

На правах рукописи

Сотников Роман Олегович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ
КАПИТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ
МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ**

Специальность 25.00.20 - Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021 год

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Карасев Максим Анатольевич

Официальные оппоненты:

Сидоров Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью "Полигор", заместитель генерального директора по научной работе;

Румянцев Александр Евгеньевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», Горная лаборатория, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"

Защита диссертации состоится 29 сентября 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1163.

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

Автореферат разослан 29 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Разработка месторождений твердых полезных ископаемых в подавляющем большинстве случаев осуществляется с применением массовых взрывов, которые служат для дробления полезного ископаемого и отделения его от рудного тела или породного массива. При этом подготовительные и капитальные выработки располагаются в непосредственной зоне влияния массовых взрывов.

Наметившаяся в последнее время тенденция увеличения объемов одновременно используемого взрывчатого вещества, а также уменьшения размеров защитных породных целиков между горными выработками и участком проведения массовых взрывов приводит к интенсификации сейсмического воздействия как на горные выработки, так и на составной элемент горной выработки - крепь. Разрушения, которые получает крепь при таком воздействии, могут частично или полностью вывести выработки из эксплуатации, а сам аварийный участок потребует перекрепить. Такие чрезвычайные ситуации приводят к дополнительным трудовым и материальным затратам, а также усложнению организационных процессов на горном предприятии. Считается, что общие затраты, связанные с перекреплением горных выработок, значительно могут превышать стоимость ее изначального крепления.

Известные подходы к прогнозу устойчивости горных выработок основаны на применении эмпирических уравнений, не рассматривают фактическую форму горной выработки, расположение участка массового взрыва относительно выработки, а ее крепь часто не включена в расчетную модель. Решение данной задачи на основании численного моделирования позволяет получить новые знания о закономерности формирования напряженно-

деформированного состояния породного массива и крепи горной выработки, определить допустимые параметры взрывного воздействия для существующих видов крепей и предложить новые конструктивные решения.

С учетом значительного экономического эффекта, который может быть получен на горном производстве за счет уменьшения объемов перекрепления горных выработок, решение данной задачи является безусловно актуальным.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами обеспечения безопасной эксплуатации горных выработок, находящихся в зоне влияния сейсмического воздействия, образованного различными источниками, занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Среди отечественных ученых можно выделить работы М.А. Садовского, А.Г. Протосени, В.Л. Трушко, А.Г. Господарикова, Б.В. Эквиста, В.В. Адушкина, А.Е. Азарковича, С.А. Козырева, В.Н. Мосинца, Н.Н. Гриба. Среди зарубежных исследователей значительный вклад в прогноз распространения сейсмических волн через породный массив и оценку сейсмического воздействия на подземные сооружения внесли О. Erthen, М. Ataei, L. Sambuelli, M. Khandelwal, I. Kadiri, Q. Li и др.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899). Ее направленность отвечает стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Распоряжение Правительства от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части вовлечения в отработку неразрабатываемых месторождений цветных, легирующих и благородных металлов.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности по 1, 2, 4, 5 и 13 пунктам.

Цель работы – разработка мероприятий по снижению негативного воздействия сейсмического эффекта массовых взрывов на устойчивость горных выработок и напряженно-деформированное состояние крепей, обеспечивающих сохранение их технического состояния.

Идея работы – прогноз напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок при многократном сейсмическом воздействии должен выполняться на основании численного моделирования зарождения и распространения сейсмических волн в среде методами прямых динамических расчетов с учетом фактического расположения горных выработок, геомеханического состояния породного массива, а также рассмотрения набрызгбетонной крепи в рамках упругопластической модели с накоплением повреждений.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ предыдущих исследований по заявленной тематике, изучение данных натуральных наблюдений за формированием нагрузок на крепи действующих горных выработок, расположенных в зоне влияния взрывных работ.

2. Разработка программы и проведения экспериментальных исследований по установлению зависимостей развития сейсмических процессов в породном массиве при воздействии массовых взрывов.

3. Разработка теоретических положений расчета напряженно-деформированного состояния крепей горных выработок при сейсмическом воздействии от массовых взрывов.

4. Разработка положений построения численных моделей и проведение расчетов с целью установления уровня влияния массовых взрывов на развитие геомеханических процессов в породном массиве в окрестности горной

выработки, напряженно-деформированное состояние крепи и степень ее повреждения.

5. Разработка методики прогноза устойчивости горных выработок, выбора типа крепи и ее рациональных параметров при воздействии массовых взрывов.

