // Горная промышленность. – 2023. – № 6. – С. 57-62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-57-62>.

12. Дремин А. В., Марков Ю. В. Способ определения гранулометрического состава развала горной массы. Патент России № 2807542. 2023. Бюл. № 32.

13. Дремин А. В., Великанов В. С. Постановка многокритериальной задачи анализа и прогнозирования гранулометрического состава взорванных горных пород // Горная промышленность. – 2023. – № 5. – С. 52-60.

14. Игнатенко И. М., Дунаев В.А., Тюпин В.Н. Совершенствование методики предпроектной оценки взрываемости массивов скальных горных пород в карьерах // Горный журнал. – 2019. – №1. – С. 46-50. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10

15. Вохмин С. А., Курчин Г. С., Шевнина Е. В., Кирсанов А. К., Костылев С. С. Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом // «Известия вузов. Горный журнал» – 2020. – № 1. – С.14–24.

16. Комащенко В. И., Воробьев Е. Д., Волков Д. А. Потенциал повышения качества, надежности и экологической безопасности технологии взрывных работ на карьерах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2018. – Вып. 1. – С.166-179.

17. Ракишев Б. Р., Орынбай А. А., Ауэзова А. М., Куттыбаев А. Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №8. – С.83-94.

18. Наимова Р. Ш., Норова Х. Ю., Мирзаев А. А. Обоснование влияния рациональной высоты обрабатываемого уступа на эффективность извлечения полезных ископаемых из недр // Взрывное дело. – 2021. – № 132/89. – С. 133-142.
19. Сафронов В. П., Сарычев В. И., Зайцев Ю. В. Сафронов В. В. Совершенствование взрывной подготовки выемочного блока трещиноватых скальных пород к экскавации // Известия ТулГУ. Наука о Земле. – 2023. – Вып.1. – С. 371-381. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-371-381.
20. Жариков С. Н., Кутуев В. А. О свойствах объекта разрушения и параметрах взрывной отбойки на карьерах // Известия ТулГУ. Наука о Земле. – 2022. – Вып. 3. – С. 283-289.
21. Ляшенко В. И., Голик В. И., Комащенко В. И., Гурин А. А. Управление качеством дробления горной массы при взрывных работах в карьерах // Взрывное дело. – 2021. – № 132/89. – С. 108-127.
22. Тюпин В. Н. Интервалы замедления для качественного дробления трещиноватых массивов взрывом в карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 70-78. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_70.
23. Жариков И. Ф. О возможности управления процессами взрывного дробления при добыче полезных ископаемых // Взрывное дело. – 2020. – № 126/83. – С. 5-15.
24. Ишейский В. А., Рядинский Д. Э., Магомедов Г. С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрывающего массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 79-95.
25. Масаев Ю. А., Масаев В. Ю., Политов А. П. Влияние буровзрывных работ на нарушенность законтурного массива горных выработок // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 4 (158). С. 75-83. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-75-83.

26. Шляпин А. В. Экспериментальное определение коэффициентов фракционности // Взрывное дело. – 2023. – № 139/96. – С. 16-25.
27. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Гришин А. Н., Богатырев А. В., Пороховский Н. Н., Рублев Д. Е. О перспективных направлениях использования экспериментальных данных сейсмо-деформационного мониторинга в буровзрывных работах на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С.104-122. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-104-122.
28. Ефремов Э. И., Пономарев А. В., Баранник В. В., Бережецкий А. Я. Влияние обводненности горных пород на механизм их разрушения и технологию взрывной отбойки // Вестник КДПУ. – 2006. – Вып. 2(37), Ч. 2. – С. 75–77.
29. Реготунов А. С., Меньшиков П. В., Жариков С. Н., Кутуеов В. А. Современные технические решения для адаптации параметров взрывного разрушения горных пород на карьерах // Проблемы недропользования. – 2022. – № 3 – С.114-127. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.114.
30. Корнев К. Л., Маринин М. А., Ишейский В. А. Повышение эффективности буровзрывных работ для условий высокой обводненности массива // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 1. – С. 228-236.
31. Аленичев И. А. Обоснование параметров взрывной отбойки обводненных горных пород хибинских месторождений (на примере Коашвинского месторождения АО «Апатит»): дис. канд. тех. наук: – Апатиты.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, 2016. – 136 с.
32. Аленичев И. А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учетом обводненности апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 7. – С. 364-373.
33. Козырев С. А., Аленичев И. А. Влияние обводненности на прочностные и динамические характеристики апатит-нефелиновых руд

Коашвинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №S56 –С. 404-412.

