

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

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Карасев М.А.

Санкт-Петербург – 2021 год

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК</b> .....	12
1.1. Общие положения .....	12
1.2. Теоретические положения зарождения и распространения сейсмиковзрывных волн в породном массиве .....	13
1.3. Обзор способов снижения сейсмического воздействия взрыва на охраняемые объекты .....	18
1.4. Нормативная база в области обеспечения безопасности охраняемых объектов по колебаниям .....	20
1.5. Анализ текущего геотехнического состояния Малеевского рудника .....	23
1.6. Выводы по главе 1.....	32
<b>ГЛАВА 2 ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК</b> .....	34
2.1. Общие положения .....	34
2.2. Методика проведения визуально-инструментальных исследований.....	34
2.3. Порядок и организация работ визуально-инструментального исследования воздействия взрывных работ на устойчивость горных выработок.....	36
2.4. Натурные исследования воздействия взрывных работ на приконтурный массив горной выработки.....	44
2.4.1. Общие сведения об экспериментальных участках .....	44
2.4.2. Результаты инструментальных наблюдений за изменением НДС породного массива .....	47

2.4.3. Результаты визуальной оценки сейсмического воздействия от взрывов на устойчивость горных выработок .....	50
2.5. Выводы по главе 2.....	52
<b>ГЛАВА 3 ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ ПРИ МНОГОКРАТНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ .....</b>	<b>53</b>
3.1. Общие положения .....	53
3.2. Сейсмические волны и динамика породного массива .....	54
3.2.1. Вибрация породного массива при распространении сейсмозрывных волн	54
3.2.2. Аналитический метод расчета скорости перемещения частиц породы .....	56
3.2.3. Определение радиуса критического воздействия.....	57
3.2.4. Определение размера зоны разрушения пород в окрестности участка инициации ВВ.....	58
3.2.5. Определение максимальной скорости перемещения частиц породы .....	59
3.3. Методика проведения численного моделирования прогноза НДС набрызгбетонной крепи при сейсмическом воздействии .....	61
3.3.1. Общие положения методики проведения численного моделирования.....	61
3.3.2. Численный метод анализа для решения задач в динамической постановке	61
3.3.3. Граничные условия для задания сейсмической нагрузки от взрывных работ	62
3.3.4. Модель деформирования породного массива, принята при выполнении численного моделирования .....	64
3.3.5. Модель упругопластического деформирования бетона с накоплением повреждений .....	68
3.4. Конечно-элементные модели прогноза развития НДС породного массива и крепи при взрывном воздействии.....	76

3.4.1. Конечно-элементные модели прогноза НДС набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии .....	76
3.4.2. Конечно-элементные модели прогноза НДС набрызгбетонной крепи при различных системах разработки .....	79
3.4.3. Конечно-элементные модели прогноза НДС набрызгбетонной крепи на Малеевском руднике .....	83
3.5. Результаты численного моделирования прогноза воздействия взрывных работ на напряженное состояние набрызгбетонной крепи.....	83
3.5.1. Результаты оценки влияния взрывного воздействия на НДС набрызгбетонной крепи при многократном нагружении .....	83
3.5.2. Результаты оценки влияния способа разработки месторождения на формирование НДС набрызгбетонной крепи и породного массива.....	91
3.5.3. Оценка влияния повреждения набрызгбетонной крепи при массовых взрывах для условий Малеевского рудника .....	119
3.6. Выводы по главе 3.....	137
<b>ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСЧЕТУ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ С УЧЕТОМ МНОГОКРАТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....</b>	<b>139</b>
4.1. Общие положения .....	139
4.2. Разработка рекомендаций по расчету несущей способности набрызгбетонной крепи от статической нагрузки .....	140
4.2.1. Особенности механизма потери несущей способности набрызгбетонной крепи .....	140
4.2.2. Особенности расчета статической нагрузки на набрызгбетонную крепь... ..	142
4.2.3. Определение минимальной величины прочности адгезии между набрызгбетоном и поверхностью породного обнажения .....	143

4.2.4. Определение минимальной толщины набрызгбетонной крепи на действие изгибающего момента.....	144
4.2.5. Определение минимальной толщины набрызгбетонной крепи при срезе..	145
4.2.6. Определение минимальной толщины набрызгбетонной крепи из условия невозможности формирования наклонных трещин .....	146
4.3. Разработка рекомендаций по расчету параметров набрызгбетонной крепи с учетом дополнительного динамического воздействия от массовых взрывов .....	147
4.4. Методика выбора типа и параметров крепи на Малеевском руднике .....	150
4.4.1. Определение категорий устойчивости с использованием классификации Q-Бартона .....	151
4.4.2. Определение размера нарушенной зоны в окрестности горной выработки	154
4.4.3. Определение параметров набрызгбетонной и дисперсно-армированной набрызгбетонной крепей .....	155
4.5. Рекомендации по креплению горных выработок расположенных в слабоустойчивой части горного массива .....	155
4.6. Выводы по главе 4.....	159
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>161</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>163</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения .....</b>	<b>178</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности**

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 достигнут на горном производстве за счет уменьшения объемов перекрепления горных выработок, решение данной задачи является безусловно актуальным.

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 O. Erthen, M. 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 натурных 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 исследований.** 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 теоритических 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 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. г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, (2017 г.)

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

- На всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». г. Санкт-Петербург, 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 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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

## 1.1. Общие положения

Буровзрывной способ разрушения пород является наиболее распространенным способом формирования полостей в горных породах (тоннели, горные выработки, камеры, добыча полезного ископаемого и т.д.) [8]. При выполнении буровзрывных работ выделяется значительное количество энергии, которая направлена на разрушение пород за счет формирования радиальных трещин и участков дробления [82, 83]. Однако, только 20-30% энергии взрыва расходуется на ее разрушение, остальная часть энергии распространяется по породному массиву в виде сейсмических волн. [54] Упругие волны могут распространяться от участка ведения взрывных работ на достаточно большие расстояния и при определенных условиях могут достичь другого породного обнажения и оказать негативное воздействие как на породный массив в окрестности породного обнажения, так, и на его крепь или обделку [7,18]. Хорошо известным является факт, что интенсивность сейсмического воздействия определяется тремя факторами: пиковая скорость перемещения частиц породы [88], частота их колебания и продолжительность воздействия, которые в целом формируют спектр воздействия [76].

Проблема сейсмического воздействия описывается двумя противоборствующими аспектами: уменьшение негативного эффекта взрыва с точки зрения безопасности ведения горных работ и обеспечение требуемой производительности.

Вопросами численного моделирования воздействия взрывных волн на сооружения занимались многие исследователи: А.П. Господариков, В.Н. Мосинец, Е.Н. Шер, Б.В. Эквист, N.R. Ambraseys, N.I. Duvall, A.J. Hendron, B. Kihkstrom, B. Yan., U. Langefors [19, 114, 115] и др.

## 1.2. Теоретические положения зарождения и распространения сейсмозрывных волн в породном массиве

При инициировании взрывчатого вещества (ВВ), происходит сложная химическая реакция связанная образованием большого количества газообразных продуктов, которые оказывают высокое давление на стенки зарядных скважин (шпуров), чем достигается ожидаемый разрушительный эффект. Высокое давление газов, образованных в результате взрыва, действуя на стенки зарядных скважин (шпуров), передаётся в другие точки среды в виде ударной волны, формируемой в месте контакта заряда ВВ и окружающей его среды. Таким образом, ударной волной принято считать моментальное возмущение среды, все параметры состояния которой (плотность, давление, температура и пр.) меняются скачкообразно, а скорость её распространения превышает скорость звука в рассматриваемой среде. Распространения ударной волны, как сверхзвукового процесса, вызывает значительные энергетические затраты и возможно до тех пор, пока давление на фронте ударной волны, превышает модуль объёмного сжатия среды. В результате эмпирических исследований была определена геометрическая область распространения ударной волны, радиус которой принимается равным 3–7 радиусам заряда ВВ [44,13].

С распространением ударной волны происходит выполаживание переднего фронта и наблюдается переход ударной волны в волну сжатия. Волна сжатия характеризуется неупругим возмущением среды, параметры состояния которой изменяются более плавно. По мере распространения волны сжатия в среде возникают остаточные деформации, которые в дальнейшем ведут к нарушению сплошности. Опытным путем установлено, что в зависимости от физико-механических свойств среды распространение таких волн ограничено 120–150 радиусами зарядов ВВ [44,13].

При последующем выполаживании переднего фронта волны сжатия в среде осуществляется её переход в сейсмическую волну. **Сейсмической волной** называется волна, переносящая энергию упругих (механических) колебаний или, другими словами, упругое возмущение среды, параметры состояния вещества

которой на фронте остаются практически без изменений. Скорость звука и скорость распространения возмущения в данной среде равны. Время отвлечения вещества из состояния равновесия равно времени его возвращения к этому состоянию. Зона распространения сейсмической волны определяется, как правило, упругопластическими свойствами среды, общей массой заряда ВВ и находится на удалении, превышающем 120-150 его радиусов [44,13]. Процесс формирования и распространения волн, образованных взрывом ВВ представлен на рисунке 1.1.

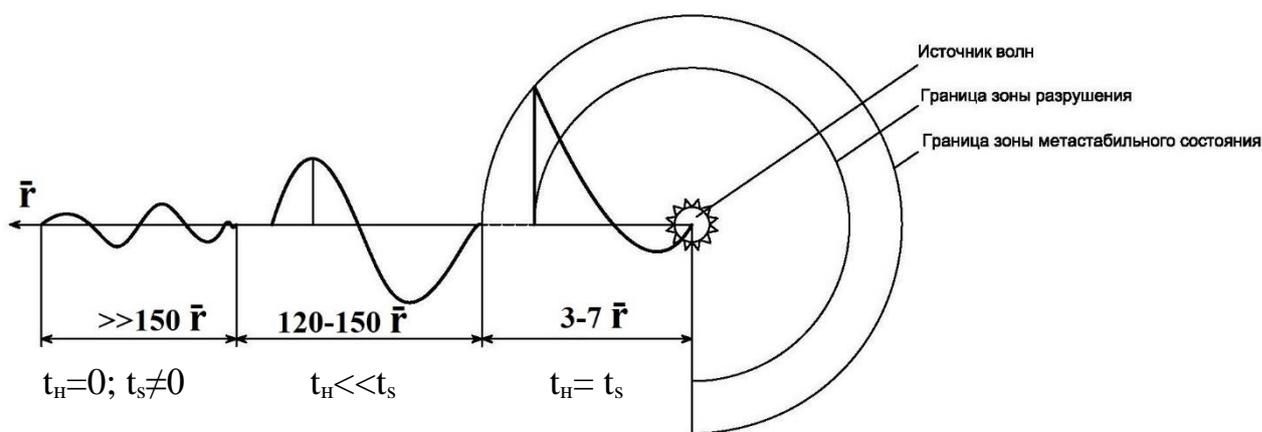


Рисунок 1.1 - Зоны распространения ударных волн, волн сжатия и сейсмических волн ( $t_H$  – время нарастания напряжений от 0 до max;  $t_s$  – время спада напряжений от max до 0;  $\bar{r}$  – относительный радиус заряда ВВ).

Процесс ослабления интенсивности взрывных волн описывается функциональными зависимостями, где  $R$  – удалённость от взрыва,  $r_0$  – радиус заряда ВВ [13]. Таким образом затухание в области сейсмических волн – близко к линейной зависимости ( $R/r_0$ ).

Скорость затухания ударной волны и волны сжатия невероятно высока, затухание происходит по закону  $(R/r_0)^3$  и  $(R/r_0)^2$  соответственно. Данный факт приводит к тому, что лишь малая часть энергии формирует сейсмическую волну, по разным подсчетам всего около 1-1,5% потенциальной энергии взрывчатого вещества участвует в формировании сейсмической волны. Однако упругие колебания среды сохраняются достаточно длительный срок и могут

распространятся на большие расстояния от источника, ввиду практически линейного закона затухания сейсмических волн [13,9].

Таким образом ввиду большого радиуса распространения сейсмических волн следует учитывать их многократное воздействие на несущую способность крепи капитальных горных выработок и изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород, расположенного в зоне такого воздействия. Различные горные выработки Малеевского рудника подвергаются многократному циклическому воздействию сейсмических волн формируемым от подземных массовых взрывов, применяющихся при камерной добыче полезных ископаемых.

Сейсмический волны, образованные от источника взрыва, характеризуются распространением продольных, поперечных и поверхностных волн [63]. Графически продольные и поперечные волны представлены на рисунке 1.2

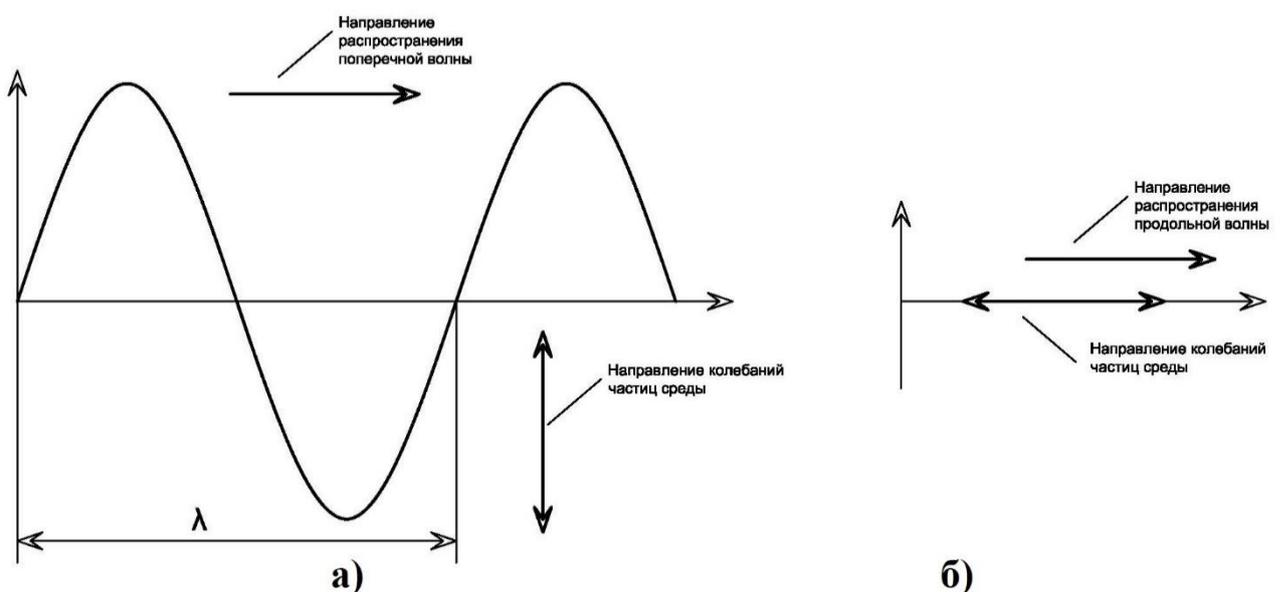


Рисунок 1.2 – Графическое представление, а – поперечной волны, б – продольной волны, где  $\lambda$  – длина волны.

Поперечной принято считать волну, возбуждающую колебания частиц среды в направлениях перпендикулярных к направлению ее распространения. Поперечные волны распространяются исключительно в твердых средах т.к. их возникновение невозможно без деформаций сдвига. В свою очередь продольная волна описывает колебательные движения частиц среды совпадающие с направлением распространения волны. Такие волны могут наблюдаться в любой

среде т.к. для их формирования и распространения достаточно деформаций сжатия и растяжения.

Более сложными по механизму описания являются поверхностные волны, или как еще иногда их называют волны Релея. Поверхностные волны распространяются по поверхности раздела двух сред, отличающихся физико-механическими свойствами. Частицы среды, переносимые поверхностными волнами, движутся по круговым или эллиптическим орбитам [12].

С точки зрения волнового воздействия на горные выработки, при массовых взрывах распространяющиеся волны можно рассматривать как однократный импульс. Начальная фаза сжатия радиальных напряжений является полуволной с крутой головной частью и пологой хвостовой. С удалением цилиндрической волны от точки начального импульса экстремум волны убывает и происходит смещение в сторону средней части [33]. По мере распространения волны и удаления от источника взрыва ее частотно-амплитудные характеристики убывают за счет распределения энергии на большей поверхности фронта волны. В ближней зоне происходит разрушение массива под действием сжимающего напряжения, а в дальней зоне взрыва разрушение массива и крепи в приконтурной зоне выработки обусловлено формированием отраженной волны растяжения. [47,33]

Продольные волны обладают в 1,7-1,9 раза большей скоростью распространения чем поперечные волны и первыми оказывают воздействия на выработки. Продольные волны, достигая внутренней поверхности выработки отражаются от границы раздела воздушной среды формируя растягивающие напряжения. Как известно, горные породы, как и набрызббетонная крепь значительно хуже сопротивляются действию растягивающих напряжений по сравнению с напряжениями сдвига. В случае если напряжения на фронте отраженной волны достигнут предела прочности на растяжение горной породы и материала крепи, то параллельно контуру выработки зарождается трещина отрыва, которая при дальнейшем воздействии может развиваться, создавая откол [33,51,56,]. Процесс формирования главных трещин разрушения при взрыве заряда ВВ представлен на рисунке 1.3.

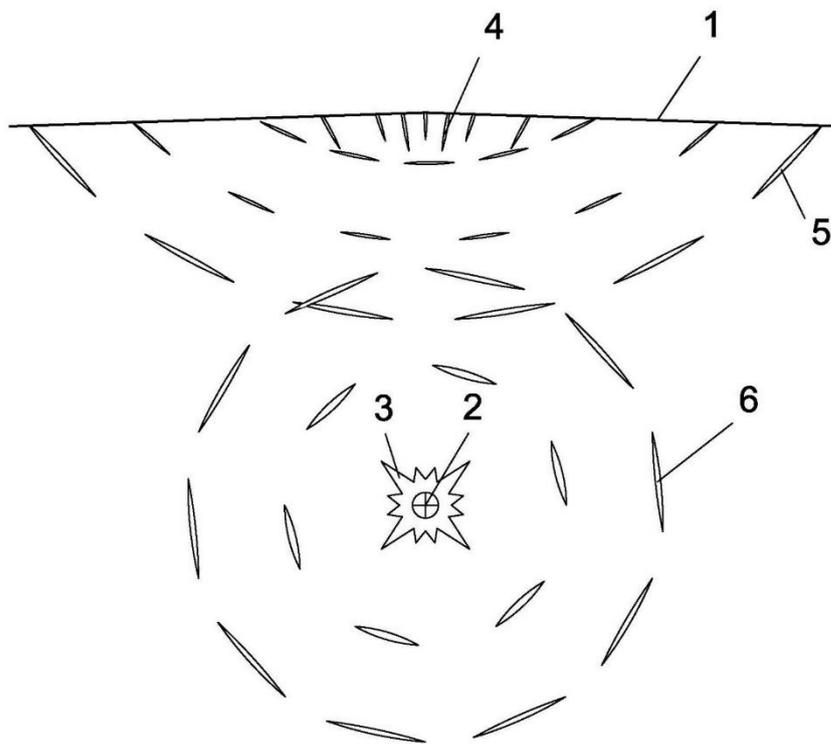


Рисунок 1.3 – Процесс формирования главных трещин разрушения при взрыве заряда ВВ. 1 – открытая поверхность, 2 - эпицентр взрыва, 3 - разрушение от прямой волны сжатия, 4 – трещины от волн сжатия и растяжения на границе раздела сред, 5 – трещины от отраженных волн растяжения, 6 – разрушения от волн разряжения.

Крепь подземных горных выработок получает наибольшие повреждения в результате воздействия сейсмических волн при совпадении их частот и периодов с собственными частотами колебаний [68]. Наличие естественной трещиноватости массива горных пород, множественные тектонические нарушения, кратное увеличение объемов выработанного пространства приводит к нарастанию уровня сейсмической опасности горных предприятий, в частности эти процессы тесно связаны с резонансными явлениями в горном массиве [46].

В результате суммирования энергии технологических взрывов и накопленной потенциальной энергией тектонических напряжений становятся возможными техногенные землетрясения разрушительной силы [16]. Стоит отметить, что в удароопасных рудниках, в условиях накопленной энергии в породном массиве, влияние массовых взрывов может привести к значительным сейсмическим событиям [35,25]. В работе [31] отмечается, что усиление воздействия сейсмических волн происходит в зонах тектонических разломов и главных трещин, а дополнительная компонента сейсмических колебаний

ассоциируется с вовлечением в движение участков массива, расположенных за зоной дробления пород. Многие специалисты отмечают зависимость частоты сейсмических событий количеством используемых взрывчатых веществ [32,28].

### **1.3. Обзор способов снижения сейсмического воздействия взрыва на охраняемые объекты**

Наибольший положительный результат в снижении сейсмического воздействия взрыва достигается уменьшением одновременно взрываемого взрывчатого вещества путем управления короткозамедленным взрыванием для чего используются различные системы инициирования [73,4,71]. К сожалению, короткозамедленное взрывание обладает проблемой точности срабатывания, что выражается отклонением проектных интервалов замедления от натурных, а в некоторых случаях даже приводит к одновременному инициированию отдельных групп зарядов с различными проектными интервалами замедления [5,27,10,43]. Особое внимание этому недостатку было уделено в работах известного ученого, проф. Эквист Бориса Владимировича и др. [74,75,102].

На уровень сейсмического воздействия взрыва так же оказывает влияние выбор конструкции заряда ВВ. Согласно статье [11] использование внутрискважинного замедления и рассредоточения заряда инертными промежутками позволяет снизить уровень сейсмического воздействия до 60%.

Величина сейсмического воздействия взрыва также зависит от расположения точки инициирования относительно длины взрывной скважины. С точки зрения повреждения зданий и сооружений, расположенных на поверхности в средней зоне распространения волн (до 500 – 800 м), меньшее сейсмическое воздействие оказывает взрывание с использованием верхнего инициирования заряда взрывчатых веществ по сравнению с нижним. Однако положительный эффект уменьшения сейсмического воздействия от управления расположением точки инициирования по мере отдаления от места производства взрывных работ постепенно снижается и в дальней зоне распространения сейсмозрывных волн расположение точки инициирования не играет важной роли [103,53,98].

Немаловажным фактором, оказывающим влияние на величину сейсмического воздействия взрыва является выбор схемы взрывания. Часто сравниваются преимущества последовательно-встречной и диагональной схем, которые заключается в возможности использования детонаторов с увеличенными интервалами замедления, что в свою очередь нивелирует возможные погрешности короткозамедленного взрывания, обеспечивая отбойку на открытую поверхность, чем повышается качество взрывных работ [38,45].

При решении задач уменьшения влияния сейсмических нагрузок на наземные здания, сооружения и другие охраняемые объекты высокую эффективность обеспечивают методы предварительного щелеобразования. Подобно методам предварительного щелеобразования проводились оценки снижения сейсмического воздействия взрывных работ путем расположения охраняемых объектов за зоной тектонических разломов, которые могут выполнять роль естественных сейсмических экранов. При прохождении сейсмической волны через тектонический разлом скорость смещений частиц массива снижается в 1,5-2 раза по сравнению с аналогичной точкой однородного изотропного массива [36,37,49,48,104].

В подземных горных выработках для обеспечения безопасности ведения горных работ использует специальные типы податливых крепей. Отличительной особенностью сейсмостойких податливых крепей является способность сопротивляться действию многократных динамических нагрузок. С этой целью были разработаны несколько вариантов узлов податливости, работа которых основана на принципе среза металлических шпилек и пластин [42].

Для защиты ответственных капитальных выработок в условиях, когда обычные виды крепи не могут обеспечить заданной несущей способности в условиях многократных динамических нагрузок, целесообразно применять сплошной сейсмический экран. Для формирования сплошного сейсмического экрана по периметру выработки бурят скважины, в которые устанавливаются анкеры-волноводы и закрепляют на них с помощью опорных плиток и гаек секции металлического экрана связанные между собой в единую конструкцию.

Пространство между секциями металлического экрана и контуром породного массива заполняется закладочным материалом, способным равномерно распределить сейсмическую нагрузку. Позднее для менее ответственных выработок был разработан упрощенный сейсмический экран, выполненный из стержневых элементов [42].

#### 1.4. Нормативная база в области обеспечения безопасности охраняемых объектов по колебаниям

Для определения интенсивности землетрясений и оценки нанесенного ими ущерба используется методика, изложенная в ГОСТ Р 57546–2017 [20]. Данная методика может применяться при проектировании наземных зданий и сооружений для оценки сейсмической опасности территории и выполнении работ сейсмического районирования, учитывающих параметры движения грунта. Следует обратить внимание на показатели PGA, PGV, PGD – средние значения пикового ускорения, скорости и смещения грунта при интенсивностях землетрясения, представленных в таблице 1.1 [20].

Таблица 1.1 - Значения параметров движений грунта при различных интенсивностях землетрясения

Интенсивность землетрясения I, баллы	PGA, см/с <sup>2</sup>	PGV, см/с	PGD, см	PGA $\tau^{0,5}$ , см/с <sup>1,5</sup>	lg(PGAxPGV), см <sup>2</sup> /с <sup>3</sup>
1,0	0,44	0,017	0,0003	0,95	-1,38
1,5	0,7	0,029	0,00059	1,5	-1,0
2,0	1,1	0,05	0,0013	2,4	-0,62
2,5	1,75	0,086	0,0028	3,8	-0,25
3,0	2,8	0,15	0,062	6,0	0,13
3,5	4,4	0,25	0,014	9,5	0,51
4,0	7,0	0,44	0,03	15	0,89
4,5	11,0	0,75	0,063	24	1,3
5,0	17,5	1,3	0,14	38	1,6
5,5	28,0	2,2	0,3	60	2,0
6,0	44,0	3,8	0,66	95	2,4
6,5	70,0	6,5	1,4	150	2,8
7,0	110	11	3,2	240	3,2
7,5	180	19	7	380	3,5
8,0	280	33	15	605	3,9
8,5	440	57	33	955	4,3
9,0	700	98	72	1516	4,7
9,5	1100	170	160	2400	5,0

На практике многие горнодобывающие предприятия при оценке сейсмического действия взрыва [65] используют сборник «Единых правил безопасности при ведении взрывных работ» ПБ 13-407-01 [24]. Сборник Единых правил предполагает в качестве основного критерия безопасности руководствоваться кратчайшим расстоянием между местом производства взрыва и охраняемым объектом, которое можно рассчитать по формуле 1.1:

$$r_{сб} = K_{Г}K_{О}a\sqrt[3]{Q}, \quad (1.1)$$

где  $K_{Г}$  – коэффициент, учитывающий свойства грунта в основании охраняемого сооружения;  $K_{С}$  – коэффициент, учитывающий характер охраняемого объекта;  $a$  – коэффициент, учитывающий условия взрывания;  $Q$  – масса заряда ВВ. Предложенная методика определения безопасного расстояния также используется при крупномасштабных промышленных взрывах [9].

Академиком М.А. Садовским [59,60,57,58] эмпирически была получена формула 1.2, которая остается актуальной до текущего времени и используется для производства быстрых приближенных расчетов:

$$r_{с} = K_{Г}^3 \sqrt[3]{\frac{Q}{0,4 + 0,6 \left(\frac{R_{В}}{\omega}\right)}}, \quad (1.2)$$

где  $K_{Г}$  - постоянная, зависящая от грунта;  $Q$  – масса заряда ВВ, кг;  $R_{В}$  – радиус воронки, м;  $\omega$  – глубина заложения заряда, м.

Российской федерации ГОСТ Р 52892-2007 определяет основные параметры сейсмического воздействия на здания и сооружения, которыми согласно [21] являются максимальная скорость колебаний и доминирующая частота.

С целью оценки величины сейсмического воздействия принимается наибольшая из компонент векторной скорости колебаний, что в общем случае можно записать в виде соотношения 1.3:

$$v_{п} = \max(v_{пх}, v_{пy}, v_{пz}), \quad (1.3)$$

где  $v_{мх}, v_{му}, v_{мz}$  – наибольшие значения скорости колебаний в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях ( $v_{мz}$  – вертикальная компонента). Если рассматривать зарубежные стандарты в области сейсмического воздействия, то

можно обнаружить некоторые отличия так, к примеру в шведском стандарте [110] принимается в рассмотрение только вертикальная компонента скорости.

Стоит отметить, что в настоящий момент в странах СНГ для оценки влияния сейсмичности взрыва принимается величина максимальной векторной скорости, которую можно записать в виде соотношения 1.4:

$$v_{\Sigma} = \sqrt{\max(v_{Mx}^2) + \max(v_{My}^2) + \max(v_{Mz}^2)}. \quad (1.4)$$

Распространенность применения максимальной векторной скорости в качестве основного параметра для оценки уровня сейсмического воздействия обусловлено техническими возможностями аппаратуры (чаще всего использовались аналоговые осциллографы), которая применялась долгое время для проведения инструментальных исследований.

Наиболее строгие требования к ведению горных работ с применением массового взрывания предъявляются при использовании в качестве основного параметра оценки максимальную векторную скорость [112,61].

Помимо выше упомянутого стандарта в производственной практике руководствуются так же другими нормативными документами [66,40], федеральными нормами и правилами [70], для оценки величины безопасного уровня сейсмозрывного воздействия на охраняемые здания и сооружения, а также исследованиями ученых в этой области [52,72]. Для оценки и сравнения зарубежного опыта применения нормативных документов в рассматриваемой области сейсмического воздействия на охраняемые объекты использовались данные, приведенные в различных научных статьях [78,34,9,107]. В результате такой оценки выявлено, что по уровню сейсмического воздействия самые высокие требования отражены в нормативных документах Германии [78, 87].

Проблема сейсмического воздействия описывается двумя противоборствующими аспектами: уменьшение негативного эффекта взрыва с точки зрения безопасности ведения горных работ и обеспечение требуемой производительности.

Сейсмическое действие взрыва в горных породах оценивают амплитудой колебания среды, скоростью и периодом колебаний.

Наиболее распространенным критерием, для оценки допустимого уровня сейсмического воздействия принято считать скорость колебания частиц породного массива. Практическим путем установлена взаимосвязь между величиной скорости колебания частиц охраняемого объекта и степенью его повреждения. Проанализировав множество научных статей и различных печатных источников, можно с уверенностью судить, что основными критериями оценки допустимого уровня влияния сейсмического эффекта взрыва являются скорость перемещения частиц и собственная частота колебаний [2,3,29,30,41,79,80].

### **1.5. Анализ текущего геотехнического состояния Малеевского рудника**

**Природное поле напряжений.** Мощные наклонные залежи богатых полиметаллических руд отрабатываются Малеевским рудником сплошной подэтажно-камерной системой разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства. Руды, в основном, сплошные, двух технологических сортов. Вкрапленные руды - в кварцитах. Все типы и сорта руд, а также вмещающие магматические породы (липаритовые порфиры) породы весьма устойчивы.

Основные горные работы по добыче руды ведутся по Родниковой рудной зоне (РРЗ) в этажах ниже 12 горизонта. Очистными работами затронута практически вся площадь рудных тел 6 и 7.

Модель природного поля напряжений основывается на предположении, что напряженное состояние массива определяется двумя активными процессами:

- гравитацией (силой собственного веса пород), действующей вертикально;
- тектоническими движениями земной коры, преимущественно, горизонтальными.

Оценка природного поля напряжений методом щелевой разгрузки проведена на Малеевской рудной зоне [14].

Было установлено, что на Малеевском месторождении природные напряжения равны:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 2\gamma H \\ \sigma_2 &= \gamma H \\ \sigma_3 &= \gamma H\end{aligned}\quad (1.5)$$

Соотношение 1.5 означает, что до начала горных работ максимальные горизонтальные напряжения, действовавшие вкрест простирания залежей и в 2 раза превышали вертикальные, а горизонтальные напряжения по простиранию были равны им. Наглядное представление природного напряженного состояния массива Малеевского месторождения на разрезе вкрест простирания показано на рисунке 1.4.

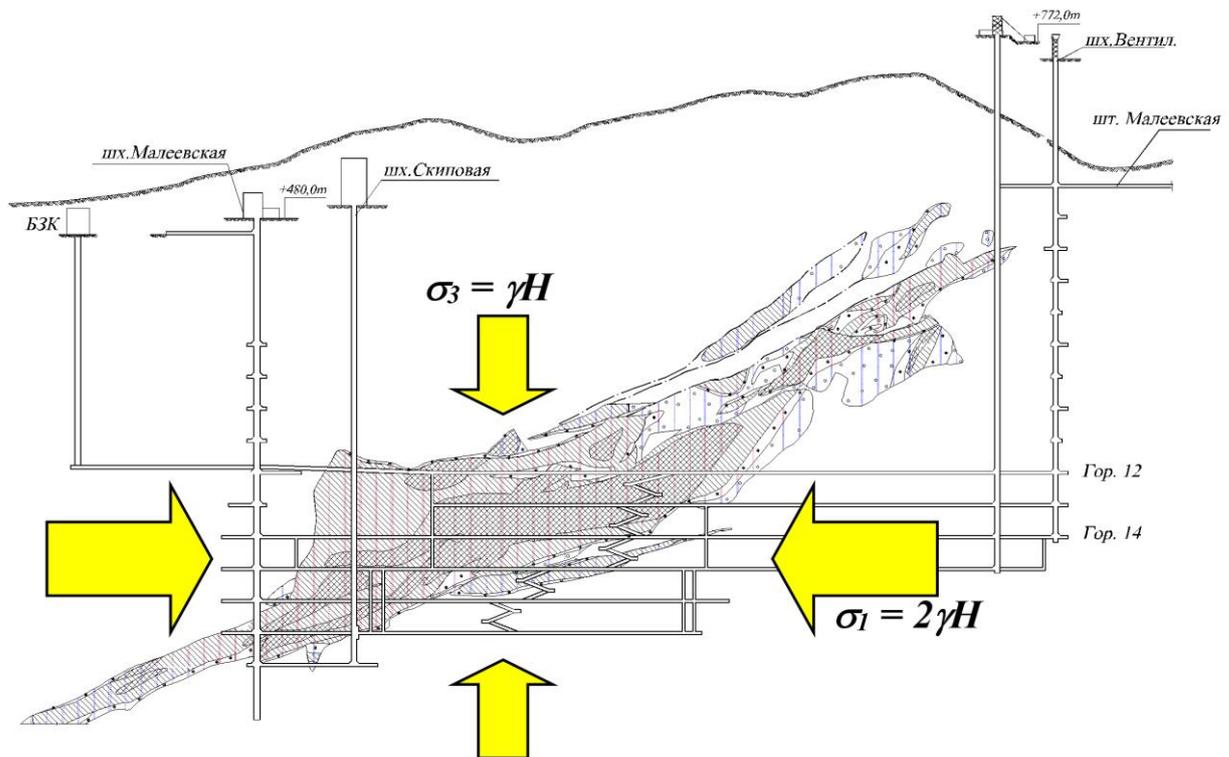


Рисунок 1.4 – Природное напряженное состояние массива Малеевского месторождения на разрезе вкрест простирания

Установленный натурным экспериментом факт доминирования (превышения) тектонических напряжений над вертикальным давлением имеет также геологическое подтверждение. На геологическом разрезе вкрест простирания в нагорной части (на отметках +250 м и выше до земной

поверхности) прослеживаются взбросы. Наличие взбросов характерно для высоких тектонических напряжений, превышающих вертикальные.

С глубиной, плоскости сдвиговых подвижек постепенно выполаживаются, а сдвиговые подвижки затухают в массиве на отметках ниже дна долин. При сдвиговых подвижках происходит частичная разгрузка действующих напряжений. Следовательно, на верхних горизонтах выше поверхностей взбросов величины тектонических напряжений должны быть существенно ниже, чем на глубоких горизонтах.

Для подтверждения характера природного поля напряжений в 2012 г. на глубине 760 м на 16 горизонте на удалении 80 м от отработанных камер методом щелевой разгрузки проведены повторные замеры [46].

Установлено, что на подэтаже гор.16+12 м природное напряженное состояние массива Малеевского месторождения характеризуется следующим образом:

- максимальными по величине являются горизонтальные тектонические напряжения  $\sigma_1$ , действующие вкрест простирания рудных зон; они превышают вертикальные напряжения  $\gamma H$  в  $\lambda_1 = 1,3$  раза;

- вертикальные гравитационные (от веса вышележащих пород) напряжения  $\gamma H$  являются промежуточными по величине  $\sigma_2$ ;

- горизонтальные напряжения, действующие по простиранию рудной зоны, являются минимальными по величине  $\sigma_3$  с коэффициентом бокового давления  $\lambda_3 = 0,7$ .

Если сравнить между собой результаты оценки природного напряженного состояния массива Малеевского месторождения в 2007 г. и 2012 г., то можно отметить:

- в обоих экспериментах природные горизонтальные напряжения вкрест простирания рудных зон оказались максимальными по величине  $\sigma_1$ ; они превышают вертикальное давление от веса вышележащей толщи пород  $\gamma H$  в  $\lambda_1 = 1,9 \div 1,3$  раза;

природные горизонтальные напряжения по простиранию рудных зон близки к вертикальному давлению пород налегающей толщи  $\gamma H$  с коэффициентом бокового давления  $\lambda_3 = 0,7 \div 1,0$ .

Это подтверждает ранее установленный на многих месторождениях факт: направления действия природных напряжений достаточно устойчиво связаны с геологической структурой массивов (в частности, с простиранием и падением рудных зон), а величины действующих напряжений могут изменяться в широких пределах; это связано с блочной структурой массива: жесткие (менее нарушенные) блоки напряжены сильнее, чем податливые (более нарушенные) блоки.

**Физико-механические свойства горных пород.** Породы и руды представлены девятью основными разновидностями: порфиритами, порфирами, кварцитами (микрокварцитами), алевролитами, роговиками, песчаниками, сланцами (серицит-хлоритовыми преимущественно окварцованными), полиметаллическими и медно-цинковыми рудами. Прочностные свойства пород и руд Малеевского месторождения представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Прочностные свойства пород и руд

Наименование основных разновидностей горных пород и руд	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$ , МПа	Прочность на растяжение, $\sigma_{р}$ , МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ , МПа
Алевролиты массивные	210	16,0	55	33	0,27	8,90
Алевролиты измененные трещиноватые	134	18,0	40	33	0,27	11,60
Микрокварциты (кварциты) слаботрещиноватые	150	15,0	67	35	0,27	9,20
Порфириты массивные	160	17,5	72	35	0,27	9,50
Кварцевые порфиры монолитные	160	12,0	72	35	0,25	8,50
Кварцевые порфиры слаботрещиноватые	108	11,7	56	33	0,25	8,50
Кварцевые порфиры трещиноватые, минерализованные	48	10,0	31	30	0,24	8,80
Руда медно-цинковая сплошная	125	7,9	56	35	0,32	20,2
Руда полиметаллическая сплошная	73	5,6	38	33	0,12	10,67
Руда барит- полиметаллическая	58	4,9	34	31	0,18	11,67
Хлорит-серицитовые сланцы	45	13,4	24	30	0,24	8,09

Результаты проведенных исследования свойств массива на нижних (ниже 16) горизонтах приведены в таблице 1.3. Сопоставление данных о свойствах руды

и пород показывает, что статистически значимых изменений с ростом глубины не наблюдается.

Таблица 1.3 - Физико-механические свойства пород на нижних горизонтах

Тип руды/породы	Показатели	Скорость продольной волны, м/с	Модуль упругости, $E \times 10^{-4}$ МПа	Прочность, МПа	
				на сжатие	на растяжение
руда полиметалл.	среднее	4653	2,6	80,0	6,2
	стандарт	671	0,9	10,0	1,4
	вар., %	14	33	13	23
кварцевые порфиры	среднее	5798	3,6	116,2	10,4
	стандарт	218	0,2	29,0	3,0
	вар., %	4	6	25	29
Кварциты	среднее	5483	3,6	103,5	7,2
	стандарт	509	0,2	28,8	3,2
	вар., %	9	6	28	45
диабазы (дайка)	среднее	6166	4,1	193,5	17,7
	стандарт	83	0,1	9,3	
	вар., %	1	3	5	

**Трещиноватость массива горных пород.** Статистические оценки трещиноватости необходимы для определения рейтинговых оценок качества массива и моделирования стохастической сетки трещин средствами DFN (Discrete Fracture Networks) с целью прогнозирования блочности трещиноватого массива. В 2012 году на Малеевском руднике была выполнена съемка трещиноватости линейным методом массовых замеров (Scanline Mapping) в горных выработках на гор.16+12 м [46].

Инструментально измерялись угол и азимут падения трещин (Dip & Dip Direction), длина следа трещин на поверхности горных выработок (Trace Length), расстояние по нормали до ближайшей трещины данной системы (Spacing). Обработка результатов съемки проведена с помощью программы *Dips* фирмы *RocSciense (Canada)*. Сводная полярная диаграмма трещиноватости массива по данным 250 замеров показана на рисунке 1.5.

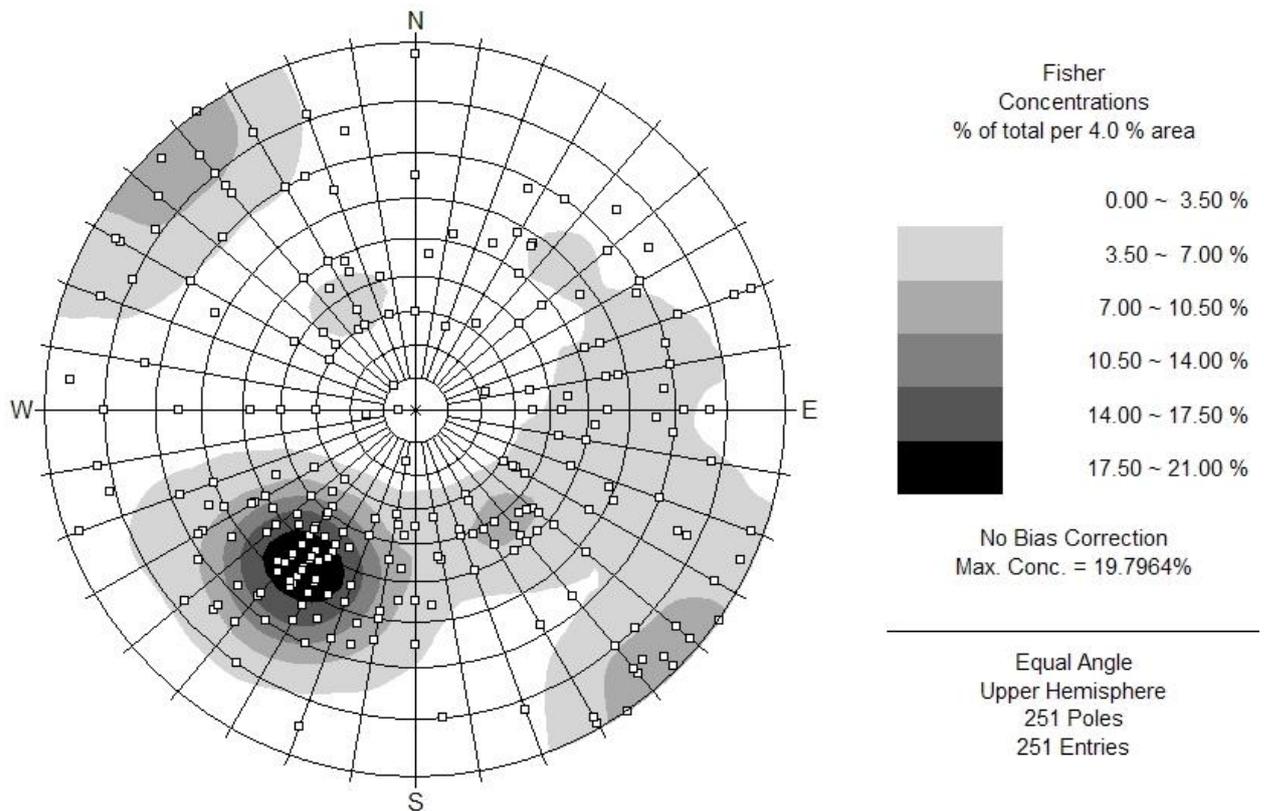


Рисунок 1.5 – Сводная диаграмма трещиноватости массива на Малеевском руднике (250 замеров на 14-16 горизонтах)

По результатам съемки были выявлены 3 основных системы трещин. Две из них – пологопадающие, одна – крутопадающая, параметры трещиноватости сведены в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 - Параметры трещиноватости массива на Малеевском руднике

№	Угол падения, град			Азимут падения, град		
	от	до	средний	от	до	средний
1	35	65	50	195	235	215
2	35	55	45	125	160	145
3	80	90	90	125 (305)	145 (325)	135 (315)

Система трещин № 1 со средним азимутом падения  $215^\circ$  и средним углом падения  $50^\circ$  является наиболее выраженной в массиве. Это совокупность трещин, залегающих согласно с рудной зоной. Они представляют собой первичные трещины, возникшие в массиве в процессе течения гидротермальных интрузий. Иногда по направлению данной системы встречаются зеркала скольжения. Система трещин № 2 является секущей по отношению к залеганию рудных тел и доминирующей системе трещин № 1. Система трещин № 3 является крутопадающей. Ее простираение практически перпендикулярно первой системе трещин. По направлению третьей системы относительно часто отмечаются зоны

дробления длиной в десятки метров, заполненные глиной трения, милонитом, жильными минералами.

Из-за широкой изменчивости элементов залегания трещин (углов и азимутов падения) расчет средних расстояний между трещинами в системах может давать существенные погрешности. Поэтому при съемке трещиноватости с помощью рулетки делались прямые замеры длин трещин и расстояний по нормали до ближайшей трещины данной системы.

По результатам прямых замеров длины трещин  $L$  обладают значительной изменчивостью и колеблются в очень широких пределах: от 0,5м до десятков метров. Для статистической обработки по результатам прямых замеров построена гистограмма длин трещин, представленная на рисунке 1.6. Плотность их распределения описывается обратным экспоненциальным законом, записанным в форме соотношения 1.6:

$$f(L) = \lambda \exp(-\lambda L), \quad (1.6)$$

где  $L$  - длины трещин;  $\lambda$  - параметр экспоненциального распределения, равный 0,24 для массива Малеевского месторождения.

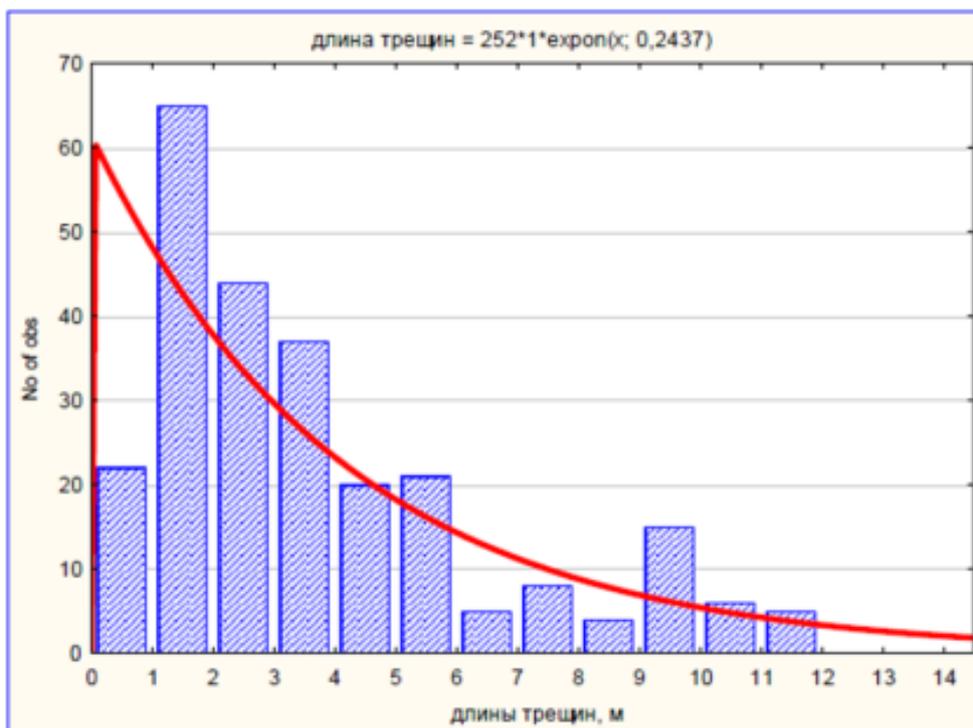


Рисунок 1.6 – Распределение длин трещин месторождений

Экспоненциальный закон распределения - однопараметрический, в котором величина  $1/\lambda$  является и средним значением, и стандартным отклонением случайной величины. Следовательно, по статистическим данным средняя длина трещин в массиве Малеевского месторождения составляет 4,2м.

Распределение расстояние между трещинами также описывается обратным экспоненциальным законом, представленным на рисунке 1.7, в котором параметр распределения для массива Малеевского месторождения равен 1,16. Это означает, что среднее расстояние между трещинами равно  $1/1,16 = 0,9$  м.

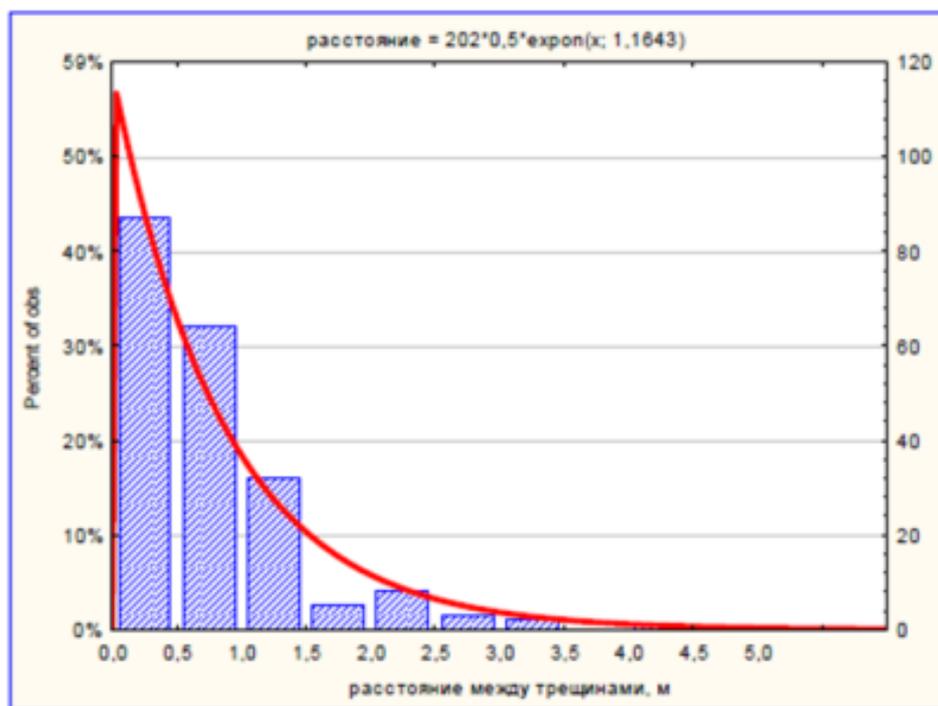


Рисунок 1.7 – Распределение расстояний между трещинами

Шероховатость трещин можно характеризовать следующим образом: в крупном масштабе (Large) на базе 5÷7 м - волнистые в разных направлениях с углом  $i$  (discontinuity roughness angle) до 10÷20°; в мелком масштабе (Small) на базе 0,2 м - шероховатые.

Показатели, принятые при расчете рейтинга RMR массива Малеевского месторождения по результатам предыдущих исследований сведены в таблицу 1.5., расчетное значение рейтинга массива RMR составляет 78÷83. Среднее значение рейтинга массива RMR=80 баллов. По классификации З. Бенявского 80 баллов – это граница между устойчивыми и весьма устойчивыми массивами.

Таблица 1.5 - Расчет рейтинга RMR массива Малеевского месторождения

Показатели	Прочность на одноосное сжатие,	RQD, %	Расстояние между трещинами, м	Шероховатость трещин	Длина трещин, м	Раскрытие трещин, мм	Заполнитель трещин	Выветренность трещин	Обводненность массива	Ориентация трещин
Значения	100-250	75-90	0,6-2,0	шероховатые	3÷10	< 0,1	нет	нет	нет	средняя
баллы	12	17÷20	15	5÷6	2	5÷6	6	6	15	-5

Для перехода от свойств пород и руд в ненарушенных образцах к свойствам трещиноватых массивов использована методика Е. Ноек [93]. Трещиноватость массива в данной методике характеризуется геологическим индексом прочности GSI - Geological Strength Index в баллах. Трещиноватость массива для определения GSI охарактеризована следующим образом: структура массива – блочный, хорошо связанный массив из блоков, образованных 3 системами трещин; свойства трещин – очень хорошие, шероховатые, неветрелые. При данных кондициях значение GSI находится в пределах 65÷85 баллов. Для уточнения используем известную зависимость  $GSI = RMR - 5$ . При  $RMR = 80$  баллов горно-геологические условия Малеевского рудника будем характеризовать  $GSI = 75$  баллов.

**Механизм потери устойчивости горных выработок.** Прочностные свойства пород и руд месторождения в массиве, а также их устойчивость при проходке горных выработок зависят от степени их расланцевания, трещиноватости, выветрелости и удаленности от зон тектонических нарушений.

В пределах разведанной части месторождения породы и руды, согласно выполненного районирования, подразделены на четыре категории устойчивости.

К устойчивым отнесены неизменные и слабоизмененные алевролиты массивные кремнистые, кварциты, сливные песчаники массивные ороговикоманные, порфириты массивные, медно-цинковые массивные монолитные руды (70%). При проходке образуются небольшие по объему вывалы, крепление, как правило, не требуется.

К породам средней устойчивости – измененные трещиноватые слабодиссланцованные алевролиты, кварц-полевошпатовые порфиры, порфириты в экзоконтактах и частично в дайках, руды полиметаллические, медно-цинковые трещиноватые (25%). При проходке породы дают вывалы кровли и бортов, заколы. После образования свода выработки стоят без крепления. Крепь – торкретбетон, в комбинации со штангами.

К неустойчивым отнесены интенсивно трещиноватые, рассланцованные, хлоритизированные алевролиты, порфириты, серицит-хлоритовые сланцы, дайки и их контакты (2%). При проходке отставание крепи от забоя минимально допустимое. Крепь – монолитный бетон или арочная металлическая вразбежку. Нарушений крепи не отмечалось.

К весьма неустойчивым отнесены породы в зонах разломов и дробления, в районе очистных работ не встречаются (до 3% от разведанной части месторождения). Проходка этих пород требует постановки одновременно с проходкой крепи из-за высокой скорости смещения кровли и бортов выработки. Рекомендуемая крепь арочная металлическая, по локальному проекту.

## **1.6. Выводы по главе 1**

Проанализировав достаточное количество отечественных и зарубежных литературных источников, можно сделать вывод, что известные подходы к прогнозу устойчивости горных выработок основаны на применении эмпирических уравнений, и 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.

Для решения поставленной задачи необходимо запланировать и выполнить такие работы как:

- Разработка программы и проведения экспериментальных исследований по установлению зависимостей развития сейсмических процессов в породном массиве при воздействии массовых взрывов.
- Разработка теоретических положений расчета напряженно-деформированного состояния крепей горных выработок при сейсмическом воздействии от массовых взрывов.
- 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.
- Разработка методики прогноза устойчивости горных выработок, выбора типа крепи и ее рациональных параметров при воздействии массовых взрывов.
- Разработка способов повышения устойчивости горных выработок, расположенных в зонах интенсивного проявления геодинамических процессов от массовых взрывов.

## **ГЛАВА 2 ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

### **2.1. Общие положения**

Приведенные в главе 1 результаты теоретических исследований выявили, что для разработки методики расчета параметров набрызгбетонных крепей с учетом влияния сейсмического воздействия от взрывных работ, а также в целом для выбора надежных способов обеспечения устойчивости выработок в таких условиях, необходимо проведение ряда экспериментов, в том числе натуральных исследований, направленных на получение качественных и количественных оценок сейсмических воздействий взрывов на устойчивость горных выработок. В этой связи сформулированы основные положения методики проведения таких исследований, приведенные ниже.

**Цель натуральных исследований:** проведение визуально-инструментальных исследований по оценке воздействия сейсмических волн при взрывных воздействиях на устойчивость горных выработок.

**Задачи натуральных исследований:**

- определение скоростей перемещения частиц на контуре горной выработки при сейсмическом воздействии от взрывных работ (при проходке горных выработок и массовых взрывах);

- оценка состояния крепей горных выработок, находящихся в зоне влияния сейсмического воздействия от взрывных работ (при проходке горных выработок и массовых взрывов).

### **2.2. Методика проведения визуально-инструментальных исследований**

**Комплект оборудования и материалов.** Для производства замеров сейсмического воздействия, используется сейсмооборудование компании ZETLAB, имеющееся в распоряжении службы геомеханического контроля Малеевского рудника, ГОК «Алтай». Общий вид оборудования представлен на рисунке 2.1. Применение приборов компании ZetLab, позволяет производить контроль сейсмических воздействий (колебаний) на горный массив и сооружения,

расположенные в непосредственной близости от места проведения взрывных работ.

Сейсмостанция ZET 048-E4 (4 канала)



Сейсмодатчик ВС 1313



Сейсмограф ZET 7156 ver.2



Рисунок 2.1 – Общий вид используемого сейсмооборудования

Так же для проведения натуральных исследований требуется: средства и материалы для крепления датчиков, а именно:

- крепеж (шпилька, винтовые или болтовые соединения)
- средства механизации для установки крепежа (перфоратор, молоток и другое).

**Краткое описание принципов проведения натуральных исследований.** В основе проводимых натуральных исследований лежит регистрация и анализ колебательных движений горного массива на контуре исследуемой горной

выработки, возникающих при производстве взрывных работ (при проходке горных выработок и массовых взрывов при добыче полезного ископаемого). Причем за счет надежного описания параметров производимых взрывных работ, известного расстояния от взрыва до исследуемой горной выработки, а также определенных инженерно-геологических свойств вмещающего массива, данные измерения позволяют не только регистрировать те или иные колебания, но и на основе этих исследований получать новые зависимости влияния сейсмического воздействия от взрывных работ, а также адаптировать и подтверждать зависимости получаемые в ходе широкого спектра теоретических проработок и численного моделирования. Визуальная оценка состояния приконтурного массива до и после сейсмического воздействия взрывов позволяет подтвердить наглядно негативное влияние изучаемых процессов на устойчивость горной выработки.

### **2.3. Порядок и организация работ визуально-инструментального исследования воздействия взрывных работ на устойчивость горных выработок**

**Перечень работ.** Методика представляет собой увязанный во времени определенный набор работ и исследований, а именно:

1. Выбор участка проведения исследований;
2. Подготовка участка к проведению исследований;
3. Установка сейсмодатчиков;
4. Подготовка к взрывным работам, зарядание, взрывание и проветривание;
5. Непосредственное проведение замеров;
6. Оценка состояния устойчивости горной выработки.

Для оценки многократного воздействия сейсмической волны от взрывных работ по мере продвижения забоя (очистного или проходческого) пункты 4-6 циклично повторяются, для набора статистики (не менее 5 раз).

Необходимо отметить, что представленный выше список равноценно относится к исследованиям влияния и проходческих (взрывные работы при проходке горных выработок) и массовых (взрывные работы при ведении очистных работ) взрывов.