6. Разработка способов повышения устойчивости горных выработок, расположенных в зонах интенсивного проявления геодинамических процессов от массовых взрывов.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является установление закономерностей многократного сейсмического воздействия на НДС набрызгбетонных крепей выработок, расположенных в зоне влияния массовых взрывов.

Научная новизна работы:

1. Оценка устойчивости породного обнажения сопряжений горных выработок и нагрузок на крепь выполняется на основании рассмотрения в рамках одной модели процесса инициации взрывчатого вещества и распространения сейсмических волн через породный массив до контура горной выработки.

2. Установлена нелинейная взаимосвязь между энергией разрушения набрызгбетона и показателем повреждения набрызгбетонной крепи при многократном динамическом воздействии от взрывных работ.

3. Разработаны методологические положения построения численных моделей прогноза развития геомеханических процессов в окрестности горных выработок, располагаемых в зоне влияния массовых взрывов.

4. Получены новые закономерности, определяющие взаимосвязь между пиковыми скоростями частиц породного массива на контуре горной выработки, количеством циклов сейсмического воздействия и степени повреждения набрызгбетонной крепи.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложен новый подход к оценке напряженно-деформированного состояния набрызгбетонных крепей, расположенных в зоне влияния многократного сейсмического воздействия от массовых взрывов.

2. Разработана методика выбора типа и обоснования параметров крепей горных выработок, располагаемых в зоне влияния массовых взрывов;

3. Разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости горных выработок и сохранности технического состояния крепей горных выработок в зоне влияния массовых взрывов.

Методология и методы исследования. Для выполнения диссертационной работы был использован целый комплекс методов состоящий из изучения и анализа опыта иностранных исследователей и достижений соотечественников в области оценки допустимого уровня воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые подземные объекты, здания и сооружения; выполнен поиск, изучение и систематизация теоретических и численных исследований, особенностей построения геомеханических моделей в рассматриваемой области знаний; проведены натурные инструментальные исследования и лабораторные работы методом численного моделирования геомеханических процессов, позволяющих учесть многократное динамическое нагружение массива с использованием метода конечных элементов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Прогноз напряженно-деформированного состояния набрызгбетонной крепи горной выработки, расположенной в зоне влияния взрывных работ, должен осуществляться на основании многократного сейсмического воздействия, при этом модель деформирования набрызгбетона

должна учитывать накопление повреждений в результате развития микротрещин.

2. Положение зоны повреждения набрызгбетонной крепи и степень ее повреждения зависят не только от расстояния до источника сейсмического события и энергии, выделяемой при его возникновении, но и от ориентации этого источника относительно горной выработки.

3. Параметры набрызгбетонной крепи должны определяться на основании принятой на Малеевском руднике методики их расчета и учитывать изменения ее эффективной толщины в результате многократного сейсмического воздействия от взрывных работ.

Степень достоверности результатов исследования.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается сопоставлением данных натурных наблюдений на экспериментальных участках, а также результатов других исследователей с результатами численного моделирования, выполненных на основании разработанной методики; использованием современных методов механики сплошных сред; рассмотрением взаимодействия системы “крепь-породный массива” в рамках теории упругости, пластичности и элементов механики повреждения.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследований были представлены на научных конференциях в 2017-2020 гг.:

- На международной научно-практической конференции «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» в Горном Университете. Место проведения: г. С-Пб, Санкт-Петербургский горный университет, (2017 г.)

- На международной научно-практической конференции «Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации». Место проведения: г. Пенза, (25 мая 2018 г.).

- На всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». Место проведения: г. С-Пб, Санкт-Петербургский горный университет, (2020 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования; обосновании методики определения входных параметров для нелинейных моделей; построении моделей и проведении численных экспериментов методом конечных элементов, выполнении обработки и анализе результатов моделирования; получение закономерностей влияния многократного динамического нагружения на напряженно-деформированное состояние набрызгбетонных крепей; разработка методики, выбора типа и обоснования параметров крепей горных выработок, располагаемых в зоне влияния массовых взрывов.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований, и 1 приложения. Диссертация изложена на 178 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 96 рисунков и 32 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность, основная цель и идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведён анализ текущего состояния вопроса в области воздействия сейсмозрывных волн на крепь горных выработок. Приведены общие положения зарождения и распространения сейсмозрывных волн в породном массиве. Представлен обзор известных способов снижения негативного сейсмического воздействия взрыва на охраняемые объекты. Исследована нормативная база в области обеспечения безопасности охраняемых объектов подверженных сейсмическим колебаниям. Изучены основные подходы к прогнозированию уровня сейсмического воздействия от взрывных работ.

