

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

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

Автореферат диссертации
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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 (ДШ) в качестве средств инициирования вместо повсеместно применяемых неэлектрических систем инициирования (НСИ), данный факт подтверждается данными Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС). 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 (ЭВВ), близкого по качеству с применением неэлектрических систем инициирования в условиях нехватки НСИ, в связи со сложной геополитической ситуацией, является актуальной.

В настоящее время не на всех горнодобывающих предприятиях 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. В свою очередь, применение специального

оборудования и программного обеспечения (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.

Задачи исследования:

1. Определение 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, путем анализа графиков кумулятивных кривых гранулометрического состава;

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

3. Выявление горно-геологических условий и параметров БВР, при которых качество дробления взорванной горной массы при взрывании ДШ сопоставимы по качеству дробления с применением НСИ.

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

Основные научные положения 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор научных работ и публикаций, посвящённых изучению оценки получаемого качества дробления горной массы после рыхления взрывом. Изучением вопросов, посвящённых дроблению горного массива энергией взрыва в различных горно-геологических и физико-технических условиях на открытых горных работах, и образующимся в результате данного воздействия фракциями горной массы занимались такие выдающиеся учёные 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. Кутыбаев, 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 учёные.

В рамках существующего исследования были определены основные методы оценки гранулометрического состава, это прямые и косвенные методы.

В ходе анализа различных исследований, было отмечено, что авторы не могут прийти к единой классификации данных методов. Опираясь на более полную классификацию, было определено, что к прямым методам относятся: поштучный обмер; ситовой анализ; планиметрический метод; фотопланиметрический метод; количественный метод; линейный метод; стереометрический метод. К косвенным методам относятся: эмпирические методы и числовые методы, такие как: модели, построенные по уравнениям Ларссона; формула SveDoFo; модель Kuz-Ram; модель КСО и другие.

Ориентируясь на проведённый обзор существующих методов, для оценки гранулометрического состава взорванной горной массы был выбран фотопланиметрический метод с дальнейшим анализом кумулятивных кривых, построенных на основании функции распределения.

Путём анализа различных литературных источников было установлено, что на качество гранулометрического состава влияют природные и техногенные факторы. К природным факторам относятся такие параметры как физико-механические свойства, трещиноватость, наличие отдельностей в массиве и их размер, тектонические нарушения и т.д. К техногенным параметрам относятся: параметры БВР: диаметр, длина заряда, сетка бурения, тип ВВ, конструкция заряда, порядок инициирования, схемы инициирования и применяемые средства инициирования.

Современные авторы солидарны, что для получения качественного гранулометрического состава при создании проекта БВР необходимо учитывать геологические особенности массива. В то же время, в современных исследованиях отмечается, что на данный момент не существует универсальных рекомендаций по учету влияния горно-геологических параметров на качество гранулометрического состава. Например, мнения авторов разделяются касательно влияния трещиноватости и обводенности массива на получаемое качество гранулометрического состава: одни утверждают, что данные параметры сказываются негативно, другие, наоборот, отмечают, что при определенных условиях улучшается качество дробления взорванной горной массы. Поэтому рекомендуется в каждом случае индивидуально рассматривать влияние горно-геологических условия на качество раздробленного массива. Данное утверждение распространяется и на параметры БВР, то есть регулирование параметров БВР необходимо производить с учётом физико-механических свойств массива.

Известно, что применение НСИ и ЭВВ происходило одновременно, и возможный этап совместного применения ЭВВ и ДШ был пропущен и, вследствие этого, не был изучен. Был проведён анализ публикаций прошлого столетия, воспроизводящих хронологию применения промышленных взрывчатых

веществ в России. По результатам данного анализа было установлено, что этап совместного применения эмульсионных взрывчатых веществ и детонирующего шнура все-таки имел место быть, но в силу давности проведения экспериментов отсутствуют конкретные результаты, свидетельствующие о качестве полученного гранулометрического состава.