**Выбор участка проведения исследований.** Выбор участка проведения замеров является основополагающим критерием надежного производства инструментальных наблюдений. Выбор производится на основе изучения планов горных работ на горизонте, на котором ведется проходка выработки или очистная добыча полезного ископаемого с применением буровзрывной технологии. На этих планах выбирается исследуемый участок (место проведения замеров), соответствующий следующим требованиям:

1. На пути распространения сейсмической волны от источника (выработка находящаяся в проходке) до места проведения замеров не должны встречаться полости (другие выработки, камеры, технологические скважины и пр.) от которых могут отражаться волны, теряя свою интенсивность.

2. Минимальное расстояние от источника до места установки датчиков должно обеспечивать безопасность проведения замеров как для специалистов снимающих показания после производства взрывных работ так и для используемого оборудования. Оптимальным расстоянием принято считать расстояние, достаточное для того, чтобы возмущение среды, образованное после инициирования взрывчатого вещества успело сформировать сейсмическую волну.

В соответствии с работой В.Н. Мосинца зоной перехода волны сжатия в сейсмическую принято считать расстояние превышающее 150 радиусов заряда, поэтому минимальное расстояние установки датчиков  $P_{\min}$  следует рассчитывать по формуле 2.1:

$$P_{\min}=150 \cdot r_3 \quad (2.1)$$

где,  $r_3$  - радиус заряда взрывчатого вещества.

Так как на Малеевском руднике при проходке выработок применяется диаметр шпуров – 43 мм, то  $P_{\min}=150 \cdot 43/2=3,25$  м, а при массовых взрывах диаметр скважин 110 мм, то  $P_{\min}=150 \cdot 110/2=8,25$  м

3. Место установки оборудования должно быть максимально удаленным от мощных источников электромагнитных полей, таких как электрические трансформаторы, точки доступа wifi, крупные металлические объекты и др.

4. Место установки должно позволять выполнить установку датчиков на опорную площадку, предварительно подготовленную на поверхности измерительного объекта.

По результатам проведения данного этапа необходимо получить следующие исходные данные:

Геологические особенности района проведения измерения, наличие и направление главных трещин, известные физико-механические характеристики пород.

Геометрические характеристики выработки, в которой производятся измерения, тип и параметры крепления.

**Подготовка участка к проведению исследований.** Перед проведением непосредственных испытаний участок горной выработки необходимо подготовить:

1. По маршруту следования и непосредственно на месте установки оборудования, необходимо оценить состояние рудничной атмосферы, крепи и горного массива, это – заколы, оголенные анкера, порывы сетки, выгнутые опорные плиты, ржавые анкера, треснутый торкретбетон/бетон и при обнаружении отклонений в состоянии массива и крепи действовать согласно протоколу, применяемому на горном предприятии.

2. Оснастить место проведения работ осветительными приборами и коммуникациями для работы бурового оборудования.

3. Повторно ознакомиться с паспортом БВР и удостовериться, что фактическое количество ВВ по паспорту БВР соответствует расчетному, принятому для дальнейших исследований.

4. Определить места расположения датчиков. Датчики располагают на стенке выработки ближайшей к проводимому взрыву, в местах без заметных ослаблений и нарушений на контуре горной выработки и ее крепи.

**Установка сейсмодатчиков.** При выполнении работ по монтажу датчиков следует выполнять требования ГОСТ ИСО 5348-2002 «Вибрация и удар».

Поверхность, на которую устанавливают датчик, должна быть проверена на гладкость и наличие загрязнений и, если необходимо, подвергнута дополнительной шлифовке. Расхождение между осью чувствительности акселерометра и направлением измерений должно быть сведено к минимуму, в противном случае это вызовет появление погрешности измерений, аналогичной той, что обусловлена поперечной чувствительностью акселерометра. Особенно большими эти погрешности будут в случае, когда колебания в поперечном направлении значительно превышают колебания в направлении оси чувствительности.

Данные о состоянии поверхности и методе установки на нее датчика необходимо указывать в протоколе измерений.

Применение рекомендуемых изготовителем способов крепления датчиков позволяет использовать ту информацию, которую представляет изготовитель.

Обзор критериев, определяющих выбор способа крепления приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Критерии, определяющие выбор метода крепления

Крепление	Резонансная частота	Температура	Масса датчика и жесткость	Добротность на резонансе Q	Необходимость подготовки крепления поверхности
Шпилька	+	+	+	+	+
Метил цианоакриловый клей	+	+	+	+	-
Пчелиный воск	-	-	-	+	+
Двусторонняя липкая лента	-		-	-	+
Устройство быстрого крепления		+			-
Вакуумное крепление		+	+		
Магнит		+			+

Зависит только от расстояния между рукой и точкой, где измеряют вибрацию.  
 Обозначения: Удовлетворение критерию: «+» — высокое; «|» — среднее; «-» — низкое.

Поверхность должна быть чистой, плоской и ровной, удовлетворяющей допускам, установленным изготовителем. Ось резьбового отверстия для шпильки должна быть перпендикулярна к поверхности крепления.

Следует руководствоваться рекомендациями изготовителя в отношении момента затяжки, чтобы получить жесткое крепление без повреждения акселерометра.

Тонкий слой масла или смазки между поверхностями поможет обеспечить хороший контакт и, как следствие, увеличить жесткость крепления.

Шпилька не должна касаться дна резьбового отверстия, поскольку это может привести к уменьшению жесткости крепления вследствие зазора между поверхностями вибрирующей конструкции и датчика.

Частотная характеристика зависит от: перпендикулярности установки датчика; плоскостности и качества обработки поверхности; момента затяжки.

Датчик следует устанавливать на ближайшем борту выработки по направлению распространения сейсмической волны на высоте 1,2-1,5 метра от головки рельса или почвы выработки (если рельс нет). Схема места установки датчика и проведения замеров представлена на рисунке 2.2.

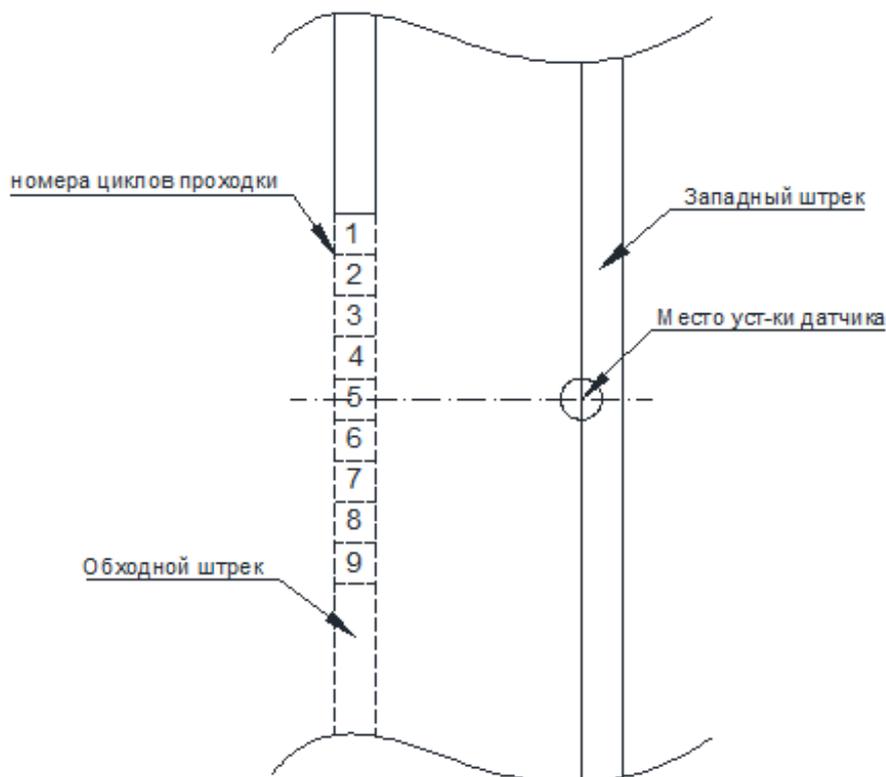


Рисунок 2.2 – Пример расположения датчика относительно места ведения взрывных работ

Датчик должен быть правильно ориентирован, а именно плоскость монтажной пластины датчика должна быть параллельна плоскости борта выработки и максимально плотно к нему прилегать, горизонтальная ось датчика

должна быть выставлена при помощи жидкостного или лазерного уровня. Изображение уже установленного датчика представлено на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Пример правильно установленного сейсмодатчика

Работу следует начинать с проверки работоспособности используемого оборудования, проведения профилактики и заряда аккумуляторных батарей. Далее необходимо определить требуемое количество времени на производство подготовительных работ для установки датчиков. Такие работы будут включать выбор оптимального места установки датчиков, подготовку поверхности выработки в месте установки датчиков, позиционирование и монтаж датчиков. Следует выбрать место установки датчиков таким образом, чтобы к моменту окончания подготовительных работ и монтажа датчиков плоскость забоя находился не ближе, чем 5 циклов проходки, что обеспечит безопасность производства работ и гарантирует возможность производства необходимого количества замеров. Замеры следует производить, пропуская один цикл проходки, согласно разработанной методике в 1, 3, 5, 7, 9 циклы проходки необходимо произвести соответствующие измерения.

По результатам проведения данного этапа необходимо получить следующие исходные данные: точное местоположение установки датчика и плоскости проходческого забоя на каждом этапе производства работ.

**Подготовка к взрывным работам, зарядание, взрывание и проветривание.** Все подготовительные работы к взрывным работам, в том числе и бурение скважин производится специализированной буровой установкой, согласно паспортам и регламентам на ведения буровзрывных работ. После бурения скважин производится их зарядание и взрывание. Все работы ведутся в строгом соответствии с нормативными и регламентирующими документами.

По результатам проведения данного этапа необходимо получить следующие исходные данные:

1. Основные параметры паспорта БВР (масса ВВ, ступени замедления, количество, глубина шпуров и их расположение и т.д.) необходимо представить в виде таблицы с паспортными значениями в сравнении с фактически выполненными. *Например, планировалось 8 ступеней замедления по паспорту, но фактически было применено 6. В таком случае критически важно указать в таблице распределение массы ВВ по ступеням замедления.*

2. Наиболее подробные известные характеристики ВВ: тип, работоспособность, скорость детонации, кислородный баланс, бризантность и т.д.

**Непосредственное проведение замеров.** Работы по записи результатов измерений ведутся в автоматическом режиме.

Допуск на участок взрыва разрешается только после восстановления на нём нормальной рудничной атмосферы, приведения выработок в безопасное состояние после чего оборудование необходимо собрать, очистить и выдать на поверхность для дальнейшего анализа.

Результаты произведенных замеров должны быть представлены в виде таблицы в формате файла .xls для каждой из осей по отношению к временным интервалам с наибольшей разрешающей способностью прибора (пример приведен на рисунке 2.4).

	A	B	C	D
1	Time	sensor_1	sensor_2	sensor_3_z
2	14.02.2018 19:04:01:401	0,015641	0,012952	0,008803
3	14.02.2018 19:04:01:401	0,014826	0,012647	0,007894
4	14.02.2018 19:04:01:401	0,014891	0,012778	0,008359
5	14.02.2018 19:04:01:401	0,015915	0,012778	0,008742
6	14.02.2018 19:04:01:401	0,015028	0,012744	0,008136
7	14.02.2018 19:04:01:401	0,01507	0,012876	0,008636
8	14.02.2018 19:04:01:401	0,016179	0,012793	0,008505
9	14.02.2018 19:04:01:401	0,014985	0,012708	0,008261
10	14.02.2018 19:04:01:401	0,015392	0,012693	0,008686

Рисунок 2.4 – Пример измеренных значений

На основании полученных данных необходимо сформировать акселерограммы по каждой из измеренных осей (пример приведен на рисунке 2.5) или велосигранмы.

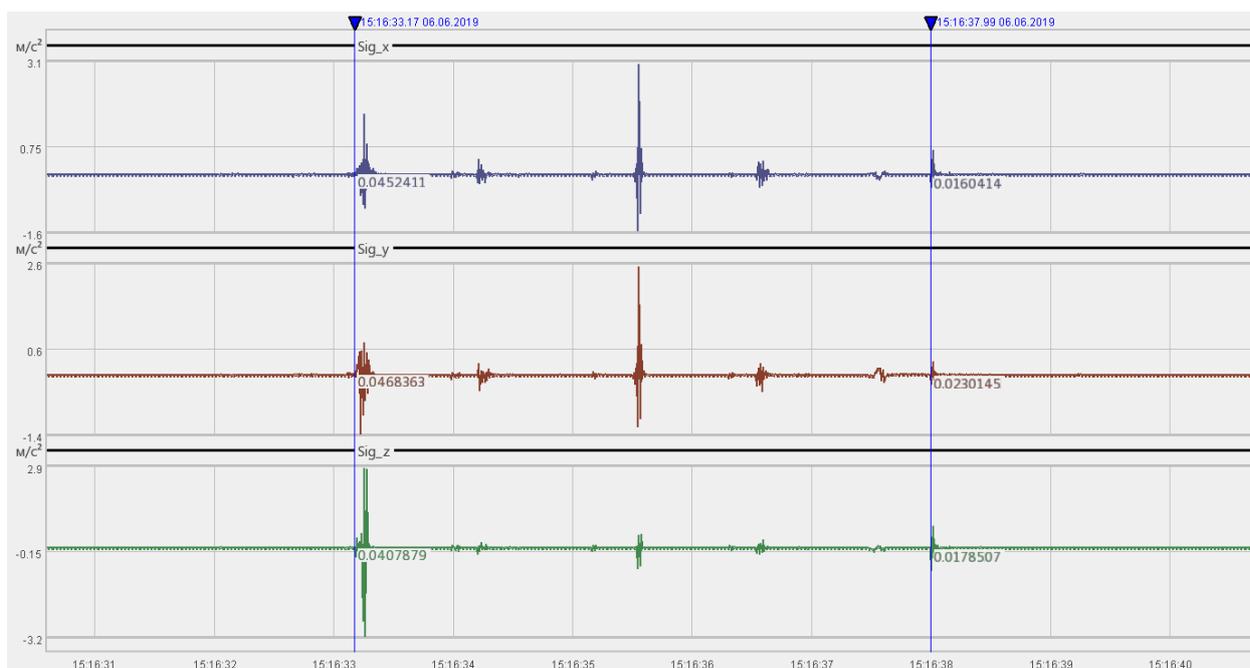


Рисунок 2.5 – Пример акселерограммы с разделением по 3-м осям (x,y,z)

**Оценка состояния устойчивости горной выработки.** Для подтверждения выводов, сделанных в главе 1, о негативном влиянии повторяющихся сейсмических воздействий от взрывов на состояние устойчивости горных выработок, перед каждым циклом замеров необходимо произвести картирование исследуемой выработки на наличие нарушений крепления (трещины, сколы, отслоения и т.д.) и их размеров в районе производства работ (+- 15 метров от места установки датчика) с обязательной фотофиксацией.

## 2.4. Натурные исследования воздействия взрывных работ на приконтурный массив горной выработки

### 2.4.1. Общие сведения об экспериментальных участках

**Участок №1 «Оценка воздействия от проходческих взрывных работ».** Согласно методике, приведенной в разделе 2.2, проведены исследования воздействия взрывных работ от проходки обходного штрека на устойчивость крепи западного штрека горизонта 14. Для этого в соответствии с требованиями, приведенными в разделе 2.2, для натурных исследований был выбран один из горизонтов Малеевского рудника, на котором проводится проходческие работы с использованием буровзрывной технологии – горизонт 14 (выполнение требования 1 раздела 2.2). Принципиальный план горизонта с нанесенными на него участками производства работ приведен на рисунке 2.6.

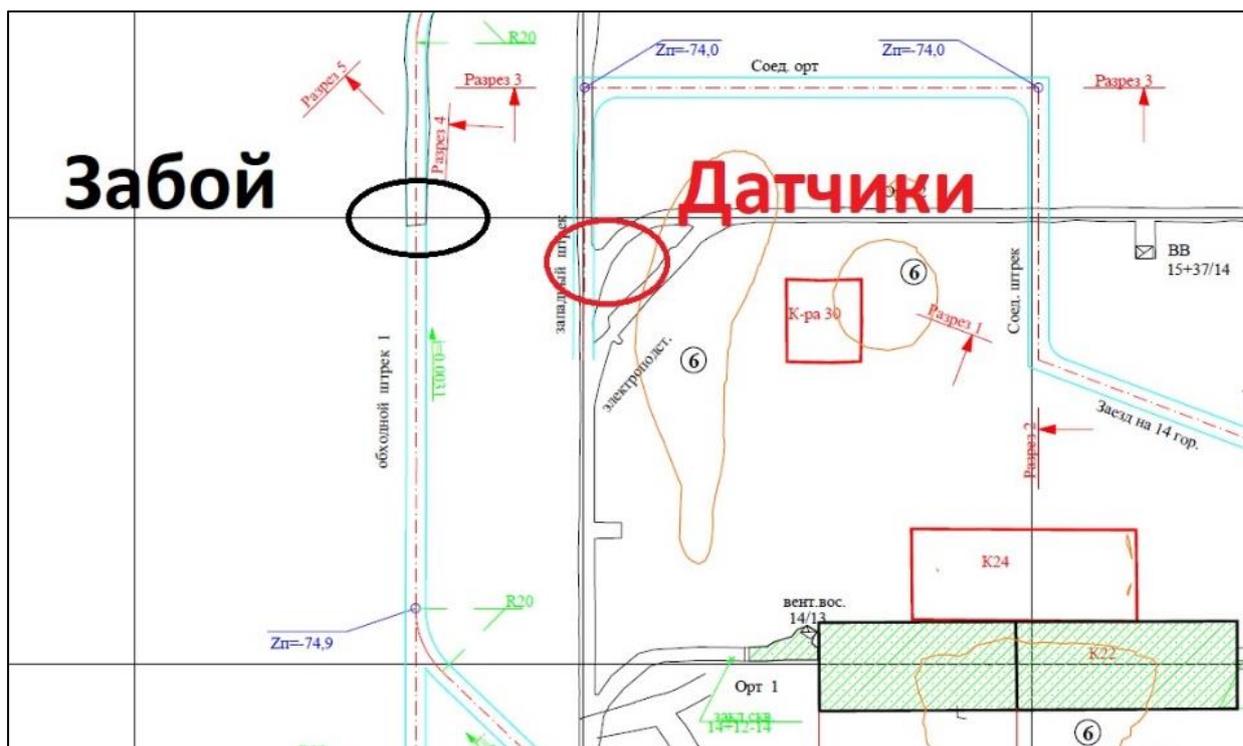


Рисунок 2.6 – План горизонта 14, на котором проводились натурные исследования. Забой – место ведения БВР (источник сейсмического события), Датчики – место установки датчиков

Фактическое расстояние между существующей выработкой и вновь проходимой составляет 33 м (между ближайшими стенками выработок), что значительно больше минимального расчетного расстояния установки датчиков, и отвечает требованию 2 раздела 2.2. Также на выбранных участках отсутствуют

инородные источники электромагнитных полей и есть возможность установить опорную площадку, что соответствует требованиям 3 и 4 раздела 2.2.

Все подготовительные работы и установка сейсмодатчиков, также приведены в полном соответствии с требованиями разделов проведена в полном соответствии с разделами 2.2 - 2.3.

Участок исследований имеет следующую горно-геологическую характеристику: Выработка проходится по кварцевым порфирам и диабазовым порфиридам. В рассматриваемом интервале преобладают кварцевые порфиры порфировой структуры, пятнистой текстуры. Видимой минерализации нет. Категория пород по буримости по шкале СНиП – 11, взрываемость по шкале подземных горных работ - 5. Породы весьма крепкие, весьма трудно буримые, весьма трудно взрывающиеся, средней степени абразивности. На всем протяжении горной выработки отмечаются взаимопересекающиеся системы трещин с элементами залегания: Аз.  $300^\circ < 85^\circ$ ; Аз.  $160^\circ < 80^\circ$ ; Аз.  $320^\circ < 70^\circ$ . Породы слаботрещиноватые, среднеустойчивые, отмечается мелко-среднеобломочное заколообразование.

**Участок №2 «Оценка воздействия от массовых взрывов».** Согласно методике, приведенной в разделе 2.2, проведены исследования воздействия массовых взрывов на устойчивость и крепь западного штрека горизонта 14. Для этого в соответствии с требованиями, приведенными в разделе 2.2 для натуральных исследований, был выбран один из горизонтов Малеевского рудника, на котором проводятся массовые взрывы – горизонт 14 (выполнение требования 1 раздела 2.2). Принципиальный план горизонта с нанесенными на него участками производства работ приведен на рисунке 2.7. Расстояние между местом взрывания и местом установки сеймостанции составляет 85 м, что значительно больше минимального расчетного расстояния установки датчиков, и отвечает требованию 2 раздела 2.2. Также на выбранных участках отсутствуют инородные источники электромагнитных полей и есть возможность установить опорную площадку, что соответствует требованиям 3 и 4 раздела 2.2.



Рисунок 2.7 – Фрагмент плана горизонта 14, на котором проводились натурные исследования. зеленой штриховкой указано место проведения массовых взрывов

Все подготовительные работы и установка сейсмодатчиков, также проведены в полном соответствии с требованиями разделов 2.2 - 2.3.

Участок исследований имеет следующую горно-геологическую характеристику: Выработка проходится по диабазовым порфирирам. В рассматриваемом интервале преобладают диабазовые порфириды мелкозернистой структуры, массивной текстуры. Отмечается наличие кварц-карбонатных прожилков. Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоdjяконова  $f = 17$ . Категория пород по буримости по шкале СНиП - 10, взрываемость по шкале подземных горных работ - 4. Породы крепкие, трудно буримые, трудно взрывааемые, ниже средней абразивности. В интервале 120.0-124.0 м возможно подсечение разлома с элементами залегания  $Az. 40^\circ < 50^\circ$ . В зоне разлома возможен капеж и просачивание воды. В интервале 146.0-160.0 м возможно подсечение системы параллельных трещин с эл. залегания  $Az. 170^\circ < 60^\circ$ , по которой возможно мелко-среднеобломочное заколообразование. Породы трещиноватые, среднеустойчивые.

## 2.4.2. Результаты инструментальных наблюдений за изменением НДС породного массива

В ходе выполнения исследовательских работ на участках №1 и №2 был получен широкий ряд экспериментальных данных в первую очередь в виде акселерограмм и велосиграм. Пример, одной из полученных акселерограмм представлен на рисунке 2.8.

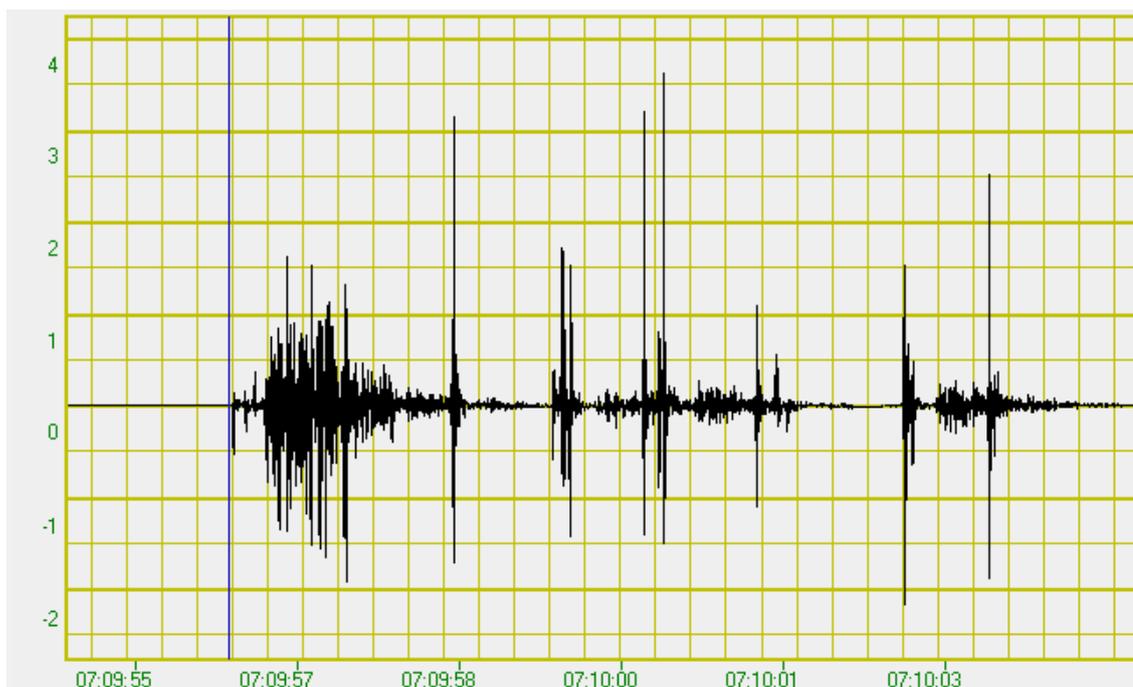


Рисунок 2.8 – Пример зависимости ускорения перемещения частиц породы.

Наибольший научно-практический интерес в рамках поставленных в диссертационной работе задач представляют велосиграммы по трем компонентам (по осям X, Y, Z), показывающие скорости перемещения массива на контуре выработки во времени. Примеры таких велосиграммы приведены на рисунках 2.9 и 2.10. Относительно небольшие значения скоростей смещений (не более 10 мм\с) связаны со значительной удаленностью источника сейсмического воздействия от места расположения датчиков (33 м и 85 м для участков измерения №1 и №2 соответственно). В целом, анализ полученных зависимостей подтверждает известные закономерности распространения волн в твердых скальных массивах, а также по степени проявления соответствует теоретическим ожиданиям. Прослеживается четкая зависимость интенсивности проявления сейсмического события на контуре выработки от энергии взрыва и расстояния до него. В ходе

исследований проведённые эксперименты позволят сопоставлять натурные и численные данные, тем самым повысив достоверность и объективность получаемых результаты, а значит и повысить надежность разрабатываемых практических рекомендаций по геомеханическому обоснованию методики расчета крепей горных выработок.

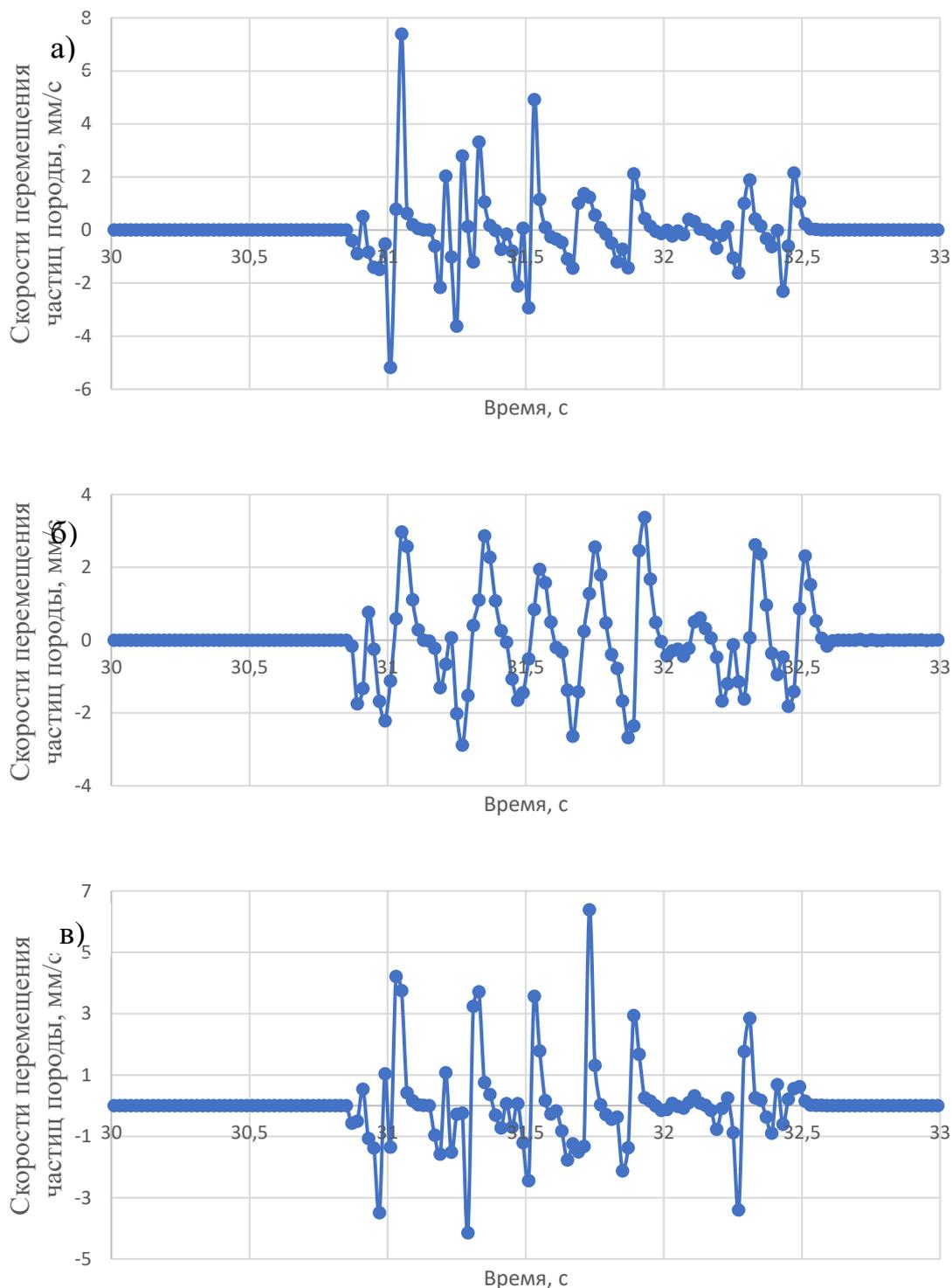


Рисунок 2.9 – Скорости перемещения частиц породы (сейсмостанция, участок №1): а – в направлении оси X; б – в направлении оси Y; в – в направлении оси Z.

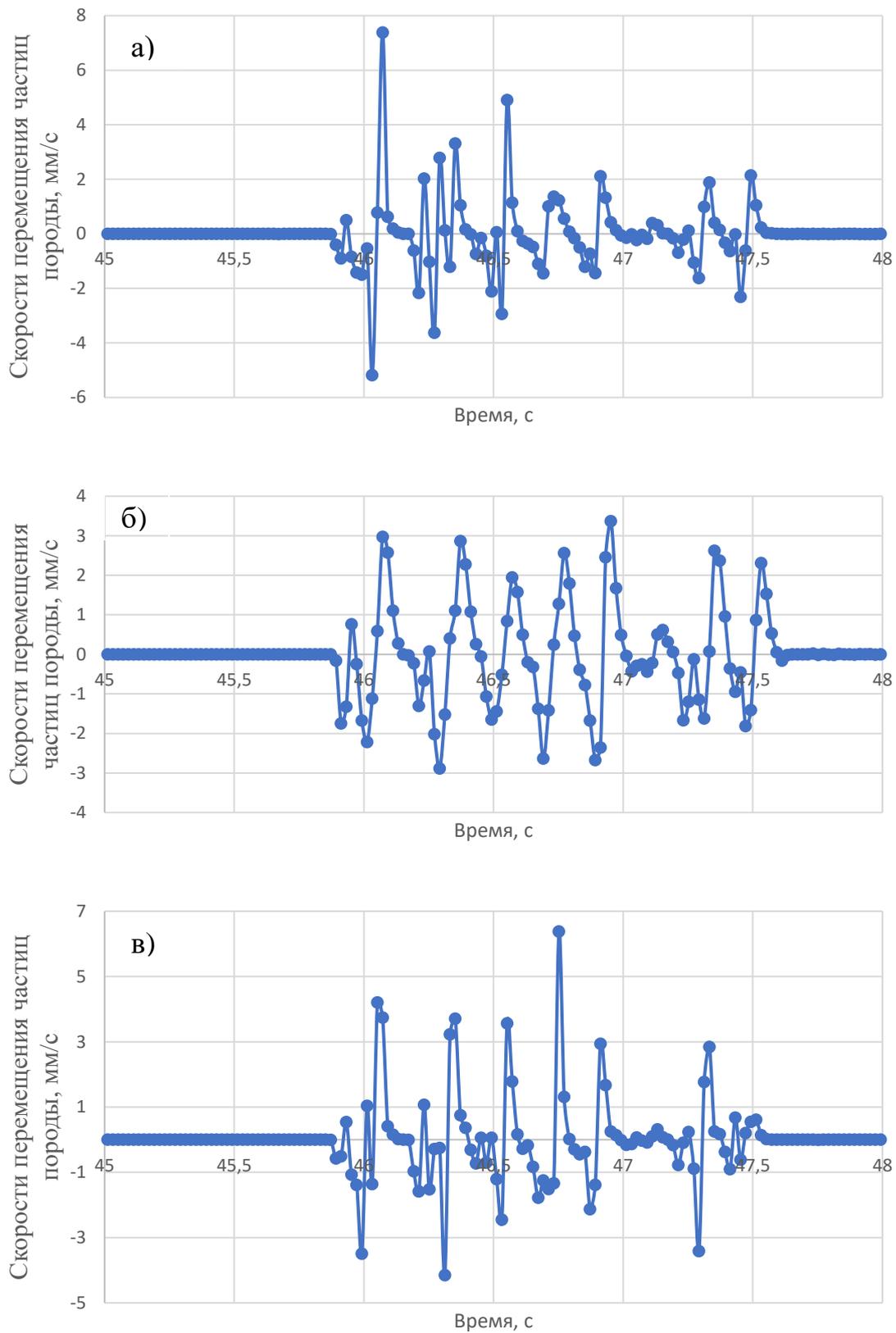


Рисунок 2.10 – Скорости перемещения частиц породы (сеймостанция, участок №2): а – в направлении оси X; б – в направлении оси Y; в – в направлении оси Z.

### 2.4.3. Результаты визуальной оценки сейсмического воздействия от взрывов на устойчивость горных выработок

Помимо инструментальных исследований, в ходе которых были получены зависимости ускорений и скоростей частит приконтурного массива горных выработок при воздействии сейсмических волн от взрывов, также проводилась визуальная оценка состояния устойчивости горных выработок в районе проведения исследований согласно разделу 2.2.

В целом несмотря на значительные удаления источников взрывов от рассматриваемых горных выработок результаты визуальной оценки подтвердили негативное влияние многократно повторяющегося сейсмического воздействия на устойчивость контура горной выработки. Так, например, на рисунке 2.11 представлена фотография Орта №3 14 горизонта до ведения взрывных работ в непосредственной близости к контуру выработки, как видно из фотографии выработка находится в устойчивом состоянии, нарушений на контуре нет.



Рисунок 2.11 – Общий вид орта №3 до проведения взрывных работ

В таблице 2.2 приведены некоторые выявленные нарушения на контуре выработки после проведения нескольких циклов испытаний [62]. Так можно заметить, что большинство из вновь появившихся нарушения приурочены к местам ослабления контура горной выработки или выветрелым контактом либо системой трещин.

Таблица 2.2 - Представление о нарушениях контура горных выработок, связанных с сейсмическим воздействием взрывов на примере участка №2

Описание нарушения	Фотография нарушения
Отслоение северного борта по выветрелому контакту	 A photograph of a mine shaft wall showing a distinct horizontal layer of rock that has delaminated from the main rock mass. The delamination is most prominent in the center and right side of the image. The rock is dark and appears to be a different type of material, possibly a contact zone. There are some cables or pipes visible in the foreground.
Отслоение в кровле по системе трещин	 A photograph of the roof of a mine shaft. The rock surface is dark and shows a network of cracks. A bright light source is visible, creating a strong glare on the rock surface. A white cable or pipe runs diagonally across the lower part of the image.
Отслоение северного борта по выветрелому контакту	 A photograph of a mine shaft wall showing a delamination of the rock. The delamination is a horizontal layer of rock that has separated from the main rock mass. The rock is dark and appears to be a different type of material, possibly a contact zone. There are some cables or pipes visible in the foreground.

Другого типа нарушений, например хрупкого разрушения или откалывания горных пород, связанных с повышенными напряжениями, сжимающими и растягивающими соответственно, не выявлено. Это в первую очередь связано с тем, что источник сейсмического воздействия находится на значительном расстоянии, а энергия взрывов также не велика, так как массовый взрыв происходит в несколько ступеней замедления. Временных интервалов между ступенями достаточно для последовательного воздействия сейсмических волн на контур горной выработки при этом они не накладываются друг на друга. Схожая картина наблюдалась и на участке №1, где также нарушения проявлялись только в местах ослаблений (выветривание и трещины).

## **2.5. Выводы по главе 2**

Проведенные натурные исследования подтвердили актуальность поставленных в диссертационной работе научных и практических задач, так как подтвердилось негативное влияние многократного сейсмического воздействия на устойчивость контура горной выработки, а значит требуется разработать способы по снижению уровня такого воздействия, в том числе разработать методику по определению параметров набрызгбетонной крепи, используемой в таких условиях. Также получены зависимости скоростей и ускорений перемещения частиц пород на контуре выработок при сейсмическом воздействии от взрывных работ, что при известной энергии взрыва, расстояния до источника взрыва и свойств горных пород позволит адаптировать используемые граничные условия для решения численных задач в главе 3, тем самым обеспечив необходимый уровень достоверности получаемых результатов.

## ГЛАВА 3 ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ ПРИ МНОГОКРАТНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

### 3.1. Общие положения

Основной принцип взаимодействия набрызгбетонной крепи с породным массивом заключается в том, что набрызгбетонная крепь поддерживает отдельные породные блоки, препятствуя их выпадению или сползанию в выработанное пространство. То есть, требуемая несущая способность набрызгбетонной крепи определяется потенциальной зоной обрушения пород. Набрызгбетонная крепь сохраняет свою работоспособность до тех пор, пока ее несущая способность достаточна для поддержания отдельных блоков или потенциальной зоны вывала пород в устойчивом состоянии. Повреждение набрызгбетонной крепи, которое может привести к потере устойчивости горной выработки, происходит в результате развития запредельных смещений породного контура. В основном, при обосновании возможности набрызгбетонной крепи сохранять свою работоспособность оперируют смещениями породного контура в результате квазистатического изменения напряженно-деформированного состояния породного массива [95,97], в то время как на динамическое воздействие обращается меньше внимания. Динамическое воздействие возникает в результате взрывных работ различной интенсивности, а также горных ударов или землетрясений. Динамическое воздействие формируется в результате распространения сейсмических волн, которое при определенном уровне интенсивности может значительно повредить обделку, в связи с чем ее остаточная прочность может снизиться до величин меньше предельно допустимых значений.

В основном, в работах исследователей, динамическое воздействие рассматривается в виде распространения сейсмических волн от единичного взрывного воздействия. Такой подход является правомерным в случае, если сейсмическое воздействие не превышает предела прочности материала и не приводит к развитию микротрещин в набрызгбетоне. Однако, при проведении массовых взрывов интенсивность сейсмического воздействия значительна и

может в рамках единичного нагружения приводить к повреждениям крепи, которое накапливается по мере многократного воздействия. В рассматриваемой главе предложена методика прогноза напряженно-деформированного состояния набрызгбетонной крепи, неармированной и дисперсно-армированной, при многократном сейсмическом нагружении на основании численного моделирования.

### 3.2. Сейсмические волны и динамика породного массива

#### 3.2.1. Вибрация породного массива при распространении сейсмических волн

Амплитуда перемещения частиц пород при взрывных работах снижается с увеличением расстояния от источника взрыва [22,23]. Внимание необходимо уделить двум факторам, которые влияют на снижение величины амплитуды: геометрическое расширение сейсмической волны по мере удаления от источника взрыва [26]; демпфирование сейсмической энергии по мере прохождения сейсмической волны через породный массив [85,99].

Снижения амплитуды сейсмической волны в результате ее геометрического расширения можно записать в общем виде как уравнение 3.1:

$$A_2 = A_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^m. \quad (3.1)$$

где  $A_1$  – величина амплитуды сейсмической волны на расстоянии  $r_1$  от источника взрыва;  $A_2$  – величина амплитуды сейсмической волны на расстоянии  $r_2$  от источника взрыва;  $m$  – коэффициент, учитывающий снижение амплитуды сейсмической волны при ее расширении [99]. Значение коэффициента  $m$  в зависимости характера сейсмического воздействия представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Значение коэффициента  $m$  в зависимости характера сейсмического воздействия

Расположение источника сейсмического воздействия	Тип источника сейсмического воздействия	Тип сейсмической волны	Показатель $m$	Физическое описание
Поверхностный	Точечный	Объемная	2.0	Одиночный фундамент
		Поверхностная	0.5	Одиночный фундамент

Продолжение таблицы 3.1

Подземный	Точечный	Объемная	1.0	Подземный взрыв, сферическая нагрузка
	Линейный	Объемная	0.5	Подземный взрыв, цилиндрическая нагрузка

Дополнительное рассеивание сейсмической энергии в результате прохождения сейсмических волн связано с гистерезисным характером деформирования породного массива и тем оно больше, чем выше его структурная нарушенность [99,85]. В общем виде снижение демпфирования в результате ее рассеивания можно записать как уравнение 3.2:

$$A_2 = A_1 e^{-\alpha(r_2-r_1)}. \quad (3.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент демпфирования материала.

Эмпирическое уравнение 3.3 учитывает снижение амплитуды сейсмической волны от двух рассмотренных факторов и записывается в следующем виде:

$$P = P_m \left( \frac{R}{R_0} \right)^\beta, \quad (3.3)$$

где  $P$  – давление сейсмической волны на расстоянии  $R$ ;  $R_0$  – радиус скважины;  $P_m$  – давление на стенки зарядной скважины;  $\beta$  – коэффициент затухания сейсмической волны.

Величина коэффициента затухания сейсмической волны  $\beta$  изменяется в широком диапазоне и устанавливается на основании инструментальных замеров. Типовые значения коэффициента  $\beta$  для различных горно-геологических и горнотехнических условий приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Значение коэффициента  $\beta$  для различных горно-геологических и горнотехнических условий [106]

Горная порода	Тип взрывчатого вещества	Коэффициент $\beta$	Скорость прохождения сейсмической волны, м/с
Известняк	ВВ эмульсионного типа	-1.65	3500

Продолжение таблицы 3.2

	ANFO (алюминий, нитрат, машинное масло)	-1.54	
Гранит	ВВ эмульсионного типа	-1.48	4820
	ANFO	-1.39	
Гранитодиорит	ВВ эмульсионного типа	-1.24	5600
	ANFO	-1.32	
Пирит	ВВ эмульсионного типа	-1.38	6000
	ANFO	-1.29	

### 3.2.2. Аналитический метод расчета скорости перемещения частиц породы

Скорость перемещения частиц породы  $v$  в породном массиве уменьшается по мере увеличения расстояния до рассматриваемой точки  $R$ . Это связано как с расширением самой волны, то есть энергия распределяется на большую по величине поверхность и с эффектом демпфирования самой среды, где распространяются сейсмические волны [108,116]. Для того чтобы предсказать скорость перемещения частиц породы, обычно используются масштабные функции, которые учитывают расстояние до рассматриваемой точки от источника взрыва  $R$  и массу взрывчатого вещества  $Q$ . Функция вида  $R/\sqrt{Q}$  используется при расположении взрывчатого вещества в протяженных цилиндрах (скважины, шпурь) и вида  $R/\sqrt[3]{Q}$  при рассмотрении концентрированного источника взрыва.

В общем виде скорость перемещения частиц породы  $v$  можно представить как уравнение 3.4:

$$v = a_1 \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta} \quad (3.4)$$

где  $a_1$ ,  $\beta$  – константы уравнения, которые зависят от конкретных горно-геологических и технологических условий.

Величины констант уравнения  $a_1$ ,  $\beta$  для усреднённых условий соответственно равны 700 и 1.5. Масса взрывчатого вещества  $Q$  задается в (кг), расстояние  $R$  в (м). Величина скорости  $v$  получается в (мм/с)

Для условий Малеевского рудника, на основании уравнения 3.4, была получена уточненная формула 3.5 для расчета скорости смещения частиц породы породного массива (см/с).

$$v = 2.1k_c \left[ \frac{R \left( 1 + e^{-\frac{x}{l}} \right)}{\sqrt[3]{q_{\text{пр}}}} \right]^{-2.1} \sin(0.023T + 0.5), \quad (3.5)$$

где  $k_c$  – коэффициент сейсмичности. Коэффициент сейсмичности принимается в зависимости от местонахождения взрывающей секции в пределах обрабатываемого горизонта и расположения охраняемых выработок относительно плоскости отбойки. Для рассматриваемых условий под висячим боком,  $k_c = 192$  – для выработок, расположенных на флангах секций со стороны не обрушенных пород,  $k_c = 128$  – для выработок, расположенных по центру секции, со стороны обрушенного массива и в лежащем боку месторождения;  $R$  – расстояние от начала взрывающего веера до точки наблюдения, м;  $x$  – расстояние по горизонтали от взрывающего веера до точки наблюдения, м ( $x > 0$ );  $l$  – суммарная высота соосно расположенных вееров, взрываемых на одну ступень, м;  $e$  – основание натурального логарифма;  $T$  – расстояние от первоначальной границы обрушения до рассматриваемого веера, м;  $q_{\text{пр}}$  – приведенный вес заряда на ступень замедления в зависимости от ориентации выработки по отношению к фронту отбойки, кг.

### 3.2.3. Определение радиуса критического воздействия

Радиус критического воздействия  $R_{\text{кв}}$  (м) можно определить по формуле 3.6.

$$R_{\text{кв}} = \sqrt[3]{\frac{Q}{\left(\frac{V}{800}\right)^2}}, \quad (3.6)$$

где  $Q$  – эквивалентная масса одновременно взрывающего ВВ, кг;  $V$  – допустимая скорость колебания частиц породы, см/сек.

Рекомендуемые значения допустимой скорости колебания частиц породы сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 - Допустимые скорости колебания в зависимости от типа крепи

Тип крепления, состояние выработки	Допустимая скорость колебания, см/сек
Нарушенное бетонное покрытие	3.7
Бетонно покрытие без деформаций и трещин	50.0
Выработка без крепления	100.0
Выработка с монолитным бетонным или железобетонным креплением	150.0

Отсюда, радиус критического воздействия можно выразить в графическом виде на рисунке 3.1.

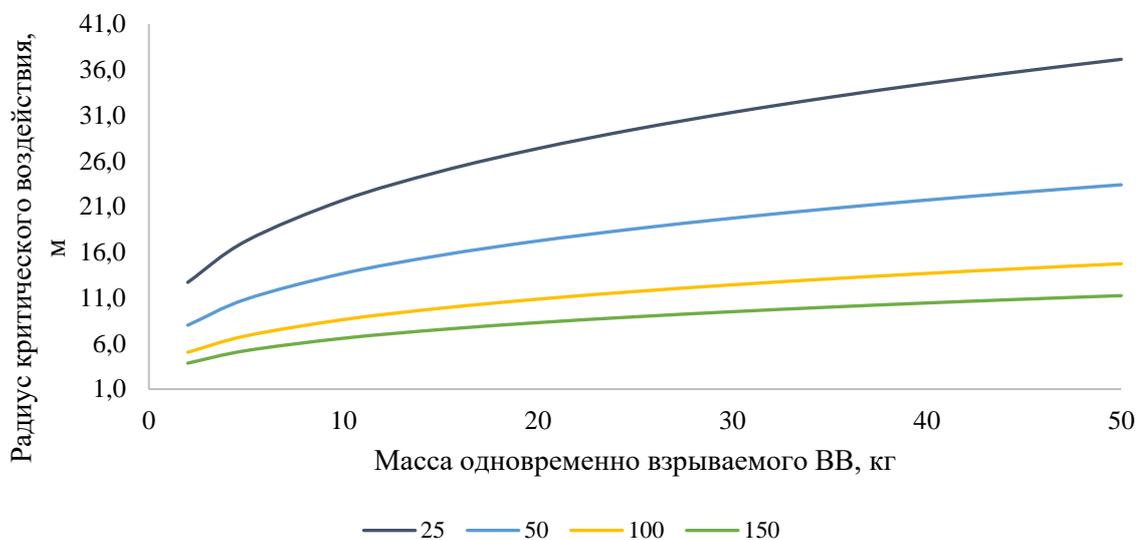


Рисунок 3.1 – Зависимость между радиусом критического воздействия и массой одновременно взрывающегося ВВ: 25, 50, 100, 150 – критическая скорость колебания, см/с.

Как видно из представленной зависимости наблюдается нелинейная связь между радиусом критического воздействия и массой одновременно взрывающегося ВВ.

### 3.2.4. Определение размера зоны разрушения пород в окрестности участка инициации ВВ

Минимальный размер зоны разрушенных пород взрывом, за пределами которых условно можно принять, что распространяются только упругие волны можно определить по формуле 3.7, приняв, что скорость перемещения частиц породы, при которой все еще происходит разращения пород равно 1 м/с:

$$R_{ppv} = 0.846\sqrt{Q}, \quad (3.7)$$

где  $Q$  – масса одновременно взрываемого взрывчатого вещества.

Величины  $R_{ppv}$  для характерной массы одновременно взрываемого ВВ сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - Определение размера зоны разрушения пород в зависимости от массы одновременно взрываемого ВВ

Масса одновременно взрываемого ВВ, кг	Размер зоны разрушения пород, м
1	0.9
2	1.2
5	1.9
10	2.6
25	4.2
50	5.9
100	8.5

Анализ представленных в таблице данных показывает, что величина размера зоны разрушения пород увеличивается по мере увеличения массы, одновременно взрываемого ВВ. Таким образом, граница зоны приложения скоростей перемещения частиц породы должна быть вынесена за пределы этих зон. Необходимо отметить, что данные расчеты приведены для одной скважины, размер общей зоны разрушения пород в окрестности системы скважин должен определяться за счет вклада каждого отдельного взрыва в общую картину. При этом необходимо учитывать только те скважины, стадии замедления взрывания ВВ, в которых совпадают.

### 3.2.5. Определение максимальной скорости перемещения частиц породы

Воспользовавшись формулой 3.4 и подставив коэффициент  $a_1 = 700$  и  $\beta$  изменяющийся в диапазоне от 1.25 до 1.75, получим уравнение 3.8 закономерности изменения скорости перемещения частиц породы по мере удаления от источника взрыва, которые в графическом виде можно представить на рисунке 3.2:

$$v_{max} = 700 \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta} \text{ [мм/с]}, \quad (3.8)$$

где  $R$  – расстояние от источника взрыва выраженное в (м);  $Q$  – масса одновременно взрываемого ВВ, выраженная в (кг).

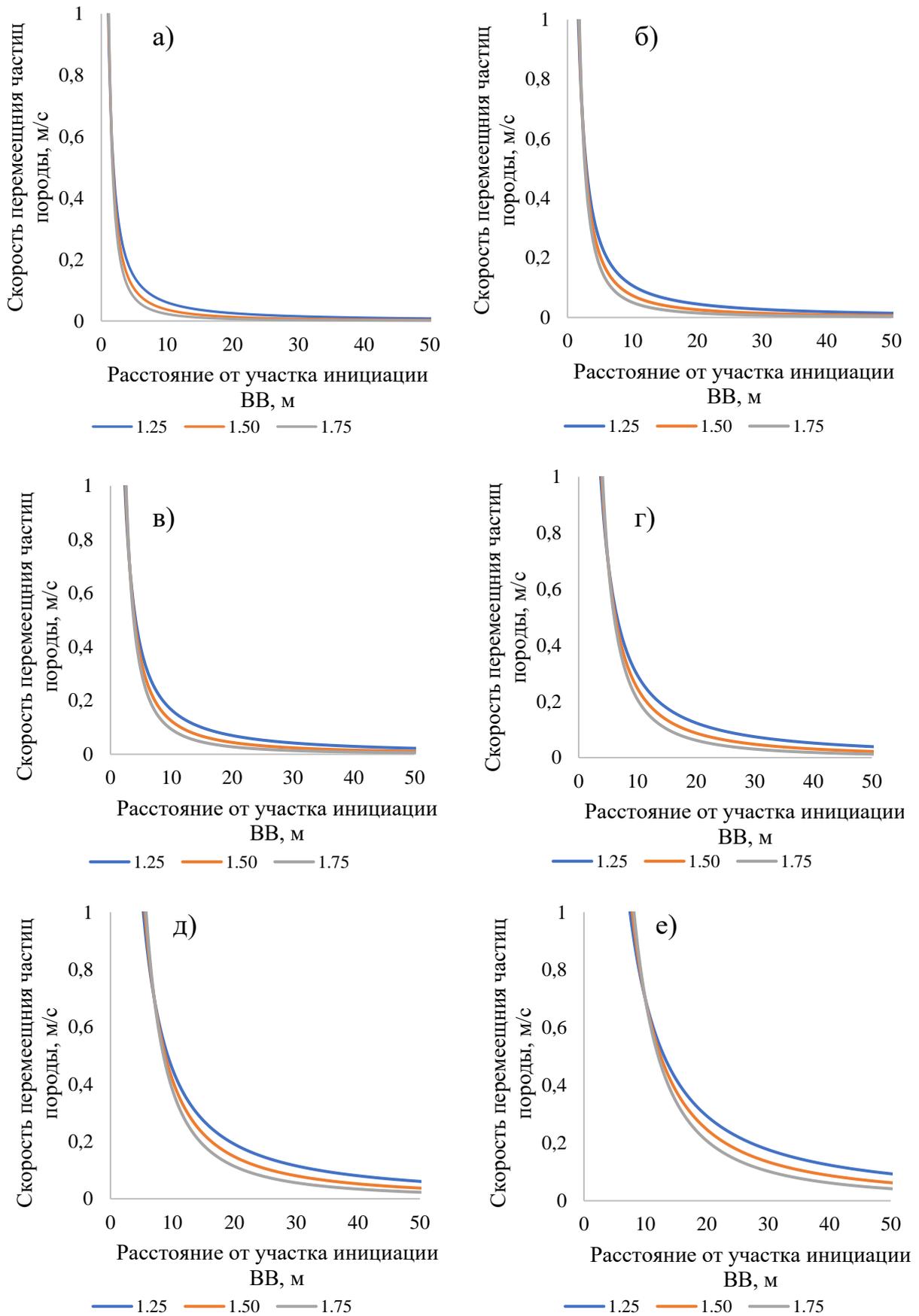


Рисунок 3.2 – Зависимости скоростей перемещения частиц породы в зависимости от расстояния от участка инициации ВВ и массы одновременно взрываваемого ВВ: а-е – соответственно при массе ВВ 2, 5, 10, 25, 50 и 100 кг; 1.25, 1.50, 1.75 – обобщенный коэффициент поглощения сейсмической энергии  $\beta$ .

### 3.3. Методика проведения численного моделирования прогноза НДС набрызгбетонной крепи при сейсмическом воздействии

#### 3.3.1. Общие положения методики проведения численного моделирования

Методика проведения сейсмического воздействия от взрывных работ на набрызгбетонную крепь горной выработки основана на решении задачи распространения сейсмических волн в сплошной среде на основании численного моделирования. Она включает в себя описание математического метода решения задач прогноза распространения сейсмических волн, выбор и обоснование моделей геоматериала и набрызгбетона, обоснование граничных и начальных условий, а также последовательности построения численных моделей.

Таким образом, комплекс положений, представленных в этом разделе представлен как основа для проведения достоверного анализа прогноза НДС системы “крепь – породный массив”.

#### 3.3.2. Численный метод анализа для решения задач в динамической постановке

В работе распространение сейсмических волн рассматривается в явной динамической постановке в соотношения 3.9:

$$M\ddot{u} = P - I, \quad (3.9)$$

где  $M$  – узловая матрица масс;  $\ddot{u}$  – вектор узловых ускорений;  $P$  – вектор внешних сил;  $I$  – вектор внутренних сил.

Ускорение в начале данного инкремента  $t$  вычисляется по формуле 3.10:

$$\ddot{u}_{(t)} = (M)^{-1}(P - I)_{(t)}. \quad (3.10)$$

Проинтегрировав ускорения по времени и воспользовавшись правилом центрального дифференцирования, получим изменение скорости при постоянном ускорении. Для того чтобы определить скорость в середине данного инкремента, изменение скорости добавим к величине скорости, полученной в середине предыдущего инкремента (уравнение 3.11):

$$\dot{u}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{u}_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{(\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)})}{2} \ddot{u}_{(t)}. \quad (3.11)$$

Проинтегрировав скорость по времени и добавив перемещения на начало инкремента, получим перемещения на конец инкремента, запишем в виде уравнения 3.12:

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \dot{u}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)}. \quad (3.12)$$

Далее выполняется вычисление приращений деформаций внутри элементов, приращений напряжений и осуществляется сборка узловых внутренних сил.

Для получения точного результата размер инкремента должен быть достаточно малым (таким, чтобы ускорение практически не изменялось в течение инкремента). Так как вычислительные затраты на нахождение неизвестных в каждом инкременте несущественны, то общее время расчета при решении высоконелинейных квазистатических задач является вполне приемлемым по сравнению с аналогичными временными затратами при использовании неявных методов численного анализа.

### 3.3.3. Граничные условия для задания сейсмической нагрузки от взрывных работ

Динамическое воздействие упругой системы, описывающей смещения частиц породного массива при прохождении сейсмических волн, может быть представлено в виде уравнений 3.13 и 3.14 изменения перемещений, скоростей или ускорений во временном диапазоне. Такая функция может быть представлена в следующем виде, с периодом колебаний  $1/f$ :

$$a(t) = -2\pi f v_{max} \sin(2\pi f t), \quad (3.13)$$

где  $v_{max}$  – максимальная скорость смещения частиц породы;  $t$  – время;  $f$  – частота колебаний частиц породы.

Величину скорости перемещения частиц породы найдем, проинтегрировав ускорения по времени:

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt = v_{max} \cos(2\pi ft) - v_{max}. \quad (3.14)$$

С учетом того, что длина сейсмической волны более чем в два раза превышает поперечные размеры рассматриваемого объекта величина  $v_{max}$  должна быть уменьшена в 2 раза, тогда получим окончательное уравнение 3.15 для задания сейсмического воздействия на некотором удалении от участка непосредственного взрывания ВВ:

$$v(t) = \frac{v_{max}}{2} \cos(2\pi ft) - \frac{v_{max}}{2}. \quad (3.15)$$

На основании численного моделирования величина сейсмической нагрузки определялась в явном виде за счет использования модели JWL. Выделение энергии при детонации взрывчатого вещества и формирования сейсмических волн в ближней к участку инициации взрывчатого вещества зоне описывалось через уравнение состояния JWL (модель Джона-Ли-Вилкенсона) [105,77]. Уравнение состояния в единицах внутренней энергии запасенной в единице массы  $E_m$  можно записать как уравнение 3.16:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\rho}{R_1\rho_0}\right) \exp\left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho}\right) + B \left(1 - \frac{\omega\rho}{R_2\rho_0}\right) \exp\left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho}\right) + \omega\rho E_m, \quad (3.16)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  – константы модели, подбираемые для каждого вида взрывчатого вещества;  $\rho_0$  – плотность взрывчатого вещества;  $\rho$  – плотность продуктов взрыва.

