

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ КОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

УДК 622.235.5

Райымкулов Марат Аширбекович

**Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с
воздушным промежутком на горный массив методом численного
моделирования**

Специальность:

25.00.22 - «Геотехнология (подземная, открытая)»

Диссертационная работа

на соискании ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор,
член-кор. НАН КР
Усманов С.Ф.

Бишкек-2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень сокращений и обозначений	3
Введение	4
Глава 1. Обзор результатов исследований в области применения воздушного промежутка в скважинных зарядах при буровзрывных работ	10
1.1. Обоснование применимости воздушных промежутков в скважинных зарядах для задач горного производства	12
1.2. Лабораторные исследования влияния воздушных промежутков на зону разрушения	16
1.3. Эмпирические параметры конструкций скважинных зарядов с воздушным промежутком	21
1.4. Обзор результатов численного моделирования зоны разрушения при применении конструкции заряда с воздушным промежутком.....	23
1.5. Методы оценки неоднородности прочностных свойств горного массива по данным удельной энергоемкости бурения.....	26
Выводы по главе 1.....	29
Глава 2. Материалы и методы исследования.....	33
2.1. Информационно-вычислительная база для оценки формирования зоны дробления при детонации во взрывной скважине.....	33
2.2. Инструменты подготовки конечно-элементных моделей прочностных свойств горного массива.....	35
2.3. Программные пакеты для расчета и задания граничных условий взрывной нагрузки на стенки скважины.....	38
2.4. Численные методы оценки напряженно-деформированного состояния горного массива при взрывных работах	40
2.5. Методы оценки неоднородности прочностных характеристик массива по данным удельной энергоемкости бурения.....	45
2.6. Оценка погрешности моделирования зоны дробления при взрывной нагрузки на породу	51
Выводы по главе 2.....	54
Глава 3. Проведение серии численных экспериментов для оценки эффекта от воздействия воздушного промежутка в скважине при формировании зоны разрушения	56

3.1. Исследование газодинамических процессов в области воздушного промежутка при детонации взрывчатых веществ в скважинном заряде	56
3.2. Численное моделирование формирования зоны разрушения в органическом стекле при применении воздушного промежутка	68
3.3. Проведение трехмерных численных экспериментов формирования зоны дробления в неоднородном массиве при применении различных конструкций заряда с воздушным промежутком	73
3.3.1. Описание трехмерной цифровой модели горного массива неоднородного по прочностным свойствам	73
3.3.2. Особенности задание нагрузок на стенки скважины при применении воздушного промежутка в конструкции скважины	78
3.3.3. Обсуждение результатов численного моделирования формирования зоны дробления при взрыве скважинных зарядов	82
Выводы по главе 3.....	90
Глава 4. Определение оптимальных конструкций заряда с воздушными промежутками для условий разработки месторождения Кумтор	91
4.1. Особенности распределения удельной энергоемкости бурения в условиях месторождения	91
4.2. Применение данных удельной энергоемкости бурения в условиях месторождения для определения физико-механических свойств пород в массиве.....	95
4.3. Оптимизация параметров конструкции заряда по результатам численного моделирования в условиях месторождения.....	100
Выводы по главе 4.....	105
Практические рекомендации по рационализации конструкции зарядов с применением воздушного промежутка для условий карьера Кумтор	107
Заключение	110
Список использованной литературы.....	112
Приложение 1. Акт внедрения исследований в учебный процесс Кыргызско-Российского Славянского Университета	118
Приложение 2. Акт внедрения в проектную работу ПИЦ «Кен-Тоо»	119
Приложение 3. Акт внедрения исследований в АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»	120

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БВР - буровзрывные работы

ВВ - взрывчатое вещество

ВП - воздушный промежуток

ПД - продукты детонации

УВ - ударная волна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В связи с повсеместным интенсивным развитием горнодобывающих предприятий, расширением границ ведения горных работ, увеличением переработки объемов пород и руд, увеличением массы заряда взрывчатых веществ, углублением карьера, усложнением условий разработки повышаются риски аварийных ситуаций в зонах горных работ и снижается качество взрывных работ. Одним из решений данной проблемы является применение конструкций зарядов с воздушными промежутками. Считается, что рациональное распределение взрывчатого вещества и воздушного промежутка в соответствии с прочностными характеристиками массива обеспечивает снижение расхода взрывчатого вещества, повышение качества взрыва и щадящее воздействие сейсмической нагрузки на горный массив. Подобный эффект особенно важен для горных предприятий, расположенных на территории Кыргызской Республики, где существенную роль играют геомеханические поля напряжений, особо чувствительные к сейсмической нагрузке.