34. Кутуев В. А., Васильева Л. А., Жариков С. Н. Об устойчивости бортов карьера Джетыгаринского месторождения при ведении взрывных работ в приконтурной зоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – №7-1. – С 25-36.

35. Ирисбоев Б. Х., Кудратов И. А. Экспериментальное влияние диаметра заряда на степень дробления горных пород взрывом // Central Asian Academic Journal of scientific research. – 2022. – № 5. – С.631-634.

36. Маринин М. А., Афанасьев П. И., Сушкова В. И., Устименко К. Д., Ахметов А. Р. Опыт применения модели Кузнецова-Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 96–109. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_96.

37. Рождественский В. Н. Опыт применения систем неэлектрического инициирования скважинных зарядов при дроблении скальных, вязких пород взрывом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 3. – С. 77-82.

38. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б., Лысак Ю. А. Влияние направления инициирования зарядов взрывчатых веществ на предразрушение массива скальных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 2. – С.50-57.

39. Белин В. А., Кутузов Б. Н., Ганопольский М. И., Оверченко М. Н. Технология и безопасность взрывных работ – М.: Изд-во Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2016. – 424 с.

40. Малков А. В., Телегина Е. А., Фирер А. А. О направлениях совершенствования ведения баланса промышленных взрывчатых материалов // Компетентность. – 2022. – № 6 – С. 22-25. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-6-22-25

41. Сайт ЕМИСС государственная статистика [Электронный ресурс] – <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения (06.08.2023))
42. Рудомазин В. В., Телегина Е. А., Цветкова Е. А. Контроль оборота промышленных взрывчатых материалов и их потребность в горнодобывающей отрасли // Успехи в химии и химической технологии. ТОМ XXXV. – 2021. № 12. – С. 134–138
43. Корнеева А. В., Кутузов Б. Н., Работинский Н. И., Сосин В. А. Современные промышленные взрывчатые вещества в России и за рубежом // Горный журнал. – 1998. – № 7. – С. 45–49.
44. Корнеева Л. В. Промышленные взрывчатые вещества, применяемые в России и их пути совершенствования // Горный журнал. – 1995. – № 9. – С. 49–52.
45. Кутузов Б. Н. Перспективы использования эмульсионных промышленных ВВ на горных предприятиях // Горный журнал. – 2001. – № 12. – С. 15–16.
46. Колганов Е. В., Сосин В. А. Концепция разработки безопасных и экологически чистых промышленных взрывчатых веществ // Горный журнал. – 2001. – № 12. – С. 1–4.
47. Кутузов Б. Н. Перспективы совершенствования ассортимента промышленных ВВ для карьеров // Горный журнал. – 1996. № 9–10. – С. 39–43.
48. Комащенко В. И., Воробьев Е. Д., Белин В. А. Перспективы развития промышленных взрывчатых веществ и применения современных технологий взрывных работ с учетом экологической безопасности // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – С. 157–167.
49. Кутузов Б. Н. Проблемы замены тротилсодержащих ВВ на бестропиловые на горных предприятиях России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. № 10. – С. 334–336.
50. Ефремов Э. И., Пономарёв А. В., Баранник В. В. Технология формирования скважинных зарядов ВВ и отбойки обводненных горных пород //

Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S5. – С. 32-40.

51. Ананьин А. А., Жуков Ю. Н., Янкилевич В. М., Жуков А. Н., Лёвшин Д. А., Сергеев А. Г. Разработка и производство промышленных взрывчатых веществ в ФГУП «Бийский олеумный завод» // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2006. – № 2. – С. 78–81.