Определение горно-геологических условий и параметров БВР в условиях апатит-нефелинового месторождения, влияющих на качество гранулометрического состава, поможет установить зависимость между применяемыми средствами инициирования и гранулометрическим составом, а именно, установить оптимальные параметры БВР, при которых качество взорванной горной массы, получаемое при взрывании детонирующим шнуром будет аналогичным как при использовании неэлектрических систем инициирования, что является актуальным вопросом в период нехватки НСИ в связи со сложной геополитической ситуацией в России.

Вторая глава посвящена обзору современных способов оценки гранулометрического состава с применением передовых программных комплексов, а также законов распределения, описывающих прогнозируемый грансостав взорванной горной массы.

В рамках проведённого анализа современных программных комплексов для оценки качества дробления взорванной горной массы установлено, что широкое применение имели программные комплексы иностранного производства, но в связи со сложившейся ситуацией в стране, многие зарубежные изготовители прекратили свою деятельность, в связи с чем данная ниша теперь занята отечественными изготовителями.

В силу вышеуказанных причин изучение методов оценки и прогнозирования качества гранулометрического состава на данный момент является динамично развивающимся, перспективным и актуальным как никогда направлением, им занимались и продолжают заниматься 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.

С целью определения имеющихся программных комплексов был проведён обзор как российских, так и иностранных программных комплексов, в ходе которого выявлено 4 используемых метода оценки: фотопланиметрический метод, фотопланиметрический метод с использованием специализированного оборудования, метод аэрофотосъёмки (с использованием БПЛА), стереометрический метод. В данном исследовании анализ гранулометрического состава производился с использованием фотопланиметрического метода с

применением специализированного портативного планшета PortaMetrics. Данный прибор применялся на многих горнодобывающих предприятиях России и зарекомендовал себя как надёжный и точный.

Приведено описание системы оценки качества гранулометрического состава, реализующей фотопланиметрический метод, также описан принцип действия и требования к выполнению работ при использовании прибора PortaMetrics. Описана методология проведения анализа фото развала взорванного массива, а именно: настройка оборудования, принцип обработки фотоматериалов, формирование отчёта о гранулометрическом составе, оценка результатов статистического распределения.

Рассмотрены функции распределения Розина-Раммлера и Swebrec, а также составляющие данных функций, с помощью которых строятся графики распределения гранулометрического состава.

Уравнение Розина-Раммлера описывается следующим выражением:

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

- 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.

Значимыми параметрами, описывающими данную функцию, являются средневзвешенный размер куска (x_c) и параметр однородности распределения (n). 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.

Функция Swebrec описывается следующим выражением:

$$P_{Swebrec}(x) = 1 / \left\{ 1 + \left[\frac{\ln(x_{max}/x)}{\ln(x_{max}/x_{50})} \right]^b \right\}, \quad (2)$$

- 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). 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. Кривая Swebrec может описывать распределение как для мелких, так и для крупных кусков. Также Оучтерлони (F.Ouchterlony) было установлено, что коэффициент детерминации при применении этой функции составляет более 0,99, что свидетельствует о том, что гранулометрический состав характеризуется довольно точно.

Проведён сравнительный анализ функций Swebrec и Розина-Раммлера, в результате которого установлено, что с помощью 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. По этой причине анализ кумулятивных кривых нами в дальнейшем будет произведён по функции Swebrec.

В разделе 3.1 главы 3 приведено краткое описание горно-геологических, гидрогеологических условий и физико-механических свойств пород Хибинского массива. Было определено, что Коашвинское и Ньоркпахкское месторождения сложены аналогичными по геологическому строению породами, отличающимися трещиноватостью и обводненностью. В таблице 1 кратко представлены горно-геологические условия и параметры БВР для карьеров Коашвинский и Ньоркпахкский.

Таблица 1 – Исходные 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	15-16 по шкале М.М. Протодьяконова	
Средняя высота уступа	15 м	10 м/12 м

В рамках отработки месторождений при постановке уступа в конечное положение формируется отрезная (или контурная) щель методом предварительного щелеобразования. Контурная щель препятствует развитию трещин в законтурном пространстве, создавая экранирующий эффект, тем самым повышая устойчивость борта в конечном положении. В рассматриваемых условиях

при указании высоты уступа 30 м или 20 м подразумевается формирование отрезной щели на высоту сдвоенного уступа.