Несмотря на высокий интерес промышленности к практическому применению воздушных промежутков в горном производстве, научные основы процессов происходящих в воздушной полости при взрыве находятся в состоянии недостаточном для разработки промышленной технологии, а применение на производстве подобных конструкций заряда не всегда обеспечивает достаточное качество взрыва. В частности, механизм действия воздушных промежутков ограничивается упрощённым качественным описанием в рамках одномерного подхода. В подобных подходах отсутствует удовлетворительное объяснение механизма действия воздушной полости и не учитываются такие параметры как размеры полости, свойства взрывчатых веществ, физико-механические характеристики горной породы, в том числе положение особо прочных участков и др.

Активно развивающиеся цифровые технологии в горном производстве позволяют учитывать вышеперечисленные параметры за счет внедрения инструментов сбора и анализа данных о режимах бурения горного массива, оперативного проектирования буровзрывных работ и применения численного моделирования зоны дробления от взрывной нагрузки. Цифровые технологии открывают широкие возможности для оптимизации конструкции зарядов, обеспечивающих необходимое качество взрыва, проработку подошвы блока и снижение сейсмической нагрузки.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института Коммуникаций и Информационных технологий по проектам: «Цифровые технологии обоснования конструкции скважинных зарядов с воздушными промежутками на основе системы BlastMaker» (тема МОН КР № КР-13, руководитель – канд. техн. наук, Коваленко В.А., 2019г); «На пути к цифровому карьере: возможности управления взрывом скважинных зарядов на основе системы BlastMaker» (тема МОН КР № КР-08, руководитель – канд. техн. наук, Коваленко В.А., 2020г).

Цель исследования состоит в оценке эффективности применении воздушного промежутка в скважинных зарядах в условиях неоднородности массива методом численного моделирования.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи исследования**:

- Разработать комплекс вычислительных инструментов для моделирования взрывного воздействия скважинного заряда с воздушным промежутком с

учетом неоднородности массива, физико-механических свойств среды и свойств взрывчатых веществ;

- Провести уточнение газодинамических процессов при сжатии воздушного зазора продуктами взрыва в процессе детонации методом численного моделирования;
- Сопоставить результаты экспериментальных исследований эффекта воздушного промежутка в скважинных зарядах с данными численного моделирования;
- Определить оптимальные параметры конструкции скважинных зарядов с воздушными промежутками с учетом информации о неоднородности массива в виде данных удельной энергоемкости бурения методом численного моделирования.

Методы исследований. В диссертационной работе использован комплексный метод, сочетающий анализ, научное обобщение теоретических и экспериментальных исследований в области применения воздушного промежутка в скважинных зарядах, применение инструментов численного моделирования методом конечных элементов и передовых цифровых технологий в горном производстве.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- уточнены газодинамические процессы области сжимаемого воздушного промежутка продуктами детонации в скважине и определены особенности формирования трещин в ближней зоне разрушения породы;
- предложено применение параметра удельной энергоемкости технологического бурения в качестве информационной базой для проектирования конструкции заряда с воздушным промежутком.

Практическая значимость полученных результатов

Применение численного моделирования зоны дробления скважинных зарядов с воздушными промежутками позволяют оперативно определять оптимальную конструкцию заряда с учетом неоднородности массива еще на стадии проектирования взрывных работ. Рациональное распределение взрывчатого вещества и воздушного промежутка в соответствии с прочностными характеристиками массива обеспечивает снижение расхода взрывчатого вещества и сейсмической нагрузки на горный массив.

Экономическая значимость полученных результатов

Оперативный расчет оптимальной конструкции заряда с применением воздушного промежутка позволяет обеспечить снижение негабаритов и проработку подошвы блока за счет соответствующего распределения энергии взрыва и при этом, добиться снижения удельного расхода взрывчатых веществ на 10-20%, за счет применения воздушных промежутков.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- выявленные численным методом моделирования газодинамические эффекты в области воздушного промежутка требуют учета при проектировании взрывных работ, поскольку влияют на характер формирования зоны дробления;
- проектирование взрывных работ с применением инструментов численного моделирования с целью определения оптимальной конструкции заряда с воздушным промежутком позволяет учесть неоднородность массива по данным энергоемкости бурения, повысить качество взрыва, снизить сейсмическую нагрузку и обеспечить экономию взрывчатого вещества;
- учет неоднородности массива посредством параметра энергоемкости бурения, оперативно получаемого с бурового станка при бурении скважин обеспечивает экономию взрывчатого вещества на 10-20%, снижение сейсмического воздействия, улучшение проработки массива и увеличение зоны дробления на 6-10%.

