

На правах рукописи



КАМЯНСКИЙ Виктор Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКВАЖИННОЙ ОТБОЙКИ
НА КАРЬЕРАХ ПРИ РАЗНОВРЕМЕННОМ ВЗРЫВАНИИ
СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ**

Специальность 25.00.20

«Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Горном институте – обособленном подразделении
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр
Российской академии наук».

Научный руководитель:

КОЗЫРЕВ Сергей Александрович
доктор технических наук

Официальные оппоненты:

ПАРАМОНОВ Геннадий Петрович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет»,
профессор кафедры взрывного дела

ДУГАРЦЫРЕНОВ Аркадий Владимирович
кандидат технических наук,
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»,
доцент кафедры физических процессов горного
производства и геоконтроля.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «20» марта 2019 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета
Д 002.074.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт
проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. Н.В. Мельникова по
адресу: 111020, г. Москва, Крюковский туп., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте
<http://www.ипконран.рф>

Автореферат разослан «___» _____ 2019г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

И.Ф. Жариков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В горнодобывающей отрасли взрывные работы являются основным технологическим процессом, от качества выполнения которого, зависят все последующие процессы добычи и переработки полезного ископаемого.

В последние годы многие горнорудные предприятия страны начали интенсивно осваивать новую технологию взрывных работ с использованием как неэлектрических (НСИ), так и электронных систем инициирования (ЭСИ). Использование НСИ за счет комбинирования поверхностных соединительных блоков с различными номиналами замедления и программируемого времени замедления инициирования зарядов при использовании ЭСИ позволяет разработать множество схем монтажа взрывной сети и реализовать любые схемы взрывания. При этом в целях снижения сейсмического действия практически используется раздельное поскважинное короткозамедленное взрывание зарядов взрывчатых веществ на массовом взрыве. Поскольку переход к поскважинному инициированию значительно меняет процесс нагружения массива энергией взрыва, то для эффективного применения данной технологии необходимы подходы, базирующиеся на более глубоком изучении механизма разрушения при взаимодействии зарядов.

Изучением механизма разрушения горных пород и разработкой методов управления действием взрыва занималось большое количество исследователей, среди которых стоит отметить работы: В.В. Адушкина, В.А. Боровикова, С.Д. Викторова, О.Е. Власова, Г.П. Демидюка, А.В. Дугарцыренова, М.Ф. Друкованного, Э.И. Ефремова, В.М. Закалинского, Н.Н. Казакова, С.А. Козырева, В.М. Комира, Б.Н. Кутузова, С.В. Лукичева, Э.О. Мендели, В.Н. Мосинца, И.Ф. Оксанича, Г.П. Парамонова, Г.И. Покровского, В.В. Ржевского, В.А. Фокина, А.Н. Ханукаева и др.

К настоящему времени сложились различные взгляды относительно эффективности дробления массива при реализации поскважинного инициирования зарядов в схемах короткозамедленного взрывания (КЗВ). Так, большинство исследователей отмечает, что при переходе от порядного к поскважинному инициированию повышается качество взрывоподготовки горной массы к экскавации, уменьшается развал отбитой породы, происходит снижение сейсмического эффекта взрыва, повышается безопасность производства взрывных работ в целом. Другие исследователи и практики наоборот отмечают ухудшение степени дробления из-за отсутствия

взаимодействия смежных зарядов в отбиваемом ряду, уменьшение подвижки массива, в результате чего последующие ряды взрываются в большем зажиме.

К тому же, до настоящего времени не выработана единая методика для определения интервала замедления при поскважинном взрывании, а все разработанные ранее методические рекомендации более подходят к порядному взрыванию. В связи с этим, не до конца остаются решенными вопросы выбора оптимального интервала замедления между скважинными зарядами, наиболее предпочтительных схем взрывания, параметров контурного взрывания при постановке уступов в конечное положение.

Комплексное рассмотрение данной проблемы, а именно, обоснование оптимального интервала замедления и схем взрывания при поскважинном инициировании зарядов в схемах КЗВ, а также параметров контурного взрывания в совокупности с углубленным изучением взаимного влияния скважинных зарядов друг на друга и на окружающий массив при взрыве является весьма актуальной научной и технологической задачей.

Цель работы. Обоснование оптимального интервала замедления и схем взрывания, при одновременном взрывании скважинных зарядов в ряду, а также параметров контурного взрывания для повышения интенсивности дробления и снижения сейсмического эффекта массовых взрывов на массив пород за проектным контуром отбойки на карьерах.

Идея работы заключается в учете взаимодействия полей напряжений, возникающих при взрыве, и динамики развития зон разрушения между смежными скважинными зарядами при применении технологии поскважинного взрывания зарядов ВВ.

Задачи работы:

- Анализ изученности вопроса в области исследования механизма разрушения горных пород взрывом;
- Оценка влияния интервала замедления на степень проработки массива между скважинными зарядами;
- Обоснование наиболее сейсмобезопасных схем взрывания, минимизирующих законтурные нарушения;
- Оценка сейсмозрывных нагрузок от взрывных работ при постановке уступов в конечное положение.

Научная новизна работы:

1. На основе численного моделирования в трехмерной упругопластической постановке выявлены особенности разрушения массива горных пород системой скважинных зарядов при различных интервалах замедления между ними и обоснованы их оптимальные значения на основе учета взаимодействия полей напряжений, возникающих при взрыве, и динамики развития зон разрушения

между смежными скважинными зарядами при применении технологии поскважинного взрывания зарядов ВВ.

2. Дано теоретическое обоснование технологии производства взрывных работ на карьерах при использовании разновременного взрывания скважинных зарядов, позволяющей уменьшить сейсмическое действие взрыва на массив пород за проектным контуром отбойки и повысить степень дробления горной массы.

Научные результаты работы:

- На основе численного моделирования в трехмерной упругопластической постановке произведена оценка поля напряжений и развития трещин в массиве, а также получены аналитические зависимости изменения эквивалентных напряжений от времени при взрыве скважинных зарядов с различными интервалами замедления между ними;

- Определено, что повышение степени дробления горной массы, при реализации поскважинного взрывания зарядов в схемах КЗВ, обеспечивается за счет выбора интервала замедления 15 мс в диагонали, при котором взаимодействие волн напряжений от взрывов смежных зарядов обеспечивает условия многократного воздействия на зону трещинообразования;

- Установлено, что снижение интенсивности сейсмозрывного воздействия на массив горных пород за проектным контуром отбойки, при производстве массовых взрывов с использованием разновременного взрывания скважинных зарядов, обеспечивается за счет выбора диагональной схемы взрывания с углом наклона диагоналей $105 - 120^\circ$ по отношению к проектному контуру отбойки, при этом максимальное векторное смещение, скорость и ускорение снижаются в 1,7; 2,6 и 1,8 раза соответственно по сравнению с поперечными схемами взрывания;

- По результатам моделирования и натурных наблюдений выявлено, что взрывание контурной щели на высоту одного уступа позволяет уменьшить сейсмическое действие за проектным контуром отбойки в 1,7 раза по сравнению с отбойкой спаренными уступами;

- Выявлено, что при взрыве отрезной щели возможно нарушение сплошности массива за проектным контуром отбойки на расстоянии до 40-50 радиусов контурного заряда от щели, при этом большее воздействие оказывает взрыв щели с водяным радиальным зазором в скважинах.