Константы уравнения для принятого на Малеевском руднике эмульсионного взрывчатого вещества сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 - Константы уравнения состояния взрывчатых веществ

Взрывчатое вещество	Константы уравнения состояния взрывчатых веществ									
	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	A, Па	B, Па	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$c_d$ , м/с	$E_0$ , Дж/м <sup>3</sup>	$p_b$ , Па	$K_{pd}$ , Па
Эмульсионная взрывчатка	1140	3.85e11	5.045e9	5.487	1.171	0.24	5573	3.26e6	2.1e+010	3.3e9

### 3.3.4. Модель деформирования породного массива, принята при выполнении численного моделирования

В качестве модели деформирования породного массива принята упругопластическая модель представленная в виде уравнения 3.7, модель основана на условии пластичности Хука-Брауна [93,94], которая как показывает мировой опыт достаточно хорошо отражает упругопластическое поведение трещиноватой среды:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c.i} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{c.i}} + s \right)^a, \quad (3.17)$$

где  $\sigma_1$  – главные максимальные напряжения;  $\sigma_3$  – главные минимальные напряжения;  $\sigma_{c.i}$  – прочность образца породы при одноосном сжатии;  $m_b, s, a$  – экспериментальные параметры критерия прочности Хука и Брауна, учитывающие геологическую характеристику массива пород.

Эмпирические параметры  $m_b, s, a$  в представлении экспериментальных зависимостей можно определить из уравнений 3.18 – 3.20:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}; \quad (3.18)$$

$$m_b = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}; \quad (3.19)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right), \quad (3.20)$$

где  $GSI$  – геологический индекс прочности;  $m_i$  – параметр характеризующий тип горной породы;  $D$  – показатель качества буровзрывных работ (нарушенности массива).

Такой показатель как модуль деформации породного массива  $E_m$  можно выразить при помощи методики Хука-Брауна и записать в виде формулы 3.21:

$$E_m = E_i \left( 0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right). \quad (3.21)$$

Механические характеристики породного массива для первого и второго расчетных этапов определены с учетом структурной нарушенности пород. На основании выполненных исследований на руднике [50] установлено, что

показатель GSI на рассматриваемом участке изменяется от 50 до 75, при среднем значении 60. Показатель  $D$  принимается равным 0. Эквивалентные показатели механических характеристик породного массива сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Расчетные физико-механические характеристики породного массива

Массив	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, МПа	Коэффициент поперечной деформации	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Прочность на растяжение, МПа
Порода	2900	26 500	0.35	6.6	43	0.5
Руда	3000	22 500	0.35	6.0	41	0.5

При выполнении численного моделирования распространения сейсмических волн в качестве модели демпфирования принимается модель демпфирования Рэлея, представленная на рисунке 3.3 и в виде соотношения 3.22, которая определяется двумя коэффициентами  $\alpha_R$  и  $\beta_R$  соответственно характеризующих демпфирование по массе и демпфирование по жесткости:

$$C = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K}, \quad (3.22)$$

где  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$  – коэффициенты Рэлея;  $\mathbf{M}$  – матрица масс;  $\mathbf{K}$  – матрица жесткости.

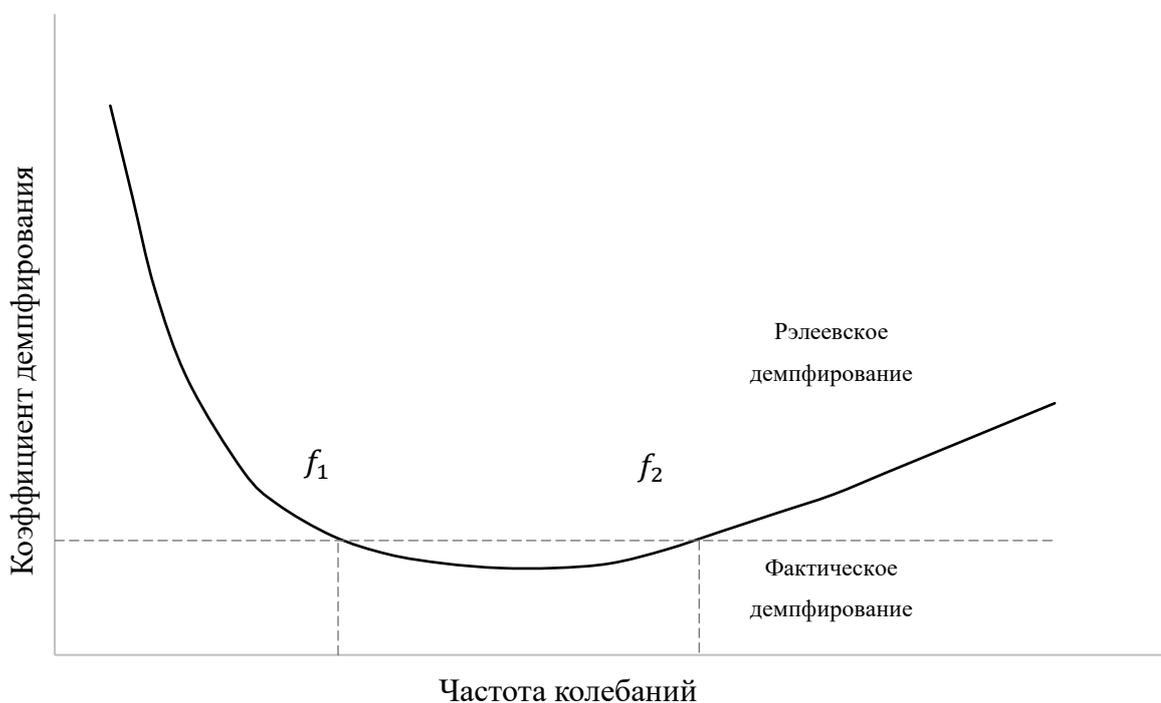


Рисунок 3.3 – Демпфирование по Рэлею:  $f_1$  и  $f_2$  – диапазон изменения частоты колебаний.

Коэффициенты Рэлея зависят от частоты колебания системы определяются из решения системы уравнений 3.23:

$$\frac{\alpha_R}{2\omega} + \frac{\beta_R \omega}{2} = \zeta; \quad (3.23)$$

$$f = 2\pi f,$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $f$  – линейная частота;  $\zeta$  – коэффициент демпфирования.

Задав диапазон изменения линейной частоты от  $f_1$  (наименьшая) до  $f_2$  (наибольшая) и решив уравнение 3.23 получим следующие формулы 3.24 для определения коэффициентов Рэлея:

$$\alpha_R = 4\pi f_1 f_2 \frac{\zeta_1 f_2 - \zeta_2 f_1}{f_2^2 - f_1^2}; \quad (3.24)$$

$$\beta_R = \frac{\zeta_2 f_2 - \zeta_1 f_1}{\pi(f_2^2 - f_1^2)}.$$

Для практических расчетов приняв значение наименьшей частоты  $f_1$  равной 0 Гц, получим значение коэффициента  $\alpha_R$  равной 0, а значение коэффициента  $\beta_R$  по формуле 3.25:

$$\beta_R = \frac{\zeta f_2}{\pi f_2^2}. \quad (3.25)$$

Для корректного разрешения уравнений прогноза распространения сейсмических волн должно выполняться условие, чтобы длина сейсмической волны была бы не больше 10-15 характерных размеров конечных элементов. Более точно, данную величину можно вычислить по следующей формуле 3.26 для продольной и поперечной волн:

$$h_p = 10 \frac{c_p}{f} = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-v}{(1+v)(1-v)}}}{f}; \quad (3.26)$$

$$h_s = 10 \frac{c_s}{f} = \frac{\sqrt{\frac{G}{\rho}}}{f},$$

где  $c_p$ ,  $c_s$  – скорости распространения продольной и поперечной сейсмических волн;  $f$  – линейная частота колебания;  $E$  – модуль деформации;  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации;  $\rho$  – плотность.

Коэффициент демпфирования определялся на основании сопоставления результатов численного моделирования с результатами, получаемыми по

эмпирической формуле определения скорости перемещения частиц породы по мере удаления от участка инициации ВВ с учетом поглощения энергии. В общем виде скорость перемещения частиц породы  $v$  можно представить формулы 3.27:

$$v = a_1 \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta}, \quad (3.27)$$

где  $R$  – расстояние от источника взрыва выраженное в (м);  $Q$  – масса одновременно взрываемого ВВ, выраженная в (кг)  $a_1$ ,  $\beta$  – константы уравнения, которые зависят от конкретных горно-геологических и технологических условий.

В работе принята следующая зависимость 3.28 связывающая скорость с интенсивностью воздействия, при этом показатель  $\beta$  изменяющийся в диапазоне от 1.25 до 1.75:

$$v_{max} = 700 \left( \frac{R}{\sqrt{2}} \right)^{-\beta}. \quad (3.28)$$

На основании выполненного численного моделирования в плоско-деформационной постановке установлено, что значение скоростей перемещения частиц породы во всем диапазоне рассматриваемых значений  $R$  в значительной степени отклоняется от эмпирической зависимости, в графическом виде данная зависимость представлена на рисунке 3.4.

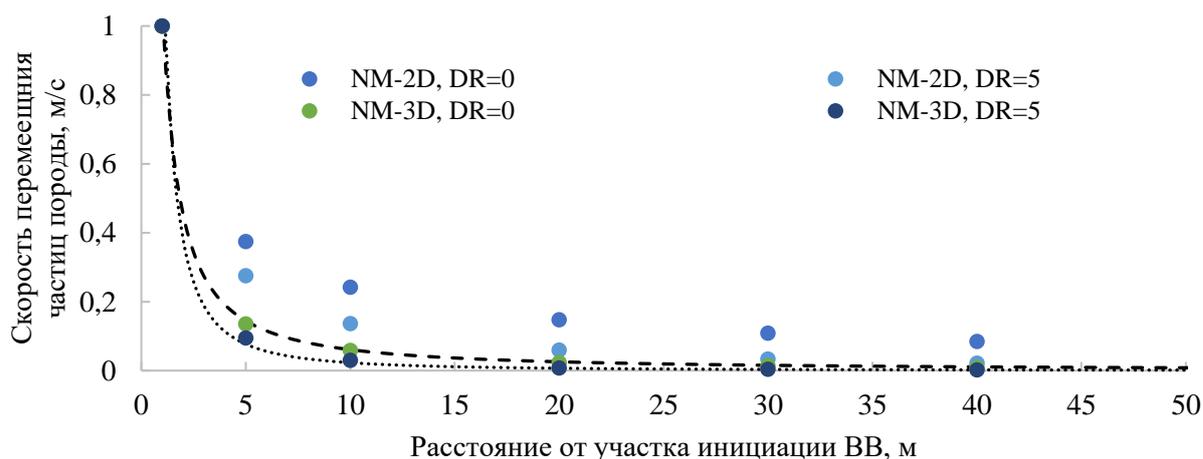


Рисунок 3.4 – Зависимость изменения скорости перемещения частиц породы от расстояния от участка инициации ВВ при различных параметрах численной модели: NM-2D, DR=0, DR=5 – результаты моделирования в плоско-деформационной постановке при коэф. демпфирования 0 и 5%; NM-3D, DR=0, DR=5 – результаты моделирования в пространственной постановке при коэф. демпфирования 0 и 5%; Эмп. верхняя граница, нижняя граница – диапазон возможных значений скоростей перемещения частиц пород по эмпирической зависимости.

Введение демпфирования в рассматриваемую систему улучшает сходимость, результатов, однако результат все равно остается не идеальным. Рассмотрение процесса распространения сейсмических волн в пространственной постановке позволяет получить хорошую сходимость с данными эмпирической зависимости. Таким образом можно заключить, что коэффициент демпфирования хотя и позволяет приблизить результаты расчетов к фактическим, однако в целом, для достижения полной сходимости, необходимо рассматривать задачу распространения сейсмических волн в упругой среде в пространственной постановке. Применение плоско-деформационной постановки для решения поставленной задачи приводит к консервативному решению.

### **3.3.5. Модель упругопластического деформирования бетона с накоплением повреждений**

Бетон, как и любой другой материал, разрушается не мгновенно, а этот процесс связан с разрушением структурных связей между отдельными его частицами. По мере накопления повреждений, снижается количество связей в бетоне и происходит его деградация. Этот характер разрушения можно проиллюстрировать через диаграмму деформирования бетона в осях напряжения-деформации представленную на рисунке 3.5а. Повреждение выражается в количестве энергии, затраченной на разрыв структурных связей, и полная энергия повреждения определяется предельной прочностью на одноосное растяжение, законом развития повреждения и предельной величиной раскрытия трещины. Таким образом, чем выше величина предельного величины раскрытия трещины, когда наступает полная деградация материала, тем лучше работает такой материал при сейсмическом воздействии, так как может испытывать большие по величине знакопеременные деформации, возникающие в набрызгбетонной крепи [109,111].

На рисунке 3.5б представлены типовые диаграммы деформирования бетона, армированного и неармированного. Как видно из представленных зависимостей, величина полной энергии повреждения сильно зависит от степени армирования бетона, и значительно повышается при дисперсном армировании бетона, что

позволяет конструкциям, выполненным из таких материалов хорошо сопротивляться кратковременным воздействиям [39,113], которые наблюдаются при массовых взрывах.

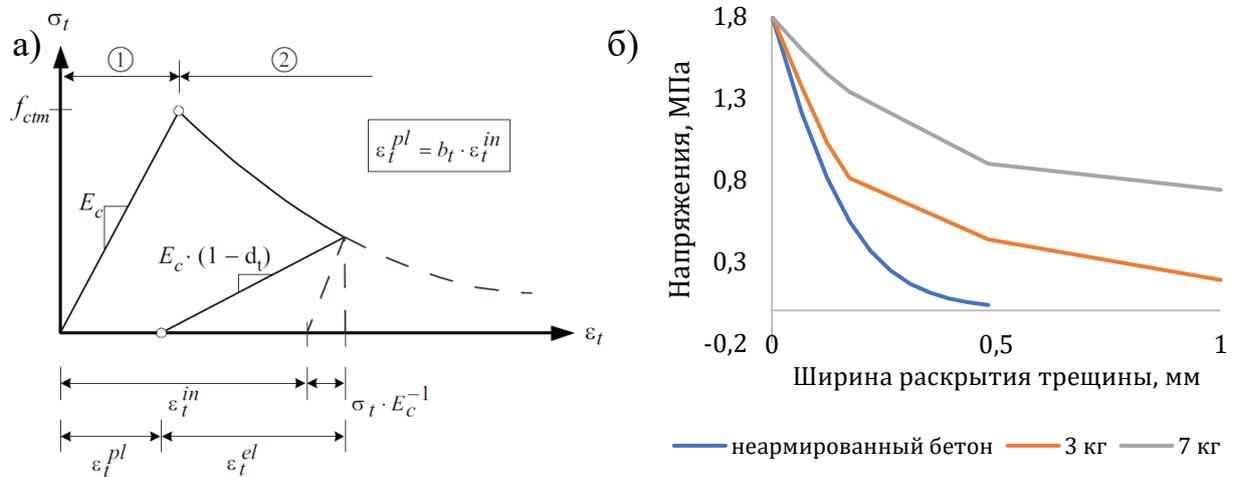


Рисунок 3.5 – Характер деформирования и разрушения набрызгбетонной крепи:  $E_c$  – модуль деформации бетона;  $d_t$  – показатель повреждения набрызгбетонной крепи.

Показатель повреждения материала крепи  $d_t$  показывает величину остаточной прочности материала крепи и изменяется в диапазоне от 0 до 1. Значению 0 соответствует участок крепи без повреждения, значению 1 участок крепи полностью разрушенный (трещины или несколько трещин полностью раскрылись). Показатель  $d_t$  определяется по следующей зависимости 3.29:

$$d_t = 1 - \frac{R_{t,r}}{R_t}, \quad (3.29)$$

где  $R_t$  – расчетное сопротивление набрызгбетона растяжению;  $R_{t,r}$  – остаточное значение сопротивления набрызгбетона растяжению.

Модель пластического деформирования бетона с накоплением повреждений (CDP), широко используется при выполнении прогноза напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций и, в частности, бетонных и набрызгбетонных крепей горных выработок [92]. Модель CDP позволяет комплексно рассмотреть процесс деформирования бетона при условиях одноосного сжатия (рисунок 3.6а), одноосного растяжения (рисунок 3.6б), так и при незначительном боковом обжатии. Нелинейное деформирование бетона при сжатии описывается в рамках теории пластического течения, в то

время как повреждение бетона при сжатии и растяжении описывается в рамках теории разрушения материала. Модель позволяет учесть знакопеременное нагружение, а также влияние скорости деформирования материала на его механическое поведение. Из недостатков, можно отметить не способность модели корректно описывать механическое поведение бетона в условиях объемного сжатия.

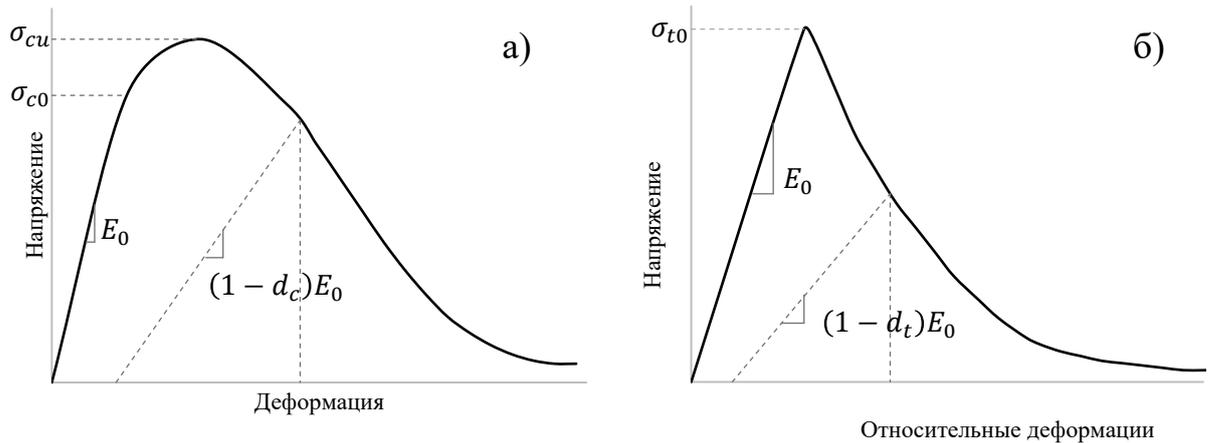


Рисунок 3.6 – Идеализированные кривые деформирования бетона в условиях одноосного сжатия (а) и одноосного растяжения (б) модели CDP:  $E_0$  – начальный модуль деформации;  $d_c$  – показатель повреждения при действии сжимающих напряжений;  $d_t$  – показатель повреждения при действии растягивающих напряжений;  $\sigma_{c0}$  – предел упругости при сжатии;  $\sigma_{cu}$  – предел прочности при сжатии;  $\sigma_{t0}$  – предел прочности при растяжении.

Поверхность пластического течения модели CDP представлена на рисунке 3.7 и задается в виде следующей зависимости 3.30:

$$F := \frac{1}{1 - \alpha} \left( \bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl})\sigma_{max} - \gamma(-\sigma_{max}) \right) - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl});$$

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1};$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) + (1 + \alpha);$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1},$$
(3.30)

где  $\sigma_{max}$  – максимальные главные эффективные напряжения;  $\sigma_{c0}$  – предел упругости бетона в условиях двухосного сжатия;  $\sigma_{c0}$  – предел упругости бетона в

условиях одноосного сжатия;  $K_c$  – показатель, определяющий форму поверхности пластического течения в девиаторной плоскости;  $\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})$  – эффективная прочность бетона при сжатии как функция от пластических сжимающих деформаций;  $\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})$  – эффективная прочность бетона при растяжении как функция от пластических растягивающих деформаций.

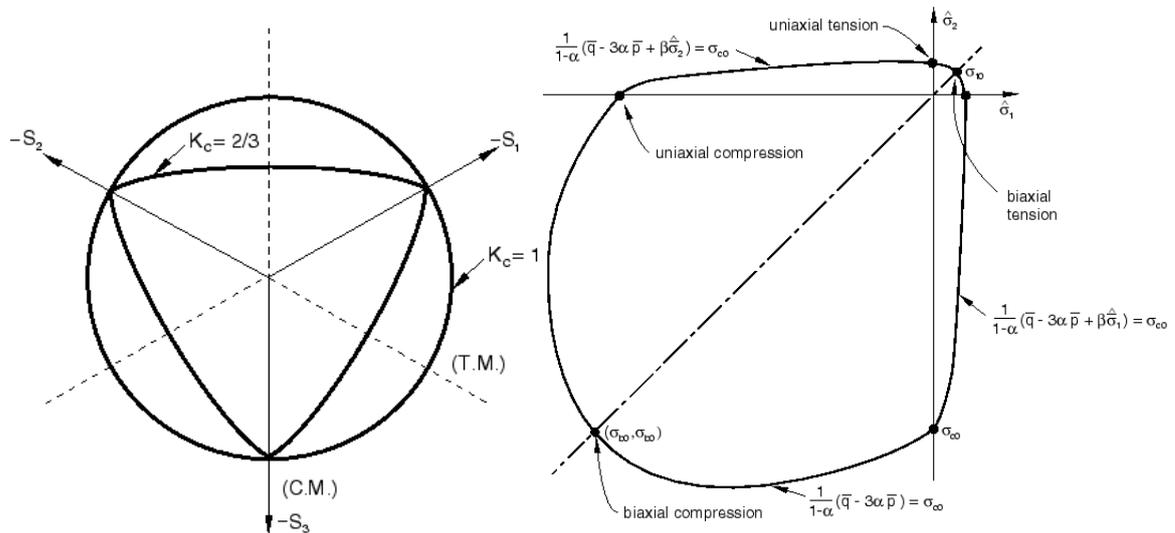


Рисунок 3.7 – Поверхность пластического течения модели CDP

В работах [89,90,91,92,101] представлены уравнения связи между напряжениями и деформациями в условиях одноосного сжатия для неармированного бетона, однако данное выражение не позволяет корректно описать деформирование дисперсно-армированного бетона в запредельной стадии деформирования. Для преодоления этого недостатка в работе [84] предложено модифицированное уравнение 3.31, которое использует один параметр для корректировки деформирования дисперсно-армированного бетона:

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,p}}}{(1-p-q) + q \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,p}} \right) + p \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,p}} \right)^{\frac{1-q}{p}}}; \quad (3.31)$$

$$q = 1 - p - \frac{E_{c1}}{E_{ci}},$$

где  $f_{cm}$  – средняя прочность бетона в условиях одноосного сжатия;  $\varepsilon_{c,p}$  – относительные деформации дисперсно-армированного бетона

соответствующий пределу прочности;  $\varepsilon_c$  – относительные деформации бетона;  $E_{c1}$  – секущий модуль деформации;  $E_{ci}$  – касательный модуль деформации.

Параметры уравнения 3.31 могут быть определены согласно следующим соотношениям 3.32:

$$E_{ci} = 21500(f_{cm})^{\frac{1}{3}} \text{ [МПа];}$$

$$E_{c1} = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c,p}}; \quad (3.32)$$

$$p = 1.0 - 0.722e^{-0.144W_f};$$

$$\varepsilon_{c,p} = \varepsilon_{c10} + 0.00026W_f,$$

где  $\varepsilon_{c10}$  – деформации на пределе прочности неармированного бетона,  $2.2 \cdot 10^{-3}$ ;  $W_f$  – расхода фибры по массе выраженный в процентах.

Величина энергии разрушения набрызгбетона при сжатии  $G_c$  варьируется в диапазоне 30-70 кН/м. Энергия разрушения неармированного набрызгбетона при растяжении  $G_t$  варьируется в диапазоне от 0.05 до 0.15 кН/м. При рассмотрении армированного набрызгбетона показатель  $G_{t,fr}$  определялся по формуле 3.33 [81]:

$$G_{t,fr} = (1 + 13.159W_f^{1.827})G_t, \quad (3.33)$$

где  $G_t$  – величина энергии разрушения неармированного набрызгбетона;  $W_f$  – расход фибры, кг/м<sup>3</sup>.

Диаграмма разупрочнения бетона при растяжении может быть идеализирована в следующем виде. Количественно диаграмма определяется прочностью бетона в условиях одноосного растяжения  $f_{ctm}$ , предельной величиной деформаций в момент полного раскрытия трещин  $\varepsilon_{cr}$  и двумя показателями  $\alpha$ ,  $p_1$  и  $p_2$ . Параметр  $p_2$  определяется по следующей формуле 3.34:

$$p_2 = \frac{2G_t}{\alpha l_b f_{ctm} \varepsilon_{cr}} - \frac{p_1 - \alpha}{\alpha}, \quad (3.34)$$

Механические характеристики набрызгбетона, включая призмную прочность в условиях одноосного сжатия  $R_{sh.c}$ , одноосного растяжения  $R_{sh.t}$  и начальный модуль деформации  $E_{sh}$  [89] можно определить из соотношения 3.35:

$$\begin{aligned} R_{sh.c} &= 0.85f_{cu}; \\ R_{sh.t} &= 0.24f_{cu}^{\frac{2}{3}}; \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$E_{sh} = (6000 - 15.5f_{cu})\sqrt{f_{cu}};$$

где  $f_{cu}$  – кубиковая прочность бетона.

В отсутствии экспериментальных данных о наборе прочности конкретной набрызгбетонной смеси в условиях рудника, величину прочности на одноосное сжатие  $R_c$  набрызгбетона можно условно рассматривать по следующим зависимостям 3.36 - 3.37:

$$R_{sh.c} = 5.506R_{sh.c,24}e^{-1.706t_s^{-0.82}}; \quad (3.36)$$

$$R_{sh.c} = R_{sh.c,tp}e^{-1.37t_s^{-0.60}}, \quad (3.37)$$

где  $R_{sh.c,24}$  – прочность набрызгбетона в условиях одноосного сжатия по истечению 24 часов с момента начала твердения;  $R_{sh.c,tp}$  – типовая прочность набрызгбетона в условиях одноосного сжатия в возрасте 28 суток, МПа;  $t_s$  – время с момента начала твердения набрызгбетонной смеси (сут).

Развитие модуля деформации набрызгбетонной смеси  $E_{sh}$  согласно следующей зависимости 3.38:

$$E_{sh} = 1.062E_{sh,28d}e^{-0.446t_s^{-0.8}}, \quad (3.38)$$

где  $E_{sh,28d}$  – модуль деформации набрызгбетона в возрасте 28 суток с момента начала твердения, можно условно принять равным 27 000 МПа.

Коэффициент поперечной деформации набрызгбетона изменяется от 0.5, что соответствует начальному моменту его твердения, до 0.2, что соответствует набору прочности набрызгбетона в возрасте 28 суток.

Прочность когезионных связей между набрызгбетоном и горной породой, полученная исследователями для различных условий, сведена в таблицу 3.7. Средняя величина прочности когезионных связей между набрызгбетоном и породой находится в диапазоне 0.5 – 1.0 МПа.

Таблица 3.7 - Прочность когезионных связей между набрызгбетоном и горной породой

Автор исследования	Прочность когезионных связей, МПа	Примечание
Hahn and Holmgren	0.3 – 1.7	Набрызгбетон наносился на поверхность гранита
Malmgren et al.	0.33	Нанесение набрызгбетонной смеси на необработанную поверхность
	0.680	Нанесение набрызгбетонной смеси на обработанную поверхность
Saiang et al.	0.56	Сильно трещиноватый породный массив
Bryne et al.	0.06 – 0.07 0.36 0.35 – 0.48 0.67 – 0.83 0.74 – 1.15	Возраст: - 6 часов - 10 часов - 12 часов - 18 часов - 24 часа

При выполнении численных расчетов прогноза повреждения набрызгбетонной крепи приняты числовые показатели модели CDP, представленные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Параметры модели CDP для неармированного и армированного набрызгбетонов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_c$ , МПа	$R_t$ , МПа	$G_c$ , кН/м	$G_t$ , кН/м	$\psi$ , °	$R_{bc}/R_c$	$K$
Неармированный набрызгбетон, класс В40	2200	25.0	1.5	30	0.15	30	1.16	0.66
Армированный набрызгбетон, класс В40, расход металлической фибры 25 кг/м <sup>3</sup>	2200	25.0	1.5	40	2.5	30		
Армированный набрызгбетон, класс В40, расход металлической фибры 50 кг/м <sup>3</sup>	2200	25.0	1.5	50	9.2	30		

Примечание: рассматривается металлическая фибра.

Все параметры получены для бетона класса прочности на сжатие В40 [67]. Диаграмма упрочнения и разупрочнения бетона при нагружении в условиях одноосного сжатия и растяжения представлены на рисунках 3.8 и 3.9.

Механические характеристики неармированного и дисперсно-армированного бетона для представленной выше механической модели сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 - Механические параметры модели неармированного и дисперсно-армированного бетона

Показатель	Значение показателей модели бетона при содержании металлической фибры (кг)		
	0	25	50
$f_{cm}$ (МПа)	25	25	25
$f_{ctm}$ (МПа)	1.5	1.5	1.5
$E_{ci}$ (ГПа)	34.2	34.2	34.2
$G_f$ (Н/м)	10	116	428
$\alpha$	1/3	0.45	0.55
$p_1$	3.0	1.5	2.0
$l_b$	45	100	80

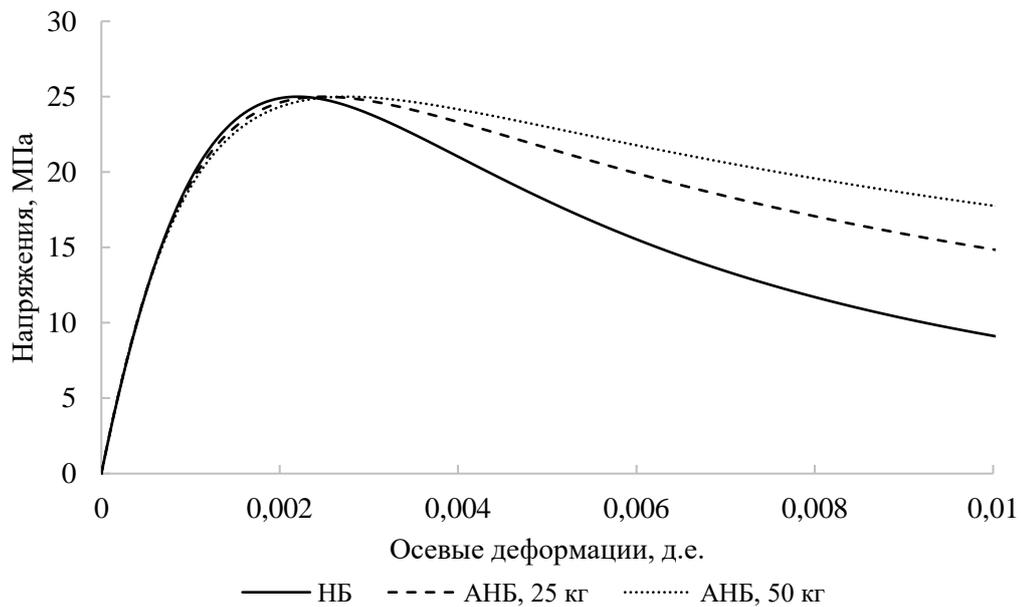


Рисунок 3.8 – Диаграммы деформирования бетона в условиях одноосного сжатия

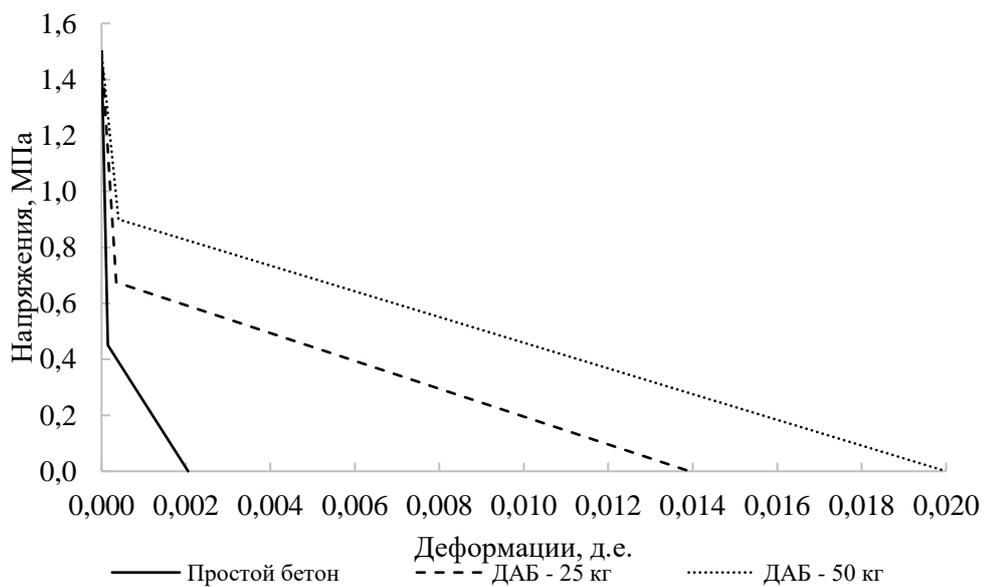


Рисунок 3.9 – Диаграммы деформирования бетона в условиях растяжения

### 3.4. Конечно-элементные модели прогноза развития НДС породного массива и крепи при взрывном воздействии

#### 3.4.1. Конечно-элементные модели прогноза НДС набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии

Достоверный прогноз развития сейсмических волн в породном массиве требует высокой плотности дискретизации конечно-элементной сетки, что накладывает некоторые ограничения на размерность численной модели, размер элемента должен быть не более 1/10 от длины волны. В этой связи, выполнена разбивка задачи на два расчетных этапа. На первом расчетном этапе выполняется прогноз распространения сейсмических волн в непосредственной близости от участка инициации взрывчатого вещества. На втором этапе выполняется прогноз распространения сейсмических волн до горной выработки, и осуществляется прогноз напряженно-деформированного состояния крепи.

Механические характеристики породного массива для первого и второго расчетных этапов определены с учетом структурной нарушенности пород. На основании выполненных исследований на руднике установлено, что показатель GSI на рассматриваемом участке изменяется от 50 до 75, при среднем значении 60. Показатель  $D$  принимается равным 0. Эквивалентные показатели механических характеристик породного массива сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 - Расчетные физико-механические характеристики породного массива

Массив	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, МПа	Коэффициент поперечной деформации	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Прочность на растяжение, МПа
Порода	2900	26 500	0.35	6.6	43	0.5
Руда	3000	22 500	0.35	6.0	41	0.5

При построении модели первого этапа учтена фактическая схема расположения взрывчатого вещества в сечении забоя горной выработки графическое представление модели изображено на рисунке 3.9. Диаметр скважины принят равным 46 мм, длина скважины 3 м. Паспорт буровзрывных работ включает 43 скважины.

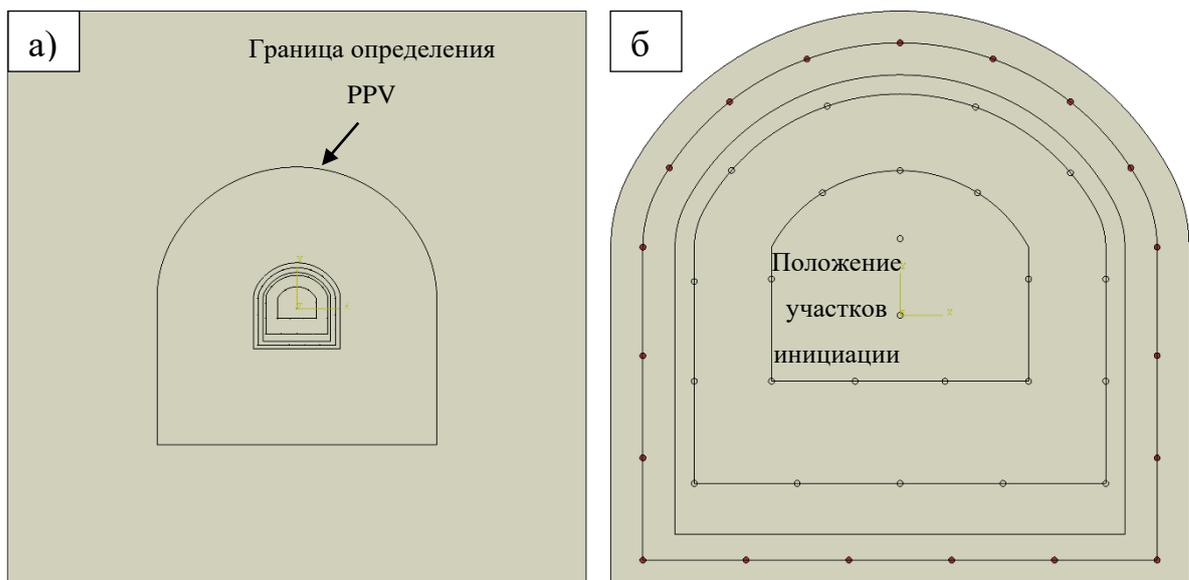


Рисунок 3.9 – Схема к расчету выделения энергии при инициации взрывчатого вещества и прогноза распространения сейсмических волн в зоне ведения взрывных работ: а – полная модель; б – фрагмент модели, соответствующий участку инициации взрывчатого вещества

Инициация взрывчатого вещества осуществляется в несколько стадий замедления, при этом шаг замедления между стадиями выбран таким, что сейсмические волны между разными стадиями замедления не накладываются друг на друга. При выполнении численного моделирования рассматривался вариант взрывания только контурных шпуров, так как при принятой схеме инициации взрывчатого вещества они оказывают наибольшее воздействие на набрызг-бетонную крепь.

По результатам первого этапа на границе модели выполнялось определение результирующих скоростей перемещений частиц породы, которые в дальнейшем переносились в качестве граничных условий распространения сейсмических волн для модели второго этапа.

На основании построенной модели 2 этапа выполнено численное моделирование распространения сейсмических волн в породном массиве и определено напряженно-деформированное состояние набрызгбетонной крепи. Прогноз НДС системы “крепь – породный массив” в плоско-деформационной постановке. Приняты конечные элементы типа СРЕ6М. Расстояние между участком инициации взрывчатого вещества и центром выработки 37.5 м. Горная выработка арочной формы, с размерами 4.8x4.65 м. В качестве крепи горной

выработки принят набрызгбетон. В качестве модели набрызгбетона принята упругопластическая модель Concrete Damage Plasticity, характеристики которого приведены в таблице 3.8. Расстояние от центра модели до границы расположения бесконечных элементов 100 м. Нагрузка от сейсмического воздействия прикладывалась к внутренним границам модели, изображенной на рисунке 3.10, в виде результирующих скоростей смещений частиц пород. Сейсмическая нагрузка прикладывалась многократно (10 циклов сейсмического нагружения) каждые 0.05 сек. При выполнении расчетов было показано, что данный период повторяемости нагрузки позволяет исключить значительного наложения сейсмических волн от циклов сейсмического нагружения в приконтурной области горной выработки.

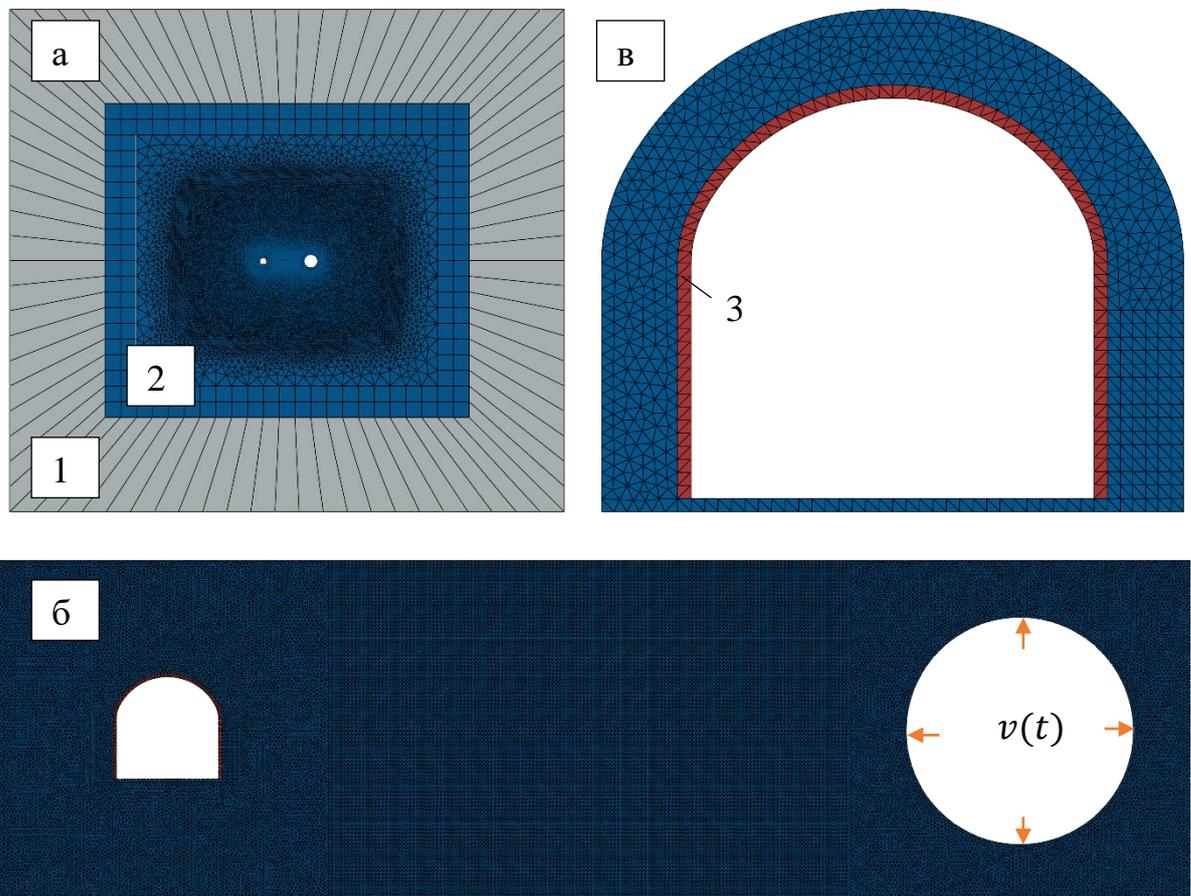


Рисунок 3.10 – Конечно-элементная модель прогноза напряженного состояния набрызгбетонной крепи: а – общий вид модели; б – фрагмент модели участка распространения сейсмических волн; в – фрагмент модели взаимодействия набрызгбетона с породным массивом; 1 – зона расположения бесконечных элементов; 2 – породный массив; 3 – набрызгбетонная крепь.

С учетом значительной продолжительности сейсмического воздействия, удаление границ модели от горной выработки не является рациональным, поэтому для исключения отражения волн от границ модели по ее периметру установлены “бесконечные элементы”.

Размер конечно-элементной сетки для рассматриваемой выработки Малеевского рудника при ожидаемой частоте колебаний породного массива, вызванного взрывом, 1000-1500 Гц не должен превышать 1.0 м. Однако с учетом фактической толщины набрызгбетонной крепи равной 0.15, и необходимости использования как минимум 3 элементов по толщине набрызгбетонной крепи, размер конечных элементов на участке крепи принят равным 0.05 м, породный массив разбит на элементы с характерными размерами от 0.05 до 0.25 м.

Сейсмическое воздействие задавалось в виде результирующей скорости на контуре радиусом 5 м величина которой определялась на основании модели 1 этапа. Полученную скорость удобно аппроксимировать следующей зависимостью 3.39:

$$v(t) = \frac{v_{max}}{2} \cos(2\pi ft) - \frac{v_{max}}{2}. \quad (3.39)$$

Для задания многократного сейсмического нагружения, импульс задавался по выше приведённой формуле, при этом величина замедления между импульсными воздействиями принималась равной 0.05 с. При данном замедлении между стадиями импульсного воздействия наложение сейсмических волн не приводило к существенному росту напряжений в набрызгбетонной крепи.

### **3.4.2. Конечно-элементные модели прогноза НДС набрызгбетонной крепи при различных системах разработки**

Численное моделирование распространения сейсмических волн, вызванных массовым взрывом, выполнено на основании создания численных моделей в плоско-деформационной и пространственной постановках. Модели включали в себя основные элементы, такие как горная порода, взрывчатое вещество и крепь горных выработок. Моделирование распространения сейсмических волн через породный массив выполнялось в Лагранжевой постановке, выделение энергии

при массовом взрыве в Эйлеровой постановке. Взаимодействие между Эйлеровой и Лагранжевой областями численной модели выполнялось через специальные контактные условия. Набрызгбетонная крепь рассматривалась как набор стержневых элементов, жестко связанных через узловые точки с элементной сеткой, отвечающей за породный массив.

При моделировании массового взрыва учитывалось замедление между взрывами в рядах скважин, при этом рассмотрены два варианта, параметры которых представлены в таблице 3.11. Первый вариант отражает ступени замедления, принятые в проекте на проведение массовых взрывов при ведении очистных работ. Вторым вариантом не учитывается замедление при взрывании и рассматривается активацию всего взрывчатого вещества мгновенно.

Таблица 3.11 - Варианты принятых при выполнении моделирования схем замедления массового взрыва между рядами скважин

Номер ряда скважин	Величина замедления, с	
	Первый вариант	Второй вариант
1 ряд	0.000	0.000
2 ряд	0.025	0.000
3 ряд	0.050	0.000
4 ряд	0.075	0.000

При выполнении моделирования источники взрыва рассматривались в виде сосредоточенных масс, величина которых определялась исходя из массы взрывчатого вещества в скважинах, ассоциированных с каждым источником. Конечно-элементное представление моделей для различных схем ведения очистных работ представлены на рисунках 3.11 и 3.12.

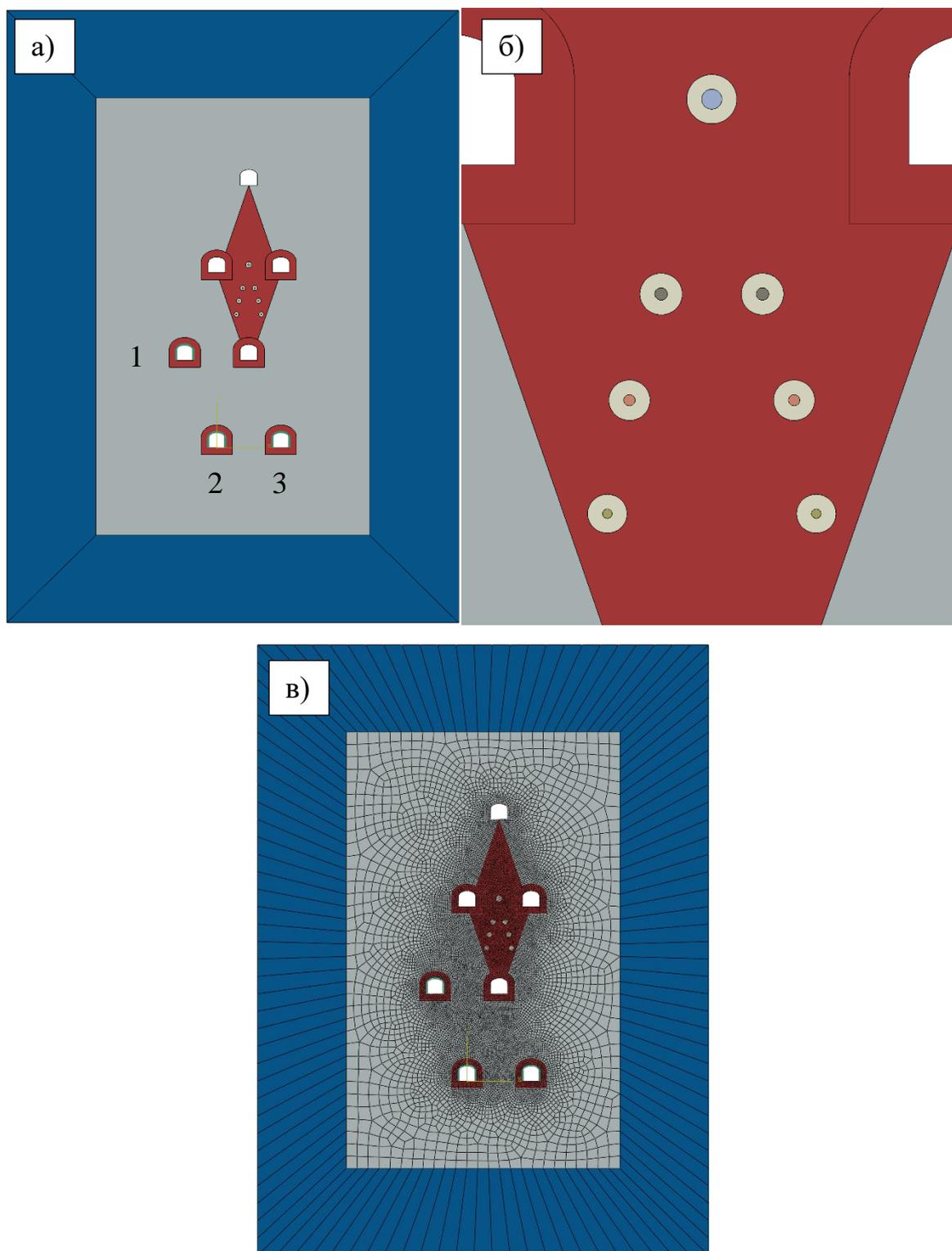


Рисунок 3.11 – Конечно-элементное представление численных моделей при моделировании массовых взрывов, схема I (торцевая схема ведения очистных работ): а) геометрическое представление численной модели участка ведения массового взрыва; б) локальный участок модели с принятой схемой расположения взрывчатого вещества; в) конечно-элементная модель: 1-3 – номера выработок.

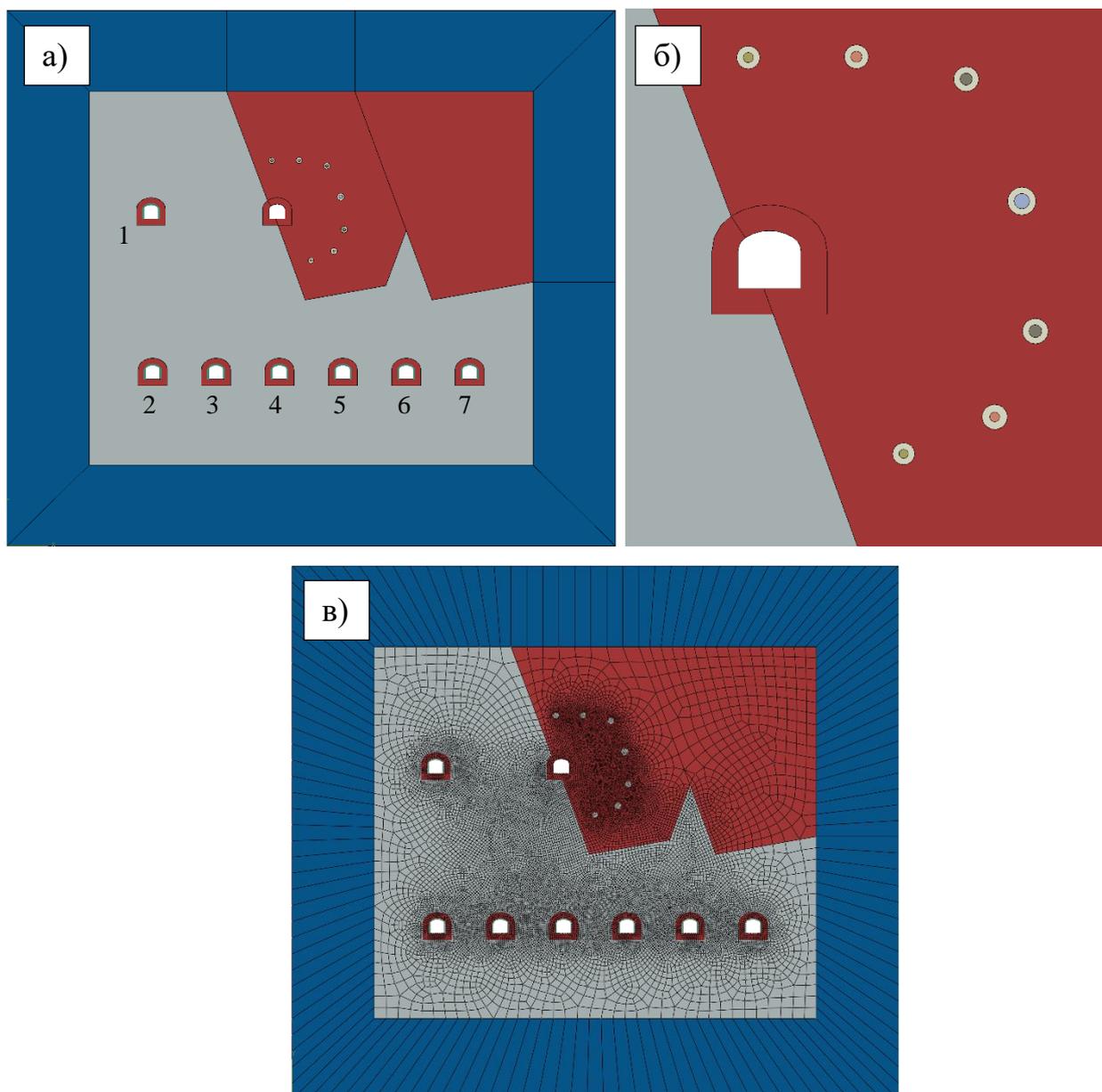


Рисунок 3.12 – Конечно-элементное представление численных моделей при моделировании массовых взрывов, схема II (траншейная схема ведения очистных работ): а) геометрическое представление численной модели участка ведения массового взрыва б) локальный участок модели с принятой схемой расположения взрывчатого вещества; в) конечно-элементная модель: 1-7 – номера выработок.

По результатам моделирования выполнялось построение диаграмм развития смещений породного контура выработок, попадающих в зону активного влияния массовых взрывов, эпюры напряженного состояния набрызгбетонных крепей, а также эпюры развития нормальных напряжений на контакте крепь-породный массив и максимальных растягивающих и сжимающих напряжений в характерных точках крепи.

### 3.4.3. Конечно-элементные модели прогноза НДС набрызгбетонной крепи на Малеевском руднике

Для оценки влияния положения участка возникновения сейсмического события от массового взрыва относительно рассматриваемой горной выработки было построено 9 численных моделей в плоско-деформационной постановке. Численная модель включает зону для моделирования распространения сейсмических волн от источника взрывных работ до горной выработки, зону моделирования изменения НДС в набрызгбетонной крепи, а также краевые зоны, которые предназначены для задания граничных элементов препятствующих отражению сейсмических волн в систему.

В качестве нагрузки от массового взрыва принята максимальная величина колебаний частиц породы на расстоянии 5 м от источника взрыва. Закон изменения колебаний частиц породы соответствует уравнению 3.30.

Выработка представляет собой арочную форму поперечного сечения, толщина рассматриваемой набрызгбетонной крепи 15 см. Размер горной выработки принят равным 5.1х4.5 м. Расстояния от центра выработки до центра сейсмического события для каждой из расчетных схем сведены в таблицу 3.12.

Таблица 3.12 - Параметры расположения горных выработок относительно участка возникновения сейсмического события

Параметр	Значения параметра для соответствующей расчетной схемы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расстояние, м	15	18	25	25	27	32	35	37	40
Угол наклона, град.	0	31	51	0	21	37	0	16	29

### 3.5. Результаты численного моделирования прогноза воздействия взрывных работ на напряженное состояние набрызгбетонной крепи

#### 3.5.1. Результаты оценки влияния взрывного воздействия на НДС набрызгбетонной крепи при многократном нагружении

На основании выполненных расчетов установлена картина распространения сейсмических волн при взрывании контурных скважин. Для наглядности, результаты представлены в виде эпюр колебания частиц породы в характерный момент времени и показаны на рисунке 3.13а.

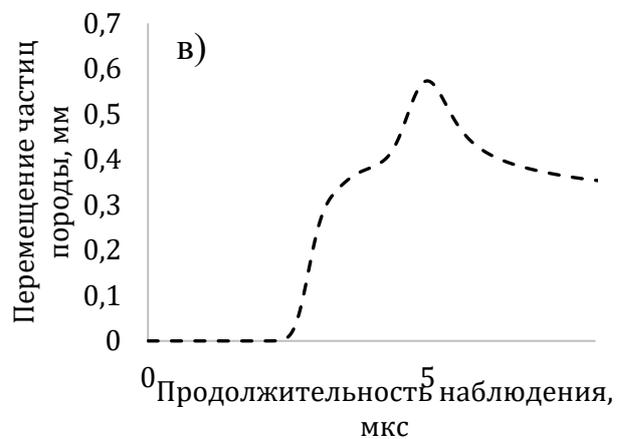
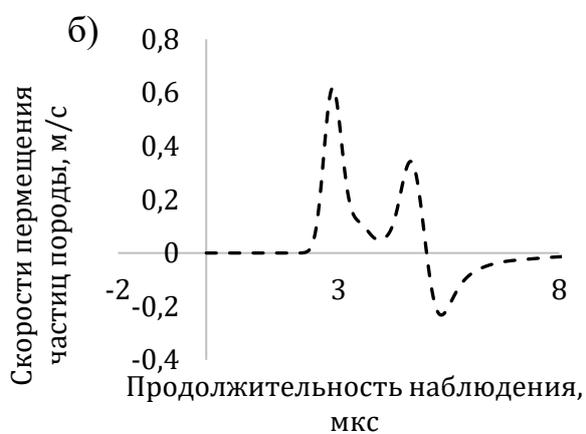
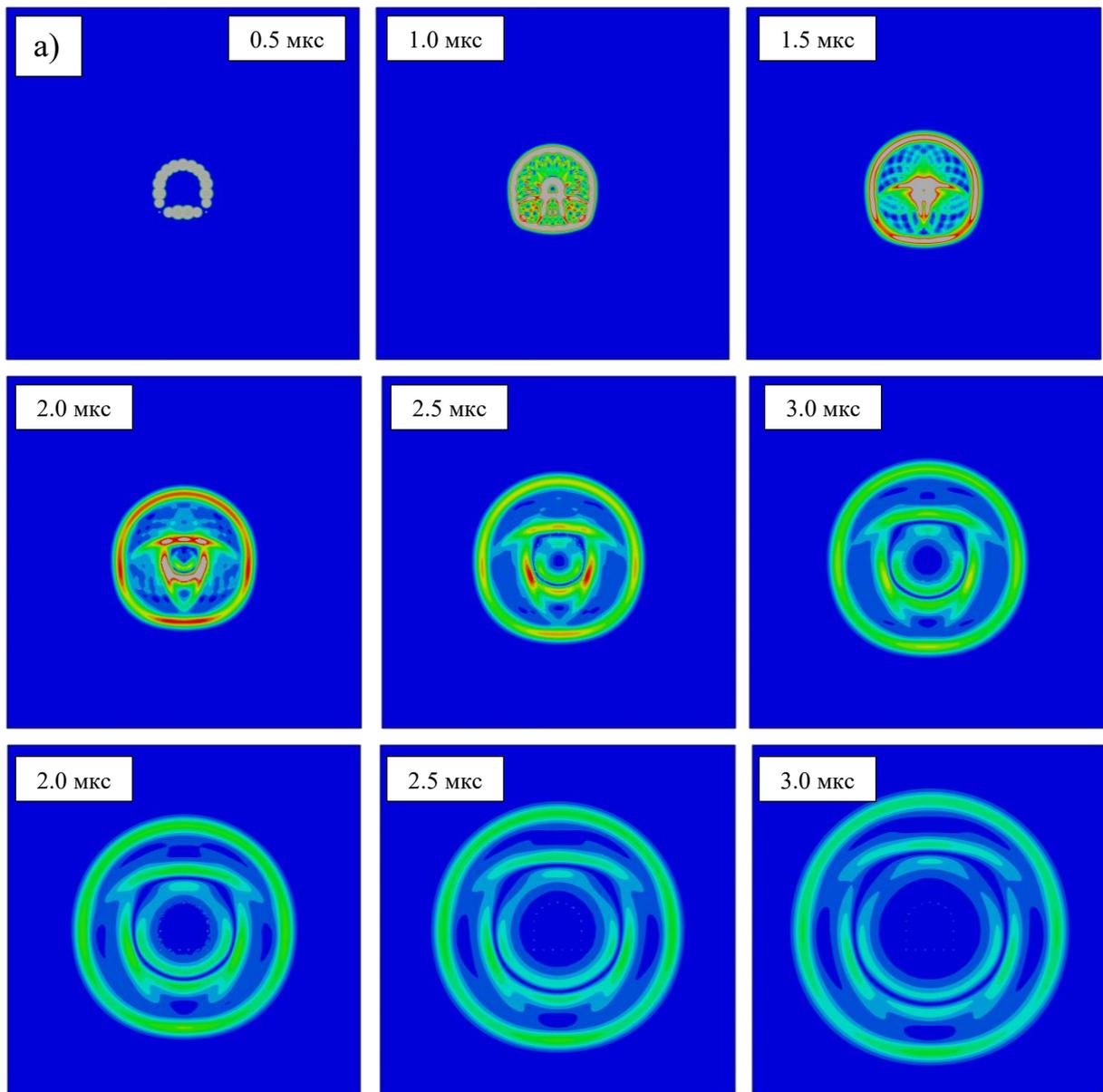


Рисунок 3.13 – Развитие пиковых скоростей перемещения частиц пород (м/сек) по мере удаления от источника взрыва: а – картина скоростей перемещений частиц породы; б – диаграмма развития скоростей смещений частиц породы в характерной точке; в – смещение частиц породы в характерной точке.