При проведении взрывных работ в качестве взрывчатого вещества применяется эмульсионное взрывчатое вещество «Фортис», изготовленное согласно техническим условиям ТУ 7276-001-23308410-2006 компанией АО «Орика СиАйЭс», в качестве средств инициирования используются неэлектрические системы инициирования.

На карьерах Ньоркпахкский и Коашвинский применяется шахматная сетка взрывания, диаметр пробуренных скважин составляет 230 (250) мм.

Особенностью Хибинского массива является влажный климат, поэтому при анализе гранулометрического состава необходимо учитывать такой показатель, как сезонная обводненность или сезонность проведения работ. 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.

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.

В разделах 3.2 и 3.3 главы 3 представлены результаты анализа замеров распределения гранулометрического состава при производстве массовых взрывов с применением НСИ в различных условиях, приведённых в таблицах 2 и 3. Проведённый анализ позволил установить зависимость параметров функции Swebrec, описывающей гранулометрический состав, от параметров БВР и условий взрывания.

В разделе 3.2 представлены результаты 12 замеров гранулометрического состава взорванной горной массы в условиях средне-трещиноватого необводненного массива карьера Ньоркпахкский при инициировании НСИ.

Оценка качества взрывных работ проводится по характеру искривления кумулятивной кривой и анализу параметров функции Swebrec, таких как: x_{50} , критерий P97%. Критерий P97% принимается по причине того, что недропользователем был установлен допустимый показатель по выходу негабаритных кусков породы 3% при размере негабарита от 1200 мм.

Таблица 2 – Результаты исследования грансостава взорванной горной массы с применением НСИ в условиях карьера Ньюоркпахкский

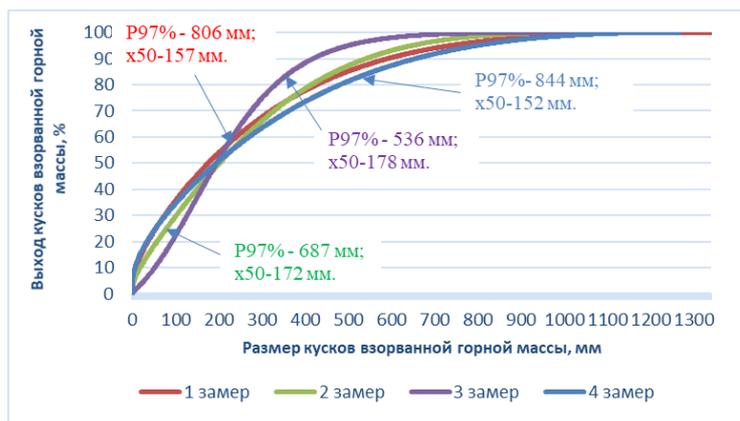
№ замера	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа, м	Модуль трещиноватости, м ⁻¹	Показатели закона распределения Swebrec	
					P97%, мм	X ₅₀ , мм
1	не обводнен	зима	15/30	10	806	157
2	не обводнен	зима	15/30	10	687	172
3	не обводнен	зима	15/30	10	536	178
4	не обводнен	зима	15/30	10	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

При анализе группы замеров 1-4 (рисунок 1а) можно наблюдать следующее: три из четырех кривых отражают неоднородное распределение гранулометрического состава, так как линии покатые, но при этом показатель P97% по всем четырем массовым взрывам не превышает 844 мм, также медианное значение X₅₀ не превышает 178 мм, что свидетельствует об отсутствии крупных кусков породы.