Защищаемые научные положения:

1. Повышение степени дробления горных пород при КЗВ обеспечивается при интервалах замедления между скважинами в ряду, при которых достигается максимальное разрушение при взаимодействии зарядов за счет дополнительного воздействия волн напряжений последующего заряда на зону

трещинообразования предыдущего и увеличения продолжительности взрывного воздействия на массив горных пород.

2. Минимизация сейсмозрывных нагрузок и разрушений массива за проектным контуром отбойки при производстве взрывных работ на карьерах достигается за счет выбора диагональной схемы взрывания с углом наклона диагоналей $105-120^\circ$ по отношению к проектному контуру отбойки.

3. Снижение сейсмического действия на массив пород за проектным контуром отбойки при постановке откосов уступов в конечное положение методом предварительного щелеобразования обеспечивается путем уменьшения высоты отрезной щели с выбором расстояния между контурными скважинами в зависимости от вида применяемого заполнителя радиального зазора, и поэтапной обработки сдвоенных уступов.

Достоверность научных положений и результатов работы подтверждается значительным объемом проанализированной исходной информации по применению технологии поскважинного взрывания на карьерах, применением передовых средств численного моделирования, достаточным объемом проведенных вычислительных экспериментов, использованием современной измерительной аппаратуры при проведении сейсмомомеров, удовлетворительной сходимостью результатов моделирования полученным на практике результатам.

Методы исследований. При выполнении работы использовался комплексный метод, включающий анализ и обобщение научных и практических результатов ранее проведенных исследований, применение средств численного моделирования, статистическую и аналитическую обработку данных моделирования, статистическую обработку результатов сейсмоизмерений.

Практическая значимость работы:

- Определено, что оптимальный интервал замедления между смежными зарядами в диагонали при отбойке массива скважинами диаметром 250 мм и наиболее распространенной для них сетке скважин 6×6 метров в условиях рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» составляет 15 мс;

- Предложен вариант перехода при производстве взрывных работ на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК» от поперечных схем взрывания к диагональным с ориентировкой отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки под углом $105-120^\circ$;

- Предложен вариант снижения сейсмического действия взрыва отрезной щели путем разбивки сдвоенного уступа на подступы с дополнительной бермой минимальной ширины, обеспечивающей безопасность работ.

Реализация результатов работы.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, послужили основой для разработки рекомендаций по повышению интенсивности дробления горной массы и снижению интенсивности сейсмозрывного воздействия на массив пород за проектным контуром отбойки при производстве взрывных работ на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

Научные и практические материалы работы используются в образовательном процессе при проведении занятий по дисциплинам «Основы компьютерного моделирования технологических процессов в рудниках», «Технология и безопасность взрывных работ» в ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет».

Личный вклад автора заключается в сборе и анализе литературных источников по проблеме изученности вопроса теории короткозамедленного взрывания, постановке целей и задач исследований, разработке расчетных моделей взрывания скважинных зарядов, обобщении и анализе полученных результатов, обработке полученных данных на ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: VII Школе молодых ученых в рамках V международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона» (г. Апатиты, 2015г.); VIII Школе молодых ученых в рамках VI международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона» (г. Апатиты, 2016г.); X Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург-Апатиты, 2016г.); XIII Международной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2016г.); XIV Всероссийской Ферсмановской научной сессии (г. Апатиты, 2017г.); Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли» (г. Апатиты, 2017г.); XIV Международной конференции пользователей ANSYS/CADFEM (г. Санкт-Петербург, 2017г.); IX школе молодых ученых в рамках VII международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона» (г. Апатиты, 2017г.); XII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург-Апатиты, 2018г.); На заседаниях Горной секции и Ученого совета ГоИ ФИЦ КНЦ РАН.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 работ в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части работы и заключения, изложенных на 123 страницах машинописного текста и содержит 55 рисунков, 12 таблиц, 4 приложения и список использованных источников из 101 наименования.

Автор считает своим долгом выразить благодарность научному руководителю работы доктору технических наук С.А. Козыреву за помощь в постановке проблемы и руководство исследованиями, доктору технических наук С.В. Терещенко за помощь в интеграции материалов работы в образовательный процесс, а также сотрудникам лаборатории технологических процессов при добыче полезных ископаемых ГоИ ФИЦ КНЦ РАН за обсуждение результатов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определены цель, идея, методы исследования, изложены защищаемые научные положения, научная новизна, научные результаты и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации выполнен обзор исследований в области изучения механизма разрушения горных пород. Произведен анализ существующих методов расчета интервала замедления и схем взрывания скважинных зарядов, рассмотрены методы снижения сейсмозрывных нагрузок на вмещающий массив, освещены вопросы, связанные с технологией ведения взрывных работ на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе обоснован выбор метода решения задач взрыва, выполнено численное моделирование процесса взаимодействия зарядов взрывчатых веществ в массиве горных пород. Проведена аналитическая оценка поля действующих напряжений и нарушенности массива при взрыве смежных зарядов ВВ.

В третьей главе проведен анализ применяемых схем взрывания скважинных зарядов на руднике «Железный», выполнено обоснование сейсмобезопасных схем взрывания, минимизирующих разрушения массива пород за проектным контуром отбойки, проведен статистический анализ результатов сейсмоизмерений.

В четвертой главе проведена оценка сейсмозрывных нагрузок от взрывных работ при постановке уступов в конечное положение, проведен анализ результатов сейсмоизмерений при разделке отрезных щелей для

сдвоенных уступов, предложены методы снижения сейсмического действия отрезной щели.

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты работы отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Повышение степени дробления горных пород при КЗВ обеспечивается при интервалах замедления между скважинами в ряду, при которых достигается максимальное разрушение при взаимодействии зарядов за счет дополнительного воздействия волн напряжений последующего заряда на зону трещинообразования предыдущего и увеличения продолжительности взрывного воздействия на массив горных пород.

Технология поскважинного взрывания на карьерах реализуется применением в поверхностной взрывной сети неэлектрических либо электронных систем инициирования. При производстве взрывных работ на руднике «Железный» короткозамедленное взрывание скважинных зарядов осуществляется с использованием в поверхностной взрывной сети неэлектрических систем инициирования, при этом наиболее распространенной является схема монтажа взрывной сети, когда время замедления между зарядами в первом ряду составляет 67-109 мс, а в отходящих от него диагоналях от 25 до 67 мс. При таких схемах инициирования каждый заряд работает в отдельности друг от друга, что снижает эффективность дробления в виду отсутствия взаимодействия между зарядами. Для оценки этого взаимодействия было выполнено моделирование разрушения от взрыва двух скважинных зарядов в объемной модели в программном продукте Ansys Autodyn. Поскольку задача ставится в трехмерной постановке, то оценка напряженного состояния производится по эквивалентному напряжению фон Мизеса, учитывающему все три главные компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

На рисунке 1 приведено взаимодействие полей напряжений при взрыве двух скважин через 2 мс после начала детонации второго заряда с различными интервалами замедлений между ними, а на рисунке 2 – зависимость изменения эквивалентных напряжений от времени.