52. Жаркенов М. И., Щепкин Ю. П., Шарапов А. М. Совершенствование ассортимента ВВ, применяемого при взрывной отбойке в НПО «Жезказганцветмет» // Горный журнал. – 1993. – № 11. – С. 31–33.

53. Подозерский Д. С., Едигарев С. А., Вяткин Н. Л. Совершенствование составов взрывчатых веществ // Горный журнал. – 1997. – № 9. – С. 24-27.

54. Добрынин А. А. Взрывчатые вещества. Химия. Составы. Безопасность. – Москва: ИД Академия Жуковского, 2014. – 528 с.

55. Перепелицын А. И., Колганов Е. В., Сосин В. А., Чумбуридзе Г. Г., Комаров Б. Е. Опыт создания установок по производству эмульсионных ВВ // Горный журнал. – 2001. – № 12. – С. 5-12.

56. Почекутов В. И., Беломоин С. В., Никандров В. И. Опыт применения неэлектрической системы инициирования «Нонель» со штатными и горячелюющимися взрывчатыми веществами // Горный журнал. – 1997. – № 9. – С. 27-30.

57. Горшколепов Г. М., Щупановский В. Ф., Карпов М. А., Нечипоренко В. И., Щербинин В. Ф. Эффективность взрывной отбойки горных пород с использованием эмульсионного ВВ Тован // Горный журнал. – 2001. – № 8. – С. 27-29.

58. Соснин В. А., Межеричский С. Э., Печенев Ю. Г., Михайлюкова А. И., Севастьянов А. Б. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19, № 19. – С. 28-33.

59. Горинов С. А. Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ: монография– Йошкар-Ола: Стринг, 2020. – 214 с.

60. Сосин В. А., Межеричкий С. Э. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19, № 19. – С. 84-90.
61. Карабанов И. С., Добрынин И. А. Совершенствование рецептур эмульсионных взрывчатых веществ для подземных взрывных работ // Взрывное дело. – 2023. – № 140/97. – С. 36-46. 12 DOI 10.18698/0372-7009-2023-9-3.
62. Пыталев И. А., Доможиров Д. В., Швабенланд Е. Е., Прохоров А. А., Пронин В. В. Способ повышения качества подготовки пород к выемке при использовании эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах с высокими уступами // Горная промышленность. – 2021. – № 6. – С. 62-67.
63. Белин В. А. Сравнительная оценка подходов к регулированию промышленной безопасности при обороте взрывчатых материалов в РФ и США // Взрывное дело. – 2021. – № 132/89. – С. 143-163.
64. Натаров О. В., Тимофеев М. В. Опыт производства и применения эмульсионного ВВ «Порэмит» в ОАО Апатит // Горный журнал. – 2000. – №2. – С. 44-45.
65. Работинский Н. И., Сахинов Р. Х., Сосин В. А. Новые экологически безопасные и эффективные промышленные ВВ в России и за рубежом // Горный журнал. – 1996. – № 11-12. – С. 46-48.
66. Кирюшина Е. В. Технология и безопасность взрывных работ: учеб, пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 236 с.
67. Лукьянов В. Г. Взрывные работы: учебник для вузов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 402 с.
68. Оника С. Г. Разрушение горных пород взрывом: пособие для студентов специальности 1-51 02 01 «Разработка месторождений полезных ископаемых» – Минск: БНТУ, 2020. – 113 с.
69. Белин В. А., Кутузов Б. Н., Ганопольский М. И., Оверченко М. Н. Технология и безопасность взрывных работ. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. – 424 с.