Как видно из представленных эпюр, на начальном этапе формируется несколько источников распространения сейсмических волн, которые по мере удаления от контура горной выработки соединяются в единую волну с определенной частотой колебания пород и скоростью перемещения частиц породного массива. Установлено, что на расстоянии 5 м от контура горной выработки, завершается формирование единой сейсмической волны.

Определить минимальный размер зоны разрушенных пород взрывом, за пределами которой можно считать, что распространяются только упругие волны и все еще происходят разрушения, возможно по следующей формуле 3.40, приняв, что скорость перемещения частиц породы равно 1 м/с:

$$R_{ppv} = 0.846\sqrt{Q}, \quad (3.40)$$

где  $Q$  – масса одновременно взрываемого взрывчатого вещества.

Величины  $R_{ppv}$  для характерной массы одновременно взрываемого ВВ от 1 до 25 кг в одном источнике взрыва позволяет установить, что размер зоны разрушения пород от взрывного воздействия изменяется соответственно от 0.9 до 4.2 м. Анализ представленных данных показывает, что величина размера зоны разрушения пород увеличивается по мере увеличения массы, одновременно взрываемого ВВ. Таким образом, граница зоны приложения скоростей перемещения частиц породы должна быть вынесена за пределы этих зон. Необходимо отметить, что расчеты приведены для одной скважины, размер общей зоны разрушения пород в окрестности системы скважин должен определяться за счет вклада каждого отдельного взрыва в общую картину. При этом необходимо учитывать только те скважины, в которых стадии замедления взрывания ВВ совпадают. В целом можно отметить, что при ведении буровзрывных работ по проходке горной выработки, расстояние от проектного контура выработки до зоны формирования единого фронта сейсмической волны за пределами зоны разрушения пород взрывом может быть принято равным 5 м.

Скорость перемещения и величина перемещения частиц породы на рассматриваемом удалении от контура горной выработки представлена в виде диаграмм на рисунках 3.13б и 3.13в. Видно, что максимальная скорость частиц

породы достигает величины 0.6 м/с, а максимальные смещения пород 0.6 мм. Полученная эпюра развития смещений породного массива использовалась в качестве показателя  $v(t)$  для задания граничных условий в модели второго этапа.

Предложенный подход позволяет реализовать прогноз распространения сейсмических волн при произвольных параметрах сечения горной выработки и паспорта БВР, что дает возможность значительно уменьшить геометрическую размерность модели и повысить степень дискретизации расчетной области конечными элементами.

Модель второго этапа рассматривает распространение сейсмических волн от источника взрыва до контура горной выработки. С учетом значительной протяженности рассматриваемого участка, важное влияние начинает оказывать демпфирование породного массива на скорость колебания частиц породы. На основании сравнения эмпирической зависимости, характеризующей изменение скоростей смещения частиц породы по мере удаления от источника взрыва, и результатов численного моделирования, предварительно установлено, что породный массив характеризуется коэффициентом демпфирования равным 5%. Для определения фактических параметров уравнения Рэлея выполнено сопоставление результатов численного моделирования с результатами инструментальных замеров изменения скоростей смещений частиц породы на контуре горной выработки. Приняв, что коэффициент демпфирования изменяется от 2 до 5%, и выполнив расчет прогноза сейсмических волн для участка проведения инструментальных замеров, получим изменение скоростей перемещение частиц породы в диапазоне от 0.07 м/с до 0.25 м/с. Пиковая скорость смещения частиц породы по данным инструментальных замеров равна 0.067 м/с что соответствует прогнозному значению при 5% коэффициента демпфирования. Таким образом предварительно выбранное значение коэффициента демпфирования подтверждено на основании сравнения с инструментальными замерами.

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 3.14.

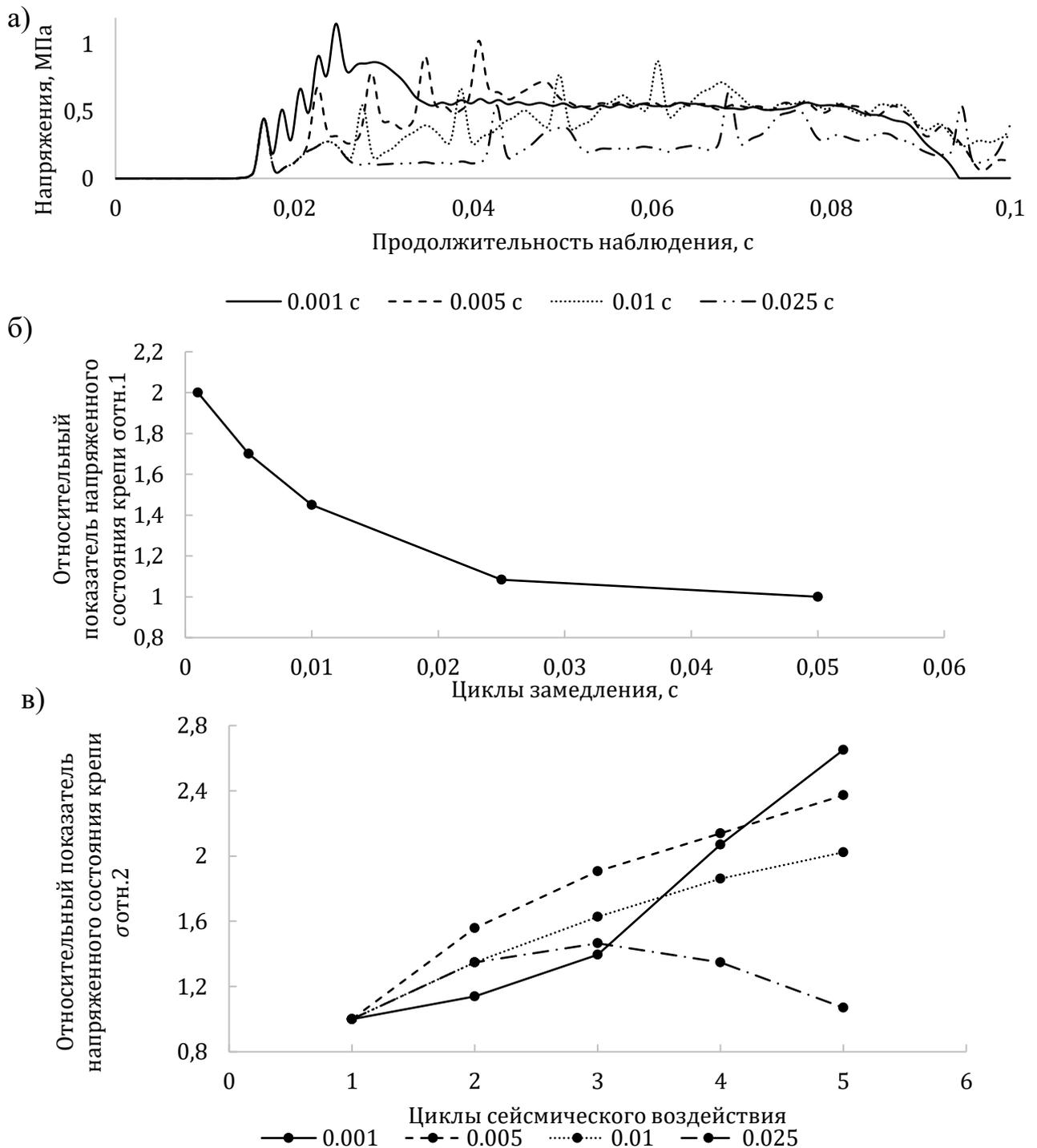


Рисунок 3.14 – Формирование напряженного состояния набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии: а – развитие напряжения в набрызгбетонной крепи во времени; б – закономерности изменения величины напряжений в крепи на конечный этап сейсмического воздействия; в – закономерности изменения величины напряжений в крепи от замедления между циклами сейсмического воздействия.

При выполнении расчетов принято, что  $v_{max}$  в области приложения граничного условия  $v(t)$  равно 1 м/с. Для оценки влияния замедления между циклами сейсмического воздействия приняты следующие стадии, равные 0.001, 0.005, 0.01 и 0.025 с. Как видно из представленных данных напряжения в набрызгбетонной крепи значительно возрастают при сейсмическом воздействии, что в целом ожидаемо. Однако, при многократном нагружении напряжения продолжают возрастать и тем они выше, чем меньше стадия замедления между взрывами. Для анализа полученных данных введем два показателя  $\sigma_{отн.1}$  и  $\sigma_{отн.2}$ . Первый показатель  $\sigma_{отн.1}$  характеризует во сколько раз увеличиваются напряжения после 5 циклов сейсмического воздействия от взрывных работ отнесенные к величине напряжения в набрызгбетонной крепи при стадии замедления 0.05 с, которую можно условно принять за граничное значение замедления, при котором наложение сейсмических волн не приводит к дополнительному росту напряжений в набрызгбетонной крепи. Вторым показателем  $\sigma_{отн.2}$  характеризует во сколько раз увеличиваются напряжения в набрызгбетонной крепи при конкретной стадии замедления относительно значения напряжения при данной стадии замедления полученного на первом цикле приложения сейсмической нагрузки. Представив полученные данные в графическом виде на рисунке 3.14а отметим, что напряженное состояние набрызгбетонной крепи при многократном приложении сейсмической нагрузки в значительной степени отличается. Так, при замедлении между взрывами равном 0.001 с напряжения увеличиваются в 2 раза, при 0.005 с в 1.7 раза, а при 0.01 с в 1.45 раза. Рост напряжений при многократном нагружении между циклами сейсмического воздействия носит нелинейный характер что наглядно видно на рисунке 3.14б, при этом характер изменения значений коэффициента  $\sigma_{отн.2}$  зависит от величины стадии замедления. Можно отметить, что при величинах замедления от 0.001 до 0.01 с в целом наблюдается увеличение напряженного состояния от цикла к циклу сейсмического воздействия, в то время как при значении замедления 0.025 с, на первых циклах сейсмического воздействия наблюдается рост напряжений, а в дальнейшем происходит падение,

что выражается в снижении коэффициента  $\sigma_{отн.2}$ . Исходя из сложности рассматриваемой задачи, достаточно трудно выделить причину такого явления, однако очевидно это связано как с формой выработки, характером сейсмического воздействия, так и с положением источника сейсмического воздействия относительно рассматриваемой горной выработки. Таким образом можно отметить, что необходимо рассматривать весь диапазон сейсмического нагружения крепи, не ограничиваясь только конечной стадией нагружения, так как величина максимальных напряжений в крепи не всегда приурочена к конечной стадии.

Развитие напряжений в набрызгбетонной крепи в упругой стадии позволяет сформировать представление о влиянии многократного сейсмического воздействия на крепь, однако такая схема идеализации крепи не позволяет оценить накопление повреждений, а также учесть перераспределение напряжений в крепи в результате изменения ее механического состояния [64,86]. Прогноз повреждений набрызгбетонной крепи, при ее рассмотрении как упругопластической среды с накоплением повреждений представлен в виде эпюр накопления повреждений, показатель которых изменяется от 0 до 1. Значение 0 означает ненарушенное состояние материала крепи, в то время как значение, равное 1 соответствует полному разрушению когезионных связей. Оценка накопления напряжений в крепи как для неармированного, так и для дисперсно-армированного набрызгбетона представлена в виде эпюр на рисунках 3.15а и 3.15б соответственно.

Как видно из представленных результатов после первого цикла сейсмического воздействия зоны повреждения достаточно активно распространяются по периметру крепи формируя набор радиальных трещин. Последующие стадии сейсмического воздействия продолжают оказывать негативное влияние на степень повреждения неармированной набрызгбетонной крепи, однако основной рост зон повреждения крепи приурочен к участку со стороны распространения сейсмической волны (в рассматриваемом случае сейсмическая волна приходит с правой стороны).

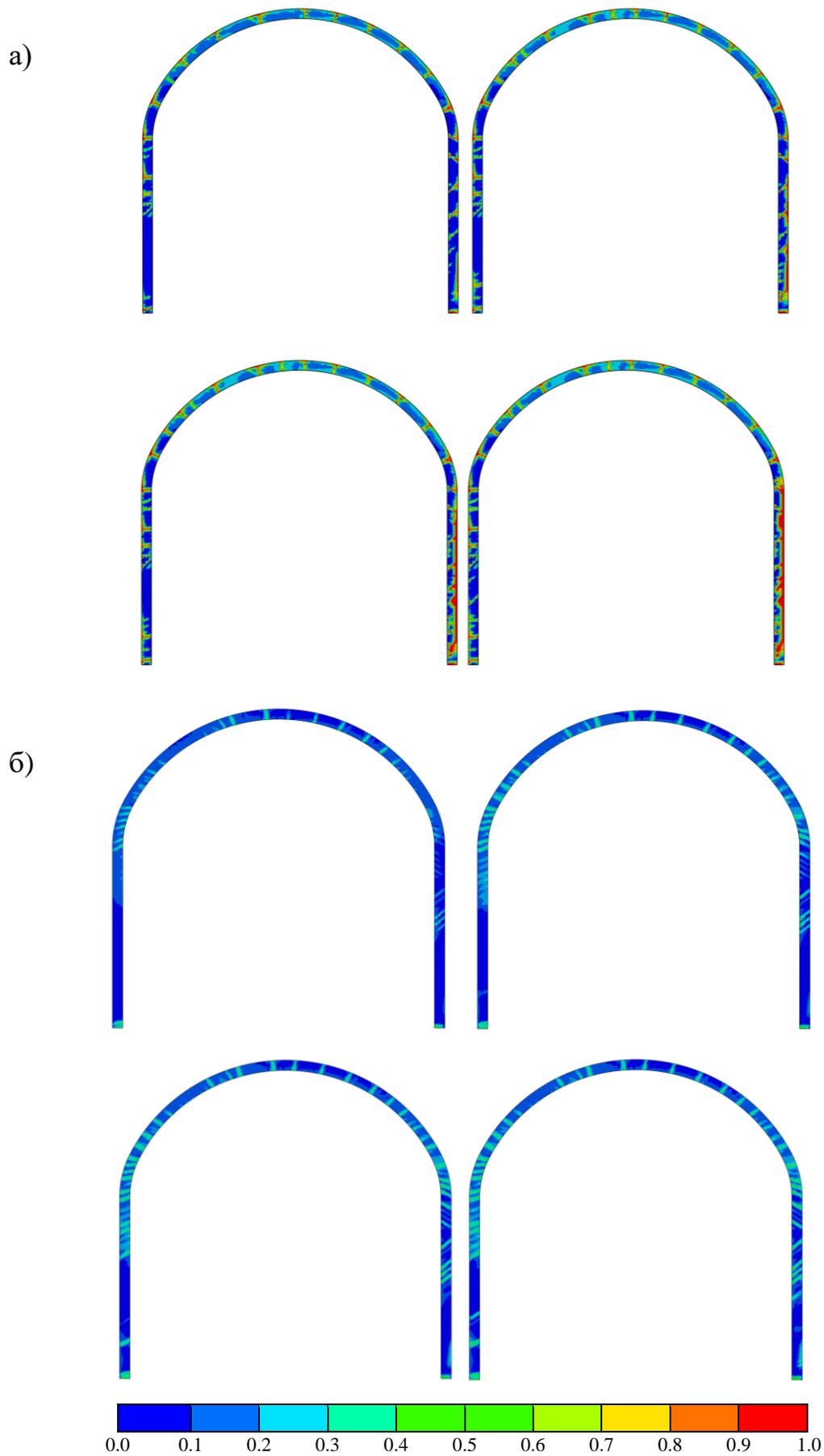


Рисунок 3.15 – Показатели повреждения нарызгбетонной крепи: а – неармированный набрызгбетон; б – дисперсно-армированный набрызгбетон.

Несколько иной характер повреждения дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи можно наблюдать по полученным результатам. Многократное сейсмическое воздействие также равномерно по периметру крепи увеличивает степень ее повреждения. Степень повреждения неармированной и дисперсно-армированной крепи в значительной степени отличается [100]. Так, неармированный набрызгбетон уже после первого цикла сейсмического воздействия получает проращение трещин и последующие циклы сейсмического воздействия значительно усиливают данный эффект, формируя зоны с показателем повреждения близким или равным 1. При рассмотрении крепи выполненной из дисперсно-армированного набрызгбетона видно, что степень повреждения крепи редко выходит за величину 0.3-0.4, а многократное нагружение не оказывает серьезного влияния на изменение этого показателя, увеличивается только зона повреждения крепи [96]. Величина повреждения 0.3-0.4 соответствует снижению прочности бетона при действии растягивающих напряжений до момента вступления фибры в работу, то есть, при рассмотрении практических расчетов в первом приближении допустимо принимать прочность набрызгбетона с учетом ее снижения на 30-40%.

Необходимо отметить, что расположение источника сейсмического воздействия относительно горной выработки в значительной степени изменяет характер повреждения. Так например при расположении источника сейсмического воздействия над сводом горной выработки, наблюдается формирование отдельных локальных зон повреждения набрызгбетонной крепи, а не распространение их по всему периметру. Это связано с особенностями характера деформирования крепи при прохождении сейсмических волн. Данный вопрос в представленной работе детально не рассматривается, так как требует отдельного направленного изучения и осмысления.

### **3.5.2. Результаты оценки влияния способа разработки месторождения на формирование НДС набрызгбетонной крепи и породного массива**

Результаты расчетов смещений части контура выработок от влияния массовых взрывов представлены:

- в виде эпюр скоростей смещений частиц породы (массовых скоростей):
  - схема 1, со ступенями замедления на рисунках 3.16 - 3.19;
  - схема 1, без ступеней замедления на рисунке 3.25-3.26;
  - схема 2, со ступенями замедления на рисунках 3.32 – 3.35;
  - схема 2, без ступеней замедления на рисунке 3.44 – 3.45.
- в виде диаграмм смещений контура горных выработок:
  - схема 1, со ступенями замедления на рисунках 3.20 – 3.22;
  - схема 1, без ступеней замедления на рисунках 3.27 – 3.28;
  - схема 2, со ступенями замедления на рисунках 3.36 – 3.39;
  - схема 2, без ступеней замедления на рисунках 3.46 – 3.49.

Дополнительно приведены результаты повреждения набрызгбетонной крепи в виде:

- контуров распределения повреждений:
  - схема 1, со степенями замедления на рисунке 3.23;
  - схема 1, без степеней замедления на рисунках 3.29 - 3.30;
  - схема 2, со степенями замедления на рисунках 3.40 – 3.42;
  - схема 2, без степеней замедления на рисунках 3.50 – 3.54.
- диаграмм развития максимальных повреждений крепи во времени на рисунках 3. 24, 3.31, 3.43, 3.55.

**Первая схема (четыре степени замедления).**

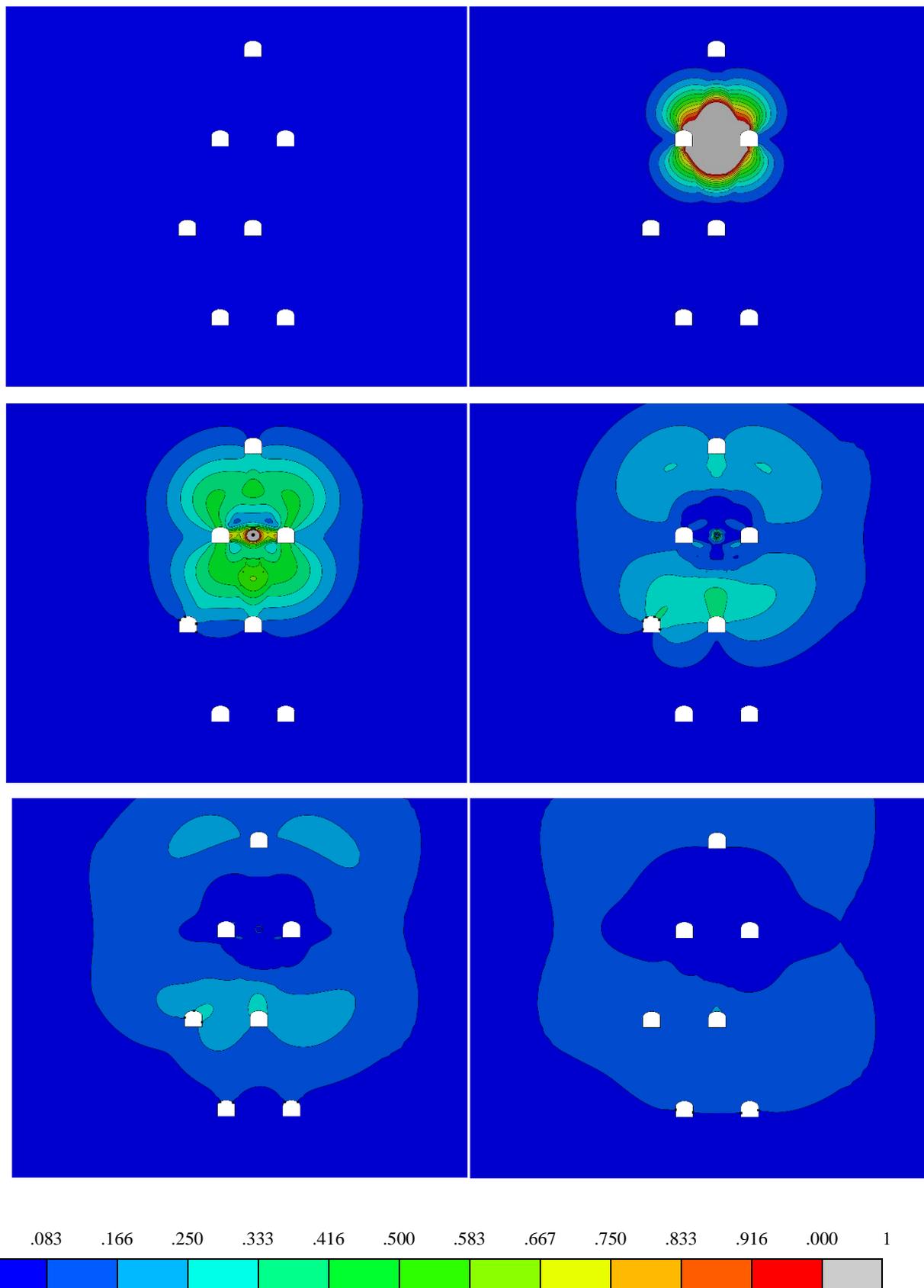


Рисунок 3.16 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (первая серия замедления, промежуток времени 0.0 – 12.5 мс): а – в момент времени 0.0 мс; б – момент времени 2.5 мс; в – в момент времени 5.0 мс; г – в момент времени 7.5 мс; д – в момент времени 10.0 мс; е – в момент времени 12.5 мс.

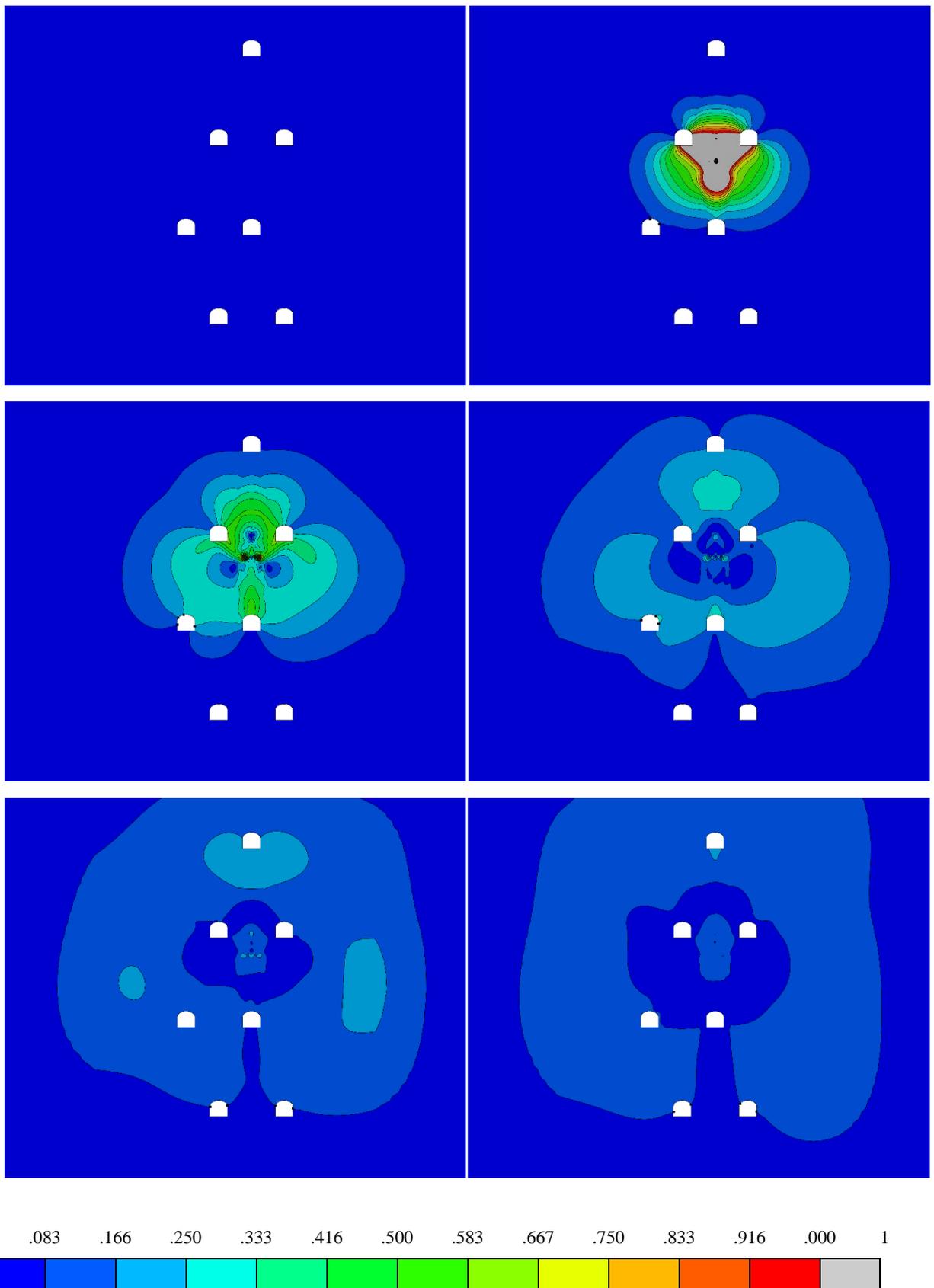


Рисунок 3.17 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (вторая серия замедления, промежуток времени 25.0 – 37.5 мс): а – в момент времени 25.0 мс; б – момент времени 27.5 мс; в – в момент времени 30.0 мс; г – в момент времени 32.5 мс; д – в момент времени 35.0 мс; е – в момент времени 37.5 мс.

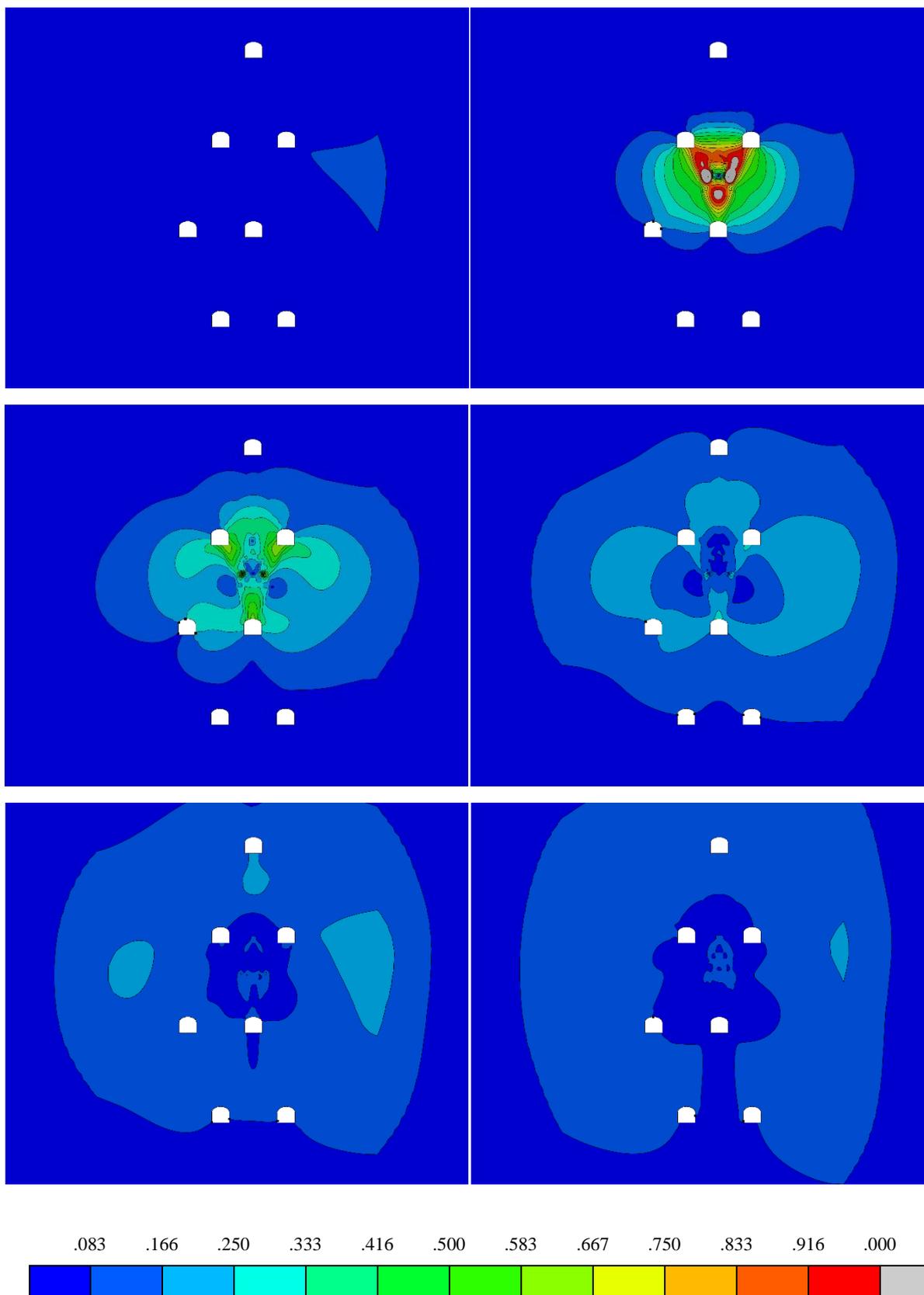


Рисунок 3.18 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (третья серия замедления, промежуток времени 50.0 – 62.5 мс): а – в момент времени 50.0 мс; б – момент времени 52.5 мс; в – в момент времени 55.0 мс; г – в момент времени 57.5 мс; д – в момент времени 60.0 мс; е – в момент времени 62.5 мс.

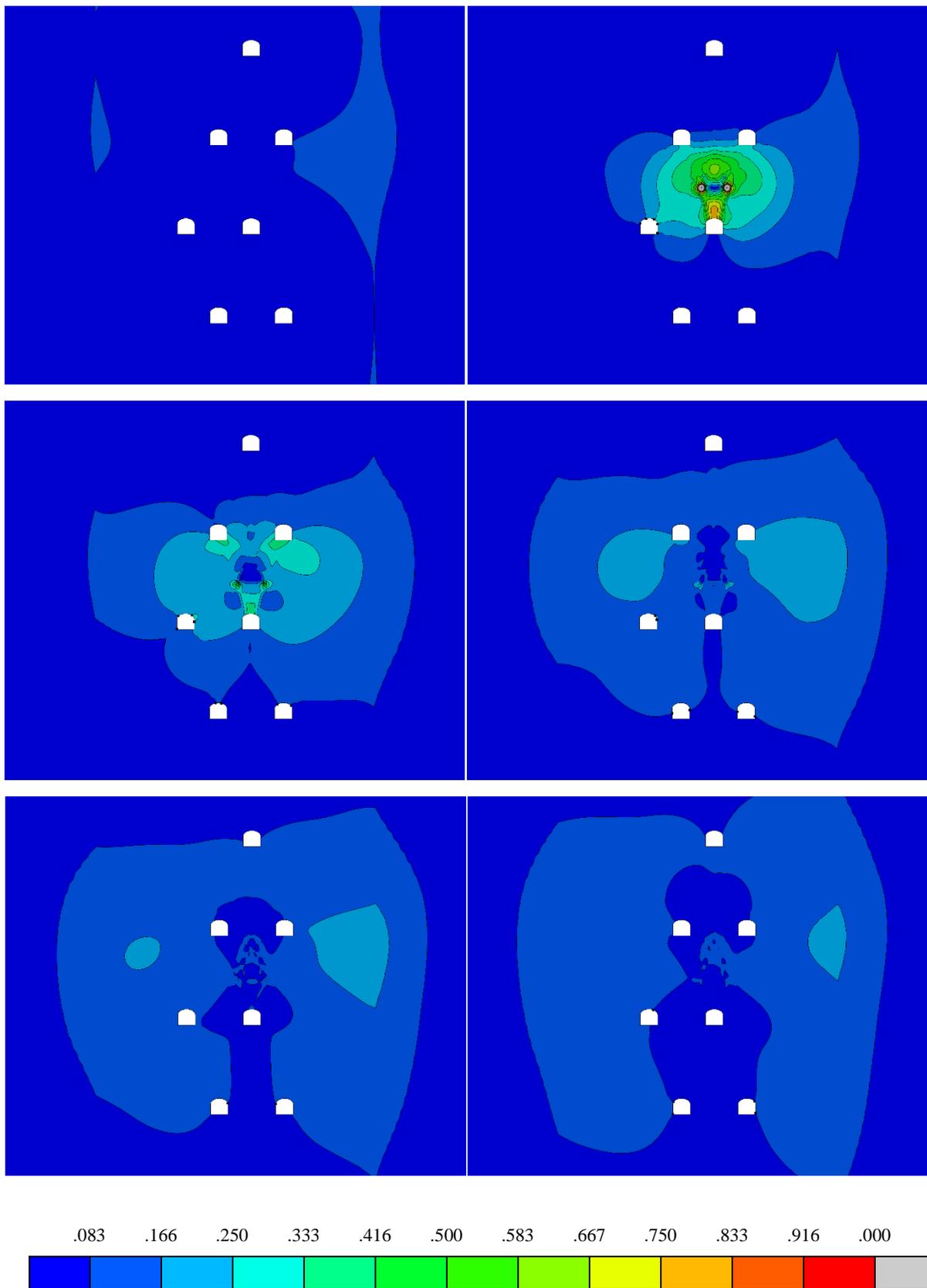


Рисунок 3.19 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (четвертая серия замедления, промежуток времени 75.0 – 82.5 мс): а – в момент времени 75.0 мс; б – момент времени 72.5 мс; в – в момент времени 75.0 мс; г – в момент времени 77.5 мс; д – в момент времени 80.0 мс; е – в момент времени 82.5 мс.

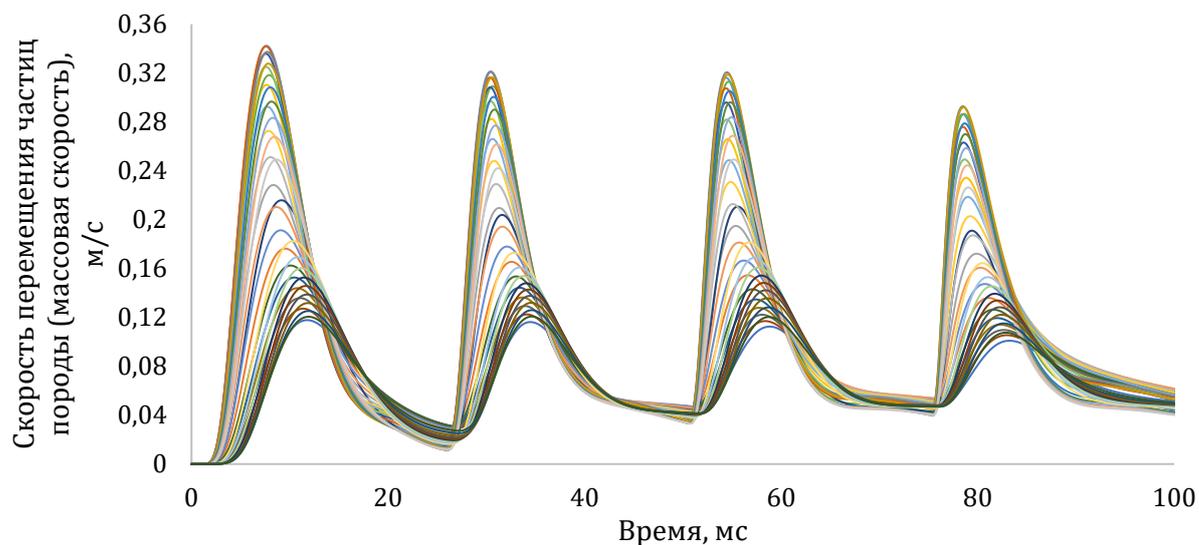


Рисунок 3.20 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №1, схема 1)

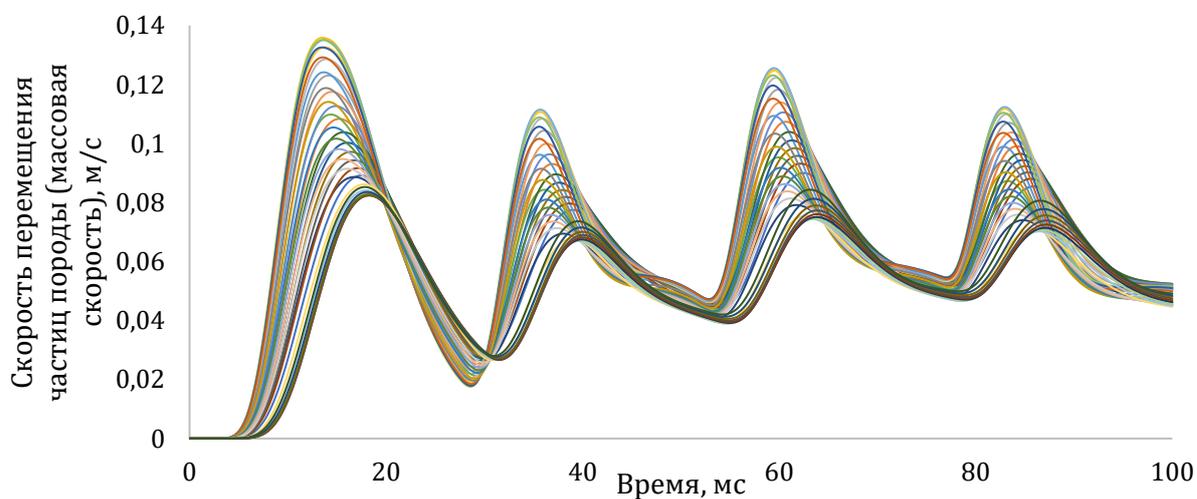


Рисунок 3.21 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №2, схема 1)

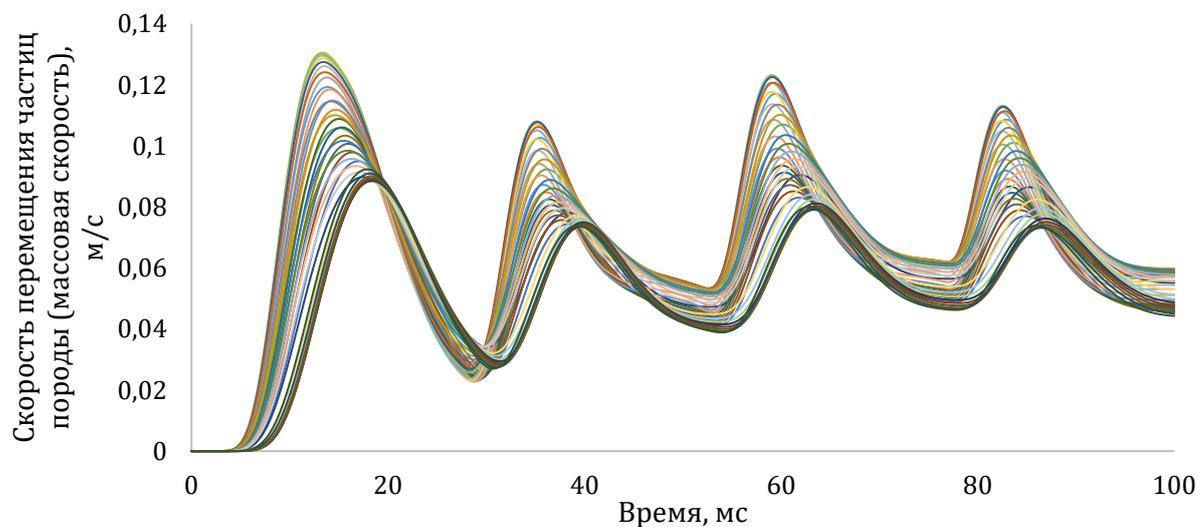


Рисунок 3.22 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №3, схема 1)

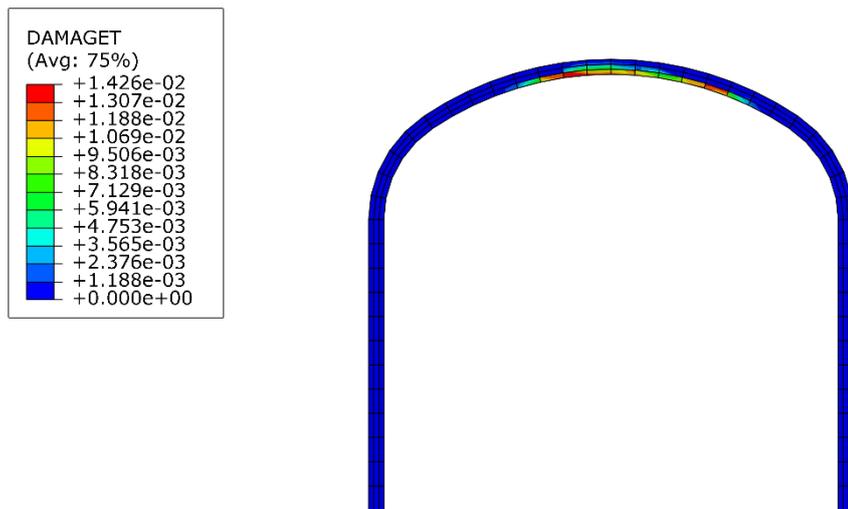


Рисунок 3.23 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №1, взрывание с 4 степенями замедления по 25 мс, расположение выработки см. раздел 3.4.2 схема 1)

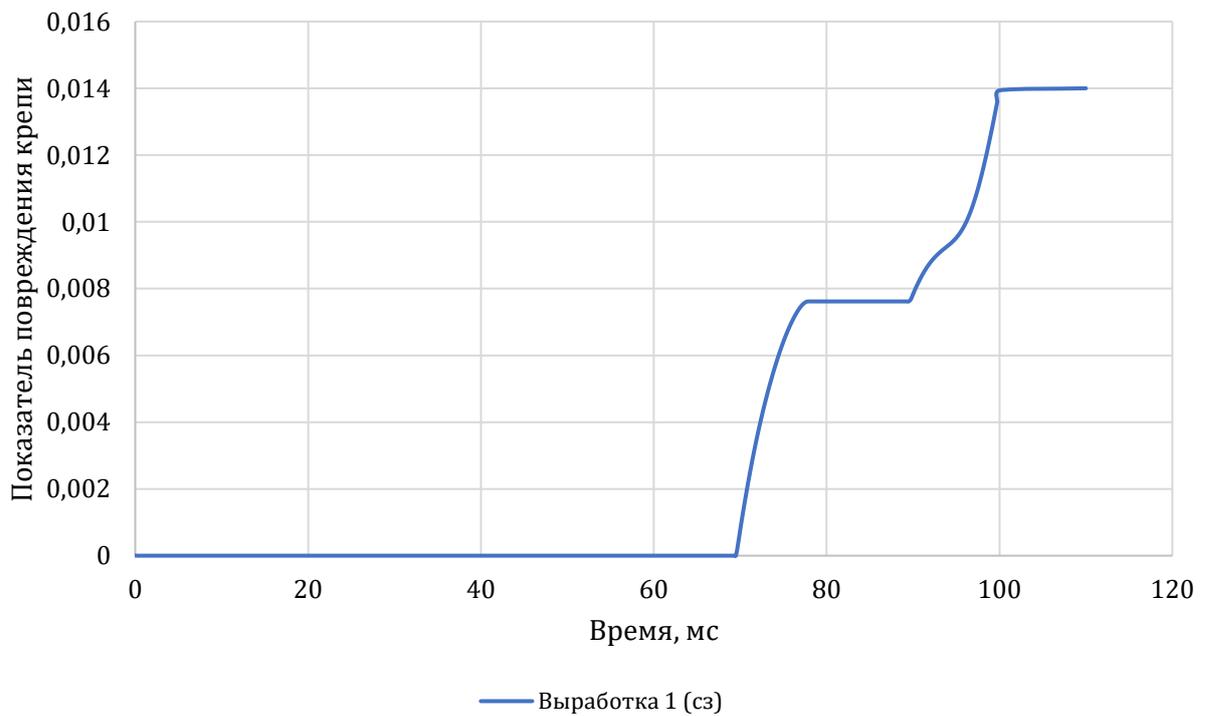


Рисунок 3.24 – Развитие повреждения набрызгбетонной крепи при массовом взрыве (усреднённые показатели) (схема 1)

**Первая схема (одна стадия замедления).**

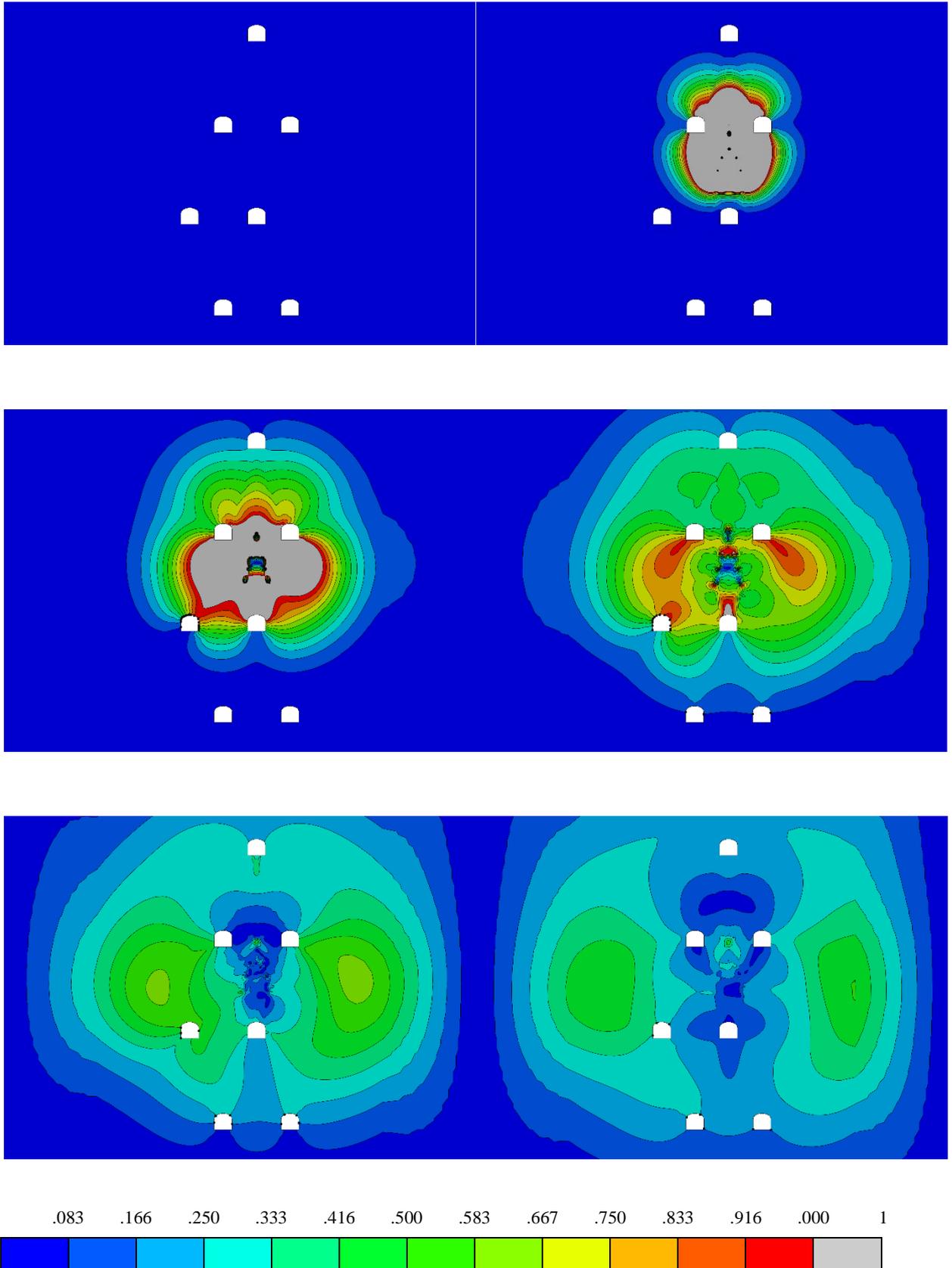


Рисунок 3.25 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (промежуток времени 0.0 – 15.0 мс): 1 – в момент времени 0.0 мс; 2 – момент времени 2.5 мс; 3 – в момент времени 5.0 мс; 4 – в момент времени 7.5 мс; 5 – в момент времени 10.0 мс; 6 – в момент времени 12.5 мс; 7 – в момент времени 15.0 мс;

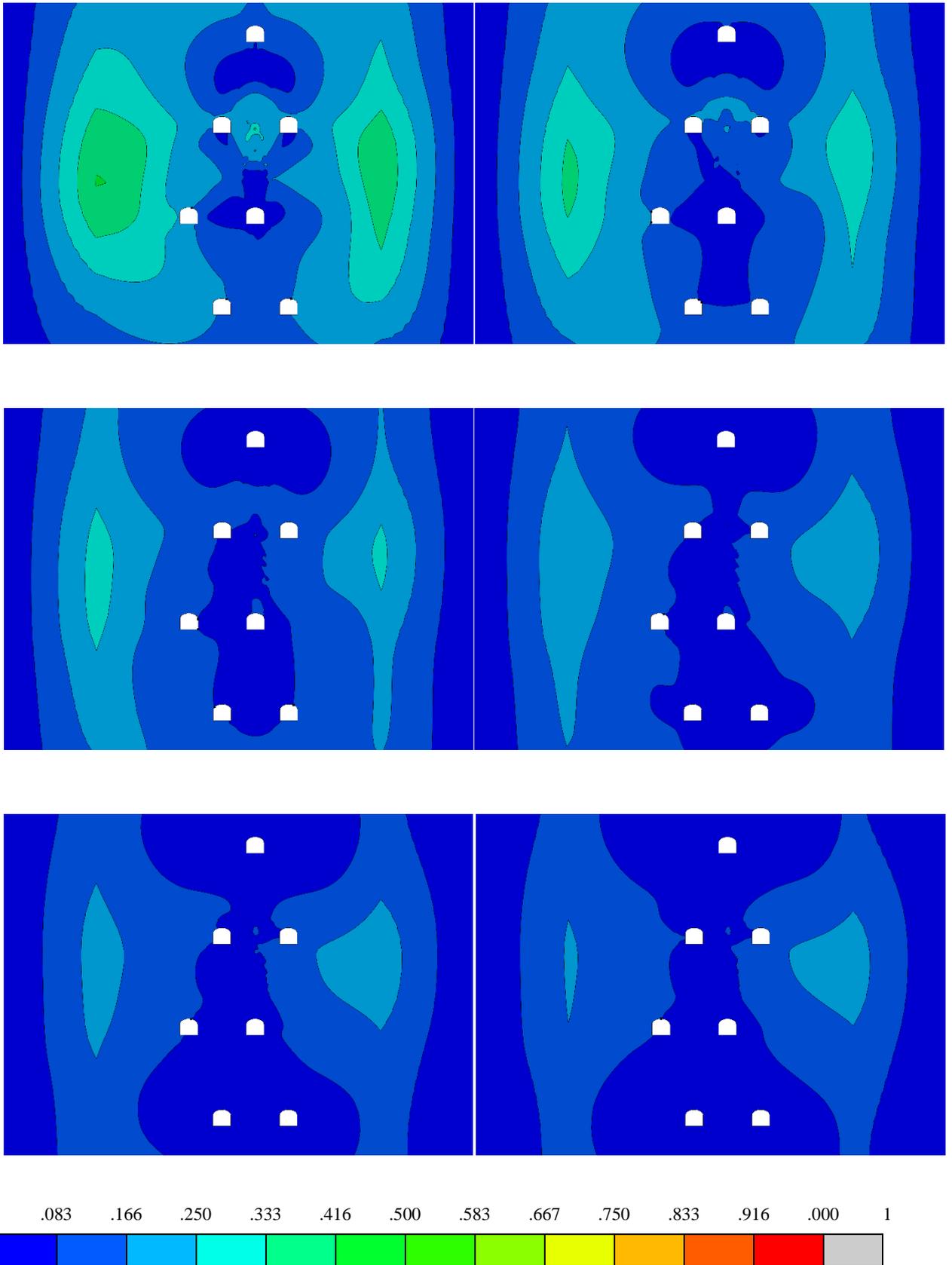


Рисунок 3.26 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (промежуток времени 17.5 – 27.5 мс; 8 – в момент времени 17.5 мс; 9 – в момент времени 20.0 мс; 10 – в момент времени 22.5 мс; 11 – в момент времени 25.0 мс; 12 – в момент времени 27.5 мс).