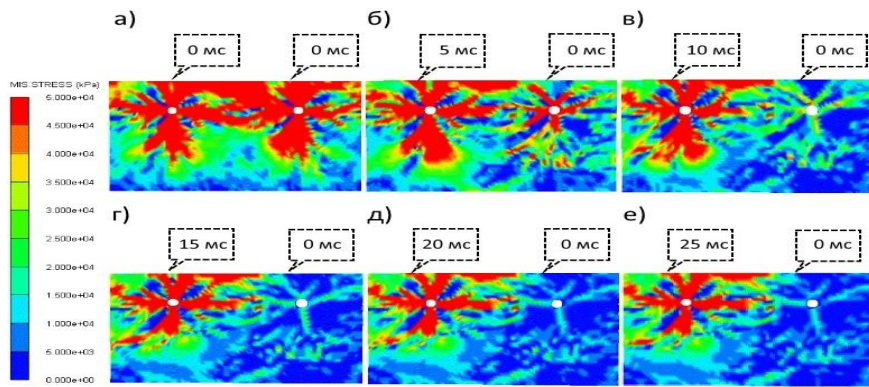


Рисунок 1– Поле эквивалентных напряжений через 2 мс после инициирования второго заряда при интервалах замедления между скважинами: а – 0 мс; б – 5 мс; в – 10 мс; г – 15 мс; д – 20 мс; е – 25 мс

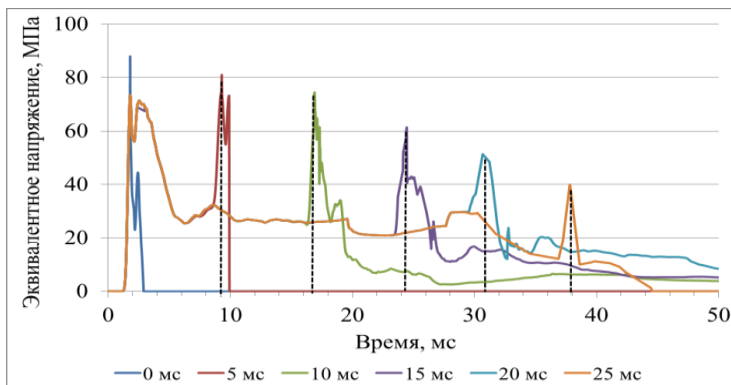


Рисунок 2 – Изменение эквивалентных напряжений при различных интервалах замедления между скважинными зарядами

Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная амплитуда напряжений от взрыва смежных зарядов достигается при интервале замедления 0 мс, но продолжительность совместного действия при этом минимальна. Длительность совместного действия полей напряжений с увеличением интервала замедлений увеличивается, но в то же время, интенсивность напряжений снижается до такого значения, что при интервале замедлений в 20-25 мс волны напряжений от взрыва первого и второго заряда практически не взаимодействуют (рис. 3). Полученные данные указывают на то, что условие максимального эффективного взаимодействия полей напряжений приходится на интервал замедления в 15 мс.

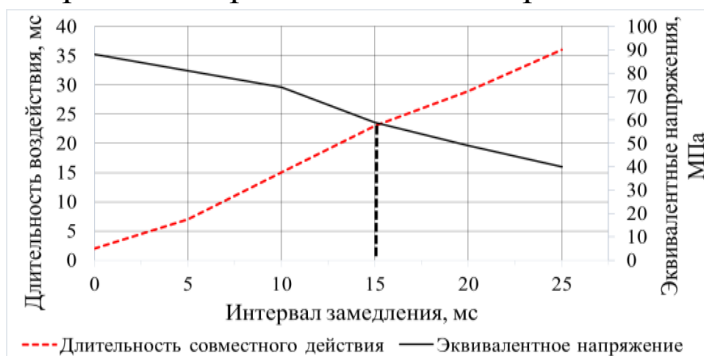


Рисунок 3 – Длительность воздействия эквивалентных напряжений при различных интервалах замедлений между зарядами

При рассмотрении нарушения массива между зарядами (рис.4) можно видеть, что максимальные разрушения приходятся при задержке взрывания

между скважинами в 15 мс, что также подтверждается большим количеством фрагментов, образующихся при взрыве (рис.5).

Это объясняется тем, что ударная волна последующего заряда оказывает дополнительное воздействие на зону трещинообразования от предыдущего заряда и обеспечиваются условия многократного воздействия на зону трещинообразования. Дальнейшее увеличение интервала замедления не приводит к интенсификации дробления.

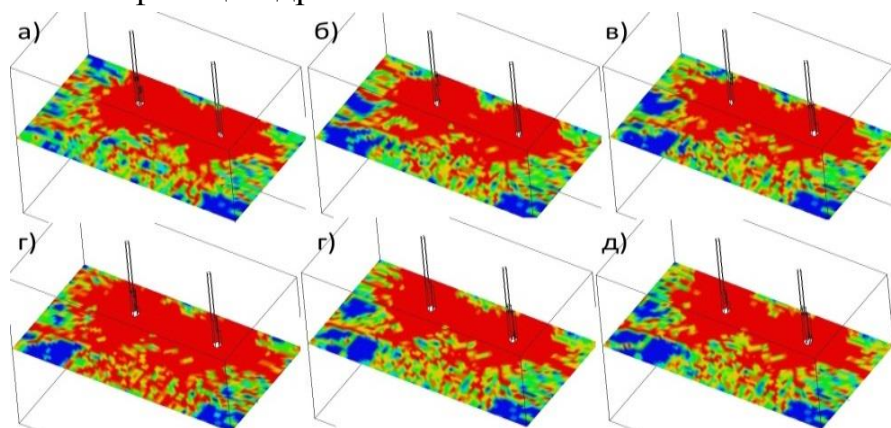


Рисунок 4 – Зоны разрушения при взрывании двух скважин с различными интервалами замедлений через 30 мс: а – 0 мс; б – 5 мс; в – 10 мс; г – 15 мс; д – 20 мс; е – 25 мс

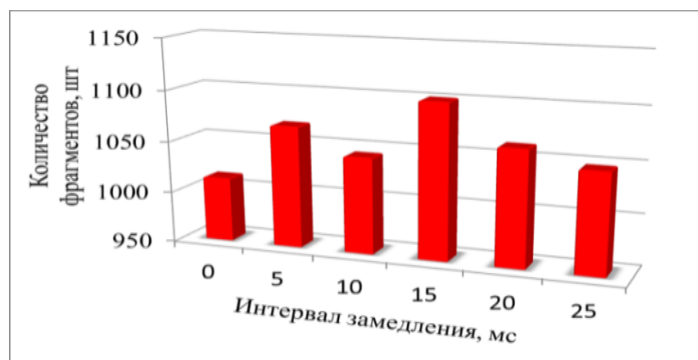


Рисунок 5 – Количественная оценка степени дробления при различных интервалах замедления между скважинными зарядами

2. Минимизация сейсмовзрывных нагрузок и разрушений массива за проектным контуром отбойки при производстве взрывных работ на карьерах достигается за счет выбора диагональной схемы взрывания с углом наклона диагоналей $105-120^\circ$ по отношению к проектному контуру отбойки.

В настоящее время основными схемами взрывания скважинных зарядов на руднике «Железный» приняты диагональная и поперечная схемы. Анализ монтажных схем показал, что наибольшее распространение получили поперечные схемы взрывания. Понятие поперечная схема подразумевает то, что результирующее действие массового взрыва направлено перпендикулярно оси уступа. Взрывание предконтурного блока осуществляется только с применением поперечных схем. Причем возможны два варианта поперечной схемы:

1. Классическая поперечная схема. В данной схеме основная магистраль располагается по первому ряду скважин (рис. 6).