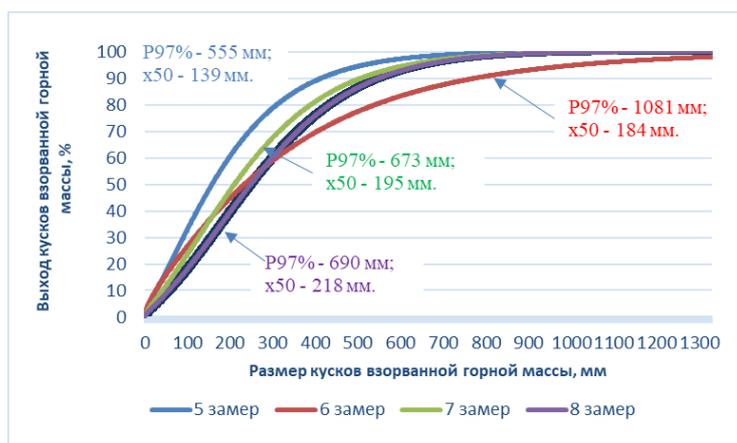
Анализ гранулометрического состава замеров 5-8 (рисунок 1б) выявляет схожий характер кривых, но стоит выделить синюю кривую, которая описывает наиболее однородный характер гранулометрического состава по сравнению с другими линиями. Значения параметра P97% по всем четырём кривым не превышают предельного значения в 1200 мм, то есть выход негабарита не выявлен.

Кривые на рисунке 1с (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

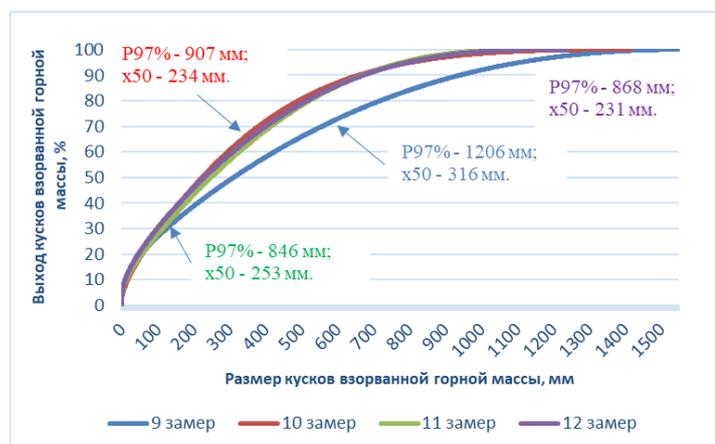


Рисунок 1 – Кумулятивные кривые, полученные при анализе грансостава в условиях карьера Ньюоркпакский 1: а) при формировании отрезной щели в зимний период; б) при высоте уступа 15 м в зимний период; с) при высоте уступа 15 м, в летний период

Анализ полученных результатов позволил установить следующие закономерности: наиболее благоприятные условия для получения качественного гранулометрического состава в необводненном среднетрециноватом массиве 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.

В разделе 3.3 проводился анализ гранулометрического состава при иницировании блока неэлектрическими системами иницирования в условиях трещиноватого обводнённого массива. Горно-геологические условия карьера Коашвинский и результаты 12 замеров гранулометрического состава представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследования грансостава взорванной горной массы с применением НСИ в условиях карьера Коашвинский

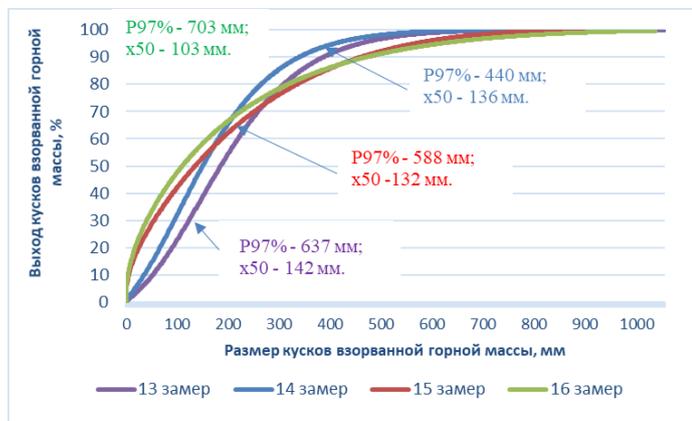
№ замера	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа, м	Модуль трещиноватости, м ⁻¹	Показатели закона распределения Swebrec	
					P97%, мм	X50, мм
13	обводнен	зима	10/20	20	637	142
14	обводнен	зима	10/20	20	440	136
15	обводнен	зима	10/20	20	588	132
16	обводнен	зима	10/20	20	703	103
17	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
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 2а) 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.