Во второй главе представлены результаты проведенных натурных исследований воздействия взрывов на устойчивость горных выработок и техническое состояние крепей Малеевского рудника. Разработана методология проведения инструментальных наблюдений за распространением сейсмических волн при взрывных работах. Проведены замеры скоростей смещения частиц породного массива на контуре горной выработки в результате взрывных работ различной степени интенсивности.

В третьей главе рассмотрены теоретические вопросы прогноза напряженно-деформированного состояния набрызгбетонной крепи. Представлена модель деформирования набрызгбетона с учетом накопления повреждений. Разработана методика построения численных моделей прогноза распространения сейсмических волн от источника взрыва до горной выработки основанная на двухстадийном подходе. Представлены результаты прогноза распространения сейсмических волн в породном массиве при различных схемах

расположения горной выработки относительно источника взрыва, а также представлены закономерности формирования степени повреждения неармированной и дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия.

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета несущей способности набрызгбетонной крепи с учетом многократного сейсмического воздействия. Предложена методика выбора типов и параметров крепления выработок с учетом динамического воздействия массовых взрывов.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Прогноз напряженно-деформированного состояния набрызгбетонной крепи горной выработки, расположенной в зоне влияния взрывных работ, должен осуществляться на основании многократного сейсмического воздействия, при этом модель деформирования набрызгбетона должна учитывать накопление повреждений в результате развития микротрещин.

На первом этапе в целях оценки накопления повреждений в набрызгбетонной крепи горной выработки, расположенной в зоне влияния многократного сейсмического воздействия от массовых взрывных работ, была построена численная модель, описывающая процесс зарождения и распространения сейсмической волны в массиве.

Результаты прогноза распространения сейсмических волн в породном массиве в окрестности участка инициации ВВ представлены в качестве скорости перемещения частиц породы и величины перемещения и приведены в виде графиков на рисунке 1.

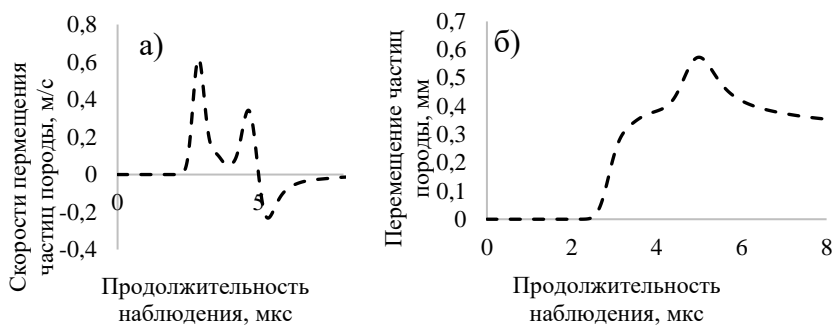


Рисунок 1 – Развитие пиковых скоростей перемещения частиц пород (м/сек) по мере удаления от источника взрыва: а – диаграмма развития скоростей смещений частиц породы в характерной точке; б – смещение частиц породы в характерной точке.

Результаты расчета напряженного состояния набрызгбетонной крепи, при ее рассмотрении как упругой среды, представлены в виде зависимостей изменения главных минимальных напряжений на каждом цикле сейсмического воздействия, что графически изображено на рисунке 2.

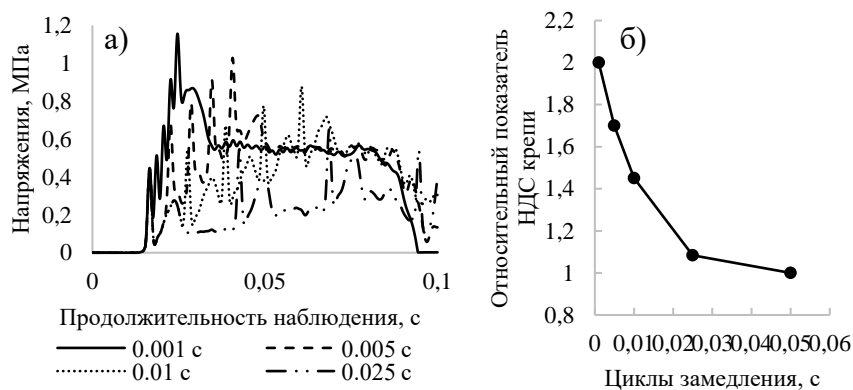


Рисунок 2 – Формирование НДС набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии: а – развитие напряжения в набрызгбетонной крепи во времени; б – закономерности изменения величины напряжений в крепи на конечном этапе сейсмического воздействия.