Личный вклад соискателя состоит в анализе и обобщении результатов численного моделирования, в обсуждении и реализации инструментов численного моделирования, в разработке методов сопоставления данных об удельной энергоемкости бурения с прочностными характеристиками массива, проведение численных экспериментов по определению оптимальных параметров конструкции заряда.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований по диссертационной работе докладывались и обсуждались на Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технология в научных исследованиях», г. Бишкек (2015-2022гг.); Международной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине», Томский университет, г. Томск, 2015; Международная научно-техническая конференция «Передовые технологии на карьерах», Институт коммуникаций и информационных технологий, оз. Иссык-Куль (2015-2022); Международная конференция «Суперкомпьютерные дни в России» г. Москва, 2019; Международный форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Научные шаги молодых ученых в цифровизации экономики», Институт телекоммуникации и информатики Туркменистана, г.Ашхабад, 2023.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Результаты исследований и научные положения, отражающие основное содержание диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Результаты численного моделирования взрывной нагрузки от конструкции заряда сплошного заряда и с воздушным промежутком при формировании зоны разрушения породы сопоставлены с данными экспериментальных исследований. Основные теоретически описанные механизмы действия воздушного промежутка, подтвержденные

экспериментально, удалось детально воспроизвести методом численного моделирования.

При сопоставлении результатов моделирования зоны дробления методом конечных элементов и фотосъемки результатов экспериментальных работ погрешность вычислений составила 15 – 25%.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, изложенных на 122 страницах. содержит 44 рисунок, 14 таблиц, 3 приложения, список использованной литературы из 55 наименований

В первой главе выполнен краткий и критический обзор работ по исследуемой проблеме, определены цель и задачи исследований диссертации.

Во второй главе приводится описание и анализ комплекса цифровых инструментов для получения информации о неоднородности массива и численного моделирования взрывного воздействия конструкции заряда с воздушным промежутком.

В третьей главе приводятся результаты сопоставления результатов экспериментальных исследований эффекта воздушного промежутка в скважинных зарядах с данными численного моделирования. На приведенных примерах обосновывается достоверность результатов численного моделирования.

В четвертой главе рассматриваются результаты серии трехмерных численных экспериментов воздействия различных конструкций заряда с воздушным промежутком на неоднородный массив и производится оценка эффекта от воздушного промежутка в конструкции скважинных зарядах в условиях карьера Кумтор.

ГЛАВА 1. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА В СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДАХ ПРИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Рассредоточение скважинных зарядов воздушными промежутками широко известно и применяется на практике при буровзрывных работах. Впервые такая технология подробно была описана в работах Мельникова Н.В. в 1940-х гг.[25 , 26]. Применение воздушных промежутков в конструкции заряда приводит к снижению максимального пикового давления продуктов взрыва в воздушной полости, а также взаимодействию ударных волн с продуктами детонации в воздушной полости. При этом, уменьшается доля энергии затрачиваемой на бесполезное переизмельчение породы, увеличивается время действия расширяющихся продуктов взрыва на горный массив, улучшается проработка подошвы, обеспечивается щадящее действие взрыва. Подобный эффект особенно важен для горных предприятий, где существенную роль играют геомеханические поля напряжений.

Несмотря на высокий интерес горного производства к практическому применению воздушного промежутка в промышленном масштабе, для полномасштабного применения данной технологии потребовалась дальнейшее развитие научных основ в данной области по следующим основным направлениям: обоснование механизма действия воздушных промежутков в скважинных зарядах, лабораторные исследования формирования зоны разрушения при применении воздушного промежутка в скважинных зарядах, разработка технологии создания промежутков при зарядании скважин и применение методов численного моделирования взрывной нагрузки на горный массив.