2. Поперечно-врубовая схема инициирования. Отличие данной схемы лишь в том, что магистраль располагается по центру блока.

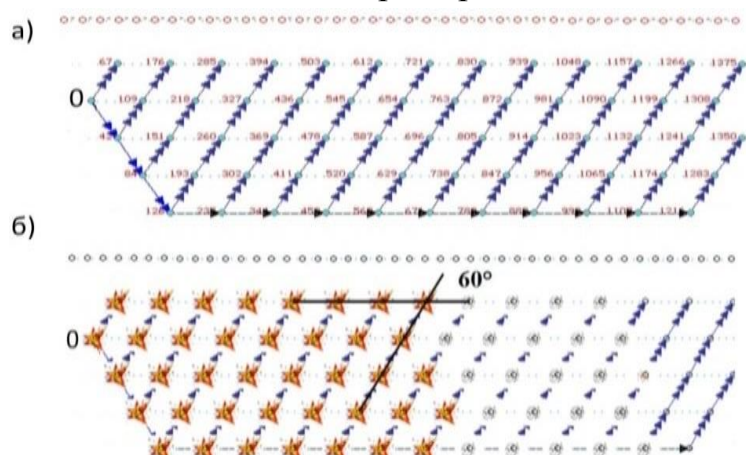


Рисунок 6 – Поперечная схема (а) и схема развития взрыва (б)

Анализируя развитие взрыва, можно отметить, что скважины последнего ряда работают с опережением. При этом свободная поверхность, образованная взрывом предыдущих скважин, составляет примерно 60° .

Для учета влияния направления отбойки на нарушения массива за проектным контуром проведены серии вычислительных экспериментов в двухмерной постановке. В моделях рассматривались углы сопряжения отбиваемого слоя с вмещающим массивом 75° , 90° и 105° .

По результатам моделирования получено распределение поля напряжений (рис. 7) и построены зависимости изменения радиальных и тангенциальных напряжений от времени при различной ориентировке отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки (рис. 8).

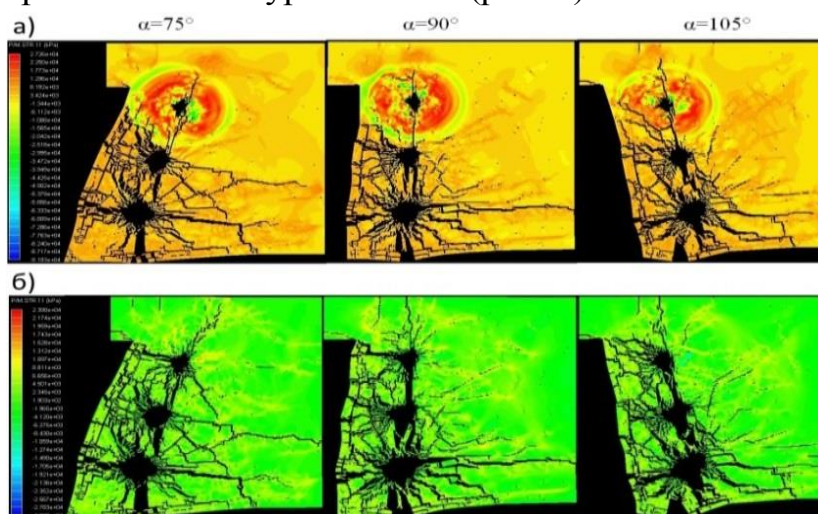


Рисунок 7 – Развитие трещин и распределение поля тангенциальных напряжений при различной ориентировке отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки: а – на момент времени 1 мс после взрыва последнего заряда; б – на момент времени 200 мс

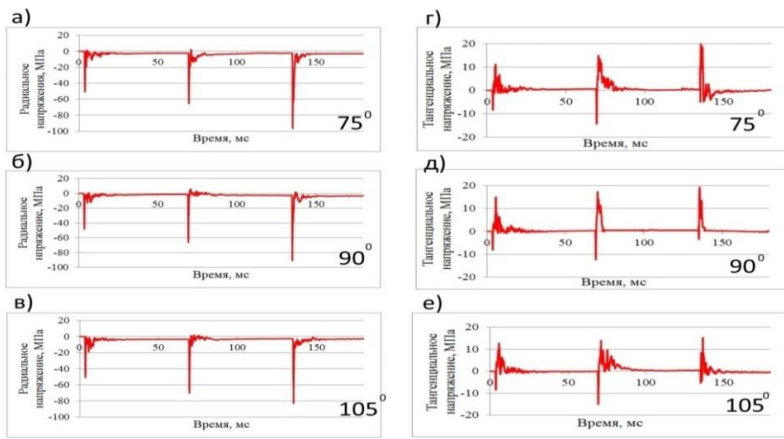


Рисунок 8 – Радиальные (а,б,в) и тангенциальные (г,д,е) напряжения в контрольных точках измерения при углах 75°, 90° и 105°

Полученные данные указывают на то, что радиальные напряжения от взрыва крайней скважины составляют 96, 90 и 83 МПа, а тангенциальные 20, 19 и 15 МПа соответственно при углах 75, 90 и 105°.

Результаты моделирования взрыва двух рядов скважин показывают, что характер трещинообразования в области массива, находящегося за проектным контуром отбойки, значительно изменяется (рис.9). Максимальное нарушение сплошности массива наблюдается при углах 75 и 90°, минимальное – при 105°.

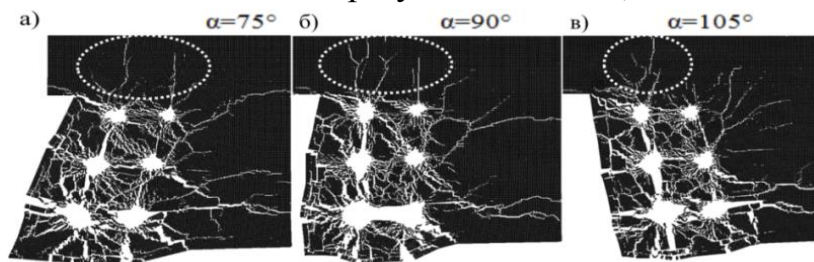


Рисунок 9 – Развитие трещин при взрыве всех зарядов на момент времени 200 мс при различной ориентировке отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки

Анализ зависимостей действующих напряжений от времени (рис. 10) показывает, что радиальные напряжения от взрыва крайней скважины составляют для всех вариантов ориентировки около 100 МПа, а тангенциальные для углов 75 и 90° имеют максимум 18 МПа, а при 105° – 15 МПа.