70. Соболев В. В. Технология и безопасность выполнения взрывных: Учебник. – Днепропетровск.: Национальный горный университет, 2008. – 164 с.
71. Флягин А. С., Меньшиков П. В., Шеменев В. Г. Анализ величин фактических интервалов замедлений неэлектрических систем инициирования // Проблемы недропользования. – 2022. – № 2. – С. 70-74.
72. Ермолаев А.И. Исследование надёжности средств инициирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003 – № 7. – С. 5–7.
73. Александров В.Е. К вопросу о дублировании сетей ДШ, Горный журнал, – 1989. – № 10. – С. 24-28.
74. Глинский В. П., Мардасов О. Ф., Мацеевич Б. В., Шалыгин Н. К., Мохова Н. В. Опыт применения промышленных шашек-детонаторов // Горный журнал. – 2000. – №2. – С. 46-47.
75. Ефремов Э. И., Кутузов Б. Н., Швыдько П. В., Быков Е. К., Чернокур И. Г., Фурман А. И, Шиман Л. Н. Выбор рациональных способов инициирования скважинных зарядов // Горный журнал. – 2000. – № 8. – С. 25-28.
76. Почекутов В. И., Беломоин С. В., Никандров В. И. Опыт применения неэлектрической системы инициирования «Нонель» со штатными и горячелюющимися взрывчатыми веществами // Горный журнал. – 1997. – № 9. – С. 27-30.
77. Григорьев А. В., Листопад Г. Г., Доильницын В. М., Попов В. К., Андреев В. В., Гусев А. Г. Опыт и перспективы применения неэлектрических средств инициирования на карьерах ОАО «Апатит» // Горный журнал. – 2001. – № 8. – С. 37-40.
78. Брухавецкая А. О. Анализ современных разработок в области оценки качества дробления взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 18–31. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_18.

79. Дремин А. В., Великанов В. С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 73-78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>.
80. Брухавецкая А. О., Добрынин И. А. Состояние и перспективы развития систем анализа гранулометрического состава взорванной горной массы в России и за рубежом // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. – М: ИПКОН РАН. – 2022 – С. 68-69.
81. Guo Q., Wang Y., Yang S., Xiang Z. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. Scientific Reports – 12: 7143 – 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11351-0>.
82. Назаренко В. М., Назаренко М. В., Хоменко С. А. Новые подходы при создании автоматизированных систем управления горными работами на базе геоинформационной системы K-MINE // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 6. – С. 155–168.
83. Винивитин Д. В. Автоматизированная система управления горными работами ОАО «Полтавский ГОК» // Использование геоинформационной системы K-MINE в различных сферах деятельности: Сборник докладов II Международного научно-практического семинара «SVIT GIS-2012». – Кривой Рог: Дионис, 2012. – 194– 205 с.
84. Наговицын О. В. Концепция и методы формирования горно – геологической информационной системы (ГГИС MINEFRAME): дис. на соискателя ученой степени докт. техн. наук. – Апатиты: Горный институт «Кольский научный центр Российской академии наук, 2018. – 339 с.
85. Исайченко А. Б., Фидотенко В. С., Сигарев М. Ю., Кононенко Е. А. Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации // Патент России № 2570797. 2015. Бюл. № 34.
86. Викторов С. Д., Казаков Н. Н, Шляпин А. В., Добрынин И. А. Определение грансостава по фотопланограммам с использованием компьютерной программы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S8. – С. 169–174.

87. Ожигин Д. С. Управление состоянием устойчивости прибортового массива на угольных разрезах: дисс. докт. тех. наук – Республика Казахстан. Караганда: Карагандинский государственный технический университет, 2018. – 155 с.
88. Шустерман С. А. Автоматический анализ гранулометрического состава взорванной горной массы по фотографиям // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S5. – С. 67–73.
89. Сайт WipWare [Электронный ресурс] – <https://wipware.com/ru/> (дата обращения 03.01.2023).
90. Галушко Ф. И., Комягин А. О., Мусатов И. Н. Управление качеством взрывной подготовки горной массы на основе оптимизации параметров БВР // Горная промышленность. – 2017. – № 5. – С. 65-68.
91. Аленичев И. А., Рахманов Р. А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 334-341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2
92. Ракишев Б. Р., Орынбай А. А., Мусахан А. Б. Гранулометрический состав массива пород и взорванной горной массы при различных шкалах крупности естественных отдельностей и кусков пород // Взрывное дело. – 2021. – № 132/89. – С. 7-26.
93. Jeong-Hun Han, Jae-Joon Song Statistical estimation of blast fragmentation by applying stereophotogrammetry to block piles // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – P. 150-158/ <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.02.010>.
94. Оверченко М. Н., Толстунов С. А., Мозер С. П., Белин В. А. Определение оптимальных параметров технологических процессов при взрывании скважинных зарядов с воздушными промежутками // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 87-99. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_87.