Научные исследования механизма действия воздушных промежутков в скважинных зарядах ведутся в направлении от качественного описания механизма воздействия взрыва на горный массив к количественному

детализированному описанию процессов в области сжимаемого воздушного промежутка и формирования трещинообразования в массиве. Для реализации данного подхода требуется учет различных факторов, влияющих на результат качества взрыва, таких как, размеры воздушного промежутка, свойства взрывчатых веществ, физико-механические свойства горной породы и др. [3, 38].

Важным этапом в обосновании эффекта от применения воздушных промежутков в скважинных зарядах стали результаты независимых экспериментальных исследований зоны разрушения в органическом стекле. В этом направлении также проведены работы таких исследователей как Жариков И.Ф.[14], Нифадьев В.И.[28], Fourny W.L. [41] и др. Лабораторные исследования подтвердили основные теоретические положения о механизме действия скважины с применением воздушного промежутка, позволили выделить основные этапы формирования зоны разрушения при взрыве такого типа конструкций заряда, получить количественную оценку эффекта и др.

Отдельным направлением в области применения воздушных промежутков является разработка технологии, обеспечивающей формирование воздушного промежутка в скважине в условиях горного производства. Сложность формирования данной конструкции заряда является существенным затруднением внедрения данной технологии при ведении буровзрывных работ. В этом направлении продолжаются исследования научной группы под руководством Шевкуна Е.Б. и др [38].

Применение цифровых инструментов для решения задач горного производства открыли возможности для определения оптимальных параметров конструкций заряда в изменяющихся горно-технологических условиях. Для реализации данного подхода потребовалось соответствующее развитие технических средств сбора информации с буровых станков, оборудования для передачи информации, вычислительных средств, разработки математических моделей и комплексной цифровизации горной технологии.

Одна из наиболее ранних работ, в которой было продемонстрировано применение численных инструментов для моделирования взрывной нагрузки скважинных зарядов с применением воздушного промежутка, была выполнена научной группой, под руководством Liu и Katsabanis [44]. Дальнейшее развитие подходов численного моделирования эффекта воздушного промежутка в скважинных зарядах было связано с выполнением серий вычислительных экспериментов.

Таким образом, несмотря на усложнение процесса заряжания и забойки скважин при применении воздушных промежутков, совершенствующиеся технологии автоматизированного заряжания открывают возможности широкого применения воздушных промежутков при проведении буровзрывных работ, поскольку современные методы численного моделирования однозначно количественно и качественно показывают эффективность их применения.

1.1. Обоснование применимости воздушных промежутков в скважинных зарядах для задач горного производства

Эффект действия воздушного промежутка при взрыве отмечен давно. В работе Мельникова Н.В. в 1940-х годах впервые была выдвинута идея управления взрывом путем применения зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками [25]. Затем эта идея была проработана детально в совместных работах Мельникова Н.В. и Марченко Л.Н. в 1960-х [26]. На основании теоретических и экспериментальных работ, проведенных под руководством Мельникова Н. В., разработаны основные теоретические положения по выбору оптимальных параметров конструкции колонкового заряда и выполнены инженерные расчеты по определению параметров воздушных промежутков при взрывании зарядов в различных горно-геологических условиях. Предложенный метод ведения взрывных работ заключается в том, что для улучшения проработки горного массива за счет эффективного использования энергии взрыва колонковых зарядов необходимо

рассредоточение заряда по длине шнура или скважины с оставлением между ними воздушных промежутков.

Согласно работам [25, 26] газодинамические процессы, происходящие при взрыве заряда с воздушным промежутком, качественно могут быть описаны следующим образом: при рассредоточении осуществляется снижение начального пикового давления ударной волны и равномерное перераспределение энергии взрывчатых веществ по всей длине скважины за счет многократного взаимодействия ударных волн с продуктами детонации в полости взрыва. При этом уменьшается доля энергии затрачиваемой на бесполезное переизмельчение породы в ближней зоне, увеличивается время действия расширяющихся продуктов взрыва, улучшается проработка подошвы, снижается сейсмический эффект и т.д.

Дальнейшее развитие идей в работах Жарикова И.Ф. позволило установить взаимосвязь между газодинамическими параметрами расширения продуктов детонации во взрывной камере при взрыве зарядов с воздушным промежутком [14]. Было показано, что благодаря более рациональному механизму передачи энергии удастся увеличить долю полезно используемой энергии в 1,4-1,7 раза по сравнению с взрывом сплошных и сосредоточенных зарядов. Основной особенностью импульса получаемого от заряда с воздушным промежутком состоит в появлении двух максимумов, следующих с определенным интервалом. Эксперименты показали, что время следования и амплитуды импульсов зависит от показателя полости при сохранении массы взрывчатого вещества. При этом выделяется фаза сжатия воздушной полости и генерирование дополнительной ударной воздушной волны.