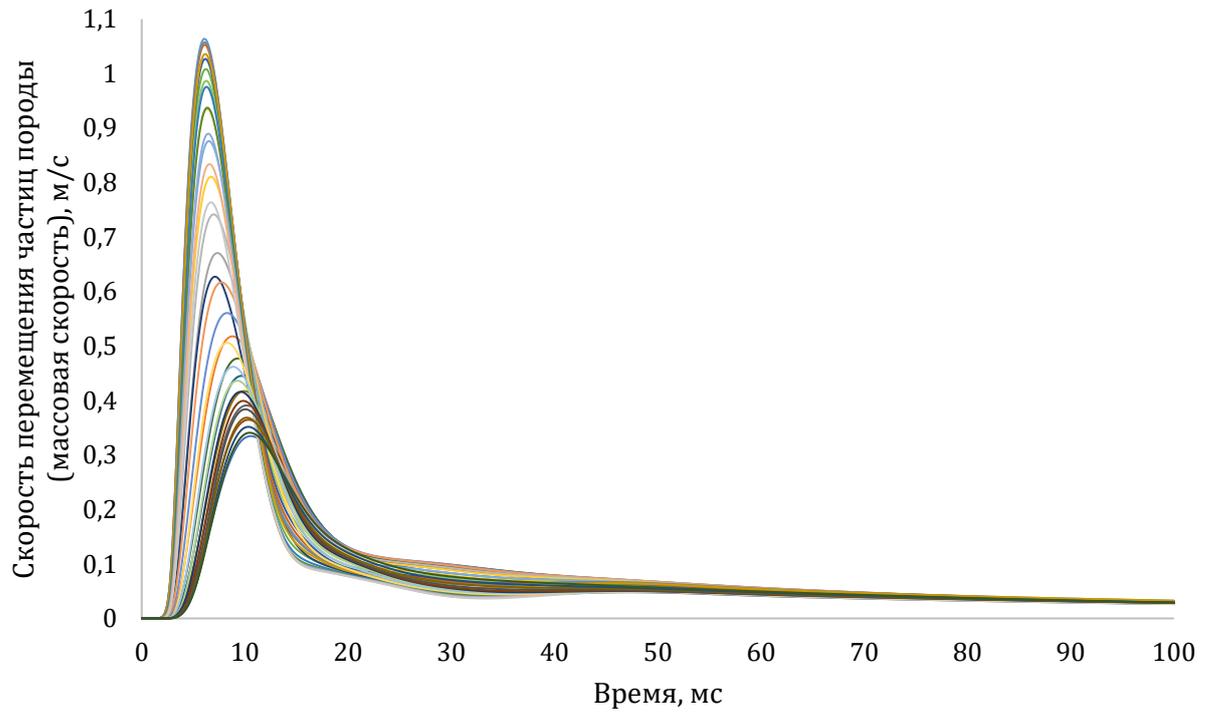


Рисунок 3.27 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №1, схема 1)

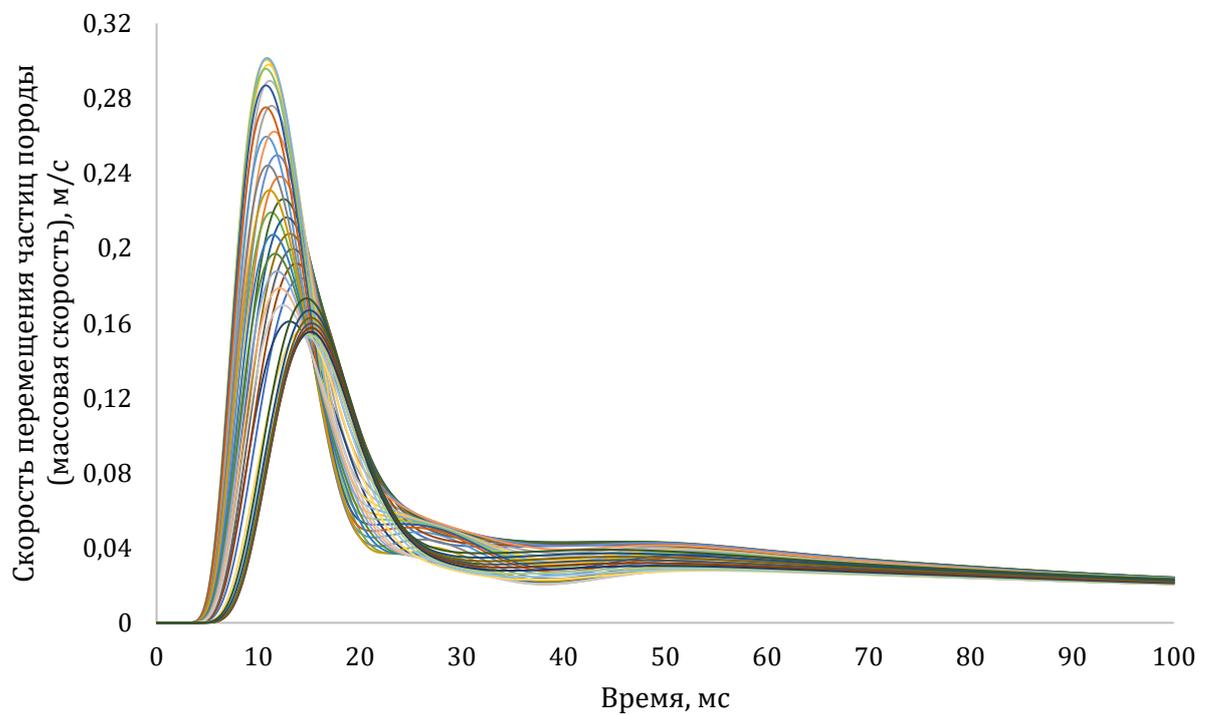


Рисунок 3.28 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №2, схема 1)

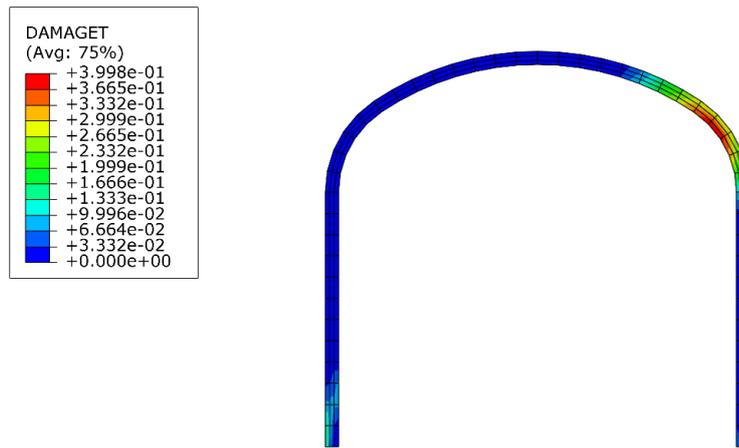


Рисунок 3.29 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №1, взрывание с 4 степенями замедления по 25 мс, схема 1)

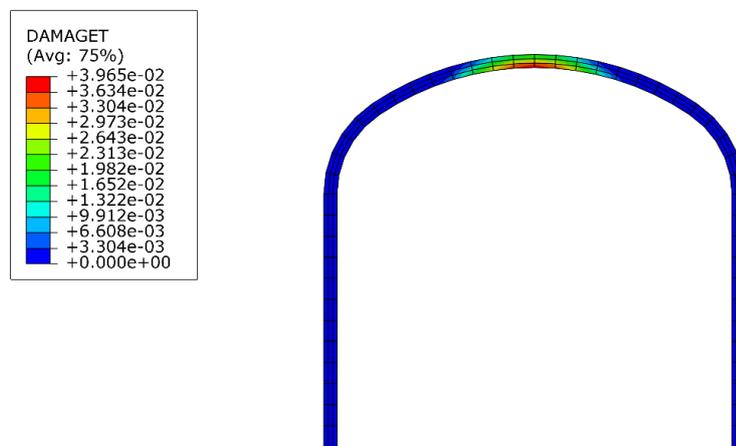


Рисунок 3.30 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №2, взрывание с 4 степенями замедления по 25 мс, схема 1)

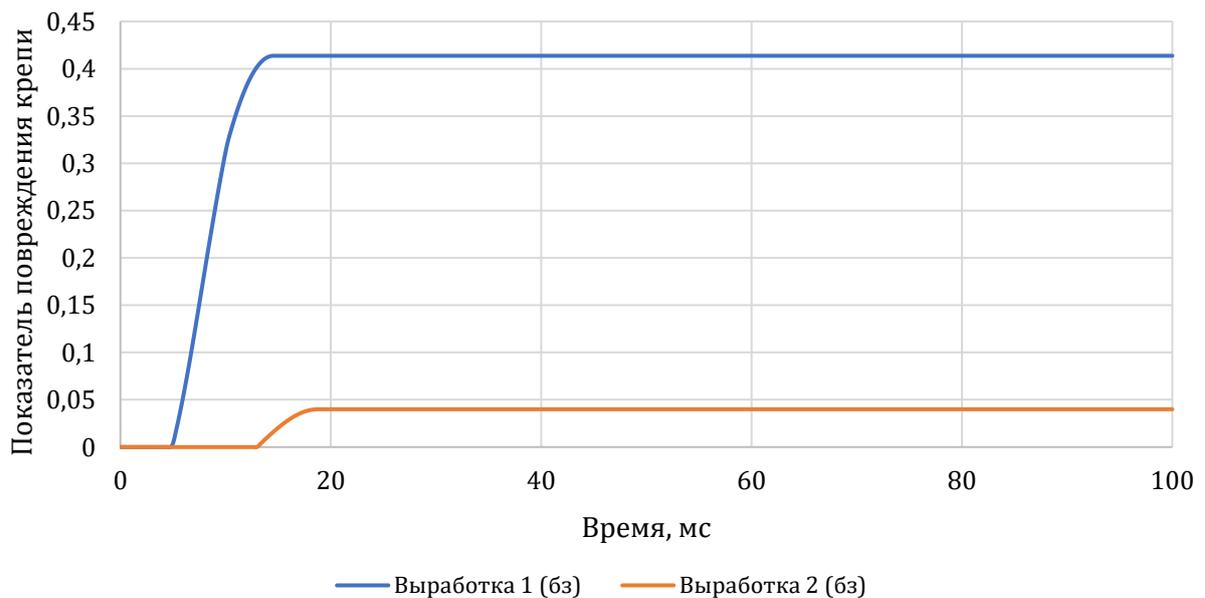


Рисунок 3.31 – Развитие повреждения набрызгбетонной крепи при массовом взрыве (схема 1)

**Вторая схема (четыре степени замедления).**

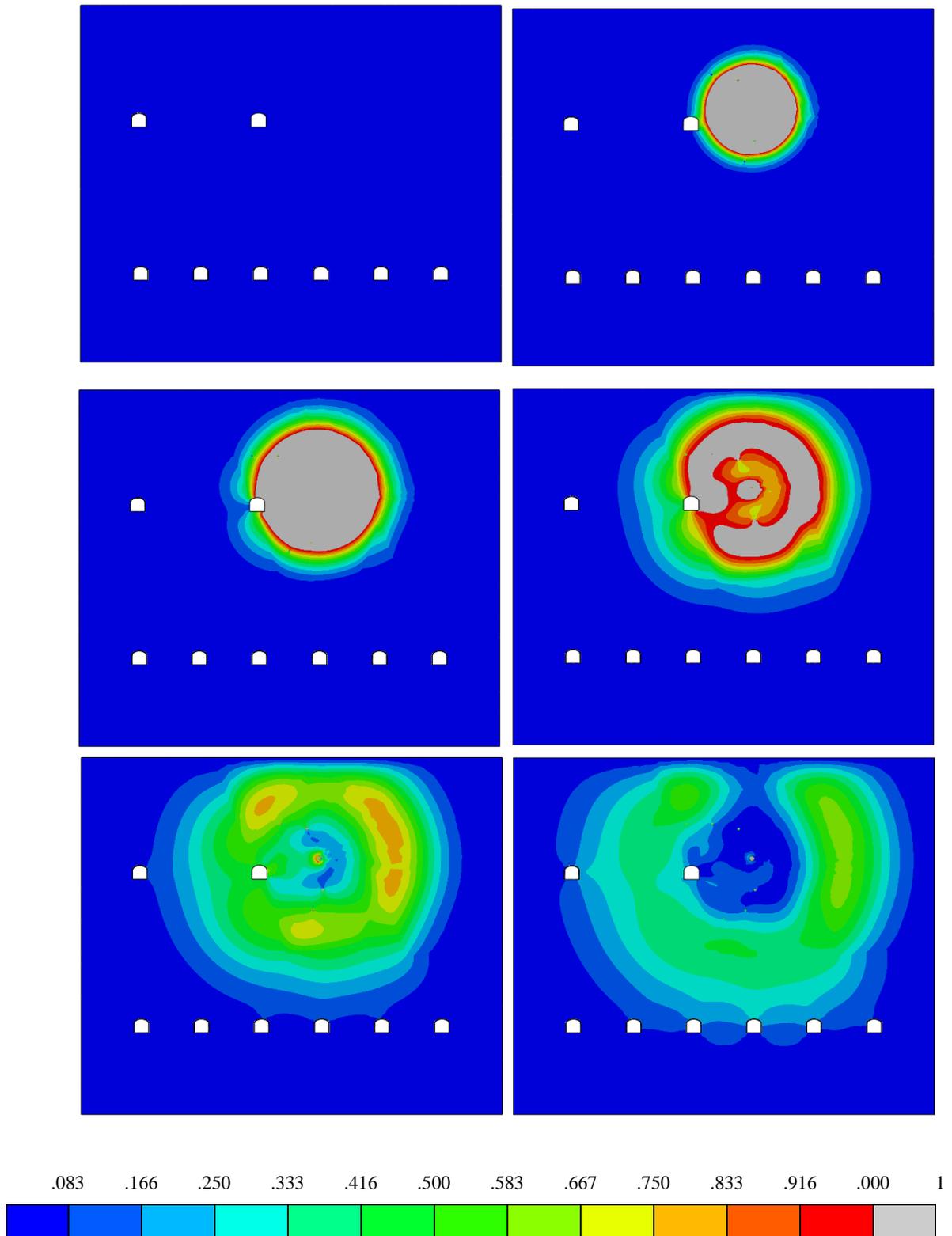


Рисунок 3.32 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (первая серия замедления, промежуток времени 0.0 – 12.5 мс): а – в момент времени 0.0 мс; б – момент времени 2.5 мс; в – в момент времени 5.0 мс; г – в момент времени 7.5 мс; д – в момент времени 10.0 мс; е – в момент времени 12.5 мс.

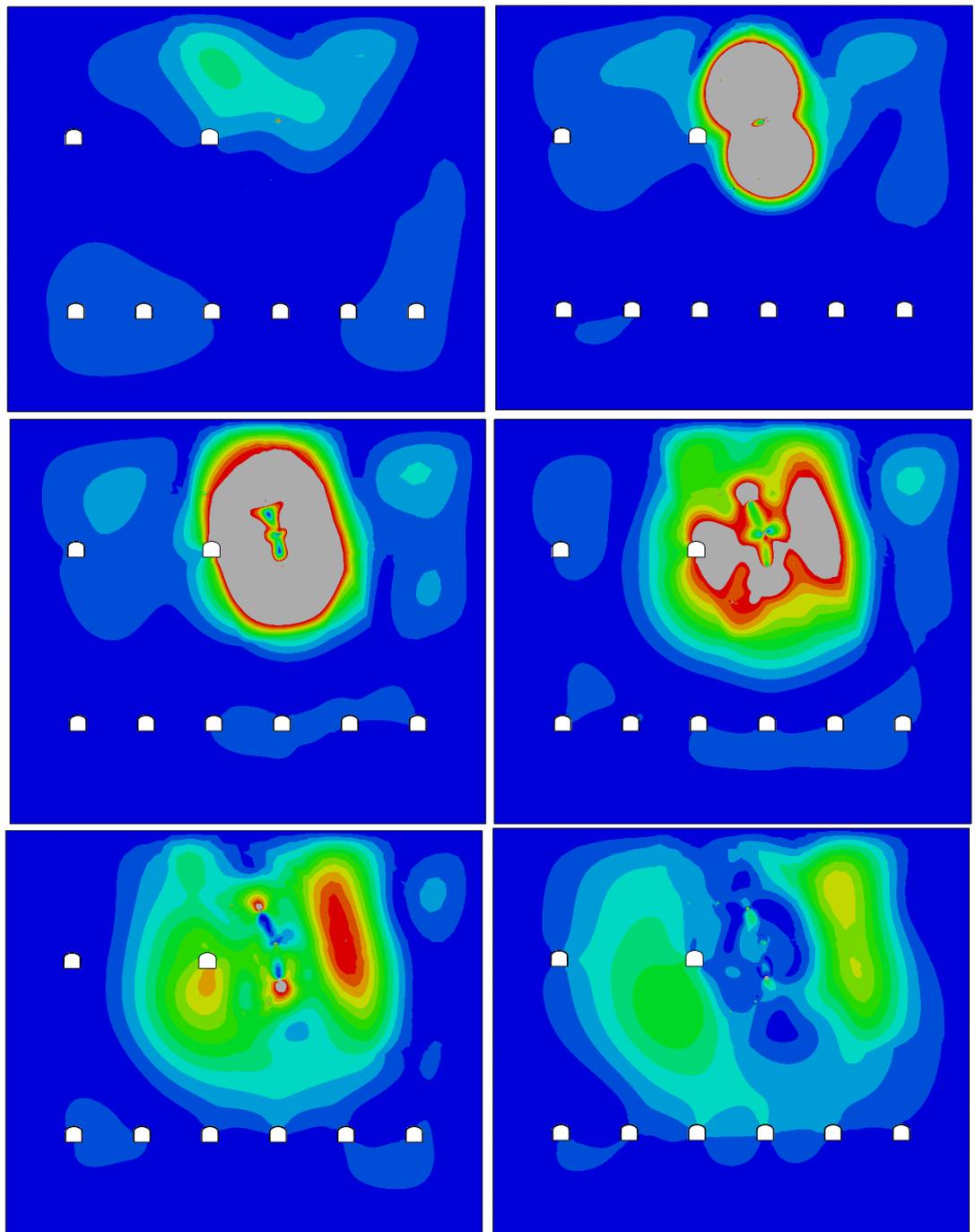


Рисунок 3.33 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (вторая серия замедления, промежуток времени 25.0 – 37.5 мс): а – в момент времени 25.0 мс; б – момент времени 27.5 мс; в – в момент времени 30.0 мс; г – в момент времени 32.5 мс; д – в момент времени 35.0 мс; е – в момент времени 37.5 мс.

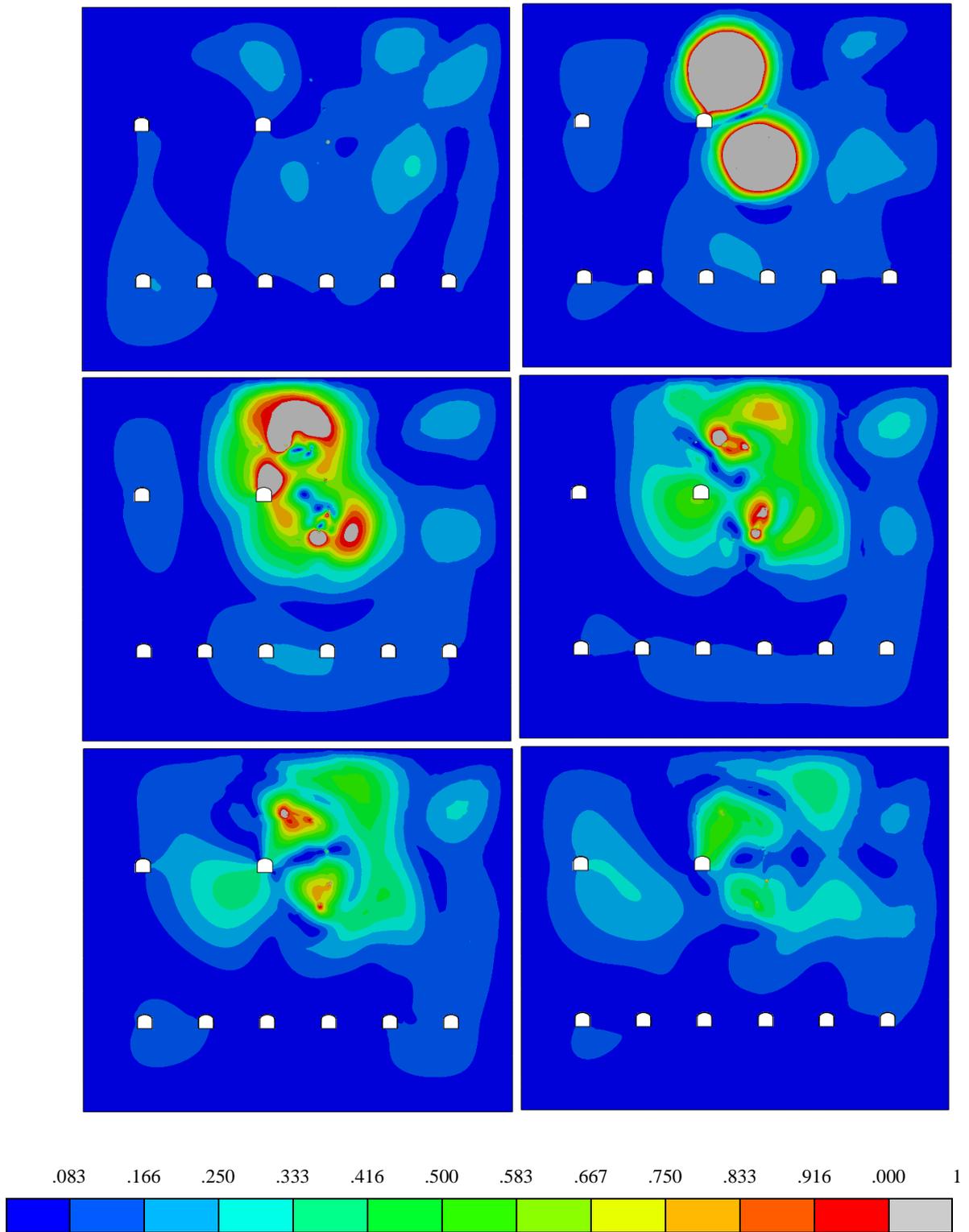


Рисунок 3.34 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (третья серия замедления, промежуток времени 50.0 – 62.5 мс): а – в момент времени 50.0 мс; б – момент времени 52.5 мс; в – в момент времени 55.0 мс; г – в момент времени 57.5 мс; д – в момент времени 60.0 мс; е – в момент времени 62.5 мс.

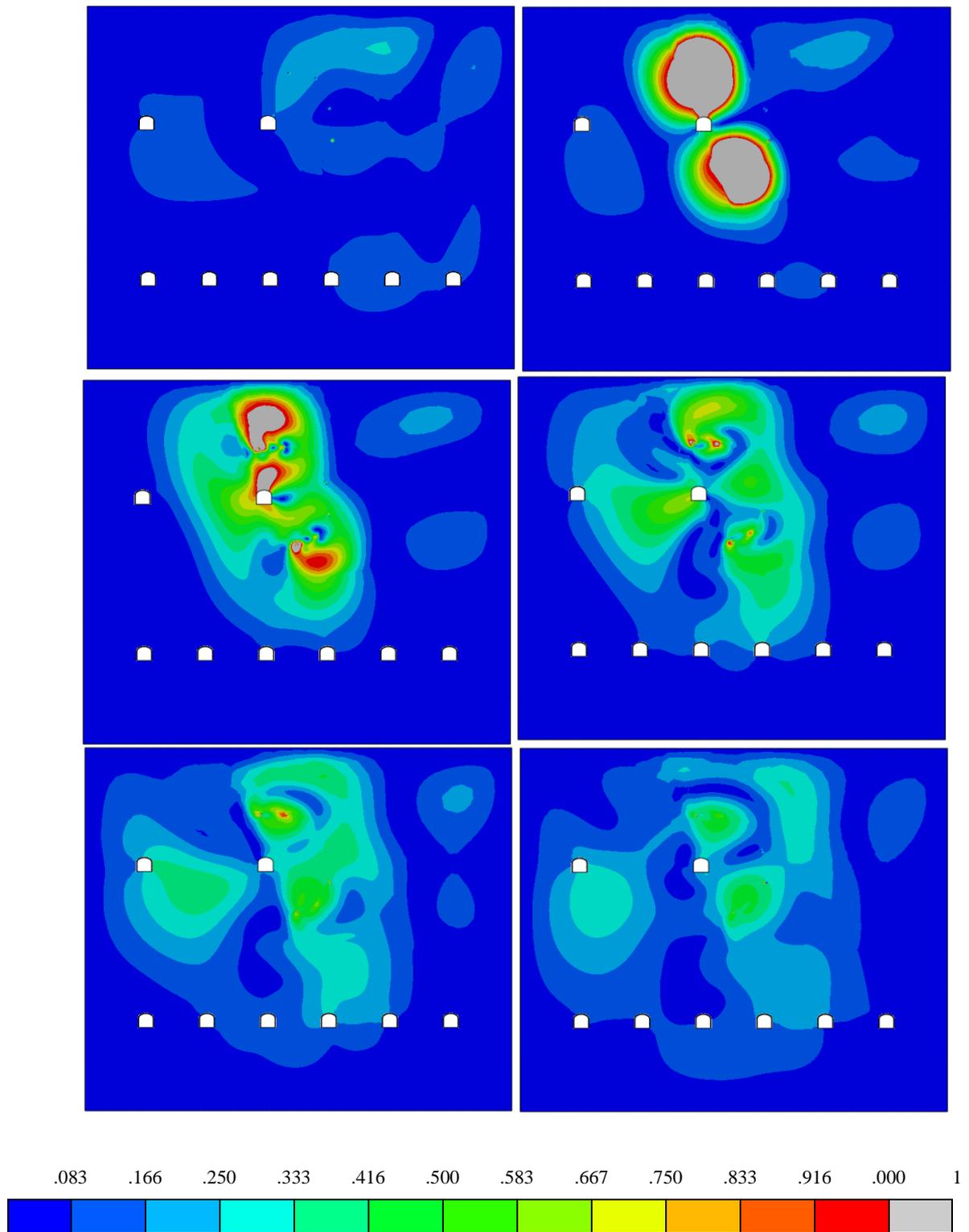


Рисунок 3.35 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы (м/с) (четвертая серия замедления, промежуток времени 75.0 – 82.5 мс): а – в момент времени 75.0 мс; б – момент времени 72.5 мс; в – в момент времени 75.0 мс; г – в момент времени 77.5 мс; д – в момент времени 80.0 мс; е – в момент времени 82.5 мс.

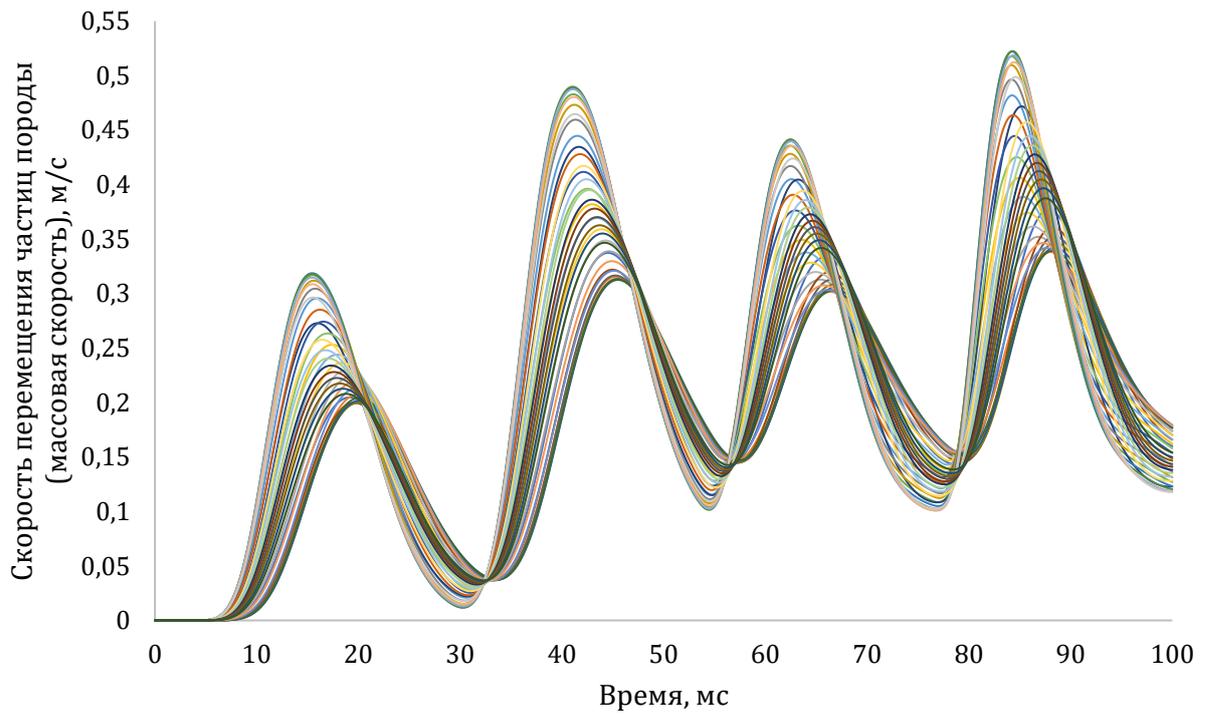


Рисунок 3.36 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №1, схема 2)

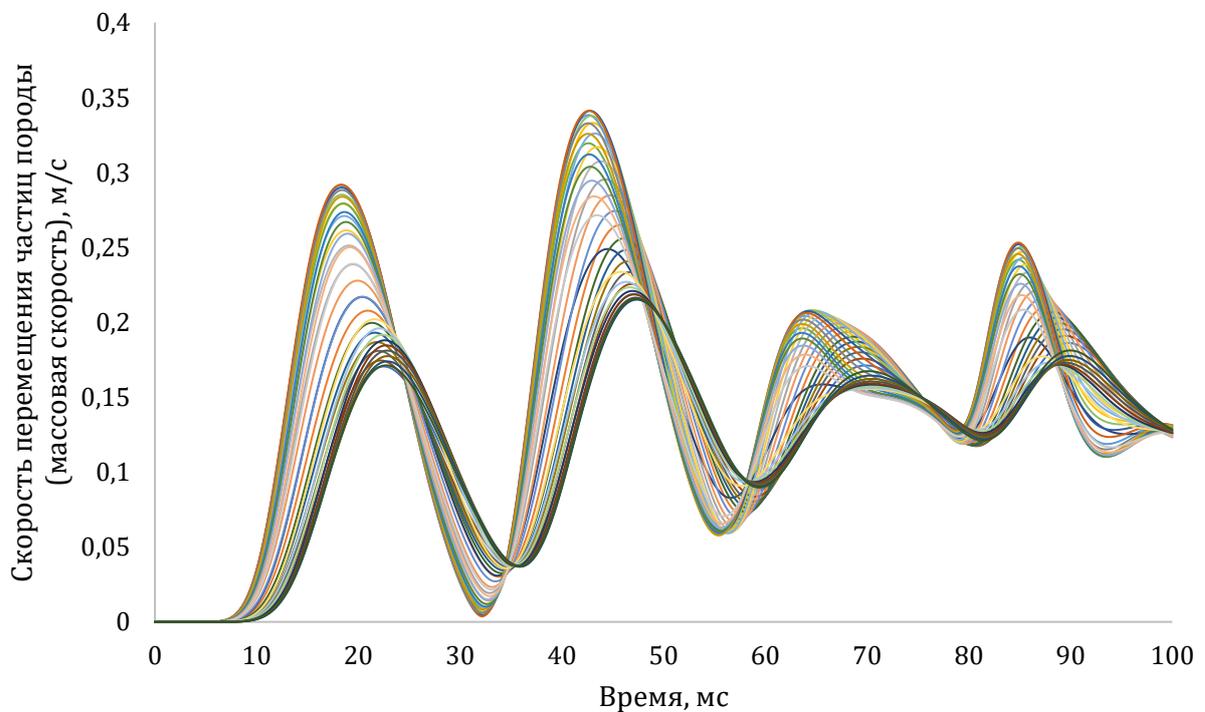


Рисунок 3.37 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №3, схема 2)

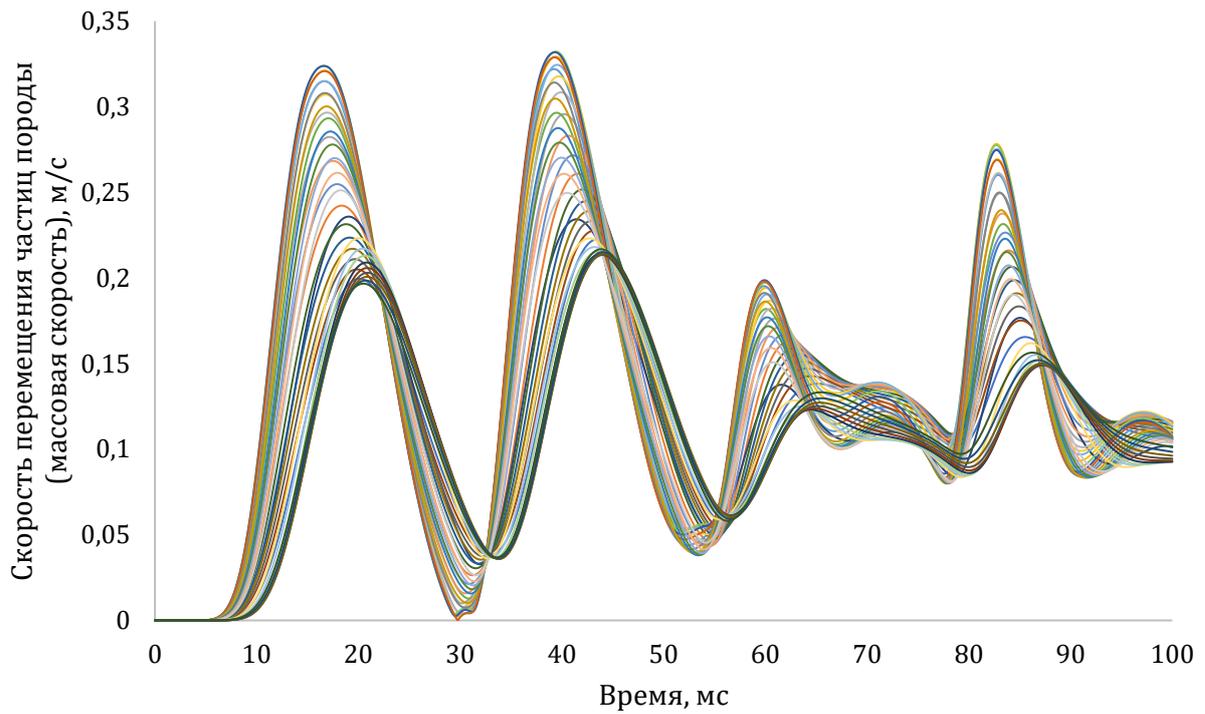


Рисунок 3.38 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №4, схема 2)

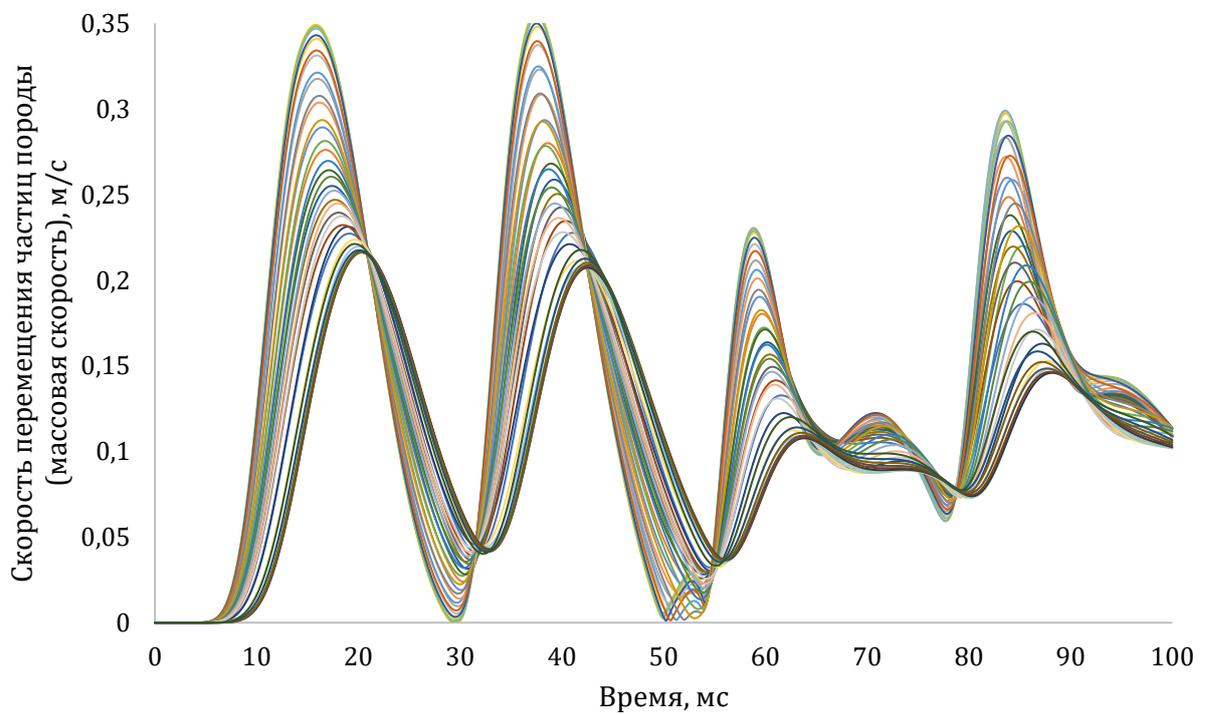


Рисунок 3.39 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №5, схема 2)

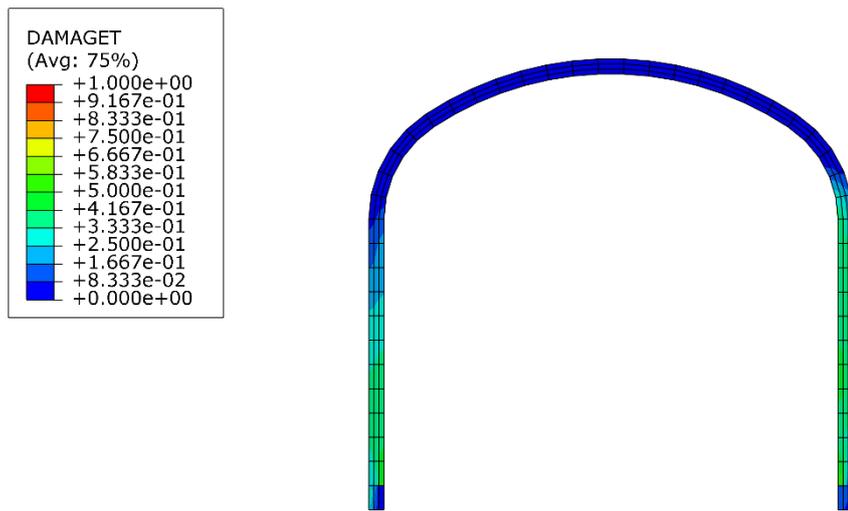


Рисунок 3.40 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №1, взрывание без степеней замедления, схема 2)

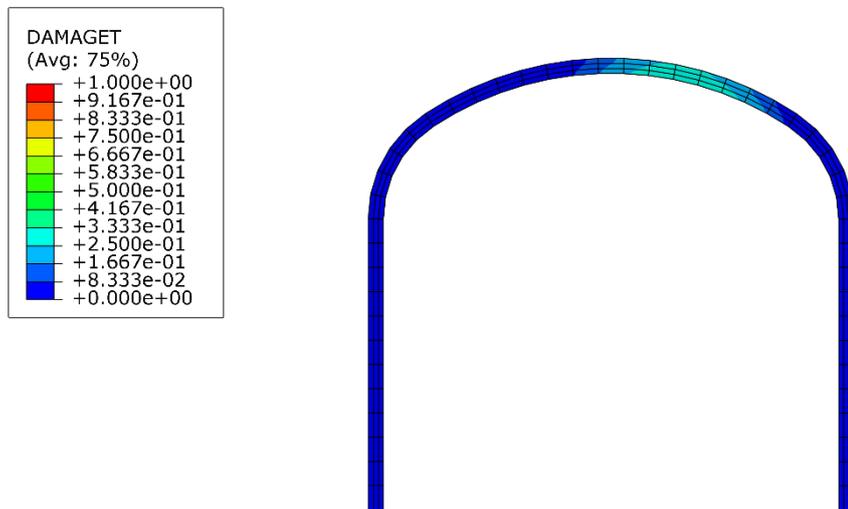


Рисунок 3.41 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №4, взрывание без степеней замедления, схема 2)

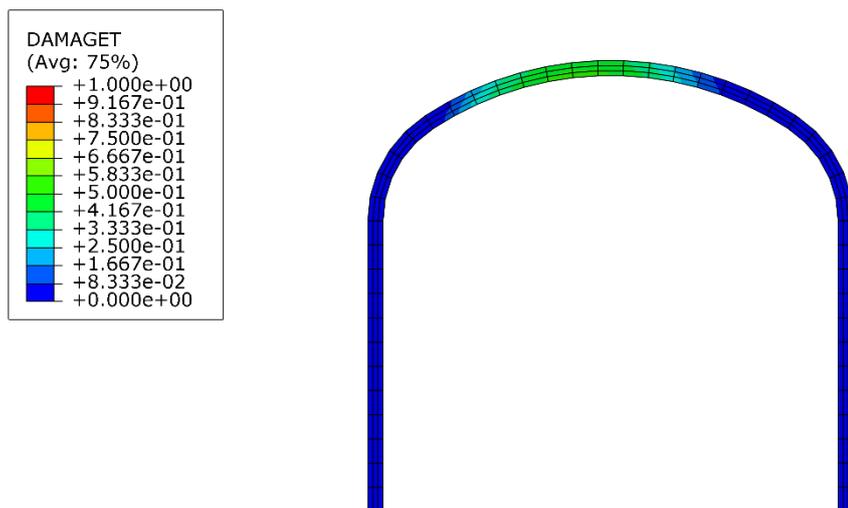


Рисунок 3.42 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №5, взрывание без степеней замедления, схема 2)

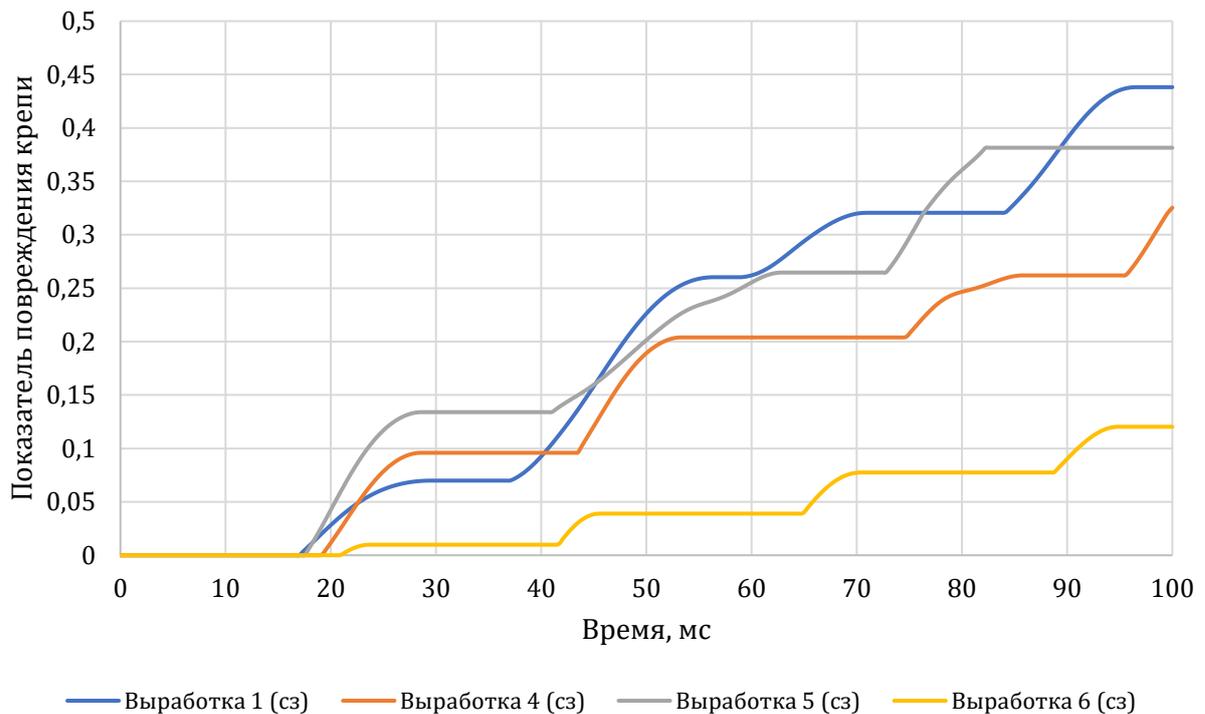


Рисунок 3.43 – Развитие повреждения набрызгбетонной крепи при массовом взрыве (схема 2)

Величина повреждений набрызгбетонной крепи для схемы №1 разительно отличается при взрывании со степенями замедления и при выполнении массового взрыва без степеней замедления. Так, показатель повреждения для выработки №1 соответственно равен 0.014 и 0.41. Другая картина наблюдается при оценке повреждения крепи при осуществлении массового взрыва по схеме №2. В целом, величина повреждений набрызгбетонной крепи выше при выполнении массового взрыва без степеней замедления, однако разница уже не столь существенна и составляет 25-45% по отношению к выполнению массового взрыва со степенями замедления. Сравнения результаты повреждения набрызгбетонной крепи по первой и второй схемам выполнения массовых взрывов можно отметить, что в целом, степень повреждения набрызгбетонной крепи, полученная по первой схеме меньше. Если исключить выработки, которые располагаются в одном уровне с массовым взрывом (выработка №1) и рассмотреть выработки, расположенные непосредственно под разрушаемым участком, то тогда величина повреждения по первой схеме варьируется от 0 до 0.039, в то время как повреждения крепью получаемые при выполнении массовых взрывов по второй схеме составляют от 0 до 0.66.

**Вторая схема (без степеней замедления).**

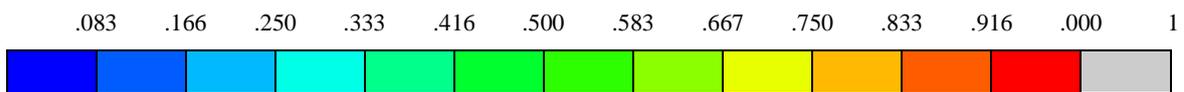
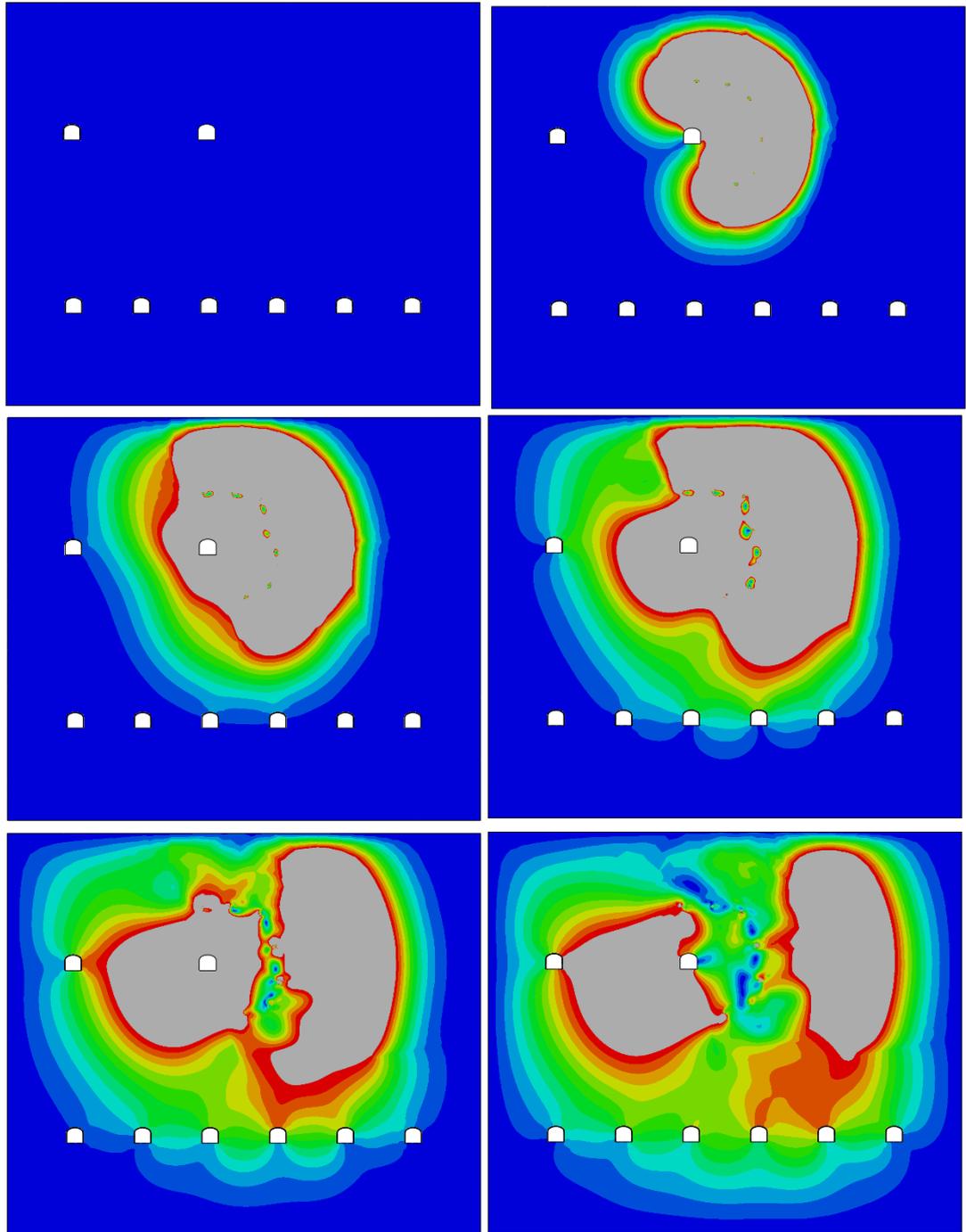


Рисунок 3.44 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы м/с (промежуток времени 0.0 – 27.5 мс): 1 – в момент времени 0.0 мс; 2 – момент времени 2.5 мс; 3 – в момент времени 5.0 мс; 4 – в момент времени 7.5 мс; 5 – в момент времени 10.0 мс; 6 – в момент времени 12.5 мс;

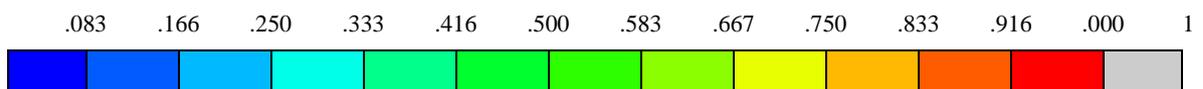
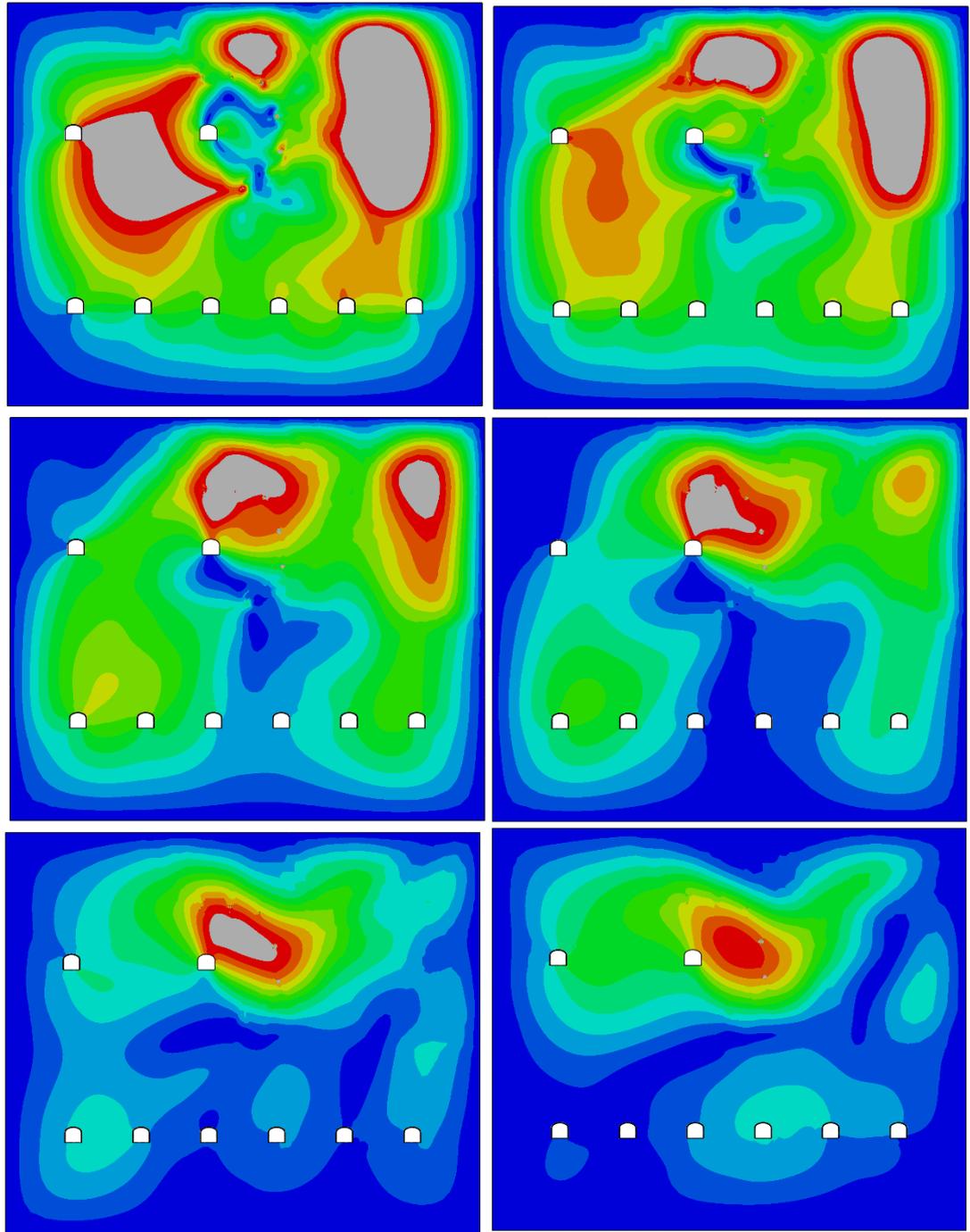


Рисунок 3.45 – Картина результирующих скоростей смещений частиц породы м/с (промежуток времени 17.5 – 27.5 мс): 8 – в момент времени 17.5 мс; 9 – в момент времени 20.0 мс; 10 – в момент времени 22.5 мс; 11 – в момент времени 25.0 мс; 12 – в момент времени 27.5 мс.