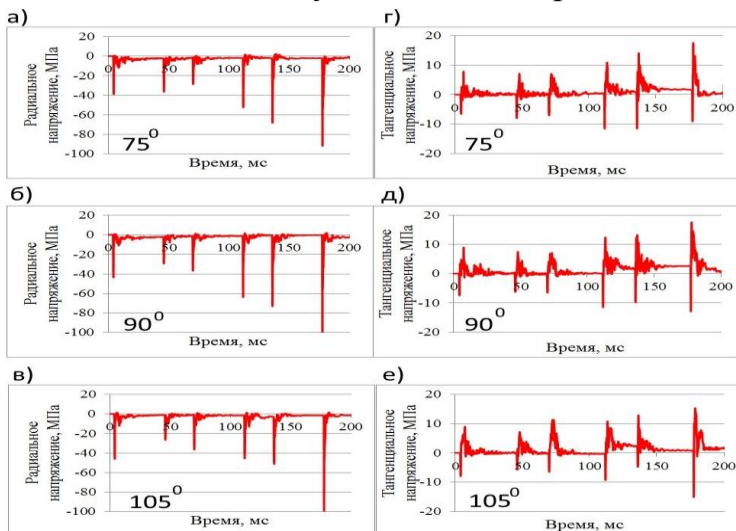


Рисунок 10 – Радиальные (а,б,в) и тангенциальные (г,д,е) напряжения от взрыва скважинных зарядов

При постановке бортов уступов в конечное положение, задача последнего ряда предконтурного блока заключается в отделении горной массы от сформированной щели, и чем больше будет угол свободной поверхности, тем меньшее воздействие окажет взрыв последнего ряда на охраняемый массив.

Для снижения сейсмического воздействия предложен вариант перехода на диагональные схемы взрывания. Развитие взрыва при диагональной схеме приведено на рисунке 11.

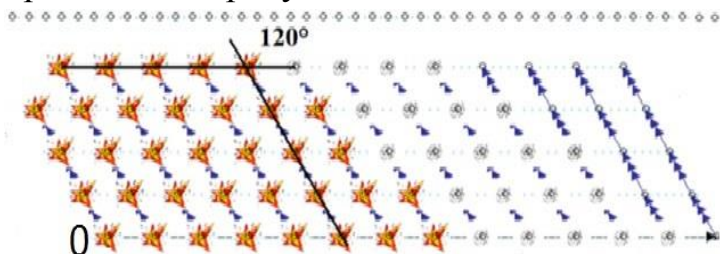


Рисунок 11 – Развитие взрыва по рекомендуемой схеме

При взрыве блока с использованием диагональной схемы, взрыв скважин последнего ряда работает на свободную поверхность равную 120° , т.е. в два раза большую, чем при использовании поперечных схем инициирования.

Результаты проведенных сейсмических измерений при производстве массовых взрывов на руднике «Железный» в 2016-2017 гг. позволили получить зависимости смещения, скорости и ускорения от приведенного расстояния для различных схем взрывания (рис. 12). Было проведено 68 сейсмомеasures, из них 58 при взрыве с поперечной схемой, 10 – с диагональной. Измерения производились с использованием комплекса аппаратуры фирмы «Instantel», включающего сейсмоизмеритель «Minimate Plus» и стандартные трехкомпонентные сейсмоприемники. Обработка данных осуществлялась с помощью программы «Blastware advanced module».

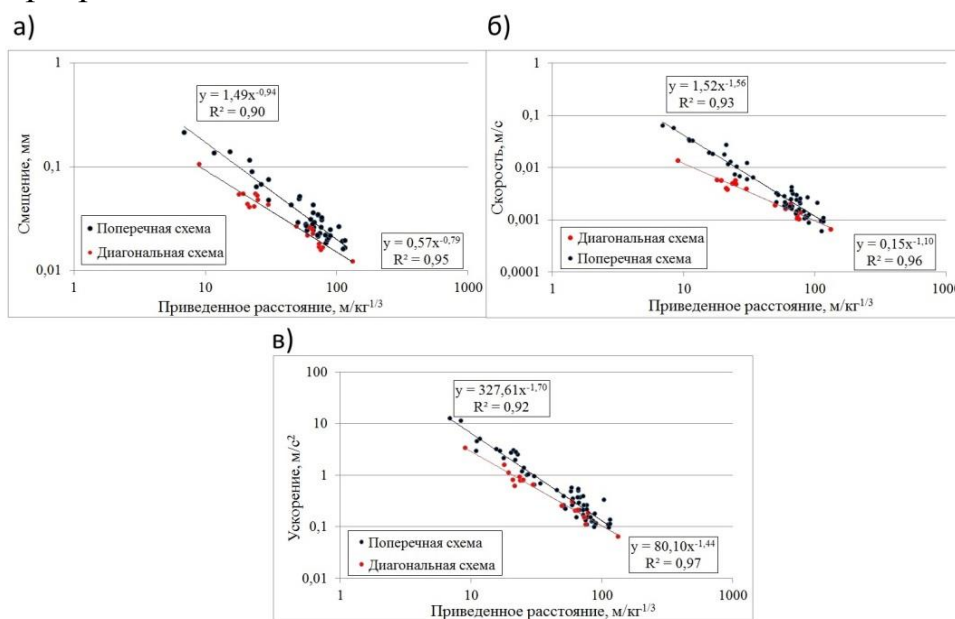


Рисунок 12 – Зависимости смещения (а), скорости (б) и ускорения (в) от приведенного расстояния при производстве массовых взрывов

Эмпирические зависимости изменения смещений, скоростей и ускорения точек массива от приведенного расстояния представлены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимости изменения смещений, скоростей и ускорения точек массива при различных схемах взрывания

	Поперечная схема	Диагональная схема
смещение (мм):	$u = 1,49 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{(\max)}}}{r} \right)^{0,94}$	$u = 0,57 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{(\max)}}}{r} \right)^{0,79}$
скорость (м/с):	$v = 1,52 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{(\max)}}}{r} \right)^{1,56}$	$v = 0,15 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{(\max)}}}{r} \right)^{1,1}$
ускорение (м/с ²):	$a = 327,61 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{(\max)}}}{r} \right)^{1,7}$	$a = 80,1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{(\max)}}}{r} \right)^{1,44}$

Приняв максимальную массу заряда в ступени замедления $Q_{(\max)} = 850$ кг, и ближайшее расстояние от блока до сейсмодатчика $r=200$ м получим результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение расчетных параметров при принятых условиях

Схема взрывания	$Q, \text{ кг}$	$r, \text{ м}$	$u, \text{ мм}$	$v, \text{ м/с}$	$a, \text{ м/с}^2$
Поперечная	850	200	0,085	0,013	1,830
Диагональная			0,051	0,005	0,99
$K_{\text{поп/диаг}}$			1,7	2,6	1,8

Полученные данные указывают на то, что при переходе к диагональным схемам взрывания векторное смещение снижается в 1,7 раза, скорость в 2,6 раза, ускорение в 1,8 раза.

3. Снижение сейсмического действия на массив пород за проектным контуром отбойки при постановке откосов уступов в конечное положение методом предварительного щелеобразования обеспечивается путем уменьшения высоты отрезной щели с выбором расстояния между контурными скважинами в зависимости от вида применяемого заполнителя радиального зазора, и поэтапной отработки сдвоенных уступов.

Одной из главных задач при производстве массовых взрывов в карьерных условиях является обеспечение долговременной устойчивости породных уступов, поставленных в конечное положение. Регулярное производство массовых взрывов в приконтурной зоне карьера приводит к постепенному разупрочнению прибортовой части породного массива и снижению его несущих характеристик, особенно в неблагоприятных геолого-структурных и гидрогеологических условиях.

В условиях карьера рудника «Железный» постановка бортов в конечном положении предусмотрена с использованием 24 метровых уступов в верхней части карьера, а в остальной части – 30 метровых уступов с различными углами откосов. В качестве основного способа принят метод предварительного щелеобразования. В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют общепризнанные методики расчета воздействия на массив контурных зарядов, а экспериментально довольно трудно это воздействие оценить в ближней зоне, было выполнено математическое моделирование.