При применении воздушного промежутка, процесс передачи энергии в породу оказывается не мгновенным, а длительным в виде отдельных порций, формируемых в результате многократного отражения волны со стенками полости и границей воздушный промежуток-воздух (рис. 1.1). При этом происходит снижение начального давления на стенку почти на два порядка и

единичное импульсное воздействие заменяется последовательным двойным воздействием. Многократное динамическое воздействие взрывного источника на разрушаемый горный массив повышает эффективность действия взрыва, чем объясняется особенности применения воздушного промежутка в скважинных зарядах.

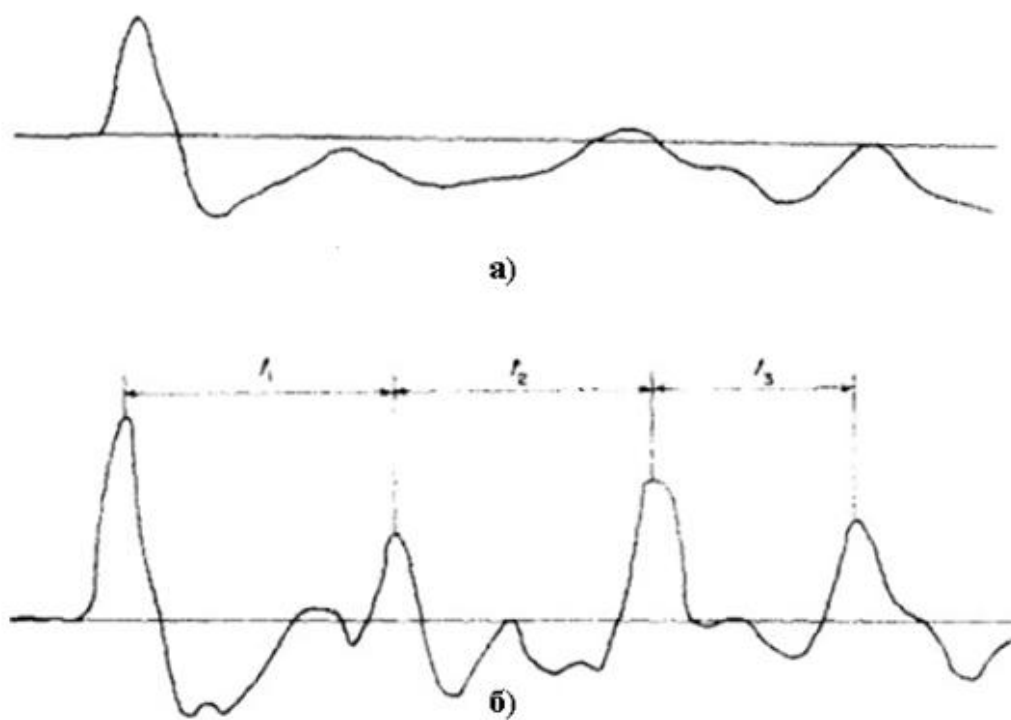


Рис. 1.1 – Сопоставление импульсов во взрывающей модели, получаемые при применении а) сплошного заряда и б) с заряда с воздушным промежутком

В работе Жунусова К. аналитическими методом установлено значительное снижение первоначального пикового давления продуктов взрыва, уменьшения скорости движения забойки и, как следствие увеличение длительности взрывной нагрузки продуктов взрыва на стенки скважины [15]. При взрыве конструкции заряда с воздушным промежутком достигается безразлетное и направленное разрушение и перемещения взорванной горной массы, увеличивается интенсивность их дробления при снижении удельного расхода взрывчатых веществ на 18-20%. Кроме того, снижается сейсмическое действие взрыва, разлет кусков и выброса газа в атмосферу. Сохранение части

энергии взрыва для полезной работы по разрушению массива возможно за счет перераспределения нагрузки во времени, что может быть реализовано посредством применения воздушных промежутков.