В качестве описания пластического поведения бетона была использована модель CDP (Concrete Damage Plasticity) учитывающая накопление повреждений набрызгбетонной крепи.

Оценка влияния многократного нагружения на накопление повреждений в набрызгбетонной крепи показала, что учитывать данный фактор важно с точки зрения сохранения технического состояния крепи и обеспечения безопасности ведения горных работ.

2. Положение зоны повреждения набрызгбетонной крепи и степень ее повреждения зависят не только от расстояния до источника сейсмического события и энергии, выделяемой при его возникновении, но и от ориентации этого источника относительно горной выработки.

Результаты прогноза скоростей перемещения частиц породы при различных схемах приложения нагрузки показывают, что величина этих скоростей в значительной степени изменяется в зависимости от положения горной выработки относительно источника сейсмического воздействия. Изменяется не только величина скоростей перемещения частиц пород, но и характер и распределения, а также положения зон с наибольшей интенсивностью сейсмического воздействия. Таким образом, в зависимости от положения горной выработки от источника сейсмического воздействия меняется и характер деформирования набрызгбетонной крепи и распределение в ней напряжений.

На основании выполненных исследований получены результаты повреждения набрызгбетонной крепи как в неармированном, так и в армированном состоянии для 9 расчетных схем с разными углами приложения сейсмического воздействия и отдаленностью исследуемой выработки от источника такого воздействия. Эпюры распределения

скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва для различных схем приложения сейсмического воздействия изображены на рисунке 3.

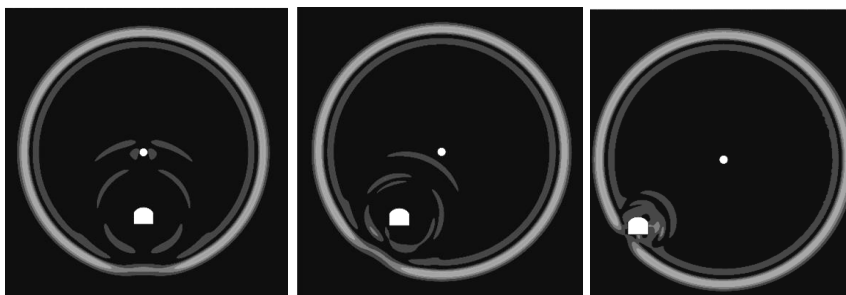


Рисунок 3 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва для 1, 2 и 3 схем соответственно

Как видно из представленных данных процесс накопления повреждений в набрызгбетонной крепи и положения зон повреждения в значительной степени зависит от принятой расчетной схемы. Накопление повреждений в набрызгбетонной крепи происходит неравномерно от цикла к циклу нагружения. Так в начальный период времени повреждения концентрируются в боках выработки, а в дальнейшем возможно развитие дополнительных напряжений уже в своде выработки, как в участке набрызгбетонной крепи в котором сохранилась большая по величине жесткость.

На основании анализа выполненных исследований установлено, что наибольшее влияние на повреждение крепи оказывает первое сейсмическое воздействие, в то время как последующие циклы сейсмического воздействия не оказывают столь существенного влияния на степень повреждения, зависимость величины повреждения крепи выработки от циклов воздействия представлена в виде диаграммы на рисунке 4.

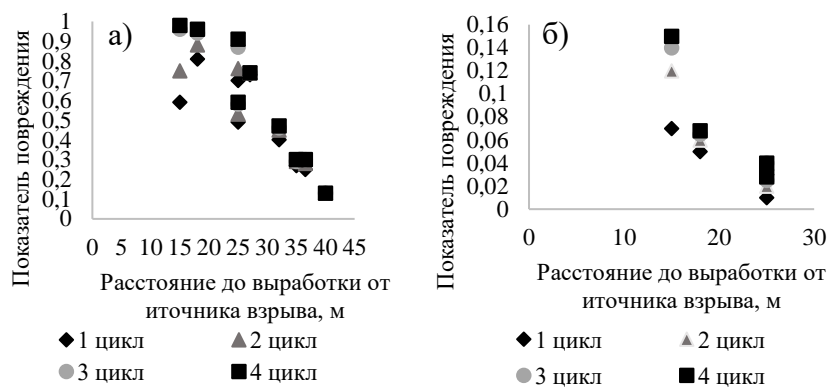


Рисунок 4 – Развитие показателя повреждения набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии:

а – неармированный набрызгбетон;

б – армированный набрызгбетон.