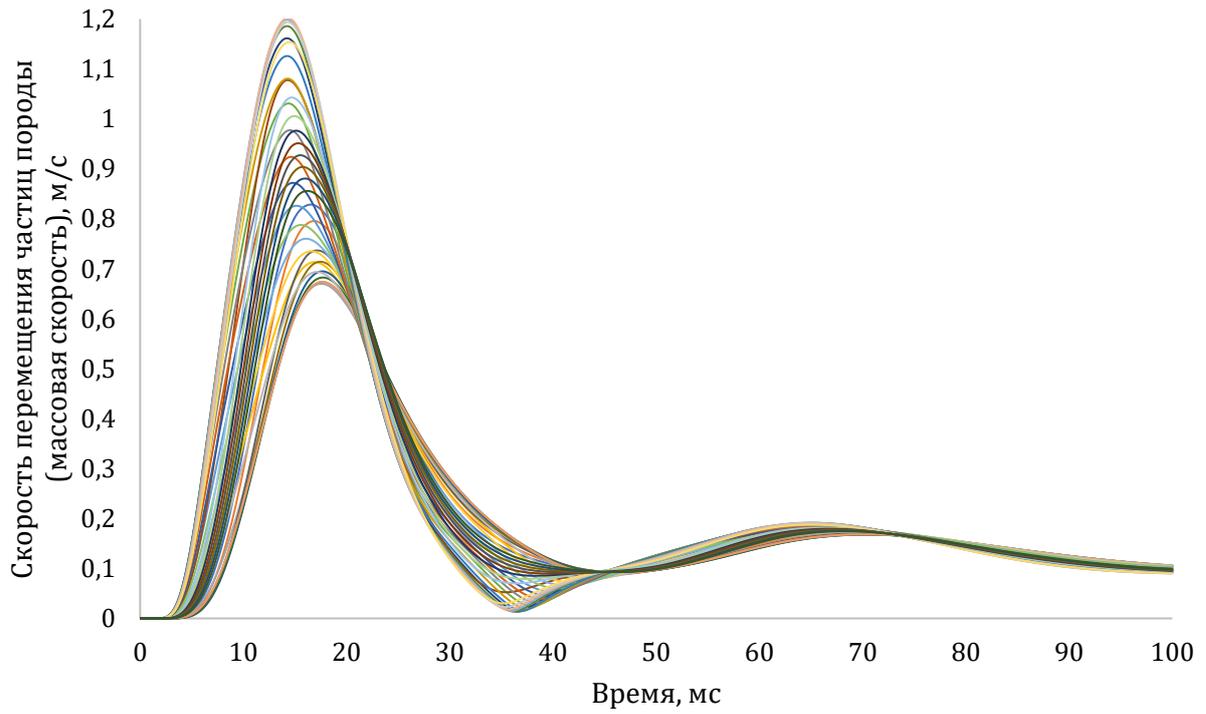


Рисунок 3.46 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №1, схема 2)

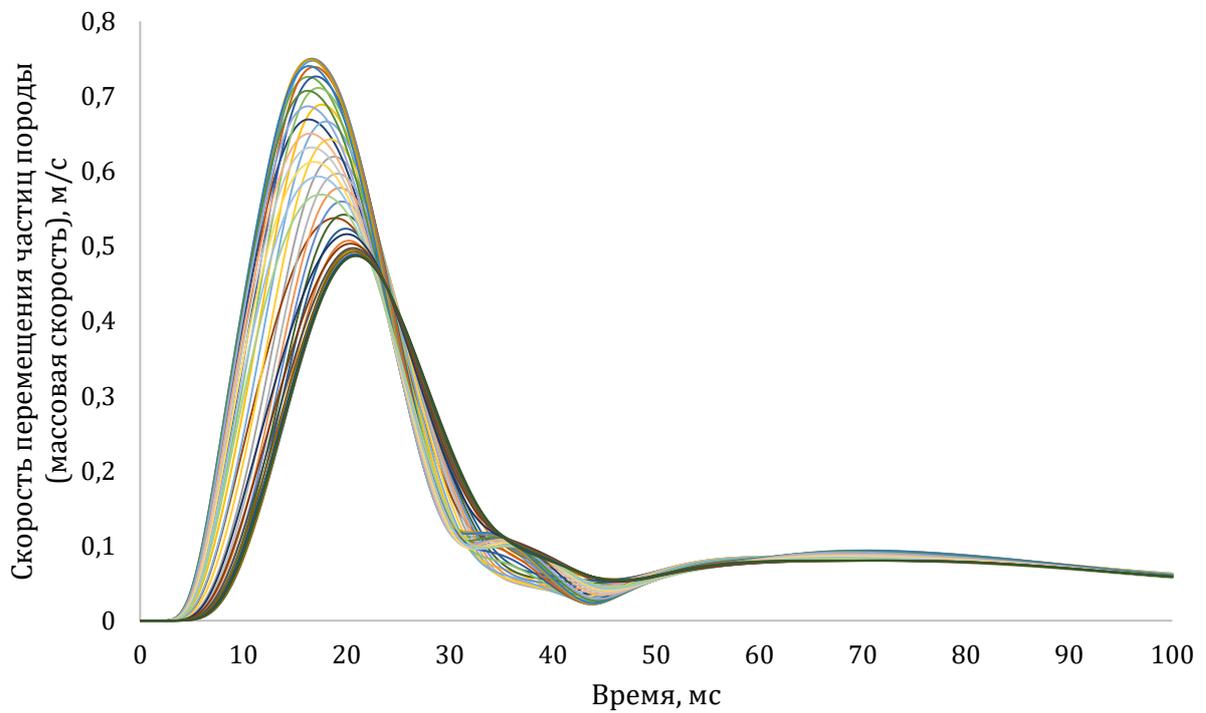


Рисунок 3.47 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №3, схема 2)

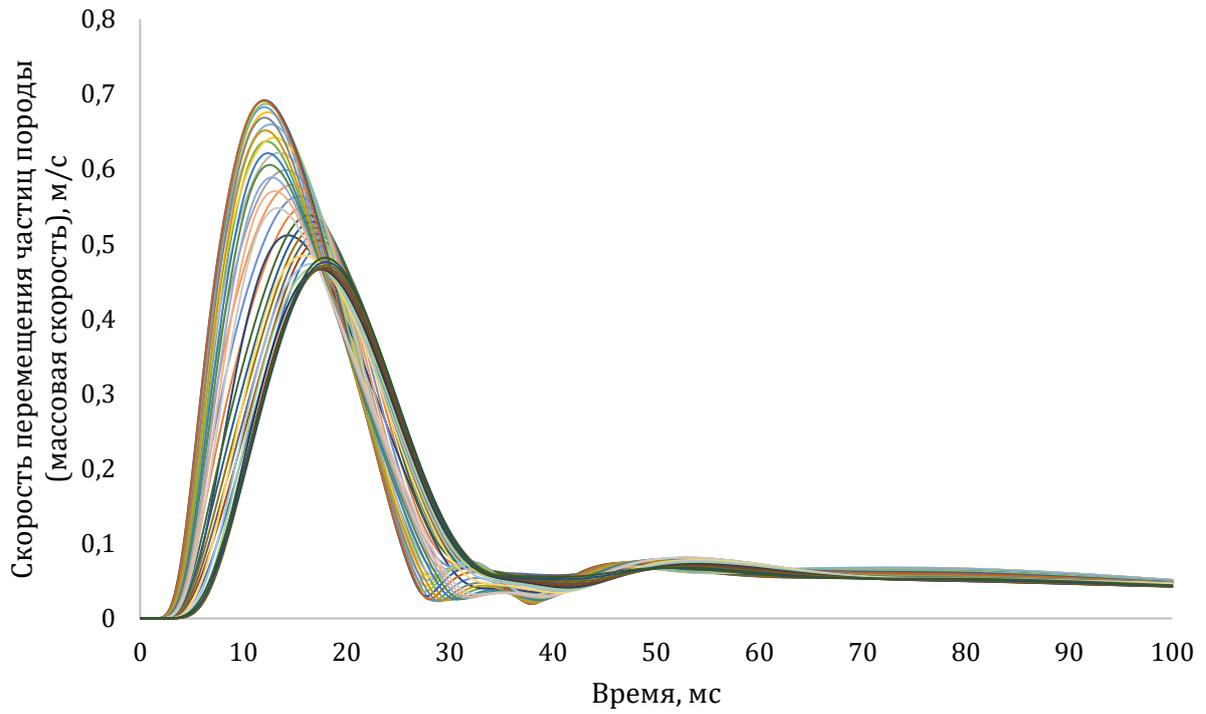


Рисунок 3.48 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №4, схема 2)

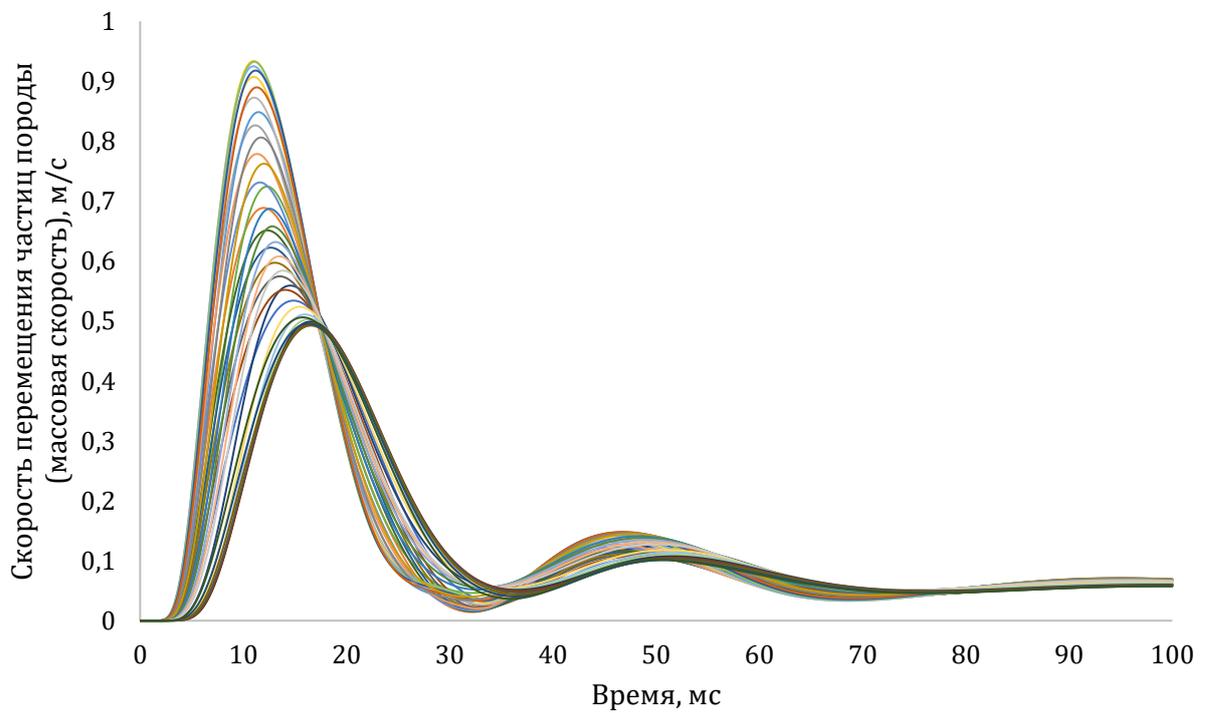


Рисунок 3.49 – Развитие результирующих скоростей смещения частиц пород на контуре выработки (выработка №5, схема 2)

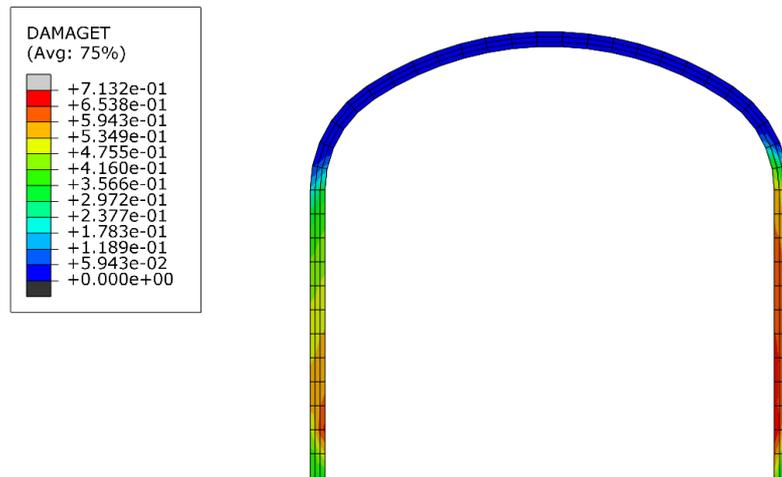


Рисунок 3.50 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №1, взрывание без степеней замедления, схема 2)

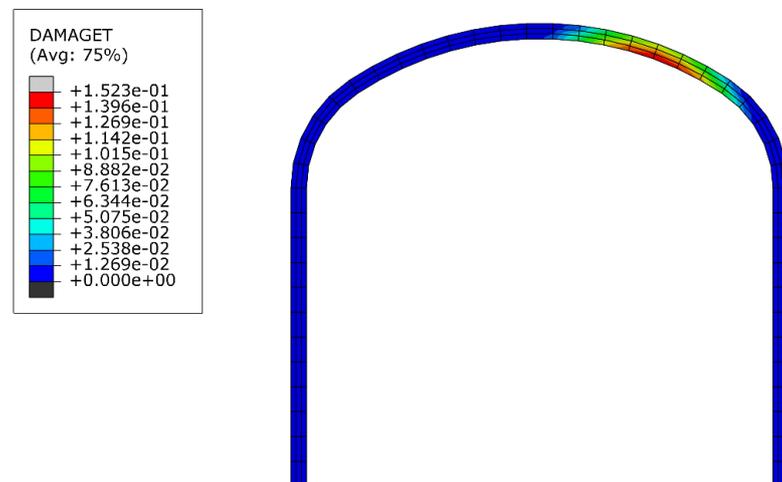


Рисунок 3.51 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №3, взрывание без степеней замедления, схема 2)

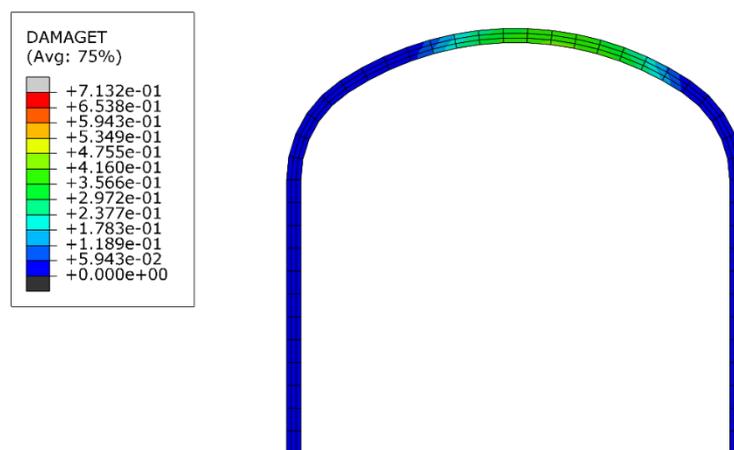


Рисунок 3.52 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №4, взрывание без степеней замедления, схема 2)

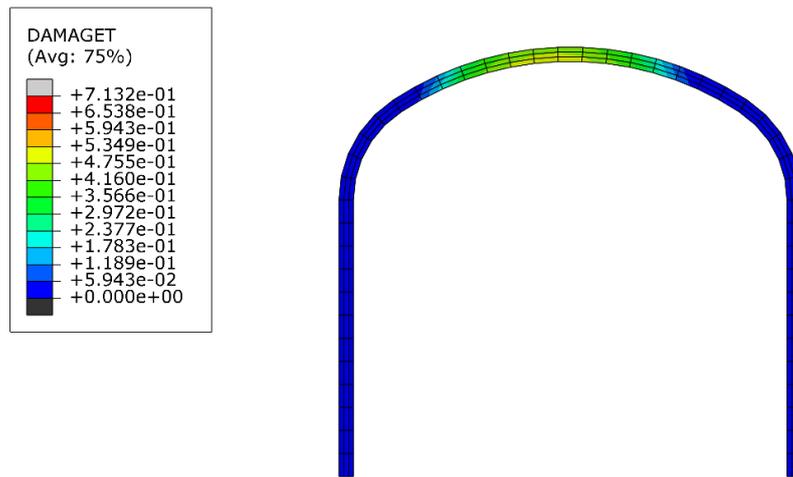


Рисунок 3.53 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №5, взрывание без степеней замедления, схема 2)

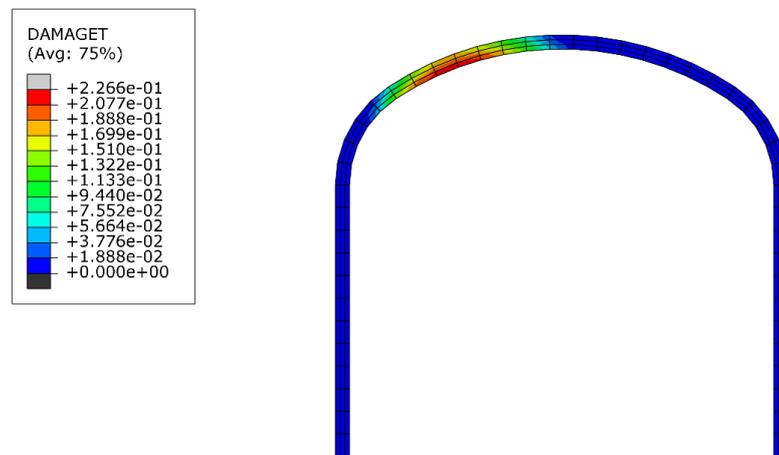


Рисунок 3.54 – Картина повреждения крепи выработки (выработка №6, взрывание без степеней замедления, схема 2)

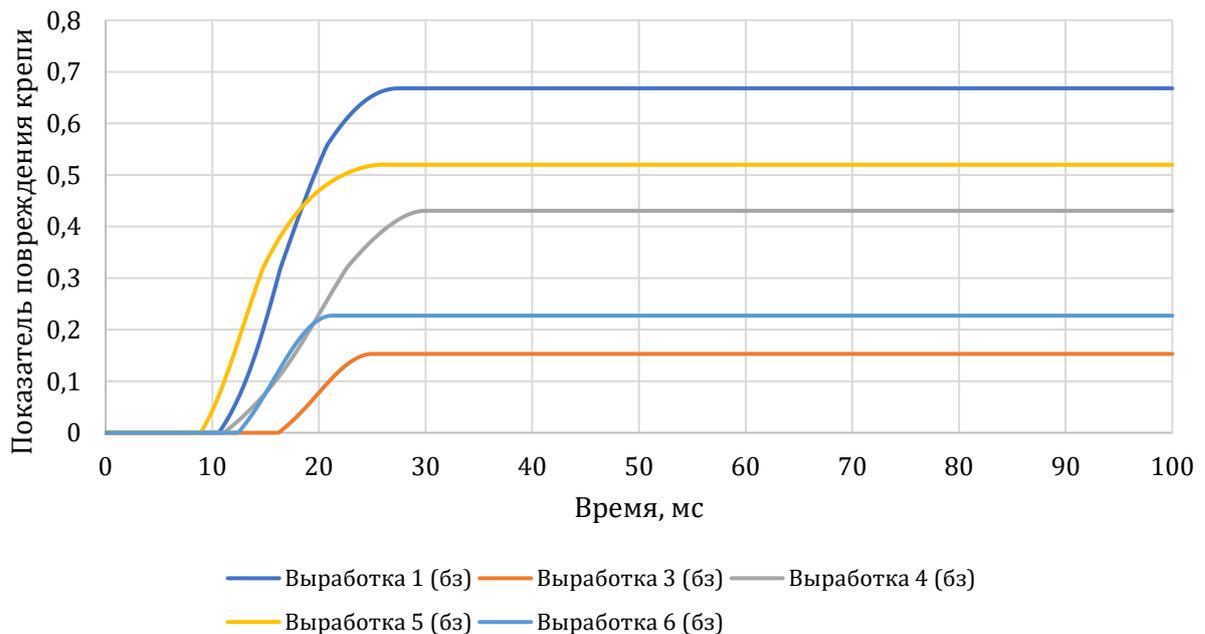


Рисунок 3.55 – Развитие повреждения набрызгбетонной крепи при массовом взрыве (схема 2)

Максимальные повреждения набрызгбетонной крепи горных выработок для первой и второй схем замедления сведены в таблицы 3.13 – 3.14. Результаты расчетов показывают, что скорость массовых смещений породы выше при взрывании без степеней замедления, и это справедливо как для схемы №1, так и для схемы №2. Таким образом, видно, что интенсивность воздействия по второй схеме проведения массового взрыва значительно выше, а повреждение крепи уже значительно и будет оказывать негативное влияние на длительную устойчивость горной выработки.

Таблица 3.13 - Результирующие показатели при проведении массовых взрывов по схеме №1

Схема выполнения массовых взрывов	Показатель	Номер выработки		
		№1	№2	№3
Схема №1 (торцевая отработка), со степенями замедления	Скорость смещения породного контура, м/с	0.34	0.14	0.13
	Показатель повреждения	0.014	0	0
Схема №1 (торцевая отработка), без степеней замедления	Скорость смещения породного контура, м/с	1.05	0.32	0.28
	Показатель повреждения	0.41	0.039	0

Таблица 3.14 - Результирующие показатели при проведении массовых взрывов по схеме №2

Схема выполнения массовых взрывов	Показатель	Номер выработки						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Схема №2 (траншейная отработка), со степенями замедления	Скорость смещения породного контура, м/с	0.52	0.32	0.34	0.33	0.36	0.34	0.3
	Показатель повреждения	0.43	-	0.09	0.32	0.38	0.12	0
Схема №1 (траншейная отработка), без степеней замедления	Скорость смещения породного контура, м/с	1.2	0.76	0.75	0.70	0.94	0.92	0.81
	Показатель повреждения	0.66	-	0.15	0.43	0.51	0.22	0

Полученные результаты оценки влияния массовых взрывов на техническое состояние крепи позволяют сделать следующий вывод: при проведении массовых

взрывов по схеме №1 набрызгбетонная крепь может эффективно работать, а степень ее повреждения незначительна, несущая способность крепи так же снижается не значительно; при проведении массовых взрывов по схеме №2 повреждения набрызгбетонной крепи значительны, несущая способность может быть сильно снижена, рекомендуется повысить пластичность набрызгбетонной крепи за счет введения армирования сетками и металлической или полимерной фиброй, что позволит значительно снизить показатель накопленных повреждений в набрызгбетонной крепи.

Главные практические выводы на основании полученных результатов, следующие:

- при проведении массовых взрывов по схеме №1 набрызгбетонная крепь может эффективно работать, а степень ее повреждения зависит от интенсивности воздействия. Несущая способность крепи практически не снижается при осуществлении массовых взрывов с замедлением. Осуществление массовых взрывов без замедления приводит к существенному повреждению крепи, что необходимо учитывать при обосновании ее параметров;
- при проведении массовых взрывов по схеме №2 повреждения набрызгбетонной крепи значительны, несущая способность крепи снижается, рекомендуется повысить пластичность набрызгбетонной крепи за счет введения армирования сетками и металлической или полимерной фиброй, что позволит значительно снизить показатель накопленных повреждений;
- взаимосвязь между скоростью перемещения частиц породы на контуре выработки и повреждением крепи не является линейной, и зависит также от формы выработки и от расположения выработки относительно места ведения взрывных работ;
- степень замедления равная 25 мс. является достаточной для снижения результирующего воздействия массового взрыва на состояние крепи (не допускает наложение сейсмических волн);
- для повышения стойкости крепи сейсмическому воздействию рекомендуется использовать дисперсно-армированный набрызгбетон;

- с точки зрения обеспечения сохранности крепи, схема с торцевым выпуском является более рациональной по сравнению со схемой с выпуском на траншейное днище.

### 3.5.3. Оценка влияния повреждения набрызгбетонной крепи при массовых взрывах для условий Малеевского рудника

Результаты прогноза скоростей перемещения частиц породы при различных схемах приложения нагрузки представлены в виде эпюр скоростей смещения частиц породного массива на рисунках 3.57 – 3.65. На основании результатов прогноза можно сделать вывод, 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 [17] 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, которые представлены в виде таблицы 3.15. За показатель повреждения принято соотношение остаточной прочности набрызгбетона к начальной прочности ненарушенного набрызгбетона.

Таблица 3.15 - Сводная таблица оценки повреждений набрызгбетонной крепи при многократном воздействии массовых взрывов

Тип крепи	Показатель повреждения набрызгбетонной крепи на различных циклах сейсмического воздействия от массовых взрывов			
	1	2	3	4
Схема 1				
Неармированный набрызгбетон	0.59/0.50	0.75/0.59	0.96/0.62	0.96/0.68
Армированный набрызгбетон	0.07/0.04	0.12/0.05	0.19/0.05	0.25/0.05
Схема 2				
Неармированный набрызгбетон	0.44/0.81	0.62/0.88	0.72/0.94	0.96/0.96
Армированный набрызгбетон	0.03/0.05	0.04/0.06	0.05/0.06	0.07/0.06
Схема 3				
Неармированный набрызгбетон	0.51/0.70	0.54/0.76	0.68/0.87	0.71/0.91
Армированный набрызгбетон	0.02/0.03	0.03/0.04	0.04/0.04	0.05/0.04

Продолжение таблицы 3.15

Схема 4				
Неармированный набрызгбетон	0.49/0.18	0.53/0.30	0.58/0.32	0.58/0.33
Армированный набрызгбетон	0.01/0.01	0.01/0.02	0.03/0.02	0.03/0.02
Схема 5				
Неармированный набрызгбетон	0.47/0.73	0.47/0.74	0.47/0.74	0.47/0.74
Армированный набрызгбетон	-	-	-	-
Схема 6				
Неармированный набрызгбетон	0.28/0.40	0.30/0.45	0.31/0.46	0.46/0.47
Армированный набрызгбетон	-	-	-	-
Схема 7				
Неармированный набрызгбетон	0.17/0.27	0.18/0.29	0.21/0.29	0.21/0.30
Армированный набрызгбетон	-	-	-	-
Схема 8				
Неармированный набрызгбетон	0.00/0.25	0.00/0.28	0.00/0.30	0.00/0.30
Армированный набрызгбетон	-	-	-	-
Схема 9				
Неармированный набрызгбетон	0.00/0.12	0.00/0.13	0.00/0.13	0.13
Армированный набрызгбетон	-	-	-	-

Примечание: в числителе приведен показатель повреждения набрызгбетонной крепи в сводовой части выработки, в знаменателе приведен показатель повреждения в боках выработки.

Взаимосвязь между показателем повреждения крепи и максимальной скоростью перемещения частиц породы на контуре выработки в аппроксимированном виде представлена на рисунке 3.56.

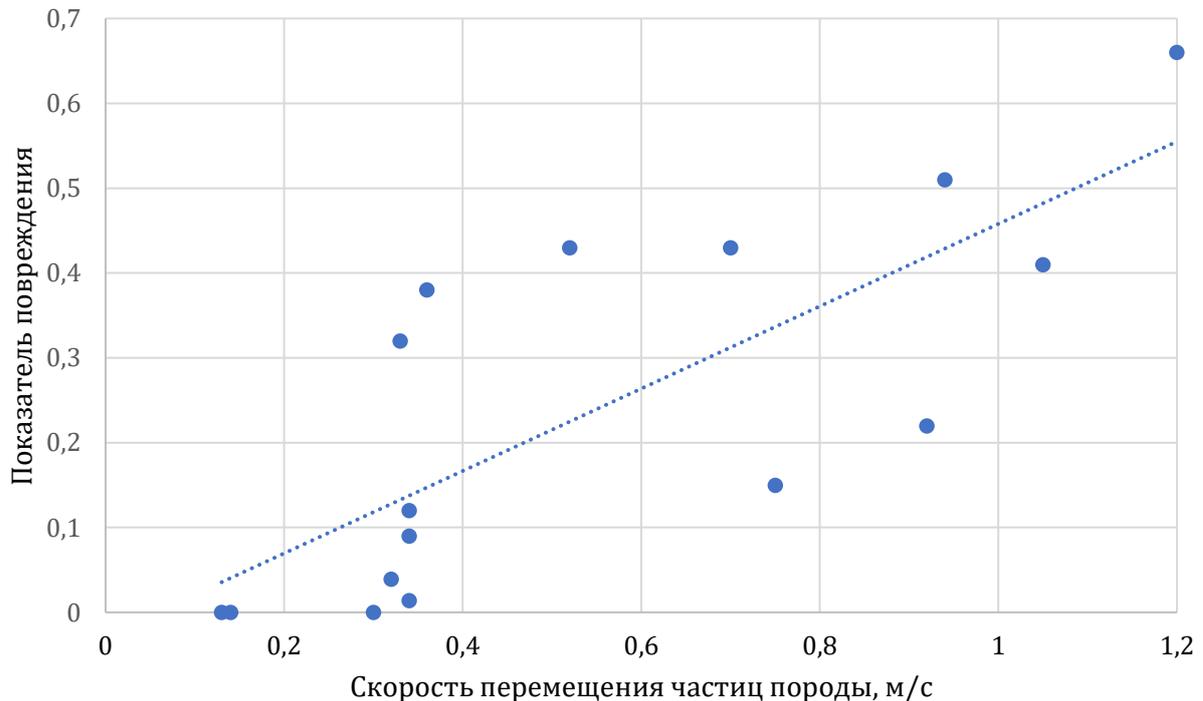


Рисунок 3.56 – Взаимосвязь между показателем повреждения крепи и максимальной скоростью перемещения частиц породы на контуре выработки

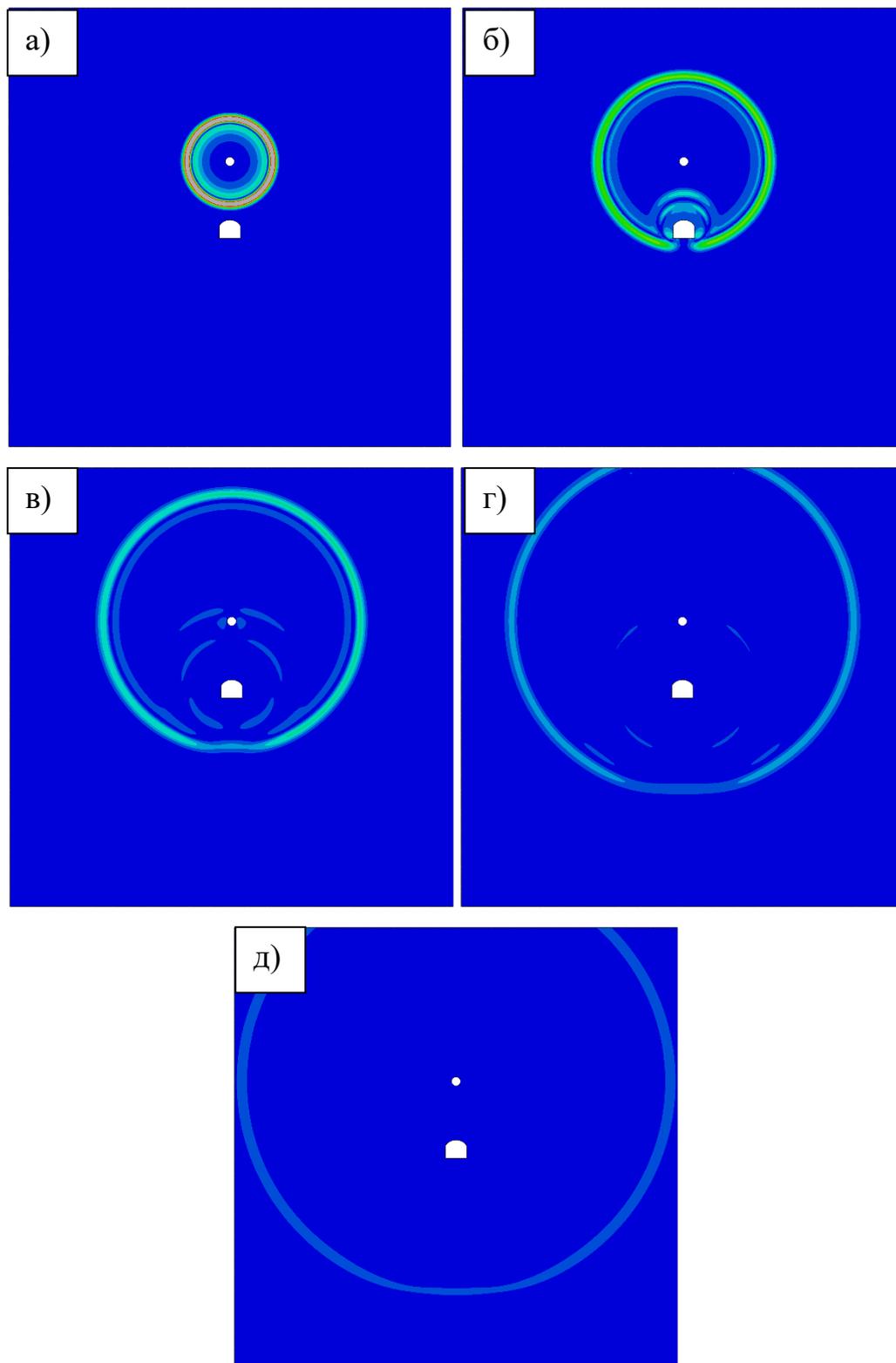


Рисунок 3.57 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 1):  
а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

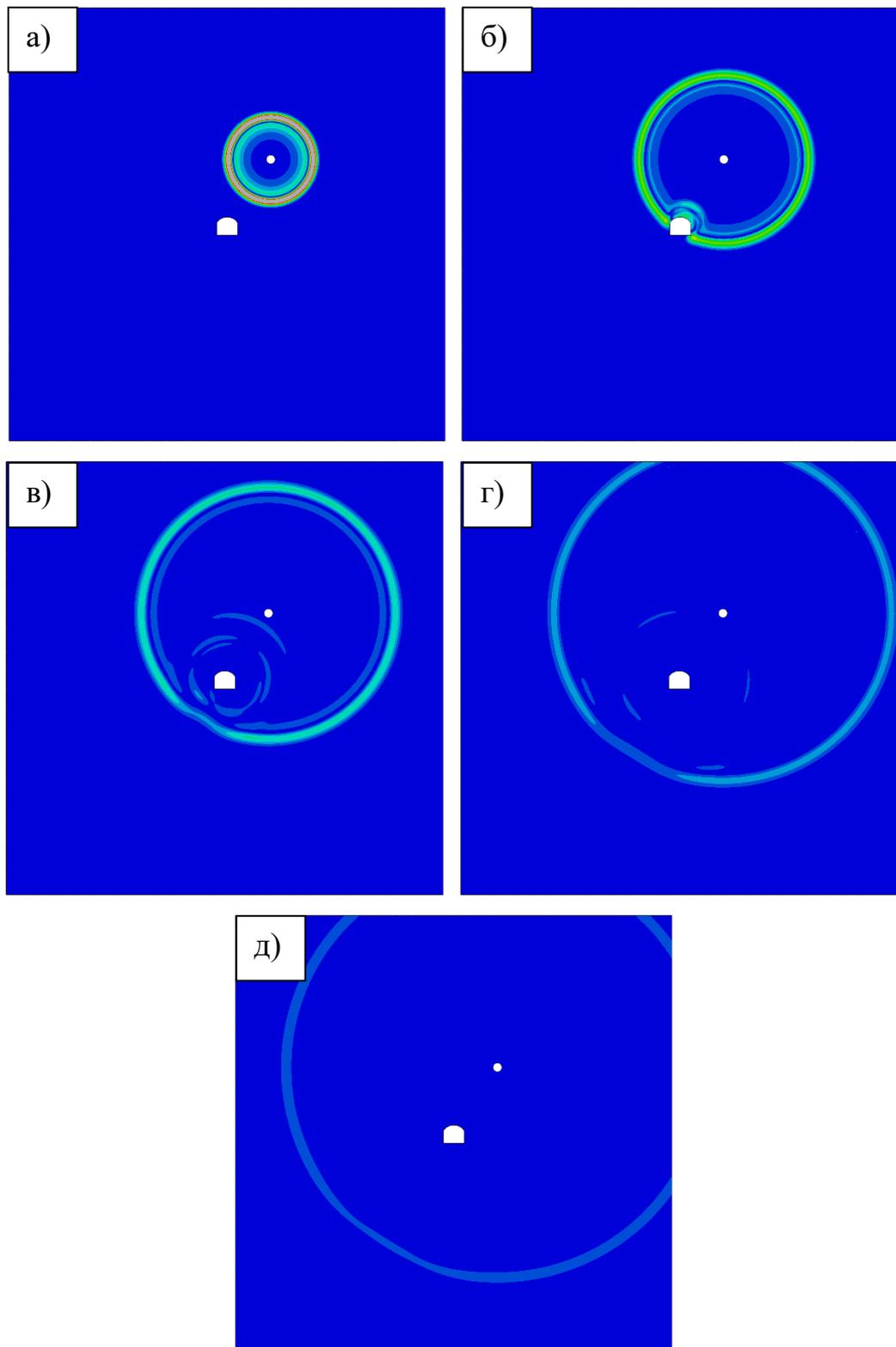


Рисунок 3.58 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 2):  
 а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

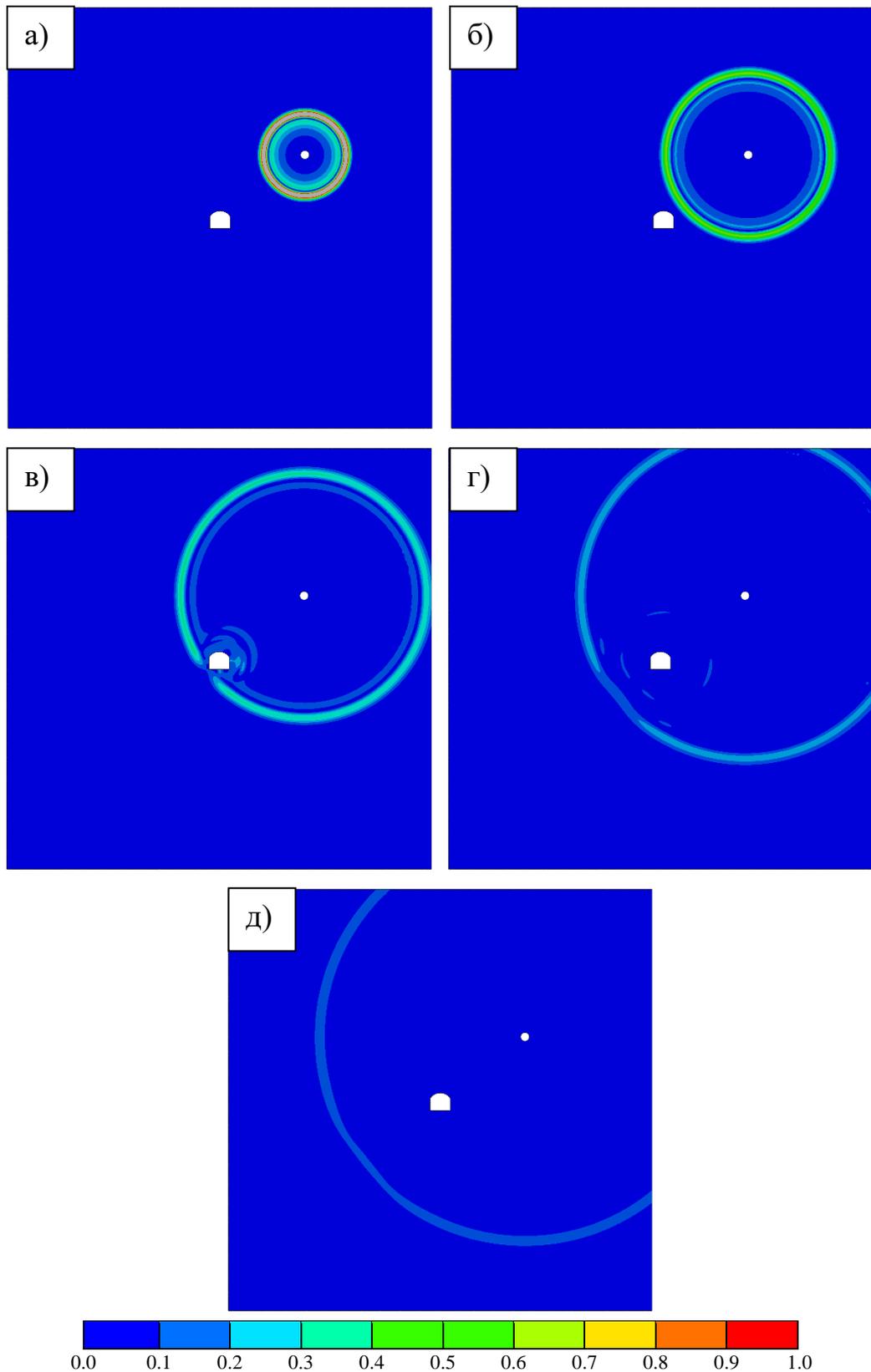


Рисунок 3.59 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 3):  
а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

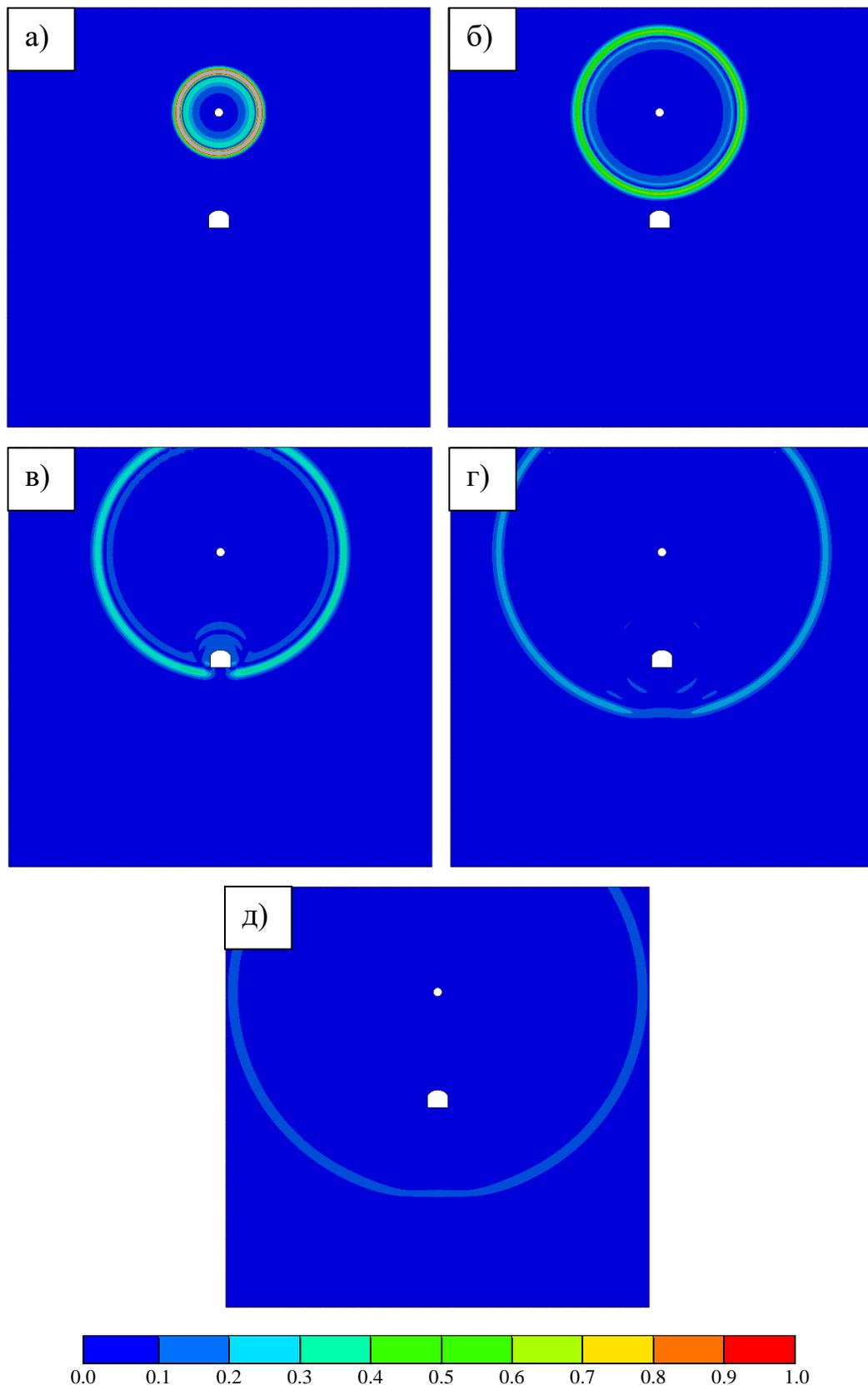


Рисунок 3.60 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 4):  
 а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

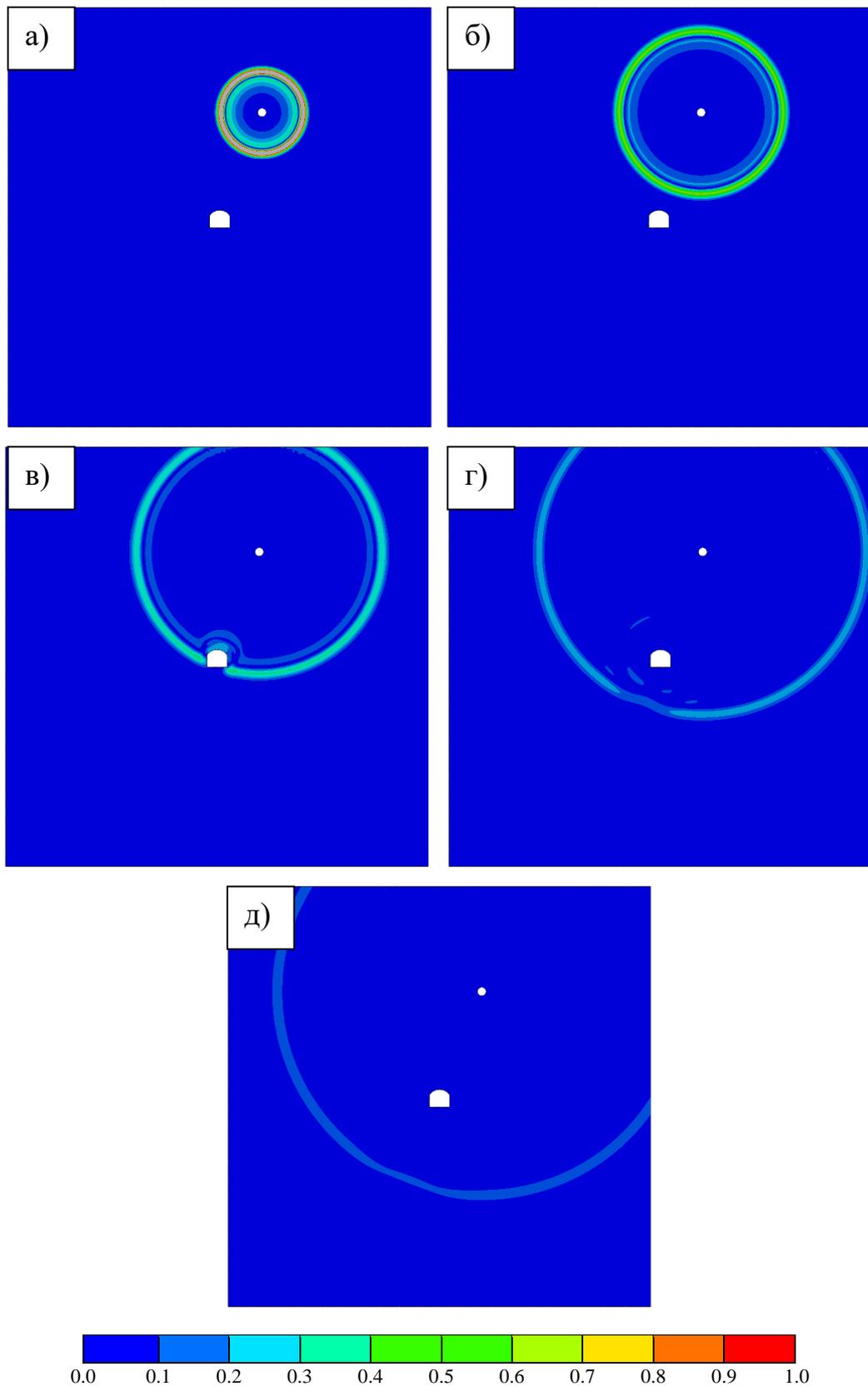


Рисунок 3.61 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 5):  
а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

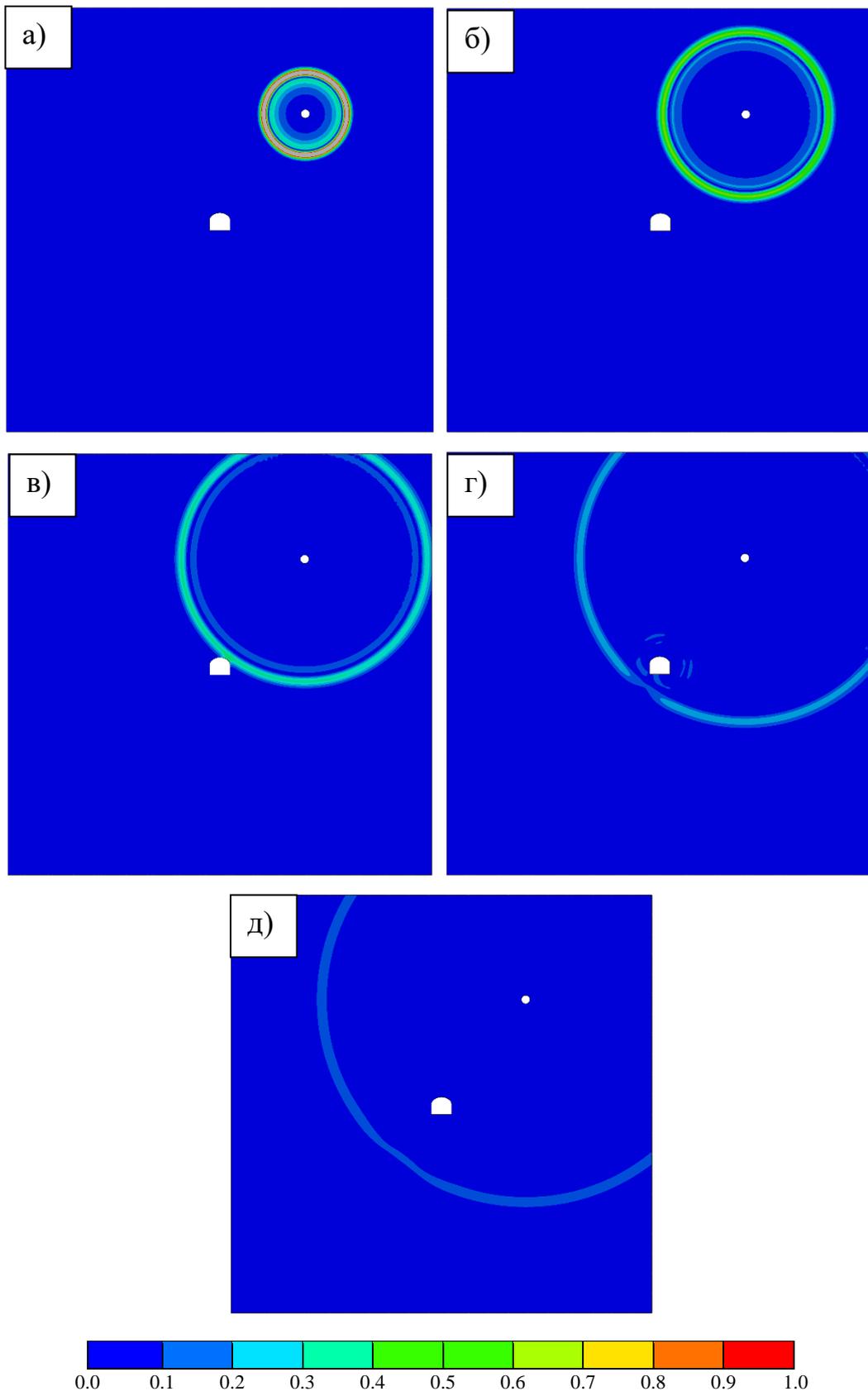


Рисунок 3.62 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема б):  
а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

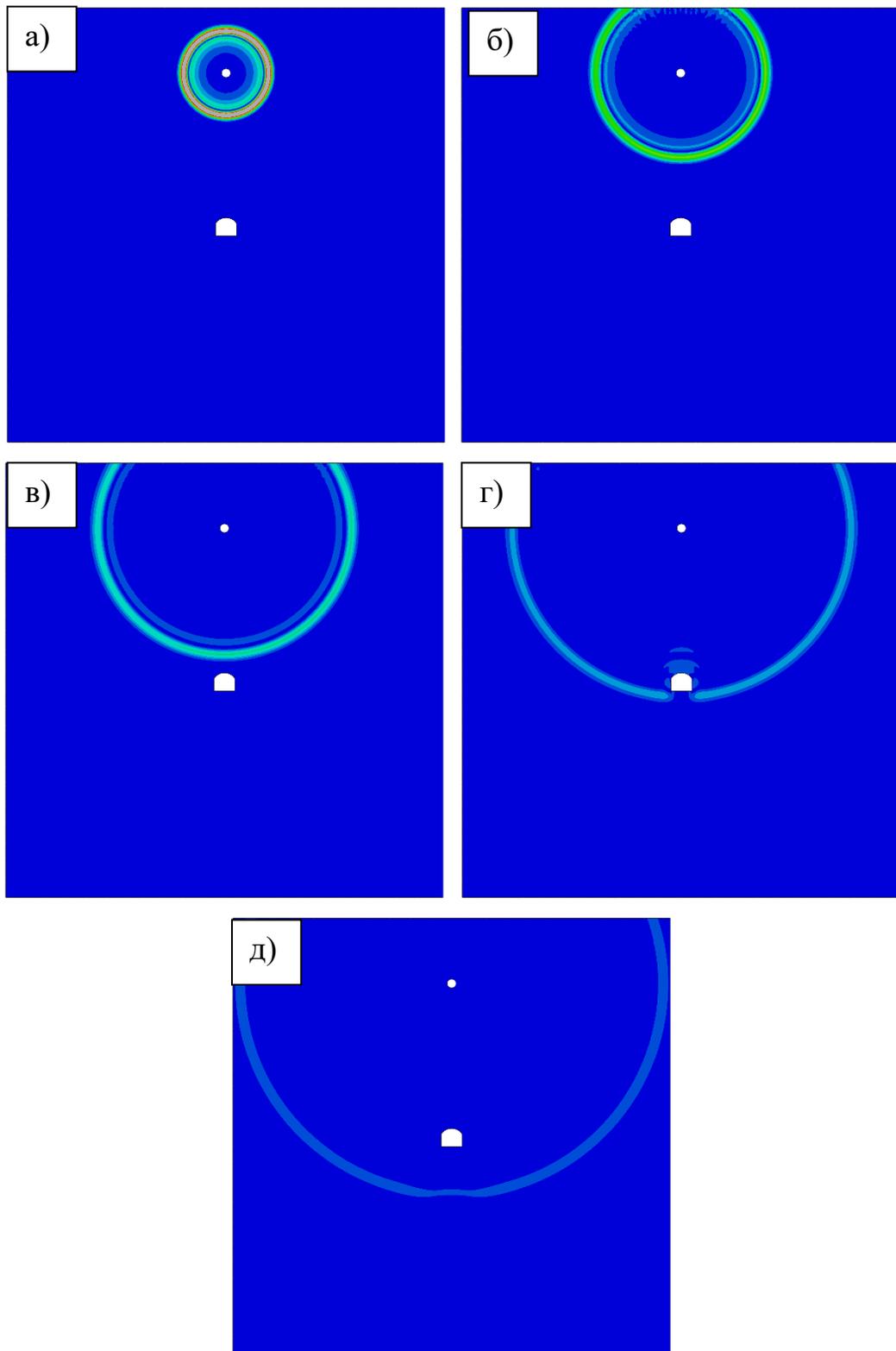


Рисунок 3.63 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 7):  
 а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

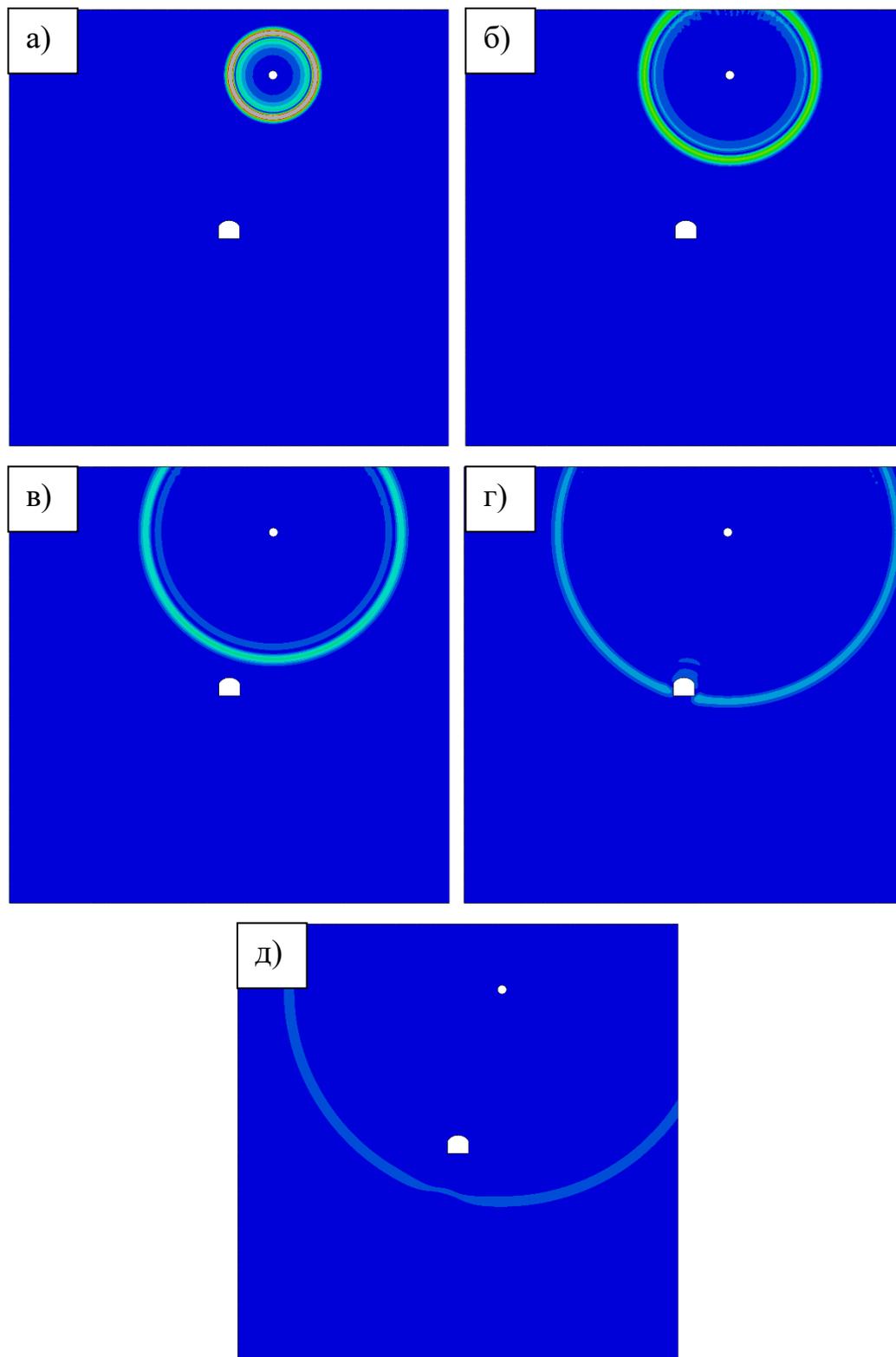


Рисунок 3.64 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 8):  
а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

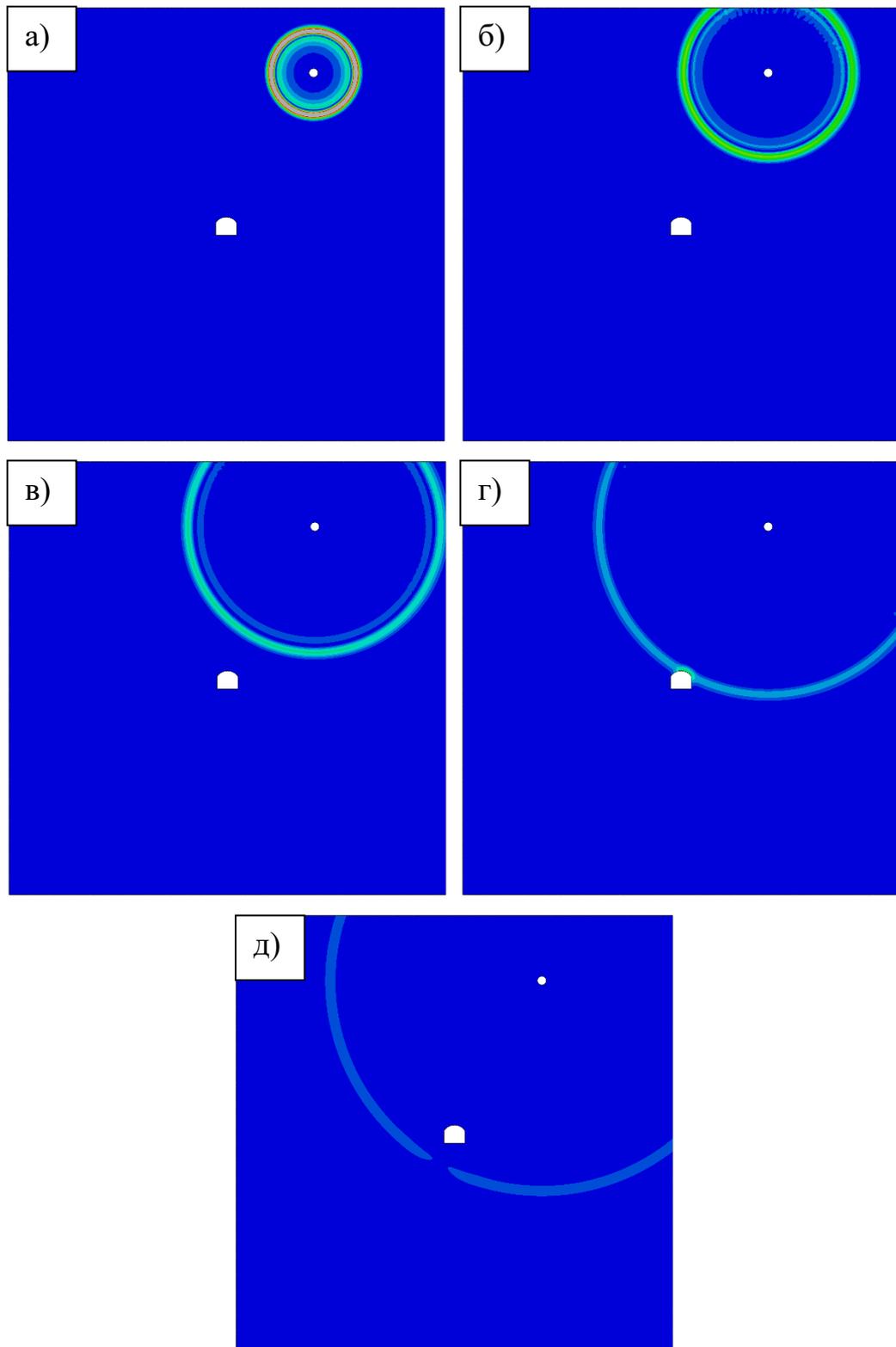


Рисунок 3.65 – Распределение скоростей перемещений частиц породного массива в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 9):  
 а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

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. Данная закономерность характерна как для дисперсно-армированного набрызгбетона, так, и для неармированного набрызгбетона, рисунок 3.66.

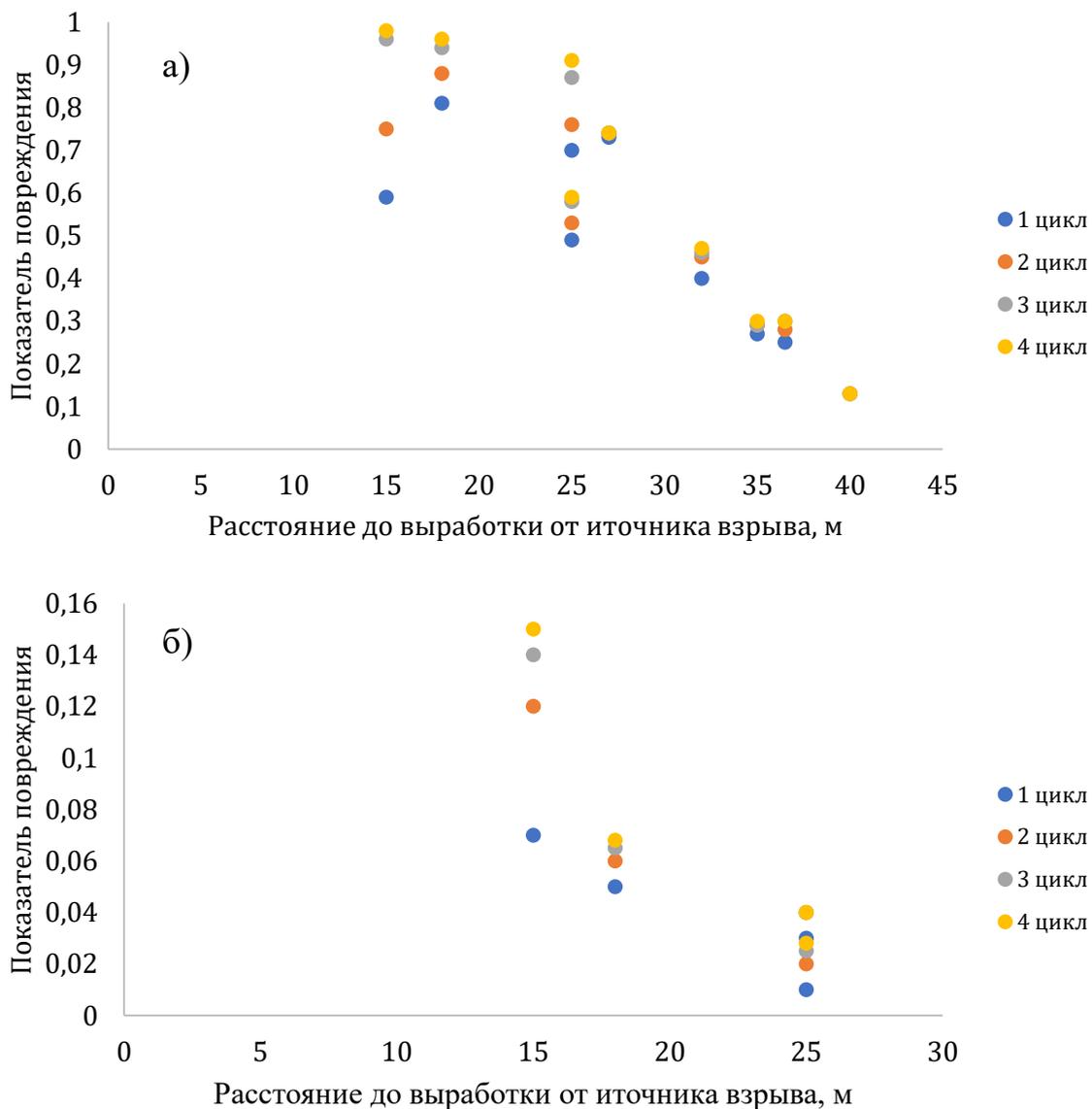


Рисунок 3.66 – Развитие показателя повреждения набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии: а – неармированный набрызгбетон; б – армированный набрызгбетон.