Таким образом, при взрыве сплошного заряда образуется избыточный объем переизмельченной горной массы и негабарита. Только при применении воздушного промежутка обеспечиваются условия, необходимые для повышения полезной работы взрыва при взрывных работах на блоке: снижение пикового давления на фронте ударной волны, увеличение длительности воздействия взрывной нагрузки на массив и усиление интерференции ударных волн. Происходит перераспределение энергии взрыва – снижается доля энергии, затрачиваемой на бесполезное переизмельчение породы вокруг скважины в результате бризантного действия ВВ. Значительно сокращается объем работ по забойке за счет снижения длины забиваемой части скважин.

Применение зарядов с воздушной подушкой в перебуре по сравнению со сплошными зарядами позволяет значительно улучшить качество дробления увеличением продолжительности действия взрыва и высоты колонки заряда на 1-2 м при соответствующем уменьшении длины забойки; снизить удельный расход ВВ на 10-20 %; уменьшить разрушение массива за последним рядом скважин в 1,3-1,6 раза; обеспечить направленный выброс горной массы в сторону откоса уступа, что принципиально важно при ведении взрывных работ в стесненных условиях [38].

Лабораторными исследованиями влияния воздушных промежутков в верхней и нижней торцовых полостях скважины на качество взрыва выявлено, что при взрывании зарядов с торцовыми воздушными полостями радиус зоны измельчения в среднем на 10 % меньше по сравнению с обычными зарядами. Уменьшение радиуса зоны измельчения и выхода мельчайших частиц указывает на существенное снижение начального давления продуктов взрыва за счет свободного расширения в воздушной полости. При этом не только уменьшается удельное давление и удлиняется время воздействия взрыва, но

изменяется и плотность энергии взрыва на единицу поверхности контакта продуктов взрыва с разрушаемой средой [38, 15].

Предложенная Жунусовым К. конструкция скважинного заряда с воздушной полостью, расположенной между нижним его торцом и забоем скважины, названная им зарядом с воздушной подушкой, имеет ряд существенных преимуществ. Применение воздушной полости в скважине со стороны нижнего торца заряда способствует значительному снижению величины первоначального пикового давления продуктов детонации (ПД), скорости движения забойки и увеличению продолжительности действия ПД на стенки скважины. Благодаря этому можно добиться направленного перемещения взорванной горной массы без подъема ее вверх (вплоть до исключения), снижения выброса газов и пыли из устья скважины, сейсмического воздействия взрыва и др.

Уменьшается опасность поражения разлетающимися кусками горной массы людей и оборудования, увеличивается сохранность расположенных вблизи взрыва объектов и сооружений. Кроме того, в зарядах с воздушной подушкой действие двойной ударной волны в нижней части скважины может создать благоприятные условия для лучшего отрыва по подошве уступа, т. е. обеспечить качественный взрыв при завышенном сопротивлении по подошве.

1.2. Лабораторные исследования влияния воздушных промежутков на зону разрушения

Важным этапом в понимании механизма действия воздушного промежутка в скважинных зарядах стали результаты независимых экспериментальных исследований зоны разрушения в органическом стекле. Различные экспериментальные исследования подтвердили основные положения об эффекте воздушного промежутка, позволили выделить основные этапы формирования зоны разрушения при взрыве скважинного заряда, получить количественные данные и др.

Так, в исследованиях Мельников Н.В., Марченко Л.Н. экспериментально было показано, что применение воздушного промежутка в скважине обеспечило увеличение зоны разрушения среды на 23% больше чем при применении сплошного заряда [26]. Так при сплошном заряде разрушению подверглось 70% среды, в то время как при тех же условиях при применении заряда рассредоточенного воздушным промежутком разрушение составило 93% среды. Изучение образования зоны разрушения производилось при помощи скоростной кинокамеры СКС-1 с частотой съемки 3600 кадров/сек. Анализ показал, что при взрыве скважины с воздушной полостью радиус сферы начального возмущения в 2 раза меньше, чем при взрыве сплошного заряда, а скорость развития сферы начального возмущения в первый период времени в 2,5 раза меньше, чем для заряда без воздушной полости. Таким образом, экспериментально было подтверждено, что наличие воздушной полости в скважинном заряде приводит в начальный период к увеличению времени воздействия взрыва на породу и уменьшения скорости развития зоны разрушения благодаря снижению части энергии взрыва, расходуемой в начальный момент времени. В последующий период времени, после 20 мсек от начала взрыва, наблюдается усиление действия взрывной нагрузки от скважины с воздушным промежутком (рис 1.2).