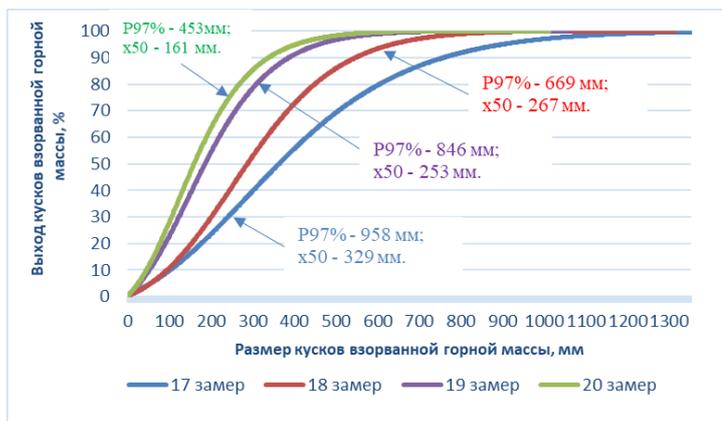
При замерах 17-20 (рисунок 2б) кумулятивные кривые имеют разный характер кривизны, красная и синяя линии описывают наиболее неоднородное распределение, также по характеру синей кривой можно судить о возникновении потенциального негабарита.

На рисунке 2с (замеры с 21 по 24) три кривые, кроме синей линии, описывают однородный гранулометрический состав с преобладанием мелкой фракции, это подтверждается значениями x_{50} , синяя кривая в свою очередь описывает неоднородное распределение.

а) замеры 13-16



б) замеры 17-20



с) замеры 21-24

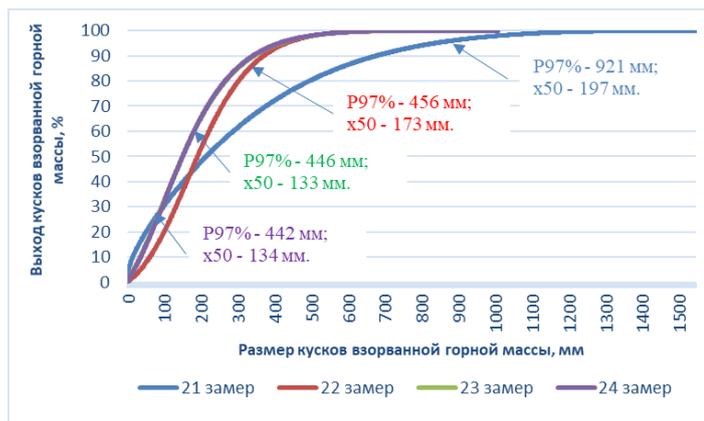


Рисунок 2 – Кумулятивные кривые, полученные при анализе грансостава на карьере Коашвинский: а) при формировании контурной щели в зимний сезон; б) при высоте уступа 10 м сезон зима; с) при высоте уступа 10 м в летний сезон

По результатам 12 массовых взрывов в обводненном трещиноватом массиве в условиях карьера Коашвинский были выявлены следующие

закономерности: при формировании отрезной щели в зимний период однородность гранулометрического состава имеет переменчивый характер, но прослеживается такая же закономерность, как на Ньюоркпахкском 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 карьера Ньюоркпахкский.

В четвертой главе приведено обоснование возможности получения качественного гранулометрического состава с применением детонирующего шнура.