Рассмотрено два варианта взрыва контурной щели – для сухих и обводненных скважин. В качестве контурных зарядов использовались линейные заряды сплошной конструкции ЗКВ-Б, диаметром 43 мм, которые помещались в скважины диаметром 140 мм. Расстояние между скважинами 1,5 м.

По результатам моделирования установлено, что после инициирования зарядов между скважинами формируется поле растягивающих напряжений, превышающих предел прочности пород на растяжение, что в конечном итоге приводит к развитию трещин по линии расположения зарядов и образованию отрезной щели.

Радиальные и тангенциальные сжимающие напряжения на расстоянии 1 м от скважин в сторону массива (рис. 13а) имеют пиковое значение 92 МПа и 60 МПа соответственно, а растягивающие по тангенциальной компоненте 16 МПа. На расстоянии 5 м (рис. 13б) сжимающие напряжения имеют пиковое значение 43 и 10 МПа, а растягивающие по тангенциальной компоненте 9 МПа, что значительно меньше прочностных характеристик массива горных пород.

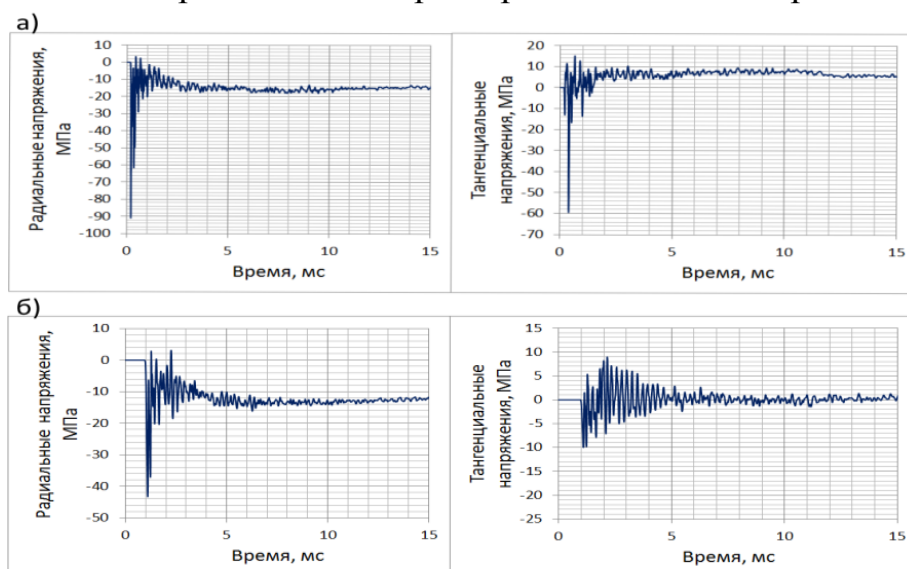


Рисунок 13 – Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 1,0 м от линии зарядов (а) и на расстоянии 5,0 м (б) после взрыва контурных зарядов с воздушным радиальным зазором

При взрыве контурных зарядов с водяным промежутком характер развития трещин несколько отличается от взрыва с воздушным промежутком (рис. 14). В

данном случае на более ранней стадии начинают формироваться трещины между скважинами и увеличивается зона нарушений вблизи взрывающей щели, что связано с увеличением практически в два раза напряжений вследствие явления гидроудара (рис.15).

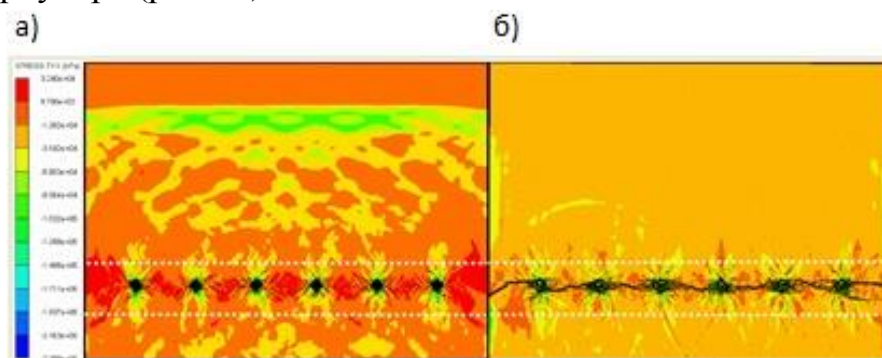


Рисунок 14 – Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели: а – на момент времени 1 мс после взрыва; б – на момент времени 30 мс после взрыва контурных зарядов с водяным радиальным зазором

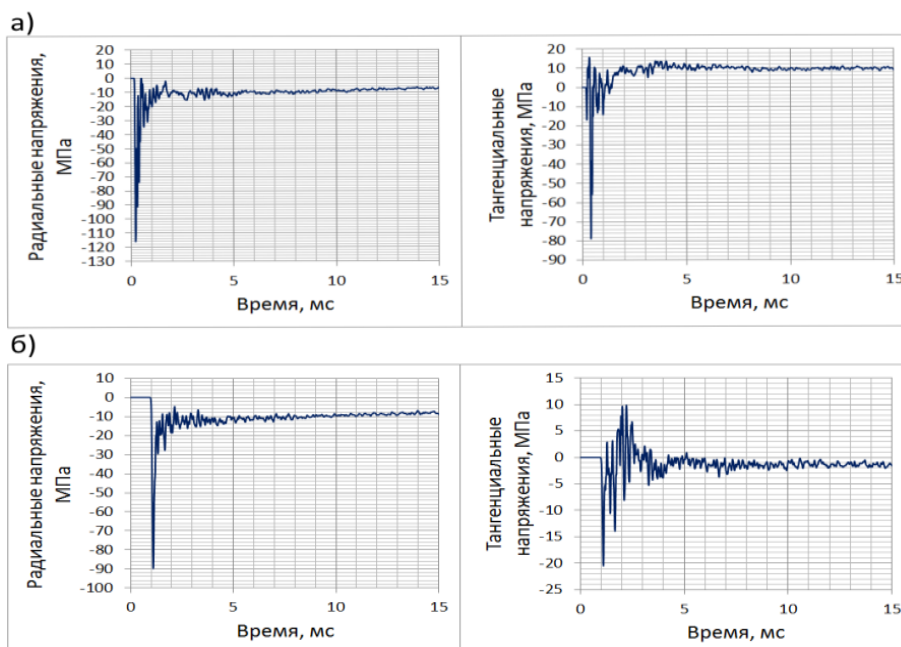


Рисунок 15 – Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 1,0 м (а) и 5,0 м (б) от линии зарядов после взрыва контурных зарядов с водяным радиальным зазором

Таким образом, установлено, что при взрыве контурного ряда наличие воды в скважинах приводит к значительному изменению НДС приконтурного массива в ближней зоне, при этом уровень действующих напряжений на расстоянии 1 м от контурного ряда в сторону массива может превысить сопротивление пород на отрыв. Для рассматриваемых условий возможная зона нарушений сплошности массива пород за проектным контуром отбойки составляет 40-50 радиусов заряда. Полученные результаты необходимо учитывать при постановке бортов уступов в конечное положение.