95. Дремин А. В., Марков Ю. В. Групповая оценка гранулометрического состава осыпи буровзрывных работ // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2023. – № 4 (61). – С. 276-281.
96. Шапурин А. В., Васильчук Я. В. Прогнозирование гранулометрического состава взорванных горных пород // Взрывное дело. – 2013. – № 109/66. – С. 79-92.
97. Афанасьев П. И., Менжулин М. Г. Изменение среднего размера куска в зоне дробления на основе расчета диссипации энергии // Известия ТулГУ. Наука о Земле. – 2022. № 4. – С. 408-419.
98. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology* // Institution of Mining and Metallurgy A.– 2005. Vol. 114. P. 29–44.
99. Victor Abioye Akinbinu, Gafar O. Oniyide, Musa Adebayo Idris Assessment of rock fragmentation and strength properties using Rosin-Rammlers and Extended Swebrec Distribution functions parameters // *International Journal of Mining and Geo-Engineering* – 2022. – № 56-1– P. 53-60.
100. Alfredo L. Coello-Velázquez, Víctor Quijano Arteaga, Juan M. Menéndez-Aguado, Francisco M. Pole, Luis Llorente Use of the Swebrec Function to Model Particle Size Distribution in an Industrial-Scale Ni-Co Ore Grinding Circuit // *Metals* – 2019. – № 9. – P. 1-13. doi:10.3390/met9080882.
101. Thomas Bamford, Karman Esmaeili, Angela P. Schoellig A real-time analysis of post-blast rock fragmentation using UAV technology // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2017. – P. 439-456.
102. Камянский В. Н. Оценка сейсмозрывных нагрузок на законтурный массив при разделке отрезной щели // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 7. – С. 181–188. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-181-188.
103. Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н., Зырянов И. В., Шеменев В. Г. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. – 172 с.

104. Шеменев В. Г., Жариков С.Н. О состоянии научных исследований в области разрушения горных пород в Институте горного дела УрО РАН // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4. – С. 30–40.
105. Кантор В. Х., Рахманов Р. А., Аленичев И. А., Фадеев В. Ю., Франтов А. Е. Исследование параметров контурных скважинных зарядов ВВ для образования отрезной щели в горных породах при заоткоске уступов на карьерах // Взрывное дело. – 2022. – № 135/92. – С. 32–66.
106. Брухавецкая А. О. Анализ влияния параметров БВР на качество дробления горной массы // Взрывное дело. – 2022. – № 136/93. – С. 111-128.
107. Брухавецкая А. О. Сравнительный анализ степени фрагментации горной массы, взорванной с применением неэлектрических систем инициирования и детонирующего шнура // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 31–41. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_31.
108. Брухавецкая А. О. Сравнительный анализ результатов гранулометрического состава горной массы, взорванной с использованием различных средств инициирования // Сборник материалов 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. – М: ИПКОН РАН, 2023 – С. 161-162.



АО «ЭВОБЛАСТ РУС»
Россия, 125315, Москва, Ленинградский проспект 72, к. 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

Справка
о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта кафедры
Физических процессов горного производства и геоконтроля
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА «МИСИС»
Брухавецкой Алины Олеговны

Основные выводы и рекомендации диссертационной работы Брухавецкой Алины Олеговны на тему «Обоснование условий применения детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ для обеспечения требуемого качества дробления горной массы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика», представляют интерес для организации АО «ЭВОБЛАСТ РУС» и предполагаются к практическому использованию при создании проектов на массовые взрывы на карьерах Кошвинский и Ньоркпахкский рудника «Восточный» Мурманской области.

С уважением,
к.т.н.
Заместитель генерального директора
по лицензионно-разрешительной работе
АО «ЭВОБЛАСТ РУС»

Дата 28.11.2024


И.А. Добрынин