С учётом закономерностей, выявленных в главе 3, проводился анализ результатов взрывного дробления при вышеописанных горно-геологических условиях (обводненность массива, сезонность ведения буровзрывных работ, трещиноватость) и параметрах БВР (высота уступа) в условиях карьеров Ньюоркпахкский и Коашвинский, только в качестве средств инициирования применялись неэлектрические системы инициирования в сочетании с детонирующим шнуром и 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 применяются 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 возможно воздействие на колонку заряда ЭВВ с последующим схлопыванием пузырьков газогенерации. Конструкции зарядов с применением ДШ и комбинировании ДШ с НСИ представлены на рисунке 3.

Ниже представлена сводная таблица 4, в которой отображены основные показатели функции Swabrec (x_{max} , x_{50} , критерий P97% и степенного показателя b) при анализе полученного грансостава на карьерах Ньюоркпахкский и Коашвинский.

Замеры гранулометрического состава 25-28 (рисунок 4а) 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.



Рисунок 3 – Схема конструкции заряда ЭВВ, инициированного средствами инициирования а) НСИ в сочетании с ДШЭ-12; б) ДШЭ-12.

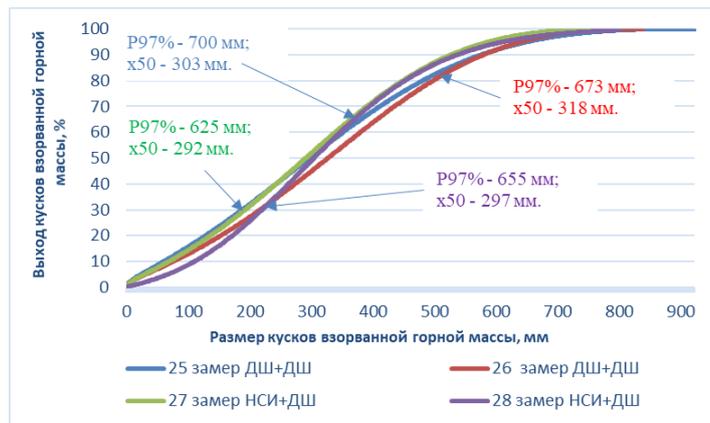
На рисунке 4б, соответствующему замерам 29-32, представлены результаты проведения взрывных работ с учётом сезонности при образовании отрезной щели в условиях карьера Ньюоркпахкский. В первую очередь сравним кривые 31 и 32 соответствующие взрыванию НСИ в сочетании с ДШ. Несмотря на то, что оба массовых взрыва были произведены в летний период, зелёная 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 Ньюоркпахкский 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 Swebres 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.

Таблица 4 - Основные показатели по 12 массовым взрывам при взрывании ДШ и ДШ+НСИ в условиях карьеров 1 и 2

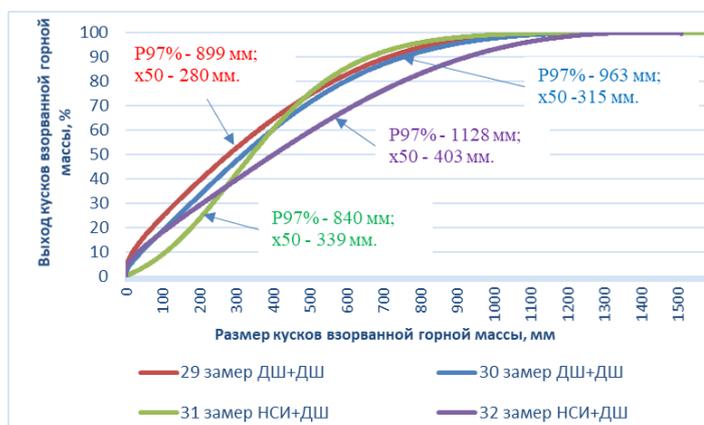
№ замера	Карьер*	Средства инициирования (внутриквартальные; поверхностные)	Обводненность массива	Время года (сезонность)	Высота уступа	Порядок инициирования	Показатели закона распределения Swebrec			
							P97%, мм	Xmax, мм	X50, мм	b
25	НК	ДШ; ДШ	не обводнен	лето	15	прямое	700	923	303	2,499
26	НК	ДШ; 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.