Данная закономерность характерна как для дисперсно-армированного набрызгбетона, так, и для неармированного набрызгбетона.

3. Параметры набрызгбетонной крепи должны определяться на основании принятой на Малеевском руднике методики их расчета и учитывать изменения ее эффективной толщины в результате многократного сейсмического воздействия от взрывных работ.

На основании полученных результатов исследований выполнено обоснование коэффициента учитывающего влияние многократного сейсмического воздействия на степень повреждения набрызгбетонной крепи, который является элементом методики расчета и обоснования параметров набрызгбетонной крепи для условий Малеевского рудника

Разрушение набрызгбетонной крепи при формировании локального вывала может произойти по различным схемам. Анализ результатов расчетов параметров крепи показал, что основным механизмом разрушения набрызгбетонной крепи от

действия веса пород в зоне локального вывала является растяжение при изгибе, а остальные формы разрушения не характерны для принятых условий крепления горных выработок Малеевского рудника.

Приняв удельный вес породы в нарушенной зоне γ равным 30 кН/м^3 и включив в расчет коэффициент $k_{\text{пнб}}$, который определяет во сколько раз снижается прочность набрызгбетона относительно исходной величины при многократном сейсмическом воздействии, получим итоговую формулу 1 для расчета толщины набрызгбетонной крепи:

$$\delta_{\text{кр}}(\text{см}) = B_{\text{выр}} \sqrt{\frac{h_{\text{н}}}{k_{\text{пнб}} R_{\text{б.и.}}}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{н}}$ – размер нарушенной зоны, м; $k_{\text{пнб}}$ – коэффициент, учитывающий накопление повреждений в набрызгбетонной крепи в результате многократного сейсмического воздействия, $R_{\text{б.и.}}$ – прочность набрызгбетона на растяжение при изгибе, МПа.

Величина коэффициента $k_{\text{пнб}}$ определяется по формуле 2, как произведение коэффициента повреждения набрызгбетонной крепи при однократном сейсмическом воздействии $k_{\text{пнб.о}}$ и коэффициента, показывающего на сколько возрастает повреждение крепи при заданном количестве циклов сейсмического воздействия $k_{\text{пнб.м}}$:

$$k_{\text{пнб}} = 1 - k_{\text{пнб.о}} k_{\text{пнб.м}}. \quad (2)$$

Численные значения данных коэффициентов для условий Малеевского рудника определены на основании обработки результатов численных исследований и представлены на рисунках 5 и 6 отдельно для неармированного и армированного набрызгбетона.

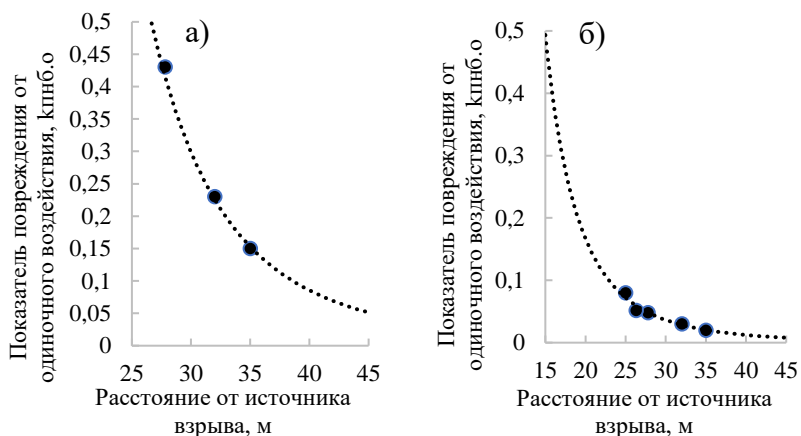


Рисунок 5 – Закономерности повреждения набрызгбетонной крепи при однократном сейсмическом воздействии: а – неармированный набрызгбетон; б – дисперсно-армированный набрызгбетон.