Положение зон повреждения набрызгбетонной крепи в зависимости от положения источника сейсмического воздействия изображены на рисунках 3.67 – 3.74.

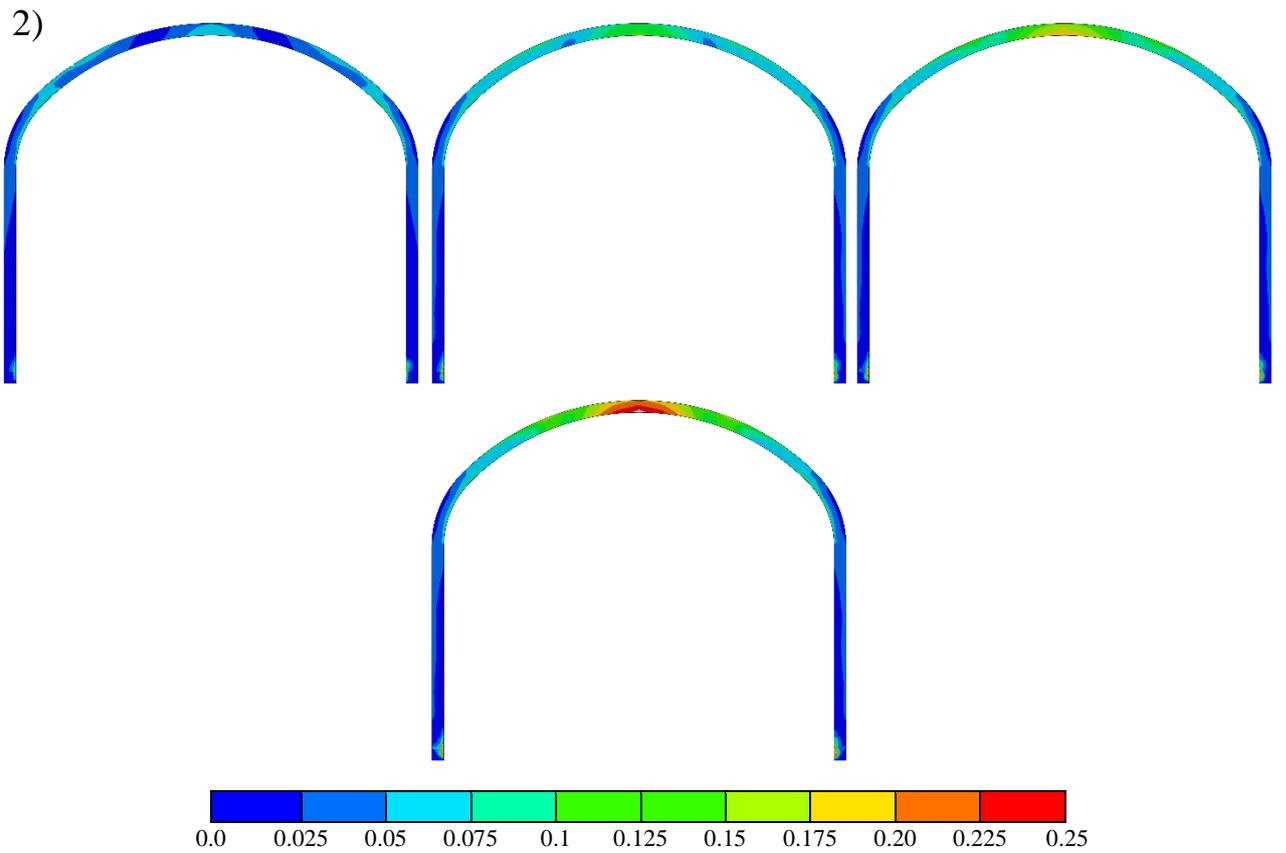
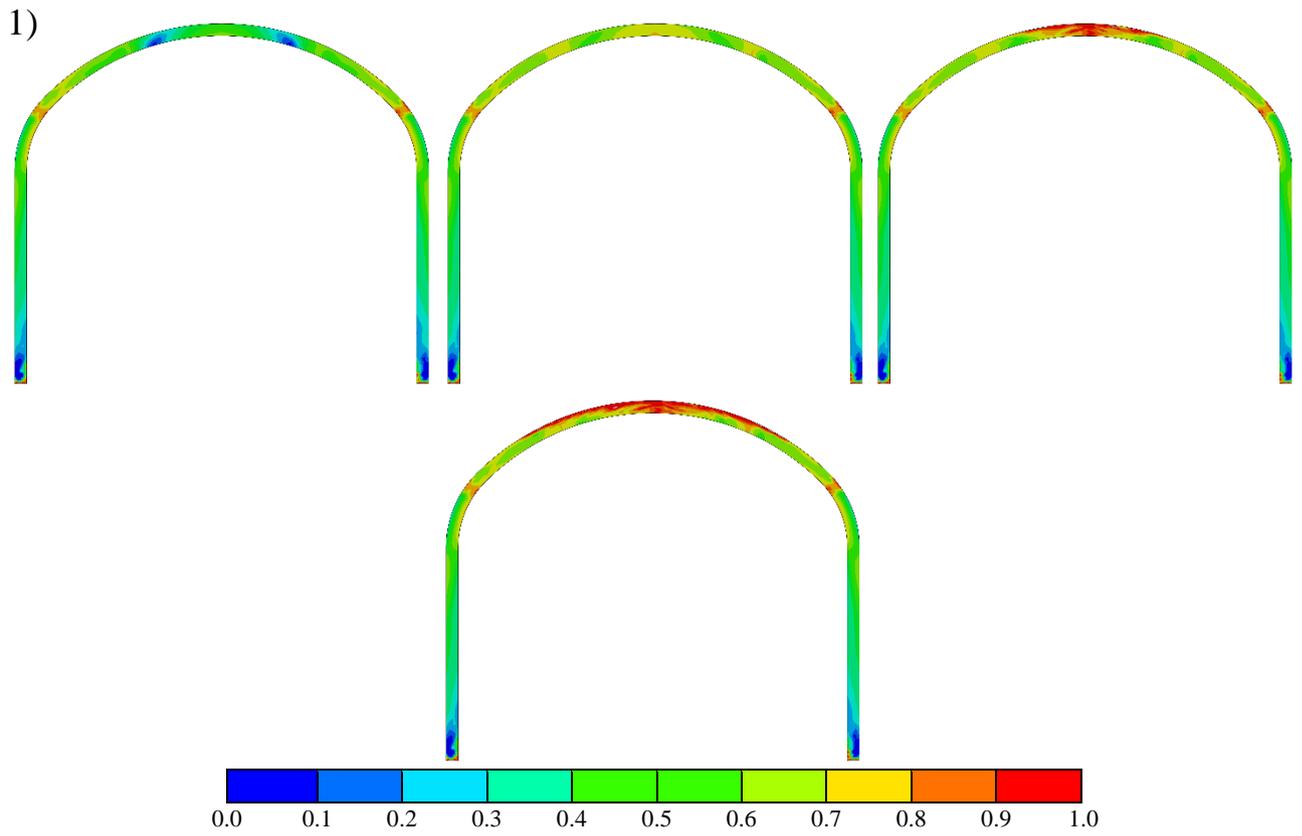
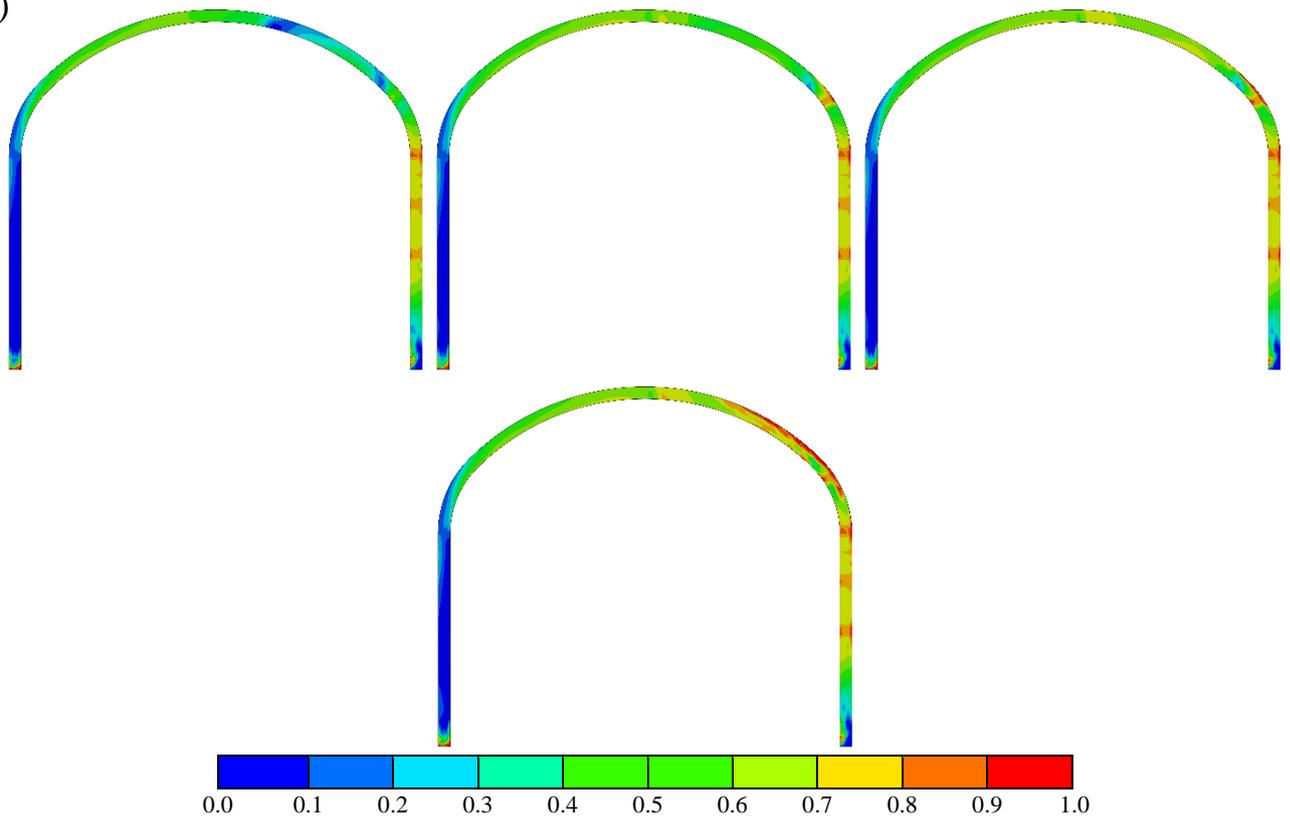


Рисунок 3.67 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 1): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

1)



2)

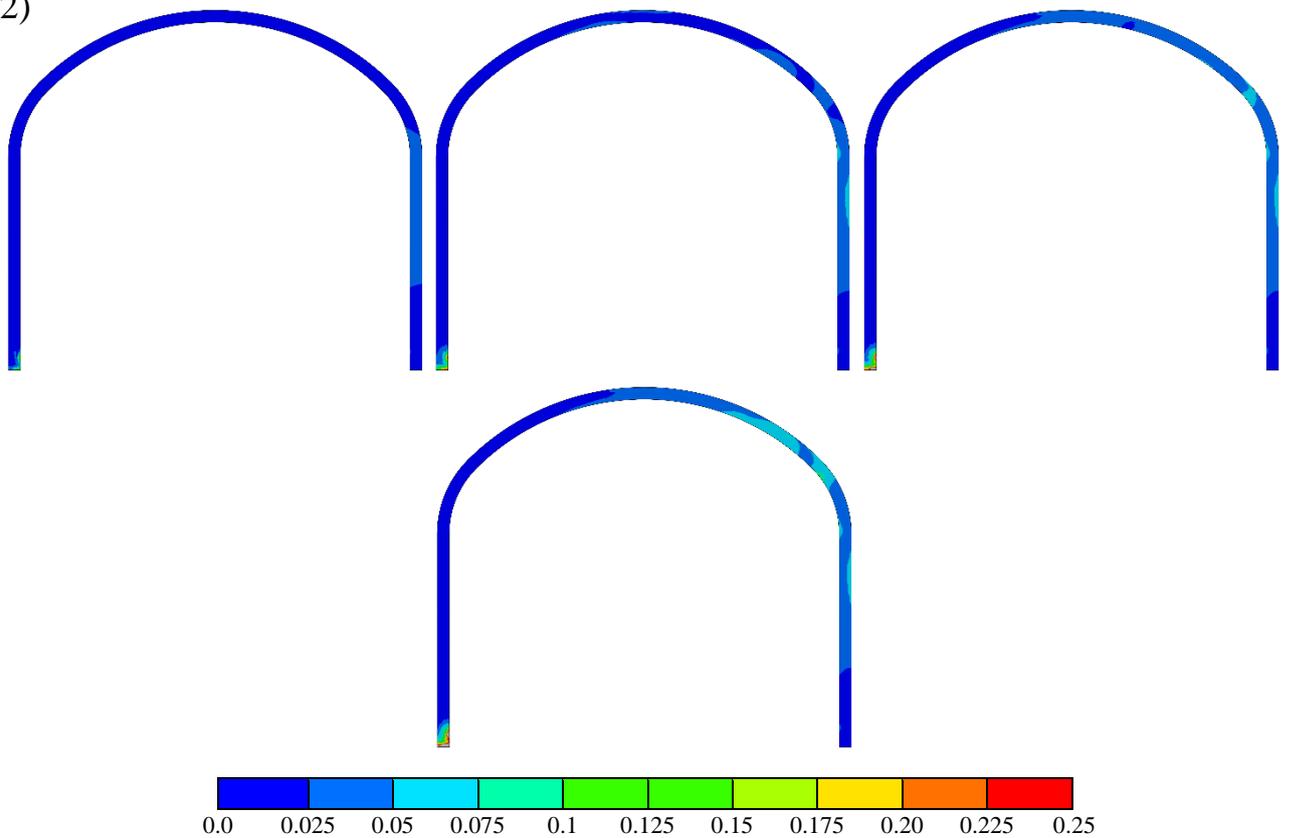


Рисунок 3.68 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 2): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

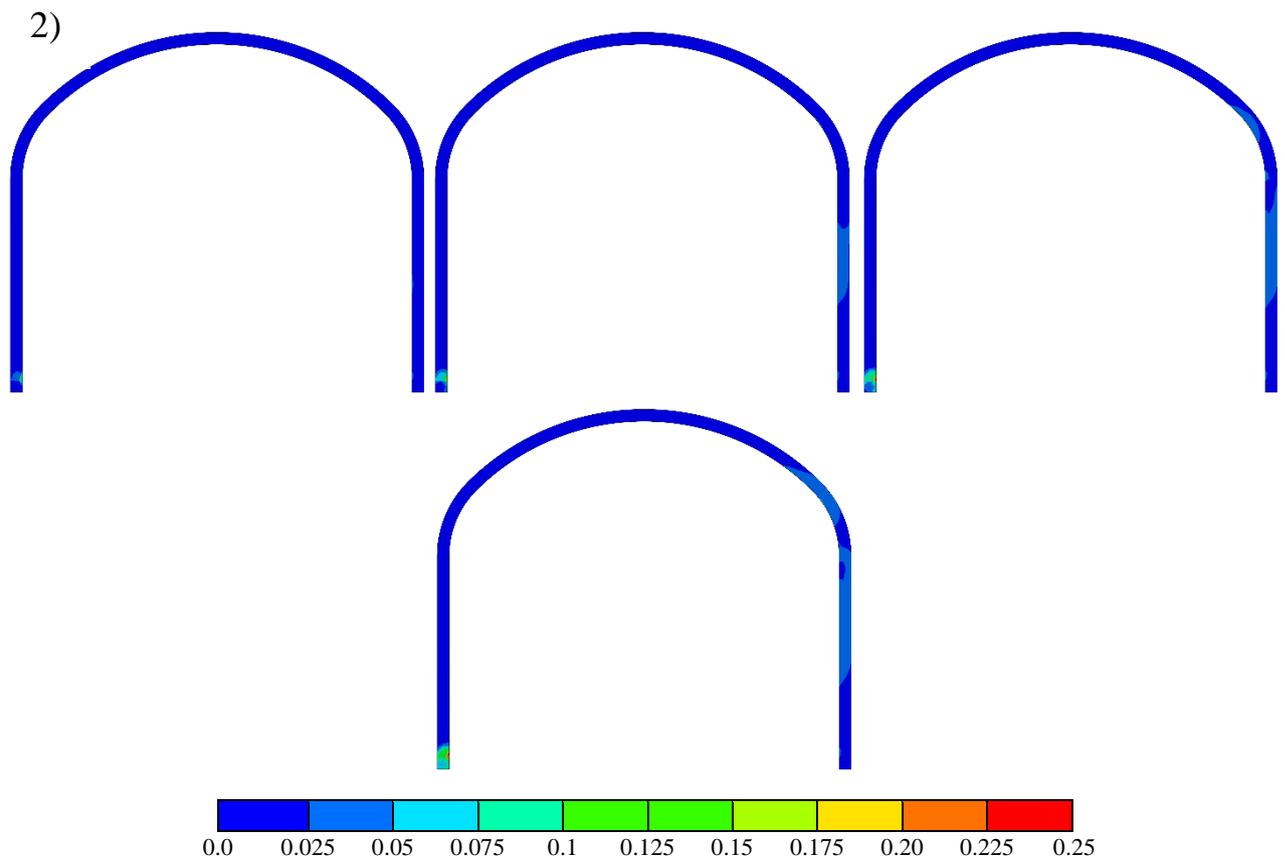
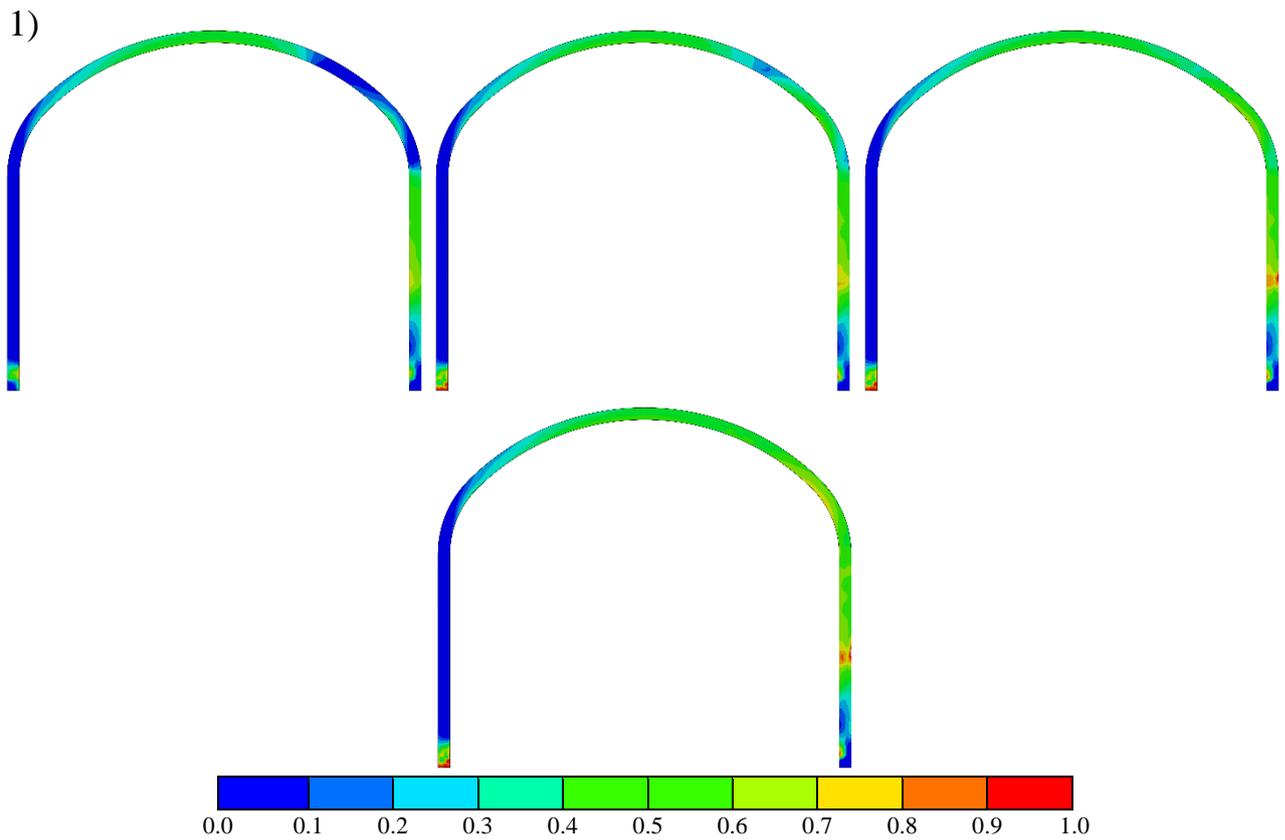


Рисунок 3.69 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 3): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

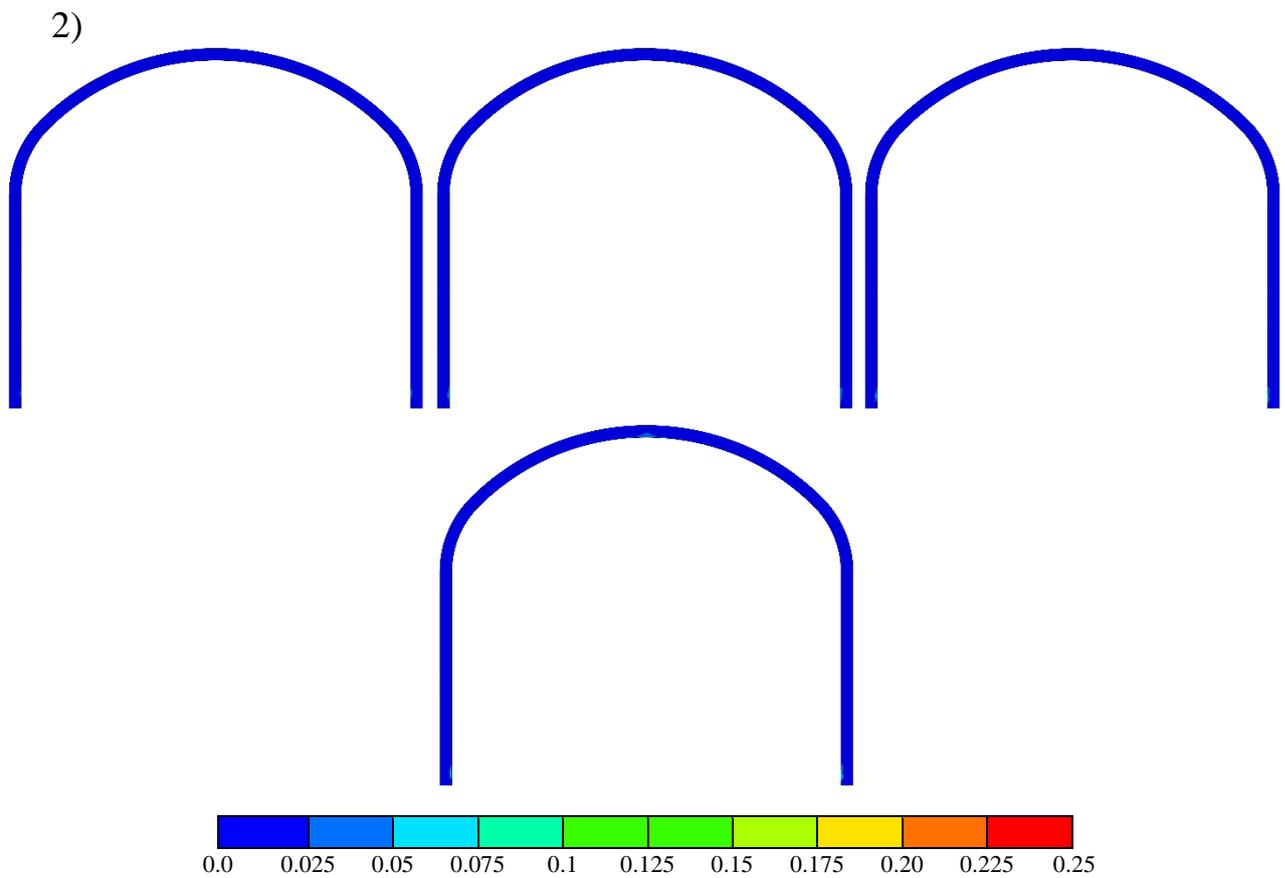
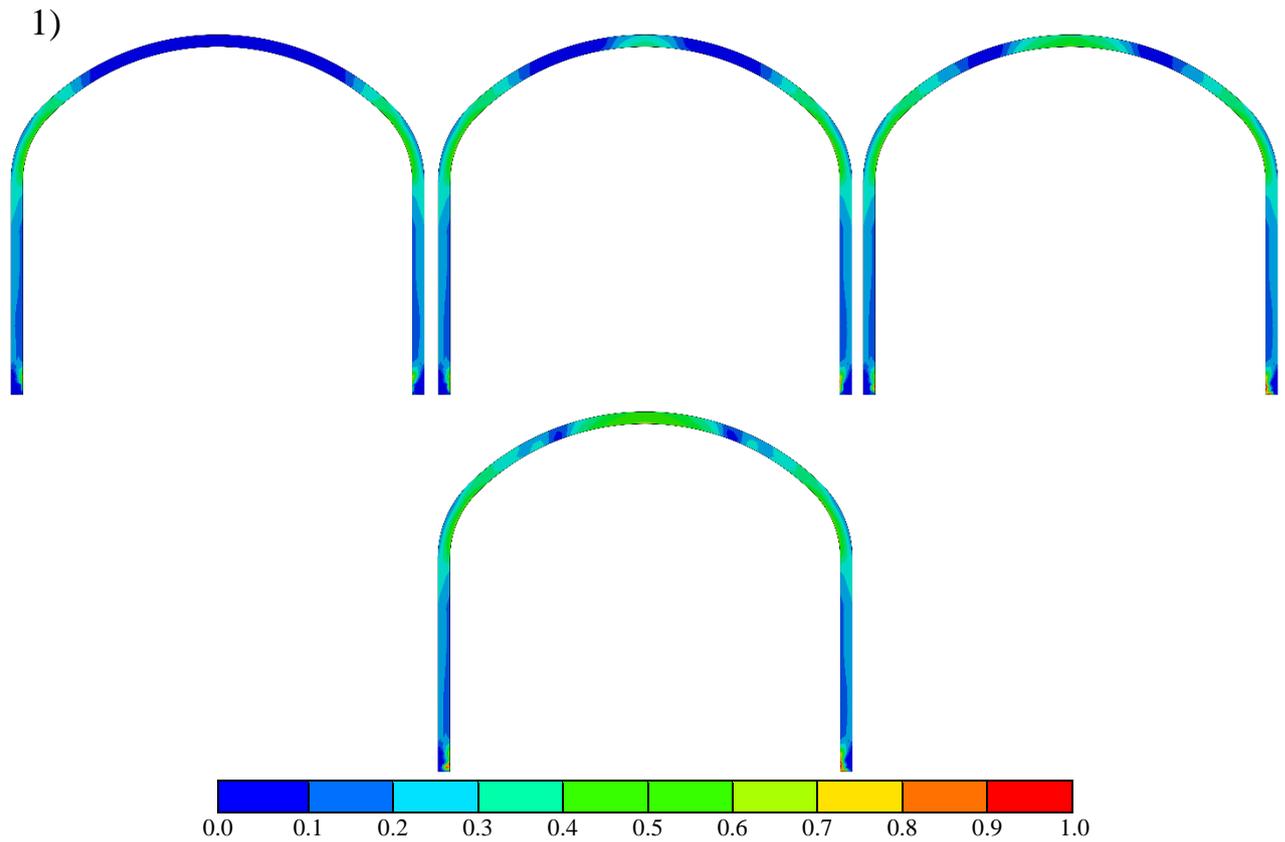


Рисунок 3.70 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 4): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

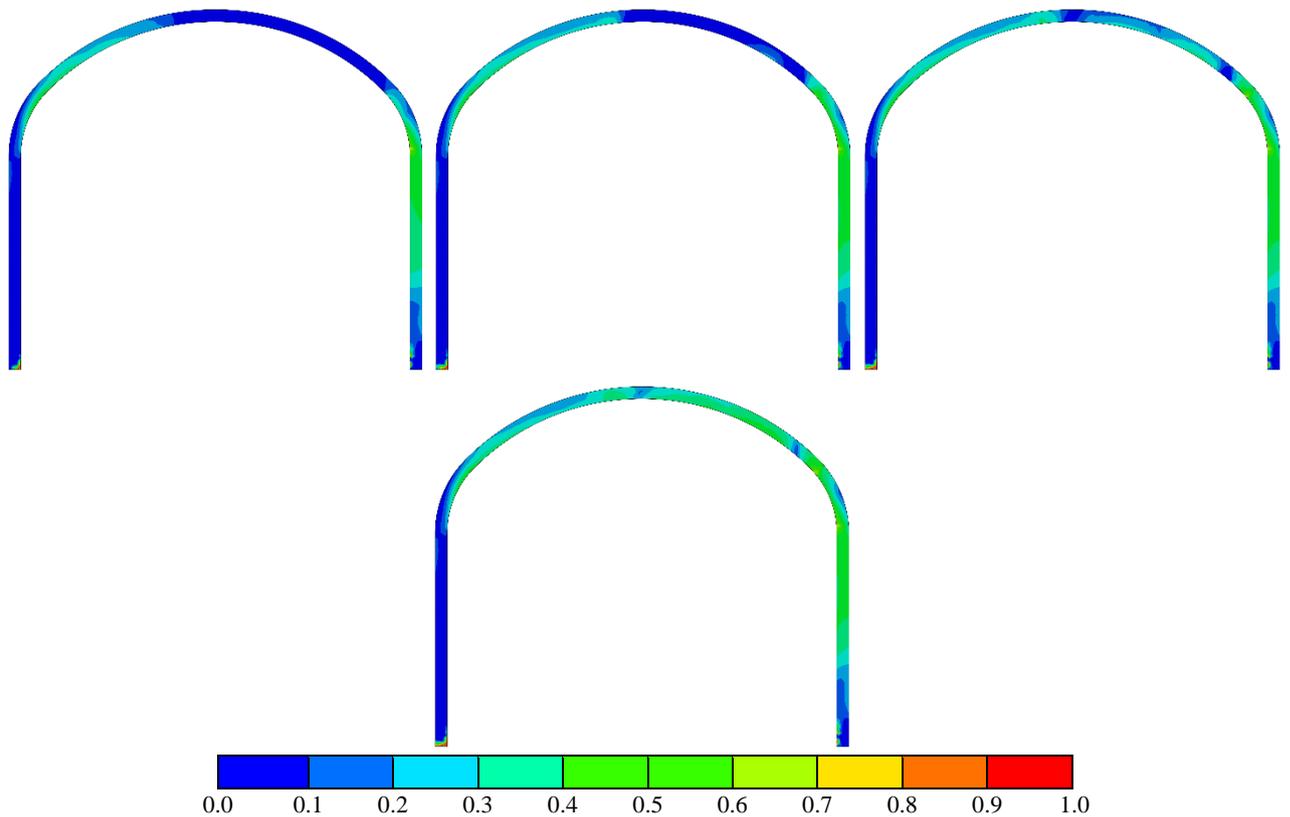


Рисунок 3.71 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 5): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

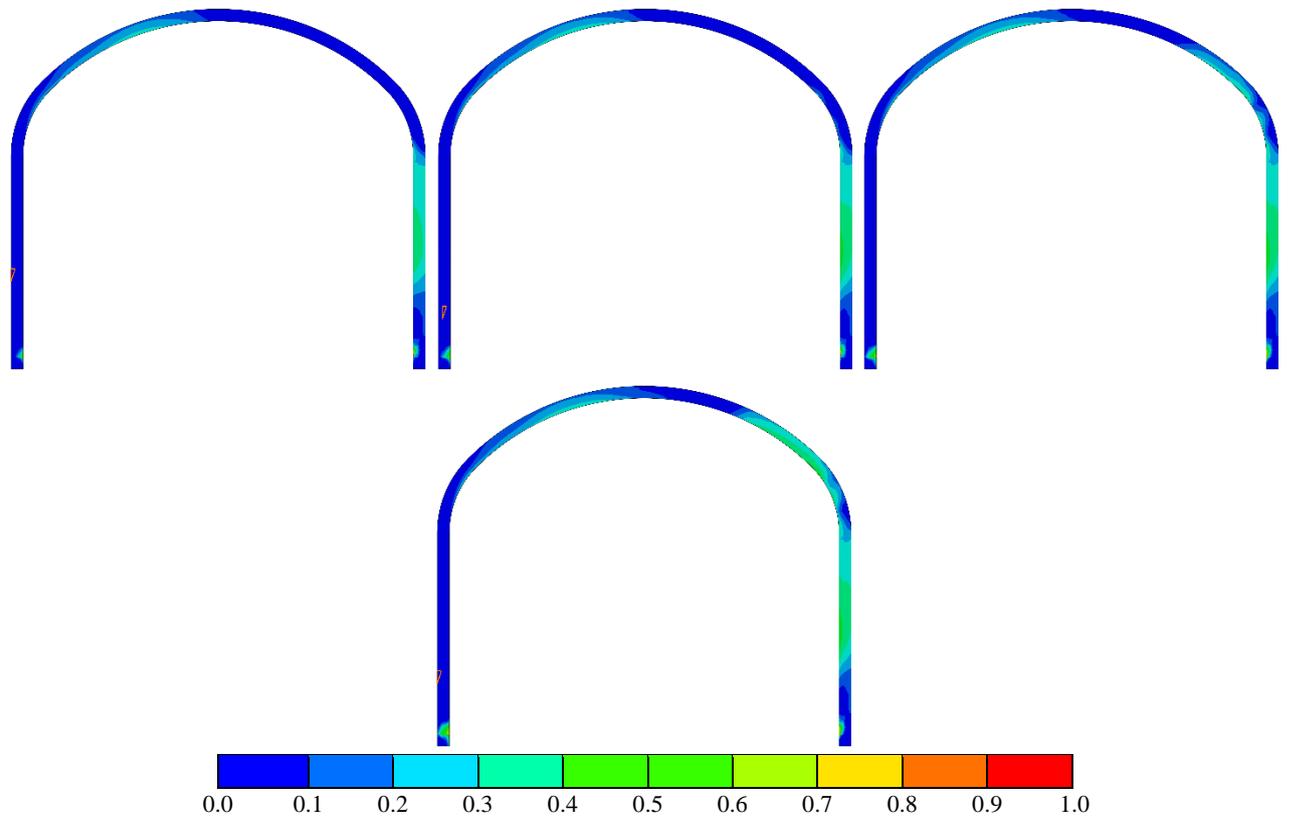


Рисунок 3.72 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема б): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

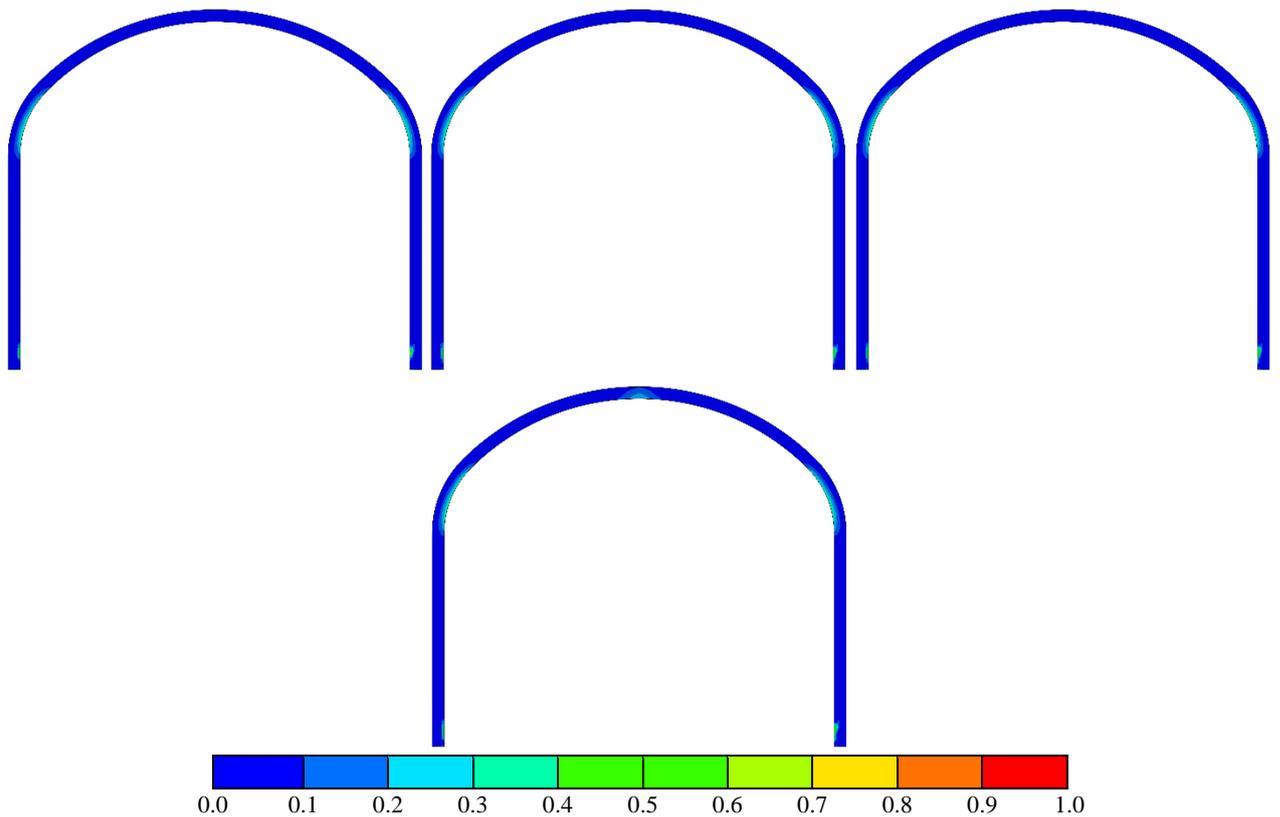


Рисунок 3.73 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 7): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

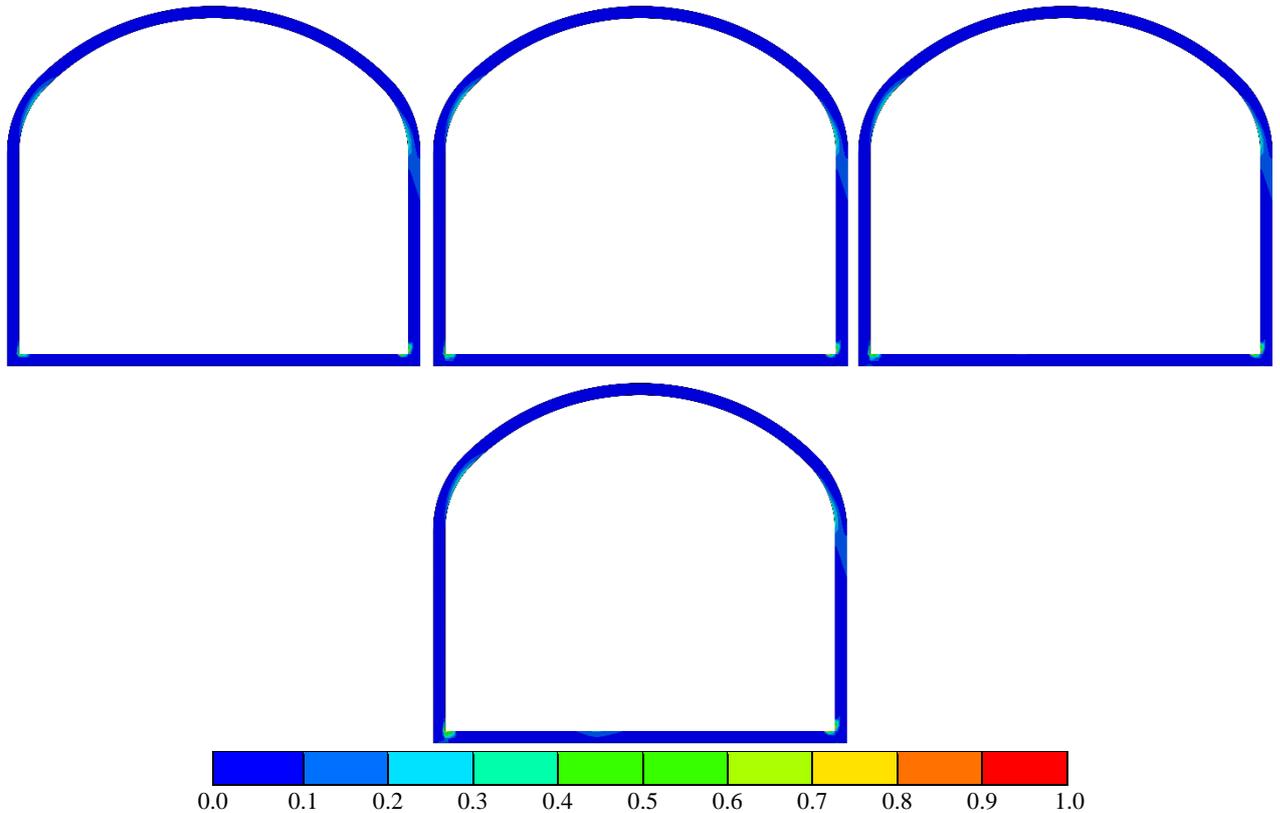


Рисунок 3.74 – Распределение показателя повреждения  $d_t$  в окрестности горной выработки при воздействии массового взрыва (схема 7): 1 – неармированный набрызгбетон; 2 – армированный набрызгбетон; а-д – соответственно картины скоростей перемещений через 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 и 0.025 с.

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. Наблюдается и обратная картина формирования повреждений в крепи.

Дополнительно можно отметить, что интенсивность развития повреждений в неармированной набрызгбетонной крепи происходит значительно быстрее по отношению к дисперсно-армированному набрызгбетону. Скорость накопления повреждений при каждом следующем цикле сейсмического воздействия у неармированного и дисперсно-армированного также несколько отличается, однако для практических расчетов может быть принято одинаковой.

### **3.6. Выводы по главе 3**

Степень повреждения неармированной и дисперсно-армированной крепи в значительной степени отличается. Так, неармированный набрызгбетон уже после первого цикла сейсмического воздействия получает проращение трещин и последующие циклы сейсмического воздействия значительно усиливают данный эффект. При рассмотрении крепи выполненной из дисперсно-армированного набрызгбетона видно, что степень повреждения крепи незначительна, а многократное нагружение не оказывает серьезного влияния, увеличивается только размер зоны повреждения крепи.

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

Схема отработки рудного тела оказывает значительное влияние на величину повреждения крепи. С точки зрения обеспечения сохранности крепи, схема с торцевым выпуском является более рациональной по сравнению со схемой с выпуском на траншейное днище. Для повышения стойкости крепи сейсмическому воздействию рекомендуется использовать дисперсно-армированный набрызгбетон.

На основании полученных в данном разделе исследований выполнено обоснование коэффициента учитывающего влияние многократного сейсмического воздействия на степень повреждения набрызгбетонной крепи, которой является элементов методики расчета и обоснования параметров набрызгбетонной крепи для условий Малеевского рудника

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСЧЕТУ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ С УЧЕТОМ МНОГОКРАТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 4.1. Общие положения

В первых трех главах представлены основные полученные результаты многокомпонентного диссертационного исследования, охватывающего:

- анализ накопленного зарубежного и отечественного опыта строительства и эксплуатации капитальных выработок глубоких рудников, находящихся в зоне сейсмического воздействия.

- анализ аналогичного практического опыта эксплуатации выработок Малеевского рудника.

- натурные наблюдения за изменениями состояния набрызг-бетонных крепей, подверженных воздействию массовых взрывов.

- оценка уровня интенсивности воздействия сейсмических волн на основании приборных измерений векторных скоростей смещения частиц контура выработки.

- численное моделирование процессов деформирования с учетом накопления повреждений набрызгбетонной крепи от многократного воздействия сейсмических волн.

В результате исследований определены технологические пробелы при проектировании и строительстве капитальных горных выработок, находящихся длительное время в зоне влияния сейсмической активности в результате ведения добычных работ с применением технологии массового взрывания на Малеевском руднике, а именно наблюдается снижение несущей способности набрызгбетонных крепей и потеря устойчивости горных выработок [69]. Все эти процессы связаны в первую очередь с накоплением повреждений в материале крепи при воздействии сейсмозрывной нагрузки, а также возникновении дополнительных напряжений при прохождении сейсмических волн.

Установлено, что в методических указаниях по выбору и обоснованию параметров набрызгбетонной крепи не учтено влияния сейсмического

воздействия на формирование ее напряженно-деформированного состояния, а также не принято во внимание снижение прочностных характеристик материала крепи при многократном сейсмическом нагружении. Основное внимание уделяется вопросам определения безопасного расстояния от источника взрыва, за пределами которого повреждение набрызгбетонной крепи не значительно или отсутствует, в то время как вопросы работы такой крепи в зоне интенсивного проявления сейсмического воздействия не рассмотрены.

Конструкции набрызгбетонных крепей, применяемых в условиях Малеевского рудника не адаптированы для работы в зоне активного проявления сейсмического воздействия и в основном рассчитаны на статическое воздействие.

Поиску решения данного вопроса посвящена 4 глава работы.

## **4.2. Разработка рекомендаций по расчету несущей способности набрызгбетонной крепи от статической нагрузки**

### **4.2.1. Особенности механизма потери несущей способности набрызгбетонной крепи**

Набрызгбетонная крепь представляет собой оболочку, которая условно равномерно наносится на поверхность выработки с целью недопущения развития деформаций породного контура, снижения разупрочнения пород в приконтурной зоне и удержания отслаивающихся частей породы от основного породного массива.

Можно выделить две характерные формы разрушения набрызгбетона под действием внешнего воздействия:

- разрушение набрызгбетонной обделки от нагрузки, сформированной в своде обрушения;
- разрушение набрызгбетонной обделки от случайной локальной нагрузки или нагрузки, сформировавшейся над участком между анкерами или в пролете между рамами или арками.

Для первой формы потери устойчивости характерно разрушение крепи от действия касательных напряжений или совместного действия касательных напряжений на части сечения и растягивающих напряжений рисунок 4.1.

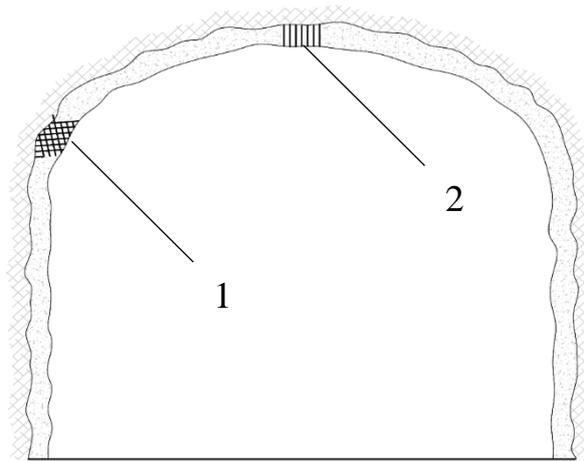


Рисунок 4.1 – Разрушение набрызгбетонной крепи при формировании сплошного свода обрушения (участки формирования зон разрушения крепи приведены условно и могут меняться в зависимости от характера формирования нагрузки): 1 – участок разрушения крепи от преимущественно касательных напряжений; 2 – участок разрушения крепи от совместного действия касательных и нормальных растягивающих напряжений.

Разрушение набрызгбетонной обделки при формировании локального вывала может произойти по одной из схем представленных на рисунке 4.2:

- отслоение набрызгбетонной обделки от породного массива;
- разрушение обделки от действия нормальных растягивающих напряжений в центре или на участках защемления набрызгбетонной крепи;
- разрушения набрызгбетонной крепи за счет срезания на участках действия максимальных касательных напряжений;
- разрушения набрызгбетонной крепи на участках защемления по наклонным трещинам.

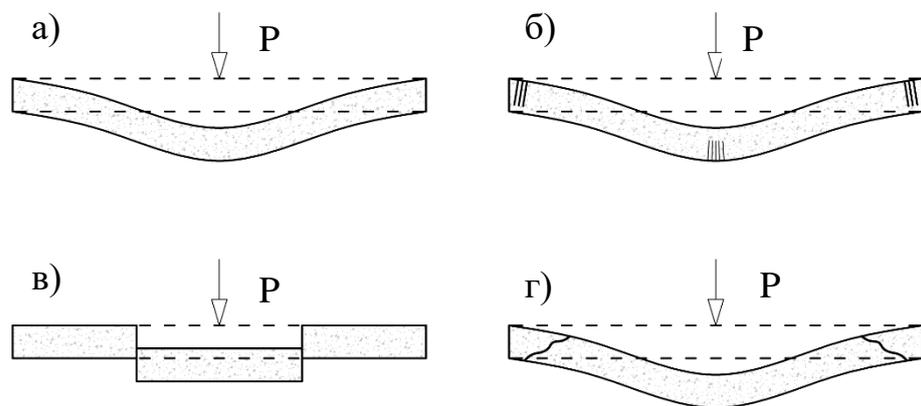


Рисунок 4.2 – Схемы нагружения набрызгбетонной крепи и формы ее разрушения при формировании случайного локального вывала или локального вывала на участке между анкерами или рамами: а – отслоение набрызгбетонной обделки; б - разрушение обделки от действия нормальных растягивающих напряжений; в - разрушения набрызгбетонной крепи за счет среза; г – разрушения набрызгбетонной крепи на участках защемления по наклонным трещинам.

#### 4.2.2. Особенности расчета статической нагрузки на набрызгбетонную крепь

Нагрузки на поддерживающие типы крепей капитальных, подготовительных и нарезных выработок следует определять, исходя из возможной высоты обрушения пород по теории М.П. Цимбаревича. Расчетная схема приведена на рисунке 4.3.

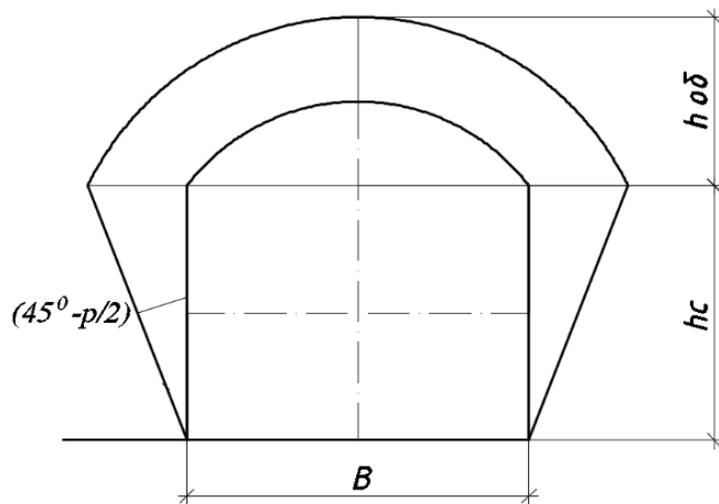


Рисунок 4.3 – Расчетная схема нагрузки на крепь

Величина расчетной нагрузки на крепь на 1 м длины выработки при вывалообразовании пород определяется по формуле 4.1:

$$P_n = \frac{B \times \beta \times \gamma \times L}{2 \times f \times K_{co}}, \quad (4.1)$$

где  $B$  – пролет выработки, м;  $\gamma$  – объемный вес пород, тс/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент, принимаемый равным 0,7 при пролете выработки  $B < 6$  м и равным 1 при  $B \geq 6$  м;  $f$  – коэффициент крепости пород;  $K_{co}$  – коэффициент структурного ослабления (определяется по таблицам 1.2 и 1.3);  $L$  – пролет свода обрушения, м. Пролет можно определить по формуле 4.2:

$$L = B + 2 \times h_c \times \text{tg}(45^\circ - \rho/2), \quad (4.2)$$

где  $h_c$  – высота стенки выработки, м;  $\rho$  – угол внутреннего трения пород, град.

Высота свода обрушения определяется по формуле 4.3

$$h_n = \beta \times L / 2 \times f \times K_{co} = \beta \{ [B/2 + h_c \times \text{tg}(45^\circ - \rho/2)] / f \times K_{co} \}. \quad (4.3)$$

Горизонтальная нагрузка от сил бокового давления определяется по формуле 4.4:

$$P_r = P_n \times \operatorname{tg}^2(45^\circ - \rho/2). \quad (4.4)$$

При определении напряженного состояния набрызгбетонной крепи от локального вывала пород, ширина которого принимается  $B/6$ , но не менее 1 м расчет выполняется по следующей методике [15]. Предполагается что локальный вывал пород можно представить равномерно распределенной нагрузкой действующей на участке прямоугольной формы с размерами по длине  $a$  и по ширине  $b$ . Тогда набрызгбетонную крепь на участке локального вывала с механической точки зрения можно рассматривать как пластину, жестко защемленную со всех сторон.

#### **4.2.3. Определение минимальной величины прочности адгезии между набрызгбетоном и поверхностью породного обнажения**

Несущая способность набрызгбетонной крепи  $c_a$  для восприятия усилий, направленных на отслоение набрызгбетонного слоя от породного контура, можно определить по следующей формуле 4.5:

$$c_a = 4R_{б.а.} a s_a, \quad (4.5)$$

где  $R_{б.а.}$  – предел адгезионной прочности между бетоном и горной породой;  $s_a$  – длина участка адгезионного закрепления, принимается равным 30 мм при плохом качестве сцепления набрызгбетона с породой и 50 мм при хорошем качестве сцепления набрызгбетона с породой.

Ориентировочно величину адгезионной прочности  $R_{б.а.}$  между бетоном и горной породой можно принять равной 0.5 МПа при плохом качестве сцепления набрызгбетона с породой и 1.0 МПа при хорошем.

Преобразовав формулу 4.5 получим выражение 4.6 для определения максимальной величины пролета:

$$a = \frac{W}{4R_{б.а.} s_a}, \quad (4.6)$$

где  $W$  – расчетная величина веса породы в зоне локального вывала.

Приняв минимальные значение адгезионной прочности равное 0.5 МПа и длину участка адгезии равную 30 мм, по формуле (4.6) получим максимальное возможное расстояние между анкерами  $a$  приблизительно равное 2.2 м, что значительно выше практически применяемых значений шага расстановки анкеров на Малеевском руднике и в дальнейшем рассматриваться не будут.

Если величина прочности адгезии набрызгбетона к породному контуру меньше 0.5 МПа, то необходимо выполнить мероприятия по подготовке поверхности породного обнажения, в целях повышения адгезионной прочности.

#### 4.2.4. Определение минимальной толщины набрызгбетонной крепи на действие изгибающего момента

Максимальные нормальные напряжения в центре пластины и на заделке соответственно определим по следующим формулам 4.7

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ц}} &= \beta_2 \frac{qa^2}{\delta_{\text{кр}}^2}; \\ \sigma_{\text{з}} &= \beta_1 \frac{qa^2}{\delta_{\text{кр}}^2},\end{aligned}\tag{4.7}$$

где  $\sigma_{\text{ц}}$  – максимальное нормальное напряжения в центре пластины;  $\sigma_{\text{з}}$  – максимальные нормальные напряжения по центру заделки;  $q$  – равномерно распределенная нагрузка от веса пород в зоне локального вывала;  $a$  – ширина пролета;  $\delta_{\text{кр}}$  – ширина слоя набрызгбетона;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – коэффициенты, учитывающие отношение длины  $a$  к ширине  $b$ .

Значения коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  сведены в таблицу 4.1 для различных соотношений длины  $a$  к ширине  $b$ .

Таблица 4.1 - Значение коэффициентов приведения длины пластины  $\beta_1$  и  $\beta_2$

Отношение длины $a$ к ширине $b$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	$\infty$
Значение коэффициента $\beta_1$	0.3078	0.3834	0.4356	0.4680	0.4872	0.4974	0.5000
Значение коэффициента $\beta_2$	0.1386	0.1794	0.2094	0.2286	0.2406	0.2472	0.2500

Отсюда, с учетом требований нормативных документов толщина набрызгбетонной обделки от воздействия локального вывала определяется по формуле 4.8:

$$\delta_{кр} = a \sqrt{\beta_1 \frac{q_{р.л}}{k_c R_{б.и.}}}, \quad (4.8)$$

где  $q_{р.л}$  – расчетная нагрузка от локального вывала;  $R_{б.и.}$  – прочность набрызгбетона на растяжение при изгибе;  $k_c$  – коэффициент условия работы, принимается равным 0.6 для условий, когда прочность набрызгбетона нанесенного на стенку выработки не соответствует (меньше) прочности при принятом классе бетона по прочности и 1.0 для армированных конструкций и когда прочность набрызгбетона нанесенного на стенку выработки соответствует (больше) прочности при принятом классе бетона по прочности.

Для выполнения практических расчетов приняв, что длина участка вывала  $a$  равна ширине  $b$  и максимальные напряжения формируются на границе защемления формулу 4.8 и приняв, что  $a = B_{выр}/4$ , получим выражение 4.9:

$$\delta_{кр} = 0.555 \frac{B_{выр}}{4} \sqrt{\frac{\gamma \cdot h_{об}}{k_c R_{б.и.}}} = 0.18 B_{выр} \sqrt{\frac{\gamma \cdot h_{н}}{R_{б.и.}}}, \quad (4.9)$$

где  $R_{б.р.}$  – расчетное значение прочности набрызгбетона на осевое растяжение;  $\gamma$  – объемный вес пород в зоне вывала.

Высота свода обрушения определяется по формуле 4.10:

$$h_{н} = \beta \times L / 2 \times f \times K_{со} = \beta \{ [B/2 + h_c \times \text{tg}(45^\circ - \rho/2)] / f \times K_{со} \}. \quad (4.10)$$

#### 4.2.5. Определение минимальной толщины набрызгбетонной крепи при срезе

Величина несущей способности при срезе определяется по следующей формуле 4.11:

$$c_a = 4R_{б.ср.} a \delta_{кр}, \quad (4.11)$$

где  $R_{б.ср.}$  – прочность набрызгбетона срезу.