Лабораторные опыты на моделях показали эффект от применения воздушной полости достигается за счет особенностей процесса трещинообразования при взрыве заряда, рассредоточенного воздушным промежутком.

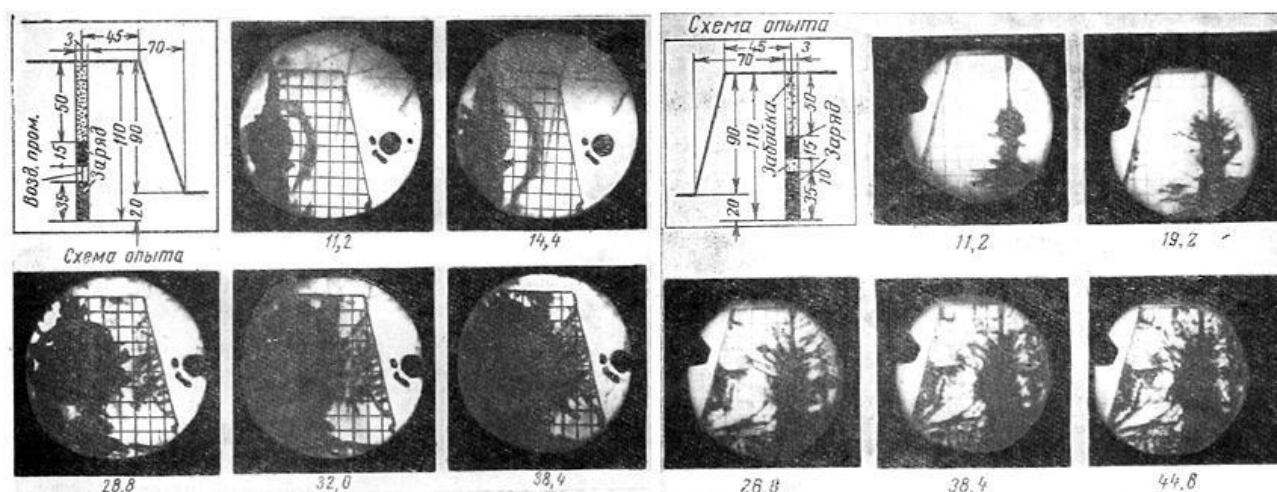
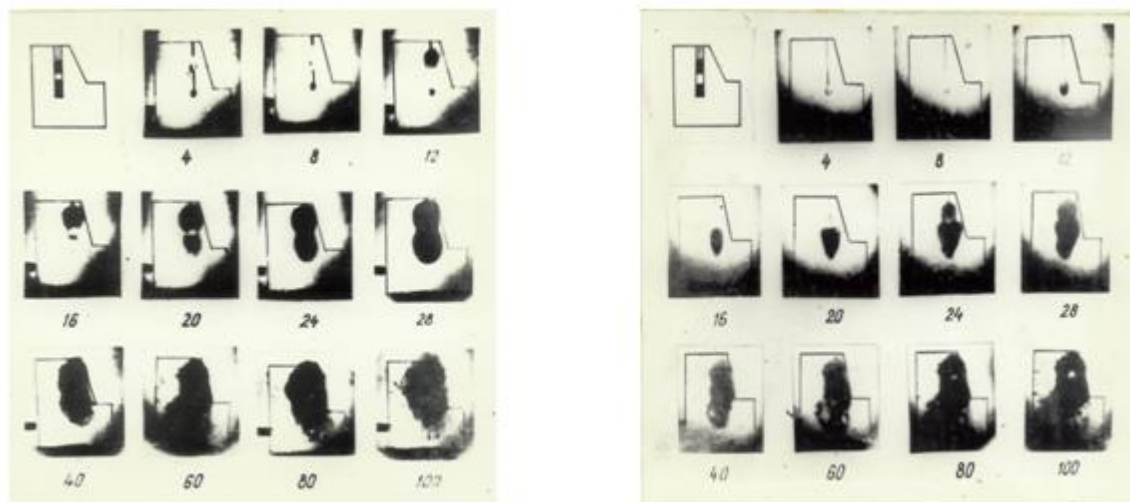


Рис. 1.2 –Процесс разрушения стеклянной модели при взрывании зарядов, рассредоточенного