Снижение прочности набрызгбетона при многократном сейсмическом воздействии принято одинаковым как неармированного, так и для армированного набрызгбетона и представлено в виде диаграммы на рисунке 7

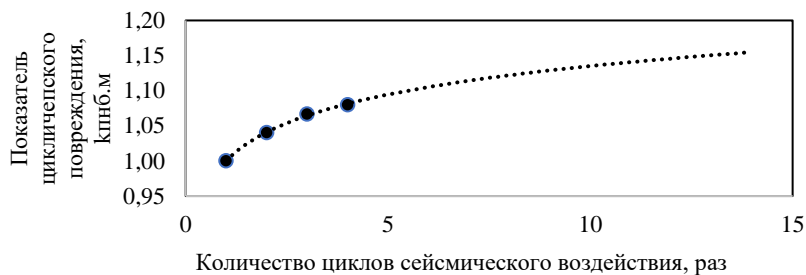


Рисунок 6 – Закономерность снижения прочности набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии

Показано, что интенсивность повреждения армированного набрызгбетона значительно меньше по отношению к неармированному набрызгбетону, а количество циклов сейсмического воздействия такая крепь выдерживает, значительно больше сохраняя свою работоспособность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - разработка методики расчета НДС крепи горных выработок подверженных воздействию массовых взрывов.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполненные исследования подтвердили снижение устойчивости горной выработки и ухудшение технического состояния набрызгбетонных крепей выработок, расположенных в зоне интенсивного влияния взрывных работ.

2. Разработаны методические положения построения численных моделей прогноза НДС набрызгбетонной крепи выработки, расположенной в зоне влияния взрывных работ, основанные на решении задач механики сплошной среды в плоско-деформационной постановке базирующиеся на применении упругопластических моделей среды с накоплением повреждений.

3. Установлено, что взаимосвязь между скоростью перемещения частиц породы на контуре выработки и повреждением крепи не является линейной, и зависит также от формы выработки и ее расположения относительно места ведения взрывных работ.

4. Установлено, что степень повреждения неармированной и дисперсно-армированной крепи в значительной степени отличается. Неармированный набрызгбетон уже после первого цикла сейсмического воздействия получает повреждения и последующие циклы сейсмического воздействия значительно усиливают данный эффект. При рассмотрении крепи, выполненной из дисперсно-армированного набрызгбетона видно, что степень повреждения значительно меньше, а многократное воздействие не оказывает

серьезного влияния, увеличивается только размер зоны повреждения крепи.

5. Установлено значительное влияние схем отработки рудного тела на величину повреждения набрызгбетонной крепи.

6. На основании полученных данных выполнено обоснование коэффициента, учитывающего влияние многократного сейсмического воздействия на степень повреждения набрызгбетонной крепи.

7. Установлено, что в зоне интенсивного влияния взрывных работ (радиус критического воздействия) применение неармированной набрызгбетонной крепи не рекомендуется, необходимо использовать дисперсно-армированную набрызгбетонную крепь, параметры которой должны определяться с учетом разработанной методики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Сотников, Р.О. Прогноз воздействия динамических проявлений горного давления на устойчивость породных обнажений / Р.О. Сотников, М.А. Вильнер - DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-21-3-13 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6 специальный выпуск 21. – С. 3 – 13.

2. Тхориков, А.И. Компьютерное моделирование геомеханических процессов для прогноза напряженно-деформированного состояния при проведении выработок через целик равный трем пролетам выработки / А.И. Тхориков, В.В. Глинский, Р.О. Сотников- DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-22-3-13 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6 специальный выпуск 22. – С. 3 – 13.

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

3. Karasev, M.A. Development of a model for predicting the dynamic effect on the stability of rock excavation / M.A. Karasev, R.O. Sotnikov, V. Yu. Sinegubov, N.A. Egorova, K.V. Makarov, A.I. Thorikov - DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012051 // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – С. 188 – 189.

Публикации в прочих изданиях:

4. Сотников, Р.О. Природа возникновения сейсмической волны и особенность ее формирования от массового взрыва / Р.О. Сотников // Научно-практический журнал «Аллея науки». – 2018. – № 11(27). – С. 129–134.

5. Сотников, Р.О. Проявление влияния сейсмических волн от массовых взрывов на крепь выработок Малеевского рудника ЗГОК, Республика Казахстан / Р.О. Сотников // Научно-практический журнал «Аллея науки». – 2018. – № 55. – С. 411–416

6. Вильнер, М.А. Прогноз устойчивости породных обнажений, располагаемых в структурно-нарушенных массивах рудников КФ АО «Апатит» / М.А. Вильнер, Р.О. Сотников // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции. -2020.

Патенты:

7. Патент RU № 2 743 161 Российская Федерация, МПК E21D 11/15(2006.01). Способ крепления горных выработок анкерами с армированными поясами: № 2020114171: заявл. 20.04.2020; опубл. 15.02.2021 / Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Синегубов В.Ю., Сотников Р.О.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 5 с. 4 ил