Тогда, минимальную толщину набрызгбетонной крепи  $\delta_{кр}$  по фактору продавливания определим по формуле 4.12:

$$\delta_{кр} = \frac{W}{4R_{б.ср.}a}. \quad (4.12)$$

где  $W$  – вес пород в зоне локального вывала;  $R_{б.ср.}$  – прочность бетона срезу.

#### 4.2.6. Определение минимальной толщины набрызгбетонной крепи из условия невозможности формирования наклонных трещин

Величина несущей способности набрызгбетонной крепи на продавливание (формирование наклонных трещин) определяется по следующей формуле 4.13

$$c_{ps} = R_{б.пр.}(c + d)\delta_{кр}, \quad (4.13)$$

где  $R_{б.пр.}$  – прочность набрызгбетона на растяжение по диагональной трещине;  $c$  – ширина опорной пластины анкера (в случае расчета на случайный локальный вывал набрызгбетонной крепи, не усиленной анкерами, принимается равным 0);  $d$  – расстояние от края пластины до участка начала формирования наклонной трещины.

Величину  $d$  определяют по формуле 4.14:

$$d = \sqrt{\left(\frac{c}{4}\right)^2 + \frac{V}{4R_{б.пр.}}} - \frac{c}{4}; \quad (4.14)$$

$$V = q_{р.л}(a^2 - c^2)$$

где  $V$  – вес породы в нарушенной зоне, приходящийся на грузовую площадь.

Анализ результатов расчетов параметров крепи по формулам 4.7 – 4.14 показал, что основным механизмом разрушения набрызгбетонной крепи на действие 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  $\gamma$  равным  $30 \text{ кН/м}^3$ , получим итоговую формулу 4.15 для расчета толщины набрызгбетонной крепи:

$$\delta_{кр}(\text{см}) = B_{выр} \sqrt{\frac{h_n(\text{м})}{R_{б.и.}(\text{МПа})}}. \quad (4.15)$$

### **4.3. Разработка рекомендаций по расчету параметров набрызгбетонной крепи с учетом дополнительного динамического воздействия от массовых взрывов**

На сегодняшний день расчет крепей выработок в условиях Малевского рудника выполняется на основании условия формирования участков вывала пород из нарушенной зоны в окрестности горных выработок, вызванной непосредственно проведением горных выработок или ведением очистных работ и не включает учет влияния сейсмического воздействия на несущую способность крепи.

Для учета влияния сейсмического воздействия при выборе параметров крепи необходимо расширить следующие расчетные положения методики выбора и обоснования параметров набрызгбетонной крепи:

- учесть влияние сейсмического воздействия на напряженное состояние крепи;
- учесть снижение прочности материала набрызгбетонной крепи при многократном нагружении.

На основании выполненных исследований определено, что в результате сейсмического воздействия от массовых взрывов, происходит формирование микро и макротрещин в набрызгбетонной крепи, результирующим показателем которых является показатель накопления повреждений, который характеризует снижение прочности набрызгбетона по отношению к исходной его прочности. Данный показатель определен на основании прямых динамических расчетов, то есть учитывается изменение НДС набрызгбетонной крепи в результате динамического воздействия. Сами повреждения в крепи формируются в результате совместного деформирования крепи с породным массивом, вызванным распространением сейсмических волн. При расчете параметров крепи используется статическая схема формирования нагрузки на крепь. С учетом того, что в работе динамические процессы не настолько значительны, чтобы привести к выбросу породы из выработанного пространство, основное их влияние сводится к накоплению повреждений в крепи, а следовательно, к снижению её несущей способности.

Таким образом включив в формулу 4.15 коэффициент  $k_{\text{пнб}}$ , который определяет во сколько раз снижается прочность набрызгбетона относительно исходной величины при многократном сейсмическом воздействии, получим формулу 4.16:

$$\delta_{\text{кр}}(\text{см}) = B_{\text{выр}} \sqrt{\frac{h_{\text{н}}(\text{м})}{k_{\text{пнб}} R_{\text{б.и.}}(\text{МПа})}} \quad (4.16)$$

где  $h_{\text{н}}$  – размер нарушенной зоны, м;  $k_{\text{пнб}}$  – коэффициент, учитывающий накопление повреждений в набрызгбетонной крепи в результате многократного сейсмического воздействия.

Величина коэффициента  $k_{\text{пнб}}$  определяется по формуле 4.17, 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  $k_{\text{пнб.м}}$ :

$$k_{\text{пнб}} = 1 - k_{\text{пнб.о}} k_{\text{пнб.м}} \quad (4.17)$$

Численные значения данных коэффициентов для условий Малеевского рудника определены на основании обработки результатов численных исследований представлены на рисунке 4.4 отдельно для неармированного и армированного набрызгбетона.

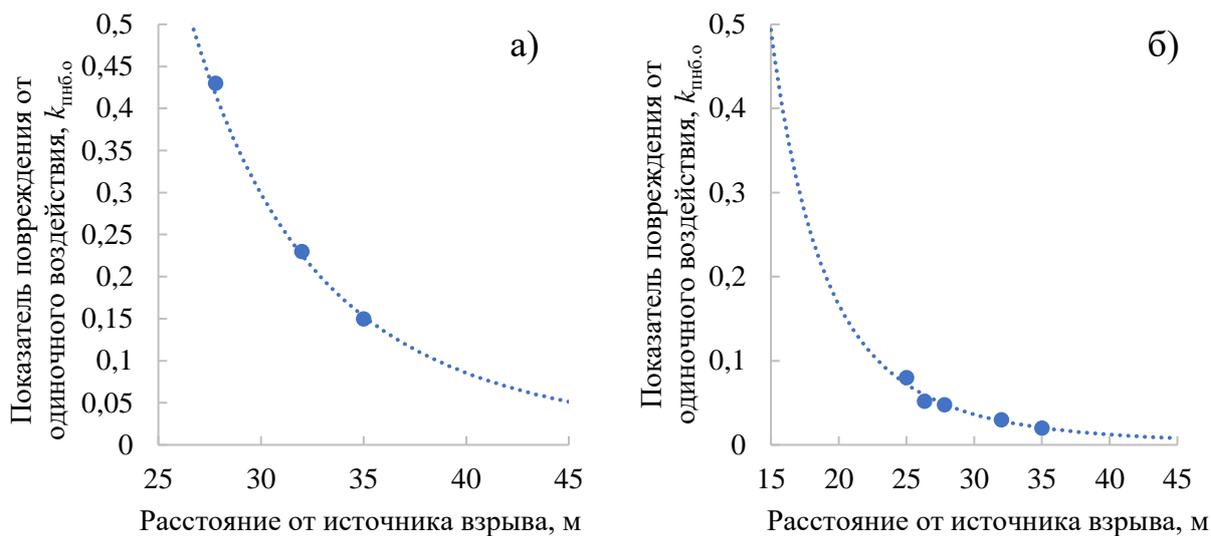


Рисунок 4.4 – Закономерности повреждения набрызгбетонной крепи при однократном сейсмическом воздействии: а – неармированный набрызгбетон; б – дисперсно-армированный набрызгбетон.

Снижение прочности набрызгбетона при многократном сейсмическом воздействии принято одинаковым как неармированного, так и для армированного набрызгбетона и представлено в виде диаграммы на рисунке 4.5.

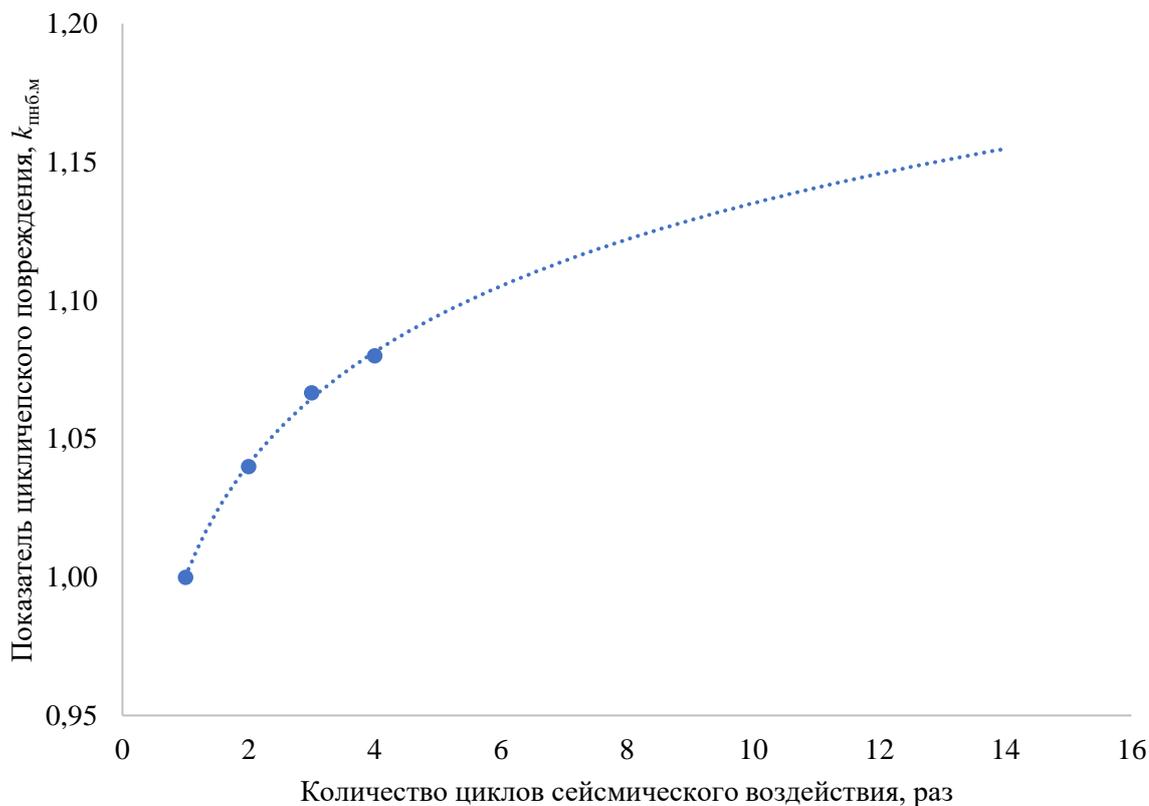


Рисунок 4.5 – Закономерность снижения прочности набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии

На основании выполненных исследований установлено, что  $k_{\text{пнб}}$  для неармированного набрызгбетона составляет 0.5, если выработка располагается в пределах радиуса критического воздействия. Таким образом несущая способность набрызгбетонной крепи в значительной степени снижается относительно исходных ненарушенных характеристик набрызгбетона, а использование неармированной набрызгбетонной крепи не рекомендуется в зоне, определенной радиусом критического воздействия.

Радиус критического воздействия  $R_{\text{кв}}$  (м) можно определить по следующей формуле 4.18.

$$R_{\text{кв}} = \sqrt[3]{\frac{Q}{\left(\frac{V}{800}\right)^2}}, \quad (4.18)$$

где  $Q$  – эквивалентная масса одновременно взрываемого ВВ, кг;  $V$  – допустимая скорость колебания частиц породы, см/сек.

#### 4.4. Методика выбора типа и параметров крепи на Малеевском руднике

На основе выполненных исследований и представленной методики расчета параметров набрызгбетонной крепи разработана Методика выбора типа и параметров креплений на Малеевском руднике, учитывающая влияние многократного сейсмического воздействия на набрызгбетонную крепь горной выработки.

Согласно разработанной методике, выбор типа и параметров крепления на Малеевском руднике выполняется в следующем порядке:

1. Определение категорий устойчивости с использованием классификации Q-Бартона и установление степени структурной нарушенности породного массива
2. Определение размеров свода обрушения ( $h_{\text{н}}$ ) с учетом степени структурной нарушенности пород и их прочностных характеристик.
3. Расчет параметров набрызгбетонной крепи на статическое воздействие с учетом полученного коэффициента  $k_{\text{пнб}}$ .

#### 4.4.1. Определение категорий устойчивости с использованием классификации Q-Бартона

Выбор типов крепи производится по категориям устойчивости руд и пород. Классификация горных пород по устойчивости принята в соответствии с «Правилами технической эксплуатации горных выработок Малеевского рудника» (Таблица 4.2).

Прочность пород в массиве зависит от его трещиноватости и блочности, характеристики которых приведены в таблице 4.3. Категория устойчивости породы в основном определяется ее прочностью и коэффициентом структурного ослабления  $K_{co}$  (отношение прочности пород в образце к прочности пород в массиве) представленного в таблице 4.4.

Условия поддержания выработок в зависимости от устойчивости пород приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.2 - Классификация руд и пород по устойчивости

Категория	Степень устойчивости	Допустимая площадь горизонтального обнажения и необходимость крепления
I	весьма устойчивые	не требуют крепления при обнажении и длительном стоянии на площади 1000 м <sup>2</sup> и более
II	устойчивые	допускают обнажение без крепления до 600 м <sup>2</sup> , при длительном стоянии требуют крепления только в ослабленных местах
III	средней устойчивости	допускают обнажение без крепления до 100 м <sup>2</sup> , требуют крепления при длительном стоянии
IV	неустойчивые	допускают обнажение без крепления до 10 м <sup>2</sup> , требуют крепления при длительном стоянии
V	весьма неустойчивые	исключают обнажение без крепления

Таблица 4.3 - Характеристика трещиноватости пород

Степень трещиноватости	Коэффициент структурного ослабления $K_{co}$	Показатели трещиноватости и блочности	
		количество трещин на 1 м <sup>2</sup>	расстояние между трещинами (ребро приведенного куба), см
Слаботрещиноватые	0,4-0,9	0-8	>35
Среднетрещиноватые	0,2-0,4	8-15	15-35
Сильнотрещиноватые	0,1-0,2	15-30	5-15
Раздробленные	<0,1	>30	<5

Таблица 4.4 - Категории устойчивости горных пород в зависимости от крепости и трещиноватости

Категория	Степень устойчивости	Степень трещиноватости	Коэффициент структурного ослабления, $K_{co}$	Коэффициент крепости пород, $f^{*})$
I	Весьма устойчивые	Слаботрещиноватые	0,4-0,75	13
		Среднетрещиноватые	0,25-0,4	15
II	Устойчивые	Слаботрещиноватые	0,4-0,7	15-10
		Среднетрещиноватые	0,2-0,4	17-11
III	Среднеустойчивые	Слаботрещиноватые	0,4-0,7	11-6
		Среднетрещиноватые	0,2-0,4	13-7
		Сильнотрещиноватые	0,1-0,2	20-9
IV	Неустойчивые	Слаботрещиноватые	0,4-0,7	7-2
		Среднетрещиноватые	0,2-0,4	9-2
		Сильнотрещиноватые	0,1-0,2	12-3
V	Весьма неустойчивые	Слаботрещиноватые	0,2-0,4	$\leq 2$
		Среднетрещиноватые	0,1-0,2	$\leq 3$
		Сильнотрещиноватые	$< 0,1$	

Примечание - \*) - Большие значения  $K_{co}$  соответствуют меньшим значениям  $f$ .

Таблица 4.5 - Условия поддержания выработок в зависимости от устойчивости пород

Степень устойчивости пород	Длительность устойчивого стояния	Условия поддержания выработок
Весьма устойчивые	неограниченная	при длительном стоянии не требуют крепления
Устойчивые	6 месяцев	при длительном стоянии крепление требуется только в отдельных местах
Средней устойчивости	до 0,5 месяца	допускают обнажения без крепления, но через некоторое время требуют крепления
Неустойчивые	1-3 суток	требуют крепления вслед за проведением выработок
Весьма неустойчивые	-	исключает проведение выработок без крепления

Численное значение индекса качества выработок (Q-система) определяется следующим выражением 4.19:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF'} \quad (4.19)$$

где  $RQD$  – показатель качества породы;  $J_n$  – показатель количества систем трещин;  $J_r$  – показатель шероховатости поверхности трещин;  $J_a$  – показатель измененности (сцепления) трещин;  $J_w$  – водный фактор;  $SRF'$  – фактор снижения напряжений.

Отношение  $RQD/J_n$  представляет собой строение массива и является приближенным значением размера блока, с двумя экстремальными значениями (100/0,5 и 10/20). Вероятно, большие блоки должны быть в несколько раз больше среднего размера блока, а более мелкие фракции – составляют менее половины этого блока (глинистые фракции не рассматриваются).

Отношение  $J_r/J_a$  – прочность на сдвиг вдоль поверхности трещин, представляет характеристики шероховатости стенок трещин и материала, заполняющего трещины и их фрикционные свойства. Это отношение имеет наиболее благоприятное значение при шероховатых поверхностях трещин, трещин с низкой степенью выветривания по направлению вдоль контакта.

Отношение  $J_w/ SRF$  – активный коэффициент напряженного состояния.

Параметр  $J_w$  представляет собой параметр давления грунтовых вод, который снижает прочность породы на срез из-за снижения нормальной составляющей давления. К тому же подземные воды могут привести к эффекту размягчения породы и возможности вымывания глинистых частиц из трещин.

Параметр снижения напряжений  $SRF$  – это параметр, указывающий уменьшение нагрузки в случае: сдвиговых зон и глиносодержащих пород, напряжений, действующих в крепкой породе, сжимающих нагрузок в пластичных слабых породах.

Классификация пород по критерию  $Q$  – Бартона согласуется с классификацией, принятой в ПТЭ. В таблице 4.6 приведены интервалы  $Q$ -рейтингов относительно категорий устойчивости.

Таблица 4.6- Интервалы  $Q$ -рейтингов относительно категорий устойчивости

Рейтинг горных пород по показателю $Q$	Категория по ПТЭ	Категория устойчивости
> 40	I	Весьма устойчивые
10 - 40	II	Устойчивые
4 - 10	III	Средней устойчивости
0,1 - 4	IV	Неустойчивые
< 0,1	V	Весьма неустойчивые

Допустимое отставание крепи от забоя для капитальных и подготовительных выработок в зависимости от устойчивости пород представлено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Типы крепей и их отставание от забоя в зависимости от устойчивости пород

Категория устойчивости	Тип крепи	Допускаемое отставание крепи от забоя
I	Без крепи	не регламентируется
	Торкретбетонная	не регламентируется
II	Без крепи	не регламентируется
	Торкретбетонная	не регламентируется
III	Штанговая	штанги до 5 м
	Комбинированная - штанги с сеткой и (или) торкретбетон	штанги с сеткой до 5 м, торкретбетон до 50 м
IV	Комбинированная - анкера+ металлическая сетка и толстый торкретбетон	не допускается отставание крепи, требуется крепление вслед за проходкой
	Комбинированная - штанги+сетка+ толстый (10-15 см) набрызгбетон	
V	Усиленные виды крепи (арочная, бетонная, комбинированная)	требуется применение специальных методов проходки (установка опережающей крепи или иньектирование пород)

#### 4.4.2. Определение размера нарушенной зоны в окрестности горной выработки

Величина расчетной нагрузки на крепь на 1 м длины выработки при вывалообразовании [6] пород определяется по формуле 4.20 :

$$P_n = \frac{B \times \beta \times \gamma \times L}{2 \times f \times K_{co}}, \quad (4.20)$$

где  $B$  – пролет выработки, м;  $\gamma$  - объемный вес пород, тс/м<sup>3</sup>;  $\beta$  - коэффициент, принимаемый равным 0,7 при пролете выработки  $B < 6$  м и равным 1 при  $B \geq 6$  м;  $f$  - коэффициент крепости пород;  $K_{co}$  – коэффициент структурного ослабления (определяется по таблицам 1.2 и 1.3.);  $L$  – пролет свода обрушения определим по формуле 4.21, м.

$$L = B + 2 \times h_c \times \text{tg}(45^\circ - \rho/2), \quad (4.21)$$

где  $h_c$  – высота стенки выработки, м;  $\rho$  - угол внутреннего трения пород, град.

Высота свода обрушения определяется по формуле 4.22

$$h_n = \beta \times L / 2 \times f \times K_{co} = \beta \{ [B/2 + h_c \times \text{tg}(45^\circ - \rho/2)] / f \times K_{co} \}. \quad (4.22)$$

Горизонтальная нагрузка от сил бокового давления определяется по формуле 4.23:

$$P_r = P_n \times \operatorname{tg}^2(45^\circ - \rho/2). \quad (4.23)$$

#### 4.4.3. Определение параметров набрызгбетонной и дисперсно-армированной набрызгбетонной крепей

Толщина набрызгбетонной крепи горной выработки для условий Малеевского рудника, расположенная в зоне влияния сейсмического воздействия определяется по следующей формуле 4.24:

$$\delta_{кр}(\text{см}) = k_n B_{\text{выпр}} \sqrt{\frac{h_n(\text{м})}{k_{\text{пнб}} R_{\text{б.и.}}(\text{МПа})}}, \quad (4.24)$$

где  $h_n$  – размер нарушенной зоны, м;  $R_{\text{б.и.}}$  – расчетная прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа (таблица 4.8);  $k_{\text{пнб}}$  – коэффициент, учитывающий накопление повреждений в набрызгбетонной крепи в результате многократного сейсмического воздействия;  $k_n$  – коэффициент условия работы набрызгбетона, принимается по таблице 4.9.

Таблица 4.8 - Значения расчетной прочности бетона на растяжение при изгибе

Класс бетона	$B_{\text{тб}} 2,0$	$B_{\text{тб}} 2,4$	$B_{\text{тб}} 2,8$	$B_{\text{тб}} 3,2$	$B_{\text{тб}} 3,6$	$B_{\text{тб}} 4,0$
$R_{\text{б.и.}}$ МПа	1,54	1,85	2,16	2,46	2,77	3,08

Таблица 4.9 - Значение коэффициента  $k_n$

Тип используемого бетона	В зоне влияния очистных работ	Вне зоны влияния очистных работ, при сроке службы выработки		
		10 лет	10-25 лет	более 25 лет
Неармированный (НБ)	1,1	1	1,2	1,4
Армированный (АНБ)	0,8	0,8	1	1,1

#### 4.5. Рекомендации по креплению горных выработок расположенных в слабоустойчивой части горного массива

Основные исследования в настоящей работе направлены на обоснование параметров набрызгбетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии. Установлено, что крепление горных выработок в таких условиях неармированным набрызгбетоном может привести к значительному объему работ по перекреплению горных выработок, что в целом подтверждается данными Малеевского рудника, а также опытом крепления горных выработок на других

рудниках, расположенных в зонах ведения массовых взрывов. В целом, рекомендуется для таких условий использовать дисперсно-армированные набрызгбетонные крепи, степень повреждения которых многократно меньше по отношению к неармированному набрызгбетону.

Однако, в слабоустойчивых породных массивах, где свод обрушения достигает значительных размеров, и формируется разрушение от полной нагрузки, сформированной в своде обрушения, применение НБ как единственного вида крепления неэффективно и не безопасно. Для таких условий разработан принципиально новый способ крепления, на который получен патент RU 2 743 161 С1 «Способ крепления горных выработок анкерами с армированными поясами»

Изобретение относится к горнодобывающей промышленности и может быть использовано при креплении выработок в слабоустойчивых горных породах любой крепью, подразумевающей соединение элементов между собой.

Основными результатами являются - увеличение скорости проходки за счет механизации отдельных операций, а также повышение безопасности ведения горных работ в призабойном пространстве за счет повышения надежности крепления в сложных условиях.

Полученный результат достигается тем, что на анкера навешивают фиксирующие элементы для крепления арматуры, которую продевают в проушины фиксирующих элементов, затем повторно наносят слой торкрет-бетона и формируют объемные армированные пояса (рисунок 4.6).

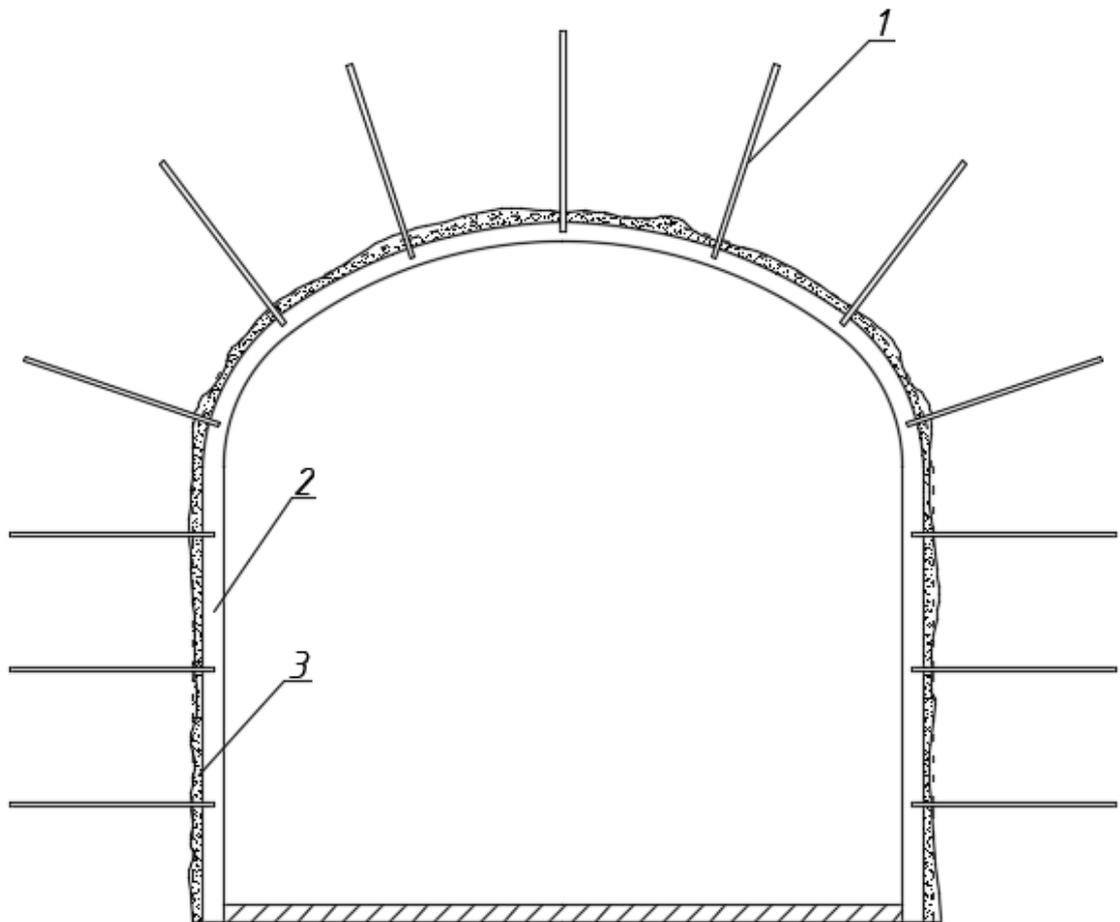


Рисунок 4.6 – Сечение выработки, закрепленной крепью с армированным поясом; 1 - фрикционный анкер; 2 – армированный пояс; 3 – выравнивающий торкрет-бетонный слой

Способ осуществляют следующим образом. При проведении выработок в слабоустойчивых горных породах осуществляется комплекс буровзрывных работ по выбранной технологии с величиной заходки не менее 1,5 м. После проведения комплекса буровзрывных работ выполняется уборка породы, обезопасивание и доведение выработки до проектного сечения.

Процесс крепления начинается с возведения временной крепи из торкрет-бетона толщиной от 100 до 150 мм на всю величину заходки. Торкрет-бетонирование производится при помощи бетононасоса и распылителя.

Затем производится установка крепи из забивных фрикционных анкеров с расчетным шагом, не превышающим 0,9х0,9 м. Длина анкеров рассчитывается исходя из условий, но принимается не менее 2,5 м. Одновременно с установкой анкеров на них навешиваются уголки с проушинами, которые являются фиксирующими элементами для создания армированного пояса (рисунок 4.7).

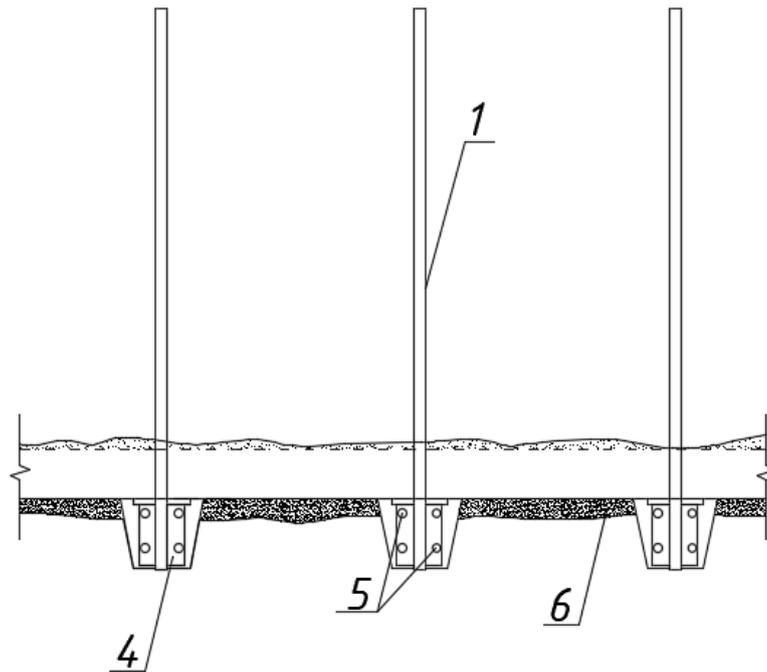


Рисунок 4.7 – сечение армированного торкрет-бетонного пояса; 4 – фиксирующие элементы; 5 – арматура; 6 – окончательный слой набрызгбетона.

Установка арматуры, например А400,  $\geq d16$ , осуществляется путем продевания ее через проушины фиксирующих элементов. После окончания формирования каркаса из арматурных стержней производится нанесение окончательного слоя торкрет-бетона толщиной, необходимой для создания защитного слоя над стальными элементами. Толщина слоя торкрет-бетона принимается не менее 300 мм. Полученная конструкция является армированным поясом.

Результатом выполнения описанных операций является комбинированная крепь, состоящая из анкеров и армированных поясов с заданным шагом.

Способ поясняется следующим примером. При проведении горных выработок в зоне тектонических нарушений принимается базовый вариант крепления, включающий опережающую крепь, слой набрызгбетона толщиной 200 мм и слой монолитной бетонной крепи толщиной 300 мм. Используемый способ отличается низкой производительностью труда и темпами проходки выработок.

Для решения вышеуказанных недостатков можно применять предлагаемый способ крепления горных выработок анкерами с армированными поясами. Параметры крепления рассчитаны на следующие условия: ширина выработки

$B=5,8$  м, приведенный показатель качества пород по Бартону  $Q_A = 0,02$ , показатель качества контактов трещин  $J_r = 2$ .

Перед возведением предлагаемого варианта крепления также выполняется опережающее крепление для обеспечения устойчивости призабойной зоны на момент возведения крепи. Глубина опережающего крепления равна величине заходки, которая составляет 1,5 м. В качестве временной крепи используется набрызгбетонная крепь толщиной 150 мм. Затем устанавливается сетка из фрикционных анкеров со следующими параметрами: глубина  $L=3$  м, диаметр анкера –  $d=50$  мм.

После завершения подготовительных работ производится возведение армированного пояса толщиной 300 мм на фиксирующие элементы, которые крепятся на анкера при их установке. Фиксирующие элементы представляют собой металлические уголки с разной длиной полок. Геометрический центр выреза располагается на расстоянии не менее 50 мм от обеих граней. Длины полок определяются в зависимости от диаметра арматуры и анкеров.

Использование заявляемого способа позволяет повысить скорость ведения работ, устойчивость к воздействию динамических нагрузок и долговечность конструкции, а также снизить материалоемкость крепи.

При проходке выработки по контакту различных по устойчивости пород отставание крепи следует принимать по наиболее слабой их разновидности. Отставание крепи указано по состоянию забоя после производства взрывных работ. При остановке проходки выработки крепь необходимо подвести вплотную к забою.

#### **4.6. Выводы по главе 4**

На основании полученных в данном разделе 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.

Установлено, что крепление горных выработок в условиях многократного сейсмического нагружения неармированным набрызгбетоном может привести к значительному объему работ по перекреплению горных выработок, что в целом подтверждается данными Малеевского рудника, а также опытом крепления горных выработок на других рудниках, расположенных в зонах ведения массовых взрывов. В целом, рекомендуется для таких условий использовать дисперсно-армированные набрызгбетонные крепи, степень повреждения которых многократно меньше по отношению к неармированному набрызгбетону.

Однако, в слабоустойчивых породных массивах, где свод обрушения достигает значительных размеров, и формируется разрушение от полной нагрузки, сформированной в своде обрушения, применение НБ как единственного вида крепления неэффективно и не безопасно. Для таких условий разработан принципиально новый способ крепления, на который получен патент RU 2 743 161 С1 «Способ крепления горных выработок анкерами с армированными поясами»

## 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.

Необходимо отметить, что расположение источника сейсмического воздействия относительно горной выработки в значительной степени изменяет характер повреждения. Это связано с особенностями деформирования крепи при прохождении сейсмических волн. Данный вопрос в представленной работе детально не рассматривается, и станет следующим этапом исследований, так как требует отдельного направленного изучения и осмысления.

Часть методики, а также выработанные на ее основании рекомендации к расчету несущей способности набрызгбетонной крепи применены для корректировки действующих регламентов по выбору и расчету параметров крепления горных выработок Малеевского рудника, ГОК «Алтай», что подтверждается соответствующим актом апробации результатов представленном в Приложении А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный расчет безопасных условий сейсмики взрывов (АРБУС-В) / В.Х. Пергамент, А.Б. Атлас, И.Т. Мельников, В.С. Сураев: Учебное пособие – Текст: непосредственный // Магнитогорск: МГМИ. 1993. – 64с
2. Азаркович, А.Е. Взрывные работы вблизи охраняемых объектов / А.Е. Азаркович, М.И. Шуйфер, А.П. Тихомиров. – Текст: непосредственный // Москва: Недра, 1984. – 213с.
3. Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов: Учебное пособие для вузов / Б.Н. Кутузов, В.К. Совмен, Б.В. Эквист, В.Г. Вартанов – Текст: непосредственный // Москва: Изд-во МГГУ, 2004. – 180с.
4. Беляев, А.Г. Опыт работы ООО «Азот-Черниговец»: применение систем электронного взрывания «DAVEYTRONIC» на горнодобывающих предприятиях / А.Г. Беляев, М.Ф. Набиулин – Текст: непосредственный // Уголь. – 2013. - №10. – С.4-6.
5. Бибик, И.П. Сравнительный анализ применения неэлектрических и электрических систем инициирования взрывов скважинных зарядов на карьерах / И.П. Бибик, В.П. Ершов – Текст: непосредственный // Горный вестник Узбекистана. – 2006. - №2 (25). – С.36-38.
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.
7. Виноградов, Ю.И. Особенности сейсмического мониторинга при ведении взрывных работ вблизи действующего газопровода / Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов, С.Т. Соколов – Текст: непосредственный // Известия тульского государственного университета. 2019. №1. С. 296-305.
8. Влияние взрывных работ разреза "Заречный" на капитальные горные выработки шахты "Талдинская-Западная -2" / Менжулин М.Г., Афанасьев П.И.,

Коршунов Г.И., Щипачев А.С. – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. Т.2. С.591-596

9. Василец, В.Н. Обеспечение условий безопасной эксплуатации горнотранспортного комплекса при воздействии сейсмозрывных волн / В.Н. Василец, П.И. Афанасьев, А.А. Павлович – Текст: непосредственный // ГИАБ. – 2020. - №1. – С.26-35.

10. Верховланцев, А.В. Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на здания и сооружения / А.В. Верховланцев, Д.Ю. Шулаков – Текст: непосредственный // Геофизика. – 2014. - №4. -С.40-45.

11. Викторов, С.Д. Снижение сейсмического воздействия массовых взрывов в карьере на устойчивость породного массива и подземных сооружений при комбинированной разработке угольных месторождений / С.Д. Викторов, В.Н. Захаров, В.М. Закалинский – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2016. - №12. – С.40-44.

12. Виноградова, М.Б. Теория волн / М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. - Москва: Наука, 1979. – 384 с.

13. Выходцев, Я.Н. Разработка математической модели воздействия сейсмозрывной волны на массив горных пород, включающий горизонтальную выработку: 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Выходцев Ярослав Николаевич; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2018. – 125 с. – Текст: непосредственный.

14. Геомеханический мониторинг напряженно-деформированного состояния массива на Малеевском месторождении при развитии очистных работ: отчет о НИР. - М.: РГГРУ, 2007.

15. Геомеханическое обоснование отсыпки отвалов "сухих" пород на гидроотвалах / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова, М.А. Карасев, Н.Г. Фоменко – Текст: непосредственный // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология,

геокриология. Москва: Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева (РАН), 2015. – с. 220-225

16. Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий / В.В. Адушкин, С.П. Соловьев, А.А. Спивак, В.М. Хазинс – Текст: непосредственный // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2020. - №2. - С.164-178.

17. Голдобина, Л.О. Исследование свойств фибробетона при различных условиях набора прочности / Л.О. Голдобина, В.Ю. Синегубов – Текст: непосредственный // COLLOQUIUM-JOURNAL. 2019. Т. 13-3 (37). С. 24-30. ISSN 2520-6990

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

19. Господариков, А.П. Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики/ А.П. Господариков, М.А. Зацепин – Текст: непосредственный DOI: 10.17580/PMI.2019.12.03 // Горный Журнал. 2019. Т. 12. С. 16-20.

20. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2017 г. № 721-ст : введен впервые : - Москва : Стандартиформ, 2017. - 28 с. - Текст непосредственный.

21. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию = Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and evaluation of its effects on structure : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по

техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2007 г. № 586-ст : введен впервые : дата введения 2008-10-01 / разработан Открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем". - Текст непосредственный. Москва: Стандартинформ, 2008 г. – 20с.

22. Григорян, С.С. Об основных представлениях динамики грунтов / С.С. Григорян – Текст: непосредственный // ПММ. – 1960. – Т. 24. - № 6. – С. 1057-1072.

23. Григорян, С.С. О действии сильного взрыва на поверхности скального полупространства / С.С. Григорян, Л.С. Евтерев – Текст: непосредственный // ДАН СССР. - 1975. - Т. 222.-№3.-С. 544-547.

24. «Единые правила безопасности при ведении взрывных работ» ПБ 13-407-01. Москва: ЗАО НТЦ ПБ, 2009

25. Еременко, А.А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории / А.А. Еременко, И.В. Машуков, В.А. Еременко – Текст: непосредственный // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2017. - №1. - С.70-76.

26. Закономерности деформирования выработок при динамических формах проявлений горного давления / В.Л. Трушко, А.Г. Протосеня, Ю.Н. Огородников, О.В. Колосова – Текст: непосредственный // Записки Горного института. 2001. Т. 149. С. 185-187. ISSN 0135-3500.

27. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ / Г.В. Гриб, А.Ю. Пазынич, Н.Н. Гриб, Е.Е. Петров – Текст: непосредственный // Известия Самарского НЦ РАН. – 2012. – Т.14. - №1(8). - С.2112-2117.

28. Изменение состояния массива горных пород от импульсных нагрузок промышленных взрывов / Н.Н. Гриб, Г.В. Гриб, В.С. Имаев, М.В. Терещенко – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2016. - №10. – С.31-33.

29. Козырев, С.А. Сейсмическое действие подземных массовых взрывов на поверхностные сооружения / С.А. Козырев – Текст: непосредственный // Вестник МГТУ. – 1998. -Т. 1. - №3. – С.123-126.

30. Козырев, С.А. Особенности сейсмического действия массовых взрывов в системах этажного принудительного обрушения с отбойкой руды веерами скважин / С.А. Козырев – Текст: непосредственный // ГИАБ, 1999. – с.111-114

31. Козырев, С.А. Реакция массива горных пород на мощные динамические воздействия / С.А. Козырев, Е.А. Усачев – Текст: непосредственный // Вестник Кольского НЦ РАН. – 2011. - №3. – С.22-30.

32. Козырев, С.А. Проявление техногенной сейсмичности при производстве массовых взрывов на подземных рудниках ОАО «Апатит» / С.А. Козырев, Е.А. Усачев – Текст: непосредственный // Вестник МГТУ. – 2014. – Т.17. - №2. – С.238-245.

33. Колосова, О.В. Обоснование методики оценки геодинамической устойчивости выработок глубоких рудников: 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Колосова Ольга Владимировна; Санкт-Петербургский горный институт (технический университет). – Санкт-Петербург, 2003. – 194 с. – Текст: непосредственный

34. Коршунов, Г.И. Сравнительный анализ методик по сейсмической безопасности охраняемых объектов (опоры ЛЭП) / Г.И. Коршунов, И.А. Бульбашева, П.И. Афанасьев – Текст: непосредственный // ГИАБ. -2017. - №4 (5-2). – С.80-88.

35. Курленя, М.В. Влияние взрывных работ на сейсмические и динамические явления при подземной разработке рудных удароопасных месторождений Сибири / М.В. Курленя, А.А. Еременко, В.И. Башков – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2015. - №8. – С.69-71.

36. Ляшенко, В.И. Обоснование параметров массовых взрывов в подземных рудниках по условиям сейсмобезопасности для жилой застройки /

В.И. Ляшенко, А.Х. Дудченко – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2012. - №8. – С.40-44.

37. Ляшенко, В.И. Обоснование сейсмобезопасных параметров при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой / В.И. Ляшенко, П.А. Кислый – Текст: непосредственный // Известия вузов. Горный журнал. - 2015.- №2.- С.84-93.

38. Лысак Ю.А. Повышение сейсмической безопасности при взрывных работах / Ю.А. Лысак, А.Ю. Плотников, Е.Б. Шевкун, А.В. Лещинский – Текст: непосредственный // ГИАБ, 2017.- № 4.- С.283-292.

39. Морозов, В.И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко – Текст: непосредственный // Вестник МСГУ. 2014. Т. №3. С. 189-196. ISSN 1997-0935.

40. Мальверн, Л. Распространение пластических волн с учетом влияния скорости деформирования / Л. Мальверн – Текст: непосредственный // Механика: период. сб. иностр. ст. – 1952. - № 1. – с. 12-18.

41. Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ / М.И. Картузов, Н.В. Паздников, А.Б. Фадеев, Л.В. Сафонов и др. – Текст: непосредственный // Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. – 12 с.

42. Мирзаев, Г.Г. Крепь горных выработок глубоких рудников: монография – Текст: непосредственный // Москва: Недра, 1984. - С.252.

43. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау» / А.В. Верхованцев, Р.А. Дягилев, Д.Ю. Шулаков, А.В. Шкурко – Текст: непосредственный // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2019. - №2. - С.59-69.

44. Мосинец, В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах: монография / В.Н. Мосинец. - Москва: Недра, 1976. – 271 с. – Текст: непосредственный.

45. Мучник, С.В. О снижении сейсмического эффекта при массовых взрывах на карьерах / С.В. Мучник – Текст: непосредственный // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2011. - №4. - С.68-78.

46. Обеспечение сейсмобезопасности при ведении взрывных работ в карьерах Криворожского бассейна / Н.И. Дядечкин, Г.В. Шиповский, П.В. Седнев, Е.Я. Бехлер – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2017. - №3. - С.90-91.

47. Окамото, Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений: монография / Ш. Окамото. - Москва: Стройиздат, 1980. – 341 с.

48. Особенности и методы снижения сейсмического воздействия взрыва отрезной щели на законтурный массив карьера / С.А. Козырев, И.А. Аленичев, А.В. Соколов, Е.А. Усачев – Текст: непосредственный // ГИАБ. - 2017.- № 10 (специальный выпуск 23). - С.307-315.

49. Оценка защитной эффективности отрезных щелей по результатам сейсмоизмерений при производстве массовых взрывов в карьерах / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов, С.В. Сёмкин, Ю.А. Шитов – Текст: непосредственный // Взрывное дело. - 2011.- №106/63.- С.100-111.

50. Оценка геомеханического состояния руд и пород в этаже 16-18 горизонтов Малеевского рудника: отчет о НИР. - ИГД УрО РАН, 2012.

51. Падуков, В.А. Горная геомеханика: учебное пособие / В.А. Падуков– Текст: непосредственный // Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. - Санкт-Петербург, 1997. – 134 с. - ISBN 5-230-19624-6.

52. Пергамент, В.Х. Интенсивность по сейсмической шкале, скорость колебаний и эквивалентные приведенные расстояния при взрывах / В.Х. Пергамент, Ю.Е. Овчаров, Е.В. Гончаров – Текст: непосредственный // Записки горного института. – 2001. – Т.148(2). - С.84-90.

53. Повышение сейсмической безопасности массовых взрывов в карьерах / В.М. Комир, А.М. Ромашко, В.А. Сокурченко, С.В. Назаренко – Текст: непосредственный // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. - №5(52). Ч.2.- С.140-143.

54. Проблемы обеспечения сейсмической безопасности при строительстве транспортных тоннелей / Холодилов А.Н., Гендлер С.Г., Виноградова Е.Ю., Шиляев А.С. – Текст: непосредственный // Записки Горного института. 2007. Т. 171. С. 229-232. ISSN 0135-3500.

55. Регламент по выбору типов и параметров крепей и технологии их возведения на Малеевском руднике ЗГОК ТОО «Казцинк».

56. Руппенейт, К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород: монография / К.В. Руппенейт. - Москва: Недра, 1975. 223 с.

57. Садовский, М.А. Оценка сейсмически опасных зон при взрывах / М.А. Садовский – Текст: непосредственный // Труды сейсмологического института АН СССР. -1920.- №106.- С.6-16.

58. Садовский, М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов / М.А. Садовский – Текст: непосредственный // Москва: АН СССР, -1946.-29 с.

59. Садовский, М.А. О сейсмическом действии подземных взрывов / М.А. Садовский, В.Н. Костюченко – Текст: непосредственный // Доклады АН СССР. - 1974. -Т. 215.- №5.- С. 1097-1100.

60. Садовский, М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / М.А. Садовский; Отв. ред. В.В. Адушкин – Текст: непосредственный // Москва: Наука, 2004. — 440 с.

61. Сейсмическое воздействие массовых взрывов на природно-технические объекты / Н.Н. Гриб, Г.В. Гриб, А.А. Сясько, А.В. Качаев – Текст: непосредственный // Безопасность в техносфере. – 2015. - №2. – С.33-39

62. **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. – № 5 (21). – С. 411–416. URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/7349MAY2018/PROYaVLENIE%20VLIYaNIYa%20SEYSMICHESKIH%20VOLN%20OT%20MASSOVYH%20VZRYVOV%20NA%20KR](https://alley-science.ru/domains_data/files/7349MAY2018/PROYaVLENIE%20VLIYaNIYa%20SEYSMICHESKIH%20VOLN%20OT%20MASSOVYH%20VZRYVOV%20NA%20KR)

EP%20VYRABOTOK%20MALEEVSKOGO%20RUDNIKA%20ZGOK,%20RESPU  
BLIKA%20KAZAHSTAN.pdf (дата обращения: 09.07.2021)

63. **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. URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/80December2018/PRIRODA%20VOZNIKNOVENIYa%20SEYSMICHESKOY%20VOLNY%20I%20OSOBNOST%20EE%20FORMIROVANIYa%20OT%20MASSOVOGO%20VZRYVA.pdf](https://alley-science.ru/domains_data/files/80December2018/PRIRODA%20VOZNIKNOVENIYa%20SEYSMICHESKOY%20VOLNY%20I%20OSOBNOST%20EE%20FORMIROVANIYa%20OT%20MASSOVOGO%20VZRYVA.pdf) (дата обращения: 09.07.2021)

64. **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.

65. Субботин, А.И. Безопасность при взрывных работах / А.И. Субботин – Текст: непосредственный // Сборник документов. Серия 13. Выпуск 1. ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». - 2009. - 232 с.

66. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве – Текст: непосредственный // Москва: ООО «Гидроспецпроект» АФ «Гидроспецстрой», 1997.- 220 с.

67. Тулин, П.К. Методика определения свойств дисперсно-армированного бетона / П.К. Тулин, В.И. Очкуров, А.А. Шубин, **Р.О. Сотников** - DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_129 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С.129-141.,

68. 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.

69. Указания по безопасному ведению горных работ на Малеевском месторождении, склонном к горным ударам. ВНИИцветмет, Усть-Каменогорск, 2000.

70. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения.» Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №494 от 03.12.2020 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573219717> (Дата обращения 04.06.2021)

71. Фокин, В.А. К вопросу определения сейсмобезопасных интервалов замедления при производстве массовых взрывов в карьерах / В.А. Фокин – Текст: непосредственный // Безопасность труда в Промышленности. – 2013. - №12. – С.37-39.

72. Фокин, В.А. К вопросу оценки предельно допустимой скорости смещения при взрывных работах вблизи охраняемых зданий и сооружений / В.А. Фокин – Текст: непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2015. - №12. – С.62-65.

73. Шер, Е.Н. Сейсмические колебания при массовых взрывах на карьерах с использованием высокоточной электронной и неэлектронной систем взрывания / Е.Н. Шер, А.Г. Черников – Текст: непосредственный // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2009. - №6. - С.54-60.

74. Эквист, Б.В. Повышение безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях / Б.В. Эквист, М.Г. Горбонос – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2016. - №10. – С.34-36.

75. Эквист, Б.В. Повышение безопасности короткозамедленного взрывания / Б.В. Эквист – Текст: непосредственный // ГИАБ. - 2017. - № 5. - С.389–394.

76. Юдовская, М.А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае: Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва: МГУ, 1995. 220 с.

77. 3D nonlinear blast model analysis for underground structures / Choi S., Wang J., Mufakh G., Dwyre E - DOI:10.1061/40803(187)206 // GeoCongress. ASCE, 2006. pp 1–6

78. Analysis of quarry-blast-induced ground vibrations to mitigate their adverse effects on nearby structures / O. Erten, G. Konak, M.S. Kizil, A.H. Onur, D. Karakus // International Journal of Mining and Mineral Engineering. – 2009. – V.1. - №4. – P.313-326.

79. Analysis of seismic waves generated by blasting operations and their response on buildings / S. Ziaran, S. Musil, M. Cekan, O. Chlebo // International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. 2013. V.7(11). pp. 769-774.

80. Ataei, M. Evaluation of blast-induced damage effects on underground / M. Ataei, M. Zare // 7th International Scientific Conference – SGEM2007

81. Barros, J.A.O. Flexural behaviour of sfrc: testing and modelling / J.A.O. Barros, J.A. Figueiras // Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1999. - v.11. – pp. 331–339.

82. Bernardo, G. Advancements in shotcrete technology. / G. Bernardo, A. Guida, I. Mecca - DOI: 10.2495/STR150491 // Conference: STREMAH. 2015. Pp. 591-602.

83. Borman, P. Seismic wave propagation and Earth models / P. Borman, E.R. Engdahl, R. Kind - DOI:10.2312/GFZ.NMSOP-2\_ch2 // German Research Center for Geosciences. 2012. p.105.

84. CDP2: a damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. / P. Grassl, D. Xenos, U. Nyström, R. Rempling, K. Gylltoft - DOI:10.1016/j.ijstr.2013.07.008 // International Journal of Solids and Structures, 2013. -V.50(24). pp. 3805–3816.

85. Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock mass / H. Hao, Y. Wu, G. Ma, Y. Zhou // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001. – v.21(2), pp. 85-98.
86. Development of a model for predicting the dynamic effect on the stability of rock excavation / M.A. Karasev, **R.O. Sotnikov**, V.U. Sinegubov, N.A. Egorova etc. - DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012051 // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. №1. pp.1230-1236
87. DIN 4150-3:1999-02. Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. – 1999. – 11p.
88. Ejection velocities measured during a rockburst simulation experiment In / D.D. Tannant, G.M. McDowell, R.K. Brummer, P.K. Kaiser // *3rd Int Symp on Rockbursts and Seismicity in Mines*. 1993. pp 129–33
89. Failure behavior modeling of slender reinforced concrete columns subjected to eccentric load / A.R. Eduardo, O.L. Manzoli, A.G. Bitencourt Jr., P.G. Prazeres, etc. - DOI:10.1590/1679-78251224 // *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2015. – v.12(3), pp. 520-541.
90. Franzén, T. Shotcrete for rock support: a summary report on the state of the art in 15 countries / T. Franzén // *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1993. -V. 8, Issue 4, pp. 441-470
91. Heravi, A.A. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) / A.A. Heravi, O.M. Smirnova, V.S. Mechtcherine - DOI:10.1007/978-94-024-1194-2\_31 // *RILEM Bookseries*, 2018. V. 15. pp. 266-274.
92. Hillerborg, A. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements / A. Hillerborg, M. Modeer, P.E. Petersson // *Cement and Concrete Research*, 1976. - vol. 6, pp. 773–782.
93. Hoek, E. Underground excavations in rock. / E. Hoek, E.T. Brown // *London: The Institution of Mining and Metallurgy*, 1980. -p. 527

94. Hoek, E. Quantification of the Geological Strength Index Chart / E. Hoek, T.G. Carter, M.S. Diederichs // 47th US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium held in San Francisco, 2013. P. 9
95. Holmquist, T.J. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures / T.J. Holmquist, G.R. Johnson, W.H. Cook // Int. Symp. on Ballistics, 1993. V. 14. pp. 591–600. ISBN: 0961815681
96. Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars / A. Meda, Z. Rinaldi, S. Spagnuolo, B. Rivaz - DOI:10.1016/j.tust.2019.01.016 // Tunnelling and Underground Space Technology, 2019. V.86. pp. 100-112.
97. Johnson, G.R. An improved computational constitutive model for brittle materials / G.R. Johnson, T.J. Holmquist - DOI:10.1063/1.46199 // High-Pressure Sci. and Technol. American Institute of Physics, 2008.
98. Khaled, M. Experimental techniques to reduce blasting vibration level, Tourah, Cairo, Egypt / M. Khaled, K. Abdel Rahman, A. Abo Makarem // Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual Conference of Explosive and Blasting Technique, Nashville, USA, 2007. – Vol. 1. – P.136-152. URL: <http://www.ascom.com.eg/files/ISEE.pdf> (Дата обращения 14.06.2021)
99. Kim, D.S. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations / D.S. Kim, J.S. Lee // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000. – v.19(2), pp.115-126.
100. Krätzig, W.B. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters / W.B. Krätzig, R. Pölling - DOI:10.1016/j.compstruc.2004.03.002 // Computers & Structures, 2004. - V. 82(15). pp. 1201–1215.
101. Löfgren, I. Fibre-reinforced concrete for industrial construction a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis / I. Löfgren // Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Structural Engineering. Chalmers University of Technology. Göteborg, 2005.

102. Probability analysis for influence of time-delay error of detonators on superposed seismic wave vibration reduction / L. Han, H. Li, D. Liu, T. Ling, etc. // *Journal of vibration and shock*. – 2019. Vol. 38. – No. 3. – P.96-101, 124.

103. Zdravković, S. The stability aspect of seismic safety of structures during open pit mining blasting // S. Zdravković, D. Zlatkov, D. Turnić // 11th International multidisciplinary scientific geo-conference SGEM 2011, Albena, Bulgaria, 2011, pp.1019-1025.

104. Li, C. A study on the blasting vibration control of creep mass high slope / C. Li, J. Cang-ru // *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, Beijing, China, 2008.- 5p. URL: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_02-0193.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_02-0193.pdf) (Дата обращения: 14.06.2021).

105. Liu, H. Dynamic analysis of subway structures under blast loading / H. Liu - DOI: 10.1007/s10706-009-9269-9 // *Geotechnical and Geological Engineer*, 2009. -V. 27. pp. 699–711.

106. Liu, Q. Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blast hole / Q. Liu, P. Tidman // Retrieved from Canmet Mrl Experimental Mine, 1995

107. Malbašić, V. Determination of Seismic Safety Zones during the Surface Mining Operation Development in the Case of the “Buvač” Open Pit / V. Malbašić, L. Stojanović // *Minerals*. – 2018. – Vol.8. – Iss. 2. – 13p. URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/8/2/71> (Дата обращения 04.06.2021)

108. Sambuelli, L. Theoretical Derivation of a Peak Partical Velocity – Distance Law for the Prediction of Vibrations from Blasting / L. Sambuelli // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2009. – Vol.42. – Iss. 3 – P.547-556.

109. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete / M.H. Esfahani, F. Hejazi, R. Vaghei, M.S.B. Jaafar, etc. - DOI:10.2749/101686616X1081 // *Structural Engineering International*, 2017. -V.27(1). pp. 68 – 78.

110. SS 460 48 66. *Vibration and shock. – Guidance levels for blasting induced vibrations in buildings*, 1991. 15p.

111. Tao, Y. Concrete damage plasticity model for modeling FRP-to-concrete bond behavior / Y. Tao, J.F. Chen // *Journal of Composites for Construction*, 2015.

112. Tripathy, G.R. Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study / G.R. Tripathy, R.R. Shirke, M.D. Kudale. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol.8. – Iss.2. – P.248-255
113. Tulin, P. K. Research of the Effect of the Concrete Reinforcement Structure on the Stress-Strain State of Structures / P.K. Tulin, A.A. Shubin, I.V. Potseshkovskaya // *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017. - № 12. V 8. pp. 1742 – 1751
114. Yan, B. Subsection forward modeling method of blasting stress wave underground / B. Yan, X. Zeng, Y. Li – DOI: 10.1155/2015/678468 v. 19(1) // *Mathematical problems in engineering*. 2015. V. 2015. 9p.
115. Yi, X. Impact testing of rockbolt for design in rockburst conditions. X. Yi, P.K. Kaiser // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sci. Geomech Abstr.* 1993. V. 31. pp. 671–85
116. Zhao, M. An Energy-Based Safety Evaluation Index of Blast Vibration / M. Zhao, D. Huang, M. Cao, En-an Chi, J. Liu, Q. Kang // *Shock and Vibration*. – 2015. – Vol. 2015, - Article ID698193. – p.9. URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2015/698193/> (Дата обращения 04.06.2021)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения



#### АКТ

апробации результатов исследования

В результате выполнения работ в рамках диссертационного исследования Сотникова Романа Олеговича на тему: «Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния крепи капитальных горных выработок при воздействии сейсмических волн от массовых взрывов» была подготовлена методика позволяющая произвести прогноз напряженного состояния набрызгбетонной крепи горных выработок в условиях ведения добычных работ с применением массового взрывания. Часть методики, а также выработанные на ее основании рекомендации к расчету несущей способности набрызгбетонной крепи применены для корректировки действующих регламентов по выбору и расчету параметров крепления горных выработок Малеевского рудника, ГОК «Алтай».

Начальник службы по поддержке производства  
ГОК «Алтай», ТОО «Казцинк»



Ю.Н. Свиридов

Promyshlennaya k., 1  
Oskamen q.  
Qazaqstan Respybikasy  
070002

ул. Промышленная, 1  
г. Усть-Каменогорск  
Республика Казахстан  
070002

БИН 970140000211  
тел +7 (7232) 291 424, 291 001  
e-mail: kazzinc@kazzinc.com



Tájeláizsík k, 24  
Altaı q.  
Qazaqstan Respybikasy  
070804

ул. Тежеліздік, 24  
г. Алтай  
Республика Казахстан  
070804

тел +7 (72335) 9 65 00  
e-mail: zgok\_office@kazzinc.com