Результаты выполненных сейсмических измерений при разделке отрезных щелей для сдвоенных уступов высотой 24 и 30 м позволили получить

зависимости смещения, скорости и ускорения от приведенного расстояния (рис. 16). Всего было проведено 40 сейсмомемеров, из них 28 при взрыве щелей глубиной 30 м, 12 – при взрыве щелей глубиной 24 м.

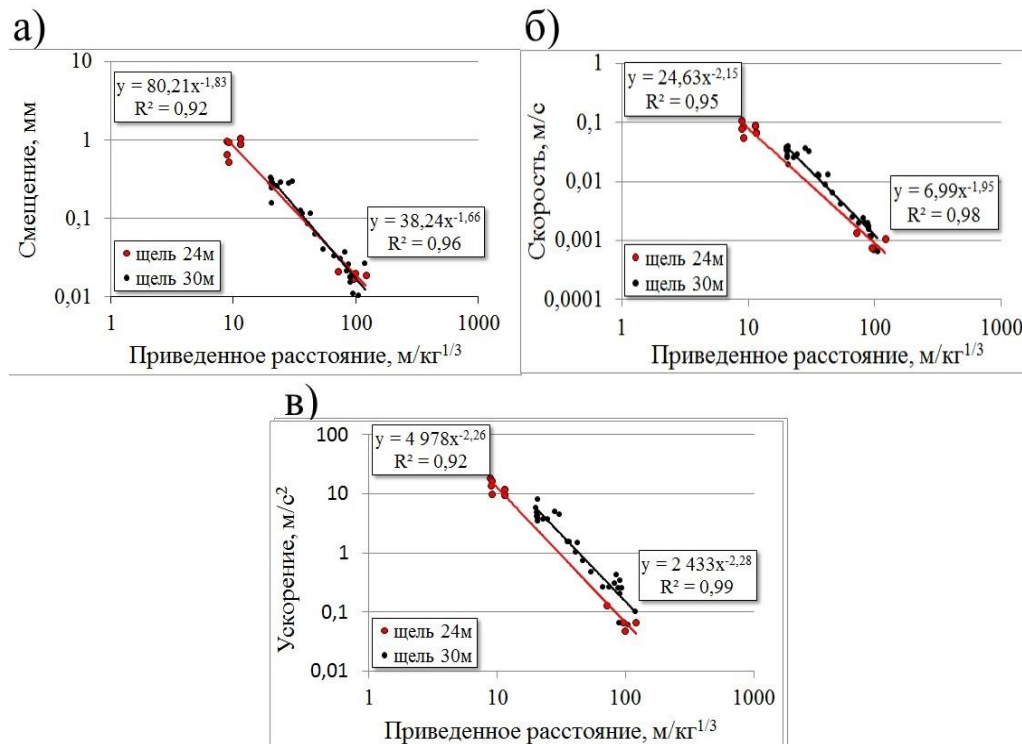


Рисунок 16 – Зависимости смещения (а), скорости (б) и ускорения (в) от приведенного расстояния при взрыве отрезных щелей для сдвоенных уступов высотой 24 м и 30 м

Эмпирические зависимости изменения векторного смещения, скорости и ускорения от приведенного расстояния при взрыве отрезных щелей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Зависимости изменения смещений, скоростей и ускорений точек массива при разделке отрезной щели

	Щель 30м	Щель 24м
смещение (мм):	$u = 80,21 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(мак)}}}{r} \right)^{1,83}$	$u = 38,24 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(мак)}}}{r} \right)^{1,66}$
скорость (м/с):	$v = 24,63 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(мак)}}}{r} \right)^{2,15}$	$v = 6,99 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(мак)}}}{r} \right)^{1,95}$
ускорение (м/с ²):	$a = 4978 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(мак)}}}{r} \right)^{2,26}$	$a = 2433 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(мак)}}}{r} \right)^{2,28}$

Принимая максимальную массу контурного заряда в ступени замедления $Q_{ст(мак)} = 600$ кг, и ближайшее расстояние от отрезной щели до сейсмодатчика $r = 100$ м получим результаты, представленные в таблице 4.

**Сравнение расчетных параметров для щели глубиной 24 м и 30 м
при принятых условиях**

Высота уступа	Q , кг	r , м	u , мм	v , м/с	a , м/с ²
30 м	600	100	0,869	0,121	18,618
24 м			0,631	0,056	8,66
$K_{30/24}$			1,4	2,2	2,2

Из полученных данных следует, что при уменьшении длины контурного заряда на 6 м максимальное векторное смещение снижается в 1,4 раза, скорость в 2,2 раза, ускорение в 2,2 раза.

Еще более существенное снижение сейсмического действия может быть достигнуто при взрывании щели на высоту одного 15 метрового уступа.

С целью оценки влияния глубины отрезной щели на величину вызванных ею сейсмозрывных нагрузок разработана двухмерная модель взрывания контурной скважины. В геометрическом плане модель представляет собой часть породного массива с пятью уступами, на нижнем из которых происходит взрыв контурного заряда. Рассмотрено три варианта контурных скважин – глубиной 15, 24 и 30 м. Распределение скоростей смещения точек массива при взрыве скважины глубиной 15 м представлено на рис. 17, зависимости изменения векторных скоростей смещения от времени в точке, расположенной на расстоянии 100 м от устья скважины – на рис. 18.

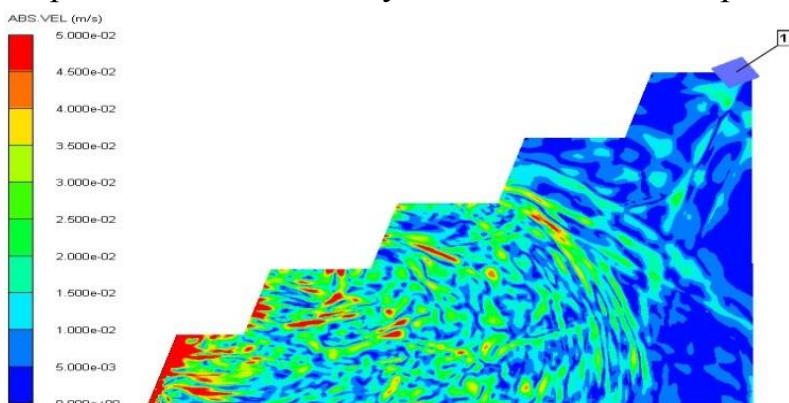


Рисунок 17 – Распределение скоростей смещения точек массива при взрыве отрезной щели глубиной 15 м

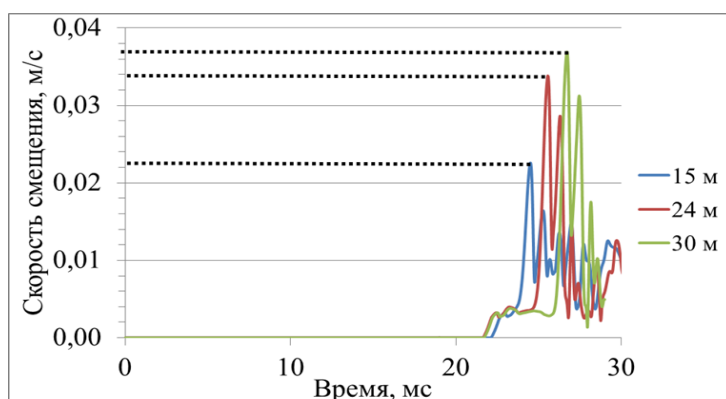


Рисунок 18 – Зависимость векторной скорости смещения от времени при взрыве отрезных щелей глубиной 15, 24 м и 30 м

Из результатов моделирования следует, что при глубине скважин 30 м максимальная скорость смещения составляет 0,037 м/с, при 24 м – 0,034 м/с, при 15 – 0,022 м/с. Что говорит о том, что при уменьшении глубины щели с 30 до 15 м происходит снижение скорости смещения в 1,7 раза.