а) замеры 25-28



б) замеры 29-32



в) замеры 33-36

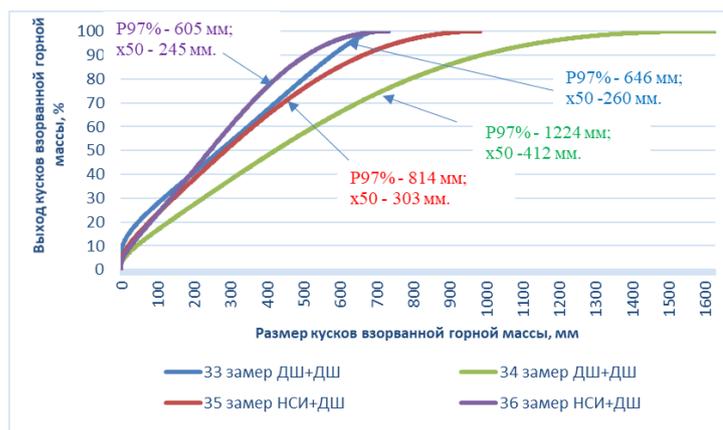


Рисунок 4 – Кумулятивные кривые при взрывании в условиях карьеров Ньюоркпахкский и Коашвинский с применением ДШ и при сочетании ДШ и НСИ

При замерах 33-36 (рисунок 4в) варьировались несколько сравнительных параметров - горно-геологические условия (карьер Ньюоркпахкский и карьер Коашвинский), 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 описывают взрывание с применением ДШ, она сравнивается с кривой, соответствующей замеру 36 (НСИ), в данном случае зелёная 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.

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 Ньюкпахкский. Синяя кривая, имеет более крутой наклон, что свидетельствует о более равномерном грансоставе, также значение x_{\max} меньше, чем для замера 35, что свидетельствует о более измельченном массиве.

Таким образом, по результатам анализа вышеприведённых замеров можно установить следующие закономерности:

- При взрывании в условиях сезонной обводненности в среднетрещиноватом необводненном массиве в условиях карьера Ньюкпахкский 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.

К тому же при применении детонирующего в данных целях возможно «подбитие» соседних скважин, что приведёт к потенциальным отказам.

Тем самым подтверждаются 1 и 2 научные положения.

В главе 5 представлены особенности применения детонирующего шнура при монтаже взрывного блока в условиях рудника «Восточный». При монтаже взрывной сети важно производить соединение прямым морским узлом или в накладку во избежание возникновения отказов. При создании поверхностной сети с применением ДШ используются такие схемы как: диагональная порядно-последовательная; врубовая клиновья технологическая; врубовая трапецеидальная технологическая; врубовая клиновья траншейная. При производстве массовых взрывов с применением ДШ необходимо учитывать, что происходит увеличение сейсмического воздействия на близлежащие сооружения по причине увеличения количества одновременно взрывающихся скважин. Детонирующий шнур применяется не только при производстве массовых взрывов, но и для дробления негабаритов.

Приведены рекомендации по применению детонирующего шнура в скважинных зарядах эмульсионных взрывчатых веществ как альтернативы при нехватке неэлектрических систем инициирования, заключающиеся в следующем:

- По результатам анализа при взрывании в условиях необводненного среднетрещиноватого массива в летний период при высоте уступа 15 м в условиях Ньюкпахкского 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 Ньюкпахкского 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 ведёт 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.

Сделанные в этой главе выводы подтверждают третье научное положение.

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 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 счёт прямого инициирования.

6. Определено, что при взрывании детонирующим шнуром в условиях необводненного среднетрешиноватого 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 среднетрешиноватом 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 Ньюоркпахкский и Коашвинский рудника «Восточный» Мурманской области.

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

В рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Брухавецкая А. О. Анализ влияния параметров БВР на качество дробления горной массы // Взрывное дело. – 2022. – № 136/93. – С. 111-128.

2. 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.

3. 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.

В прочих изданиях:

4. 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.

5. 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.