Различие в экспериментальных и модельных данных (рис.19) объясняется тем, что при моделировании рассматривается отклик сплошной среды, в то время как расчетные данные получены по эмпирическим зависимостям с учетом естественной и техногенной нарушенности массива.

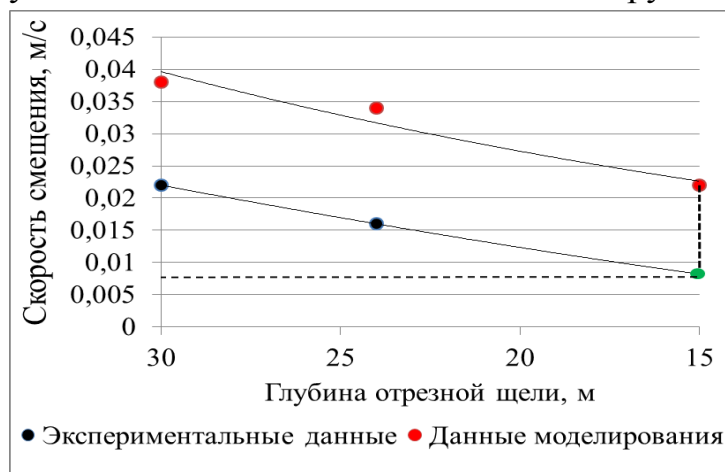


Рисунок 19 – Сравнение расчетных и модельных данных

Таким образом, из анализа полученных данных четко прослеживается тенденция снижения скорости смещения массива при уменьшении глубины контурных скважин, из чего можно с уверенностью судить о том, что переход к разделке отрезной щели на высоту одного 15 метрового уступа позволит существенно снизить сейсмическое действие взрыва. Схема разбивки сдвоенного уступа на подуступы с дополнительной бермой минимальной ширины, обеспечивающей безопасность работ приведена на рис. 20.

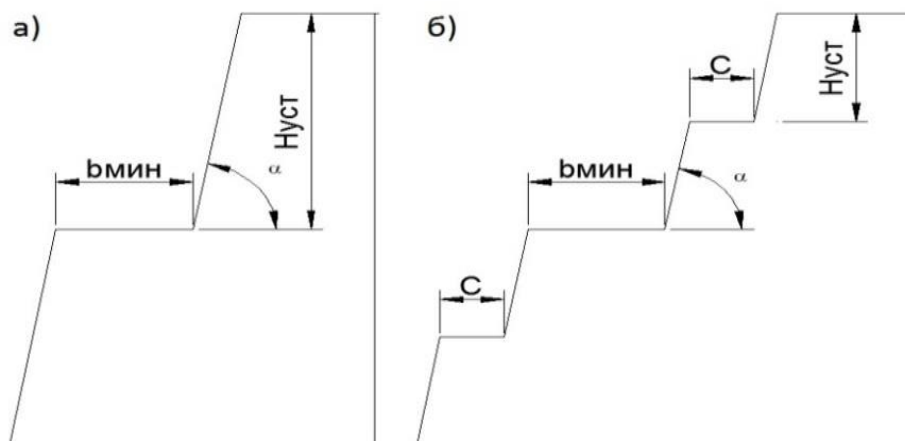


Рисунок 20 – Схема формирования уступов в конечном положении
а) формирование сдвоенных уступов; б) формирование уступов с дополнительной бермой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной научно-технической задачи по повышению интенсивности дробления горной массы и снижению интенсивности сейсмозрывного воздействия на массив пород за проектным контуром отбойки при производстве взрывных работ в карьере.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе численного моделирования в трехмерной упругопластической постановке произведена оценка поля напряжений и развития трещин в массиве, а также получены аналитические зависимости изменения эквивалентных напряжений от времени при взрыве скважинных зарядов с различными интервалами замедления между ними.

2. Определено, что повышение степени дробления горной массы, при реализации поскважинного взрывания зарядов в схемах КЗВ, обеспечивается за счет выбора интервала замедления 15 мс в диагонали, при котором взаимодействие волн напряжений от взрывов смежных зарядов обеспечивает условия многократного воздействия на зону трещинообразования.

3. Установлено, что снижение интенсивности сейсмозрывного воздействия на массив горных пород за проектным контуром отбойки, при производстве массовых взрывов с использованием разновременного взрывания скважинных зарядов, обеспечивается за счет выбора диагональной схемы взрывания с углом наклона диагоналей $105 - 120^\circ$ по отношению к проектному контуру отбойки, при этом максимальное векторное смещение, скорость и ускорение снижаются в 1,7; 2,6 и 1,8 раза соответственно по сравнению с поперечными схемами взрывания.

4. По результатам моделирования и натурных наблюдений выявлено, что взрывание контурной щели на высоту одного уступа позволяет уменьшить сейсмическое действие за проектным контуром отбойки в 1,7 раза по сравнению с отбойкой спаренными уступами.

5. Выявлено, что при взрыве отрезной щели возможно нарушение сплошности массива за проектным контуром отбойки на расстоянии до 40-50 радиусов контурного заряда от щели, при этом большее воздействие оказывает взрыв щели с водяным радиальным зазором в скважинах.

6. Определено, что оптимальный интервал замедления между смежными зарядами в диагонали при отбойке массива скважинами диаметром 250 мм и наиболее распространенной для них сетке скважин 6х6 метров в условиях рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» составляет 15 мс.

7. Предложен вариант перехода при производстве взрывных работ на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК» от поперечных схем взрывания к диагональным с обеспечением ориентировки отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки под углом 105-120°.

8. Предложен вариант снижения сейсмического действия взрыва отрезной щели путем разбивки сдвоенного уступа на подступы с дополнительной бермой минимальной ширины, обеспечивающей безопасность работ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Камянский В.Н. Исследование состояния приконтурного массива при производстве взрывных работ на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень.–2017.–№7.- С.228-234.

2. Козырев С.А., Камянский В.Н., Аленичев И.А. Оценка взаимодействия скважинных зарядов при различных интервалах замедлений между ними // Взрывное дело.–2017.– № 117/74.– С. 60-75.

3. Козырев С.А., Камянский В.Н. Оценка влияния сейсмозрывных нагрузок в ближней зоне взрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень.– 2017.– Специальный выпуск №23.– С.316-324.

4. Козырев С.А., Аленичев И.А., Камянский В.Н., Соколов А.В. Особенности сейсмического действия взрыва отрезной щели на законтурный массив и методы его снижения в условиях рудника «Железный» Ковдорского ГОКа // Взрывное дело.–2017.–№118/75.–С.212-226.

5. Камянский В.Н. Оценка сейсмозрывных нагрузок на законтурный массив при разделке отрезной щели // Горный информационно-аналитический бюллетень.–2018.–№7.- С.181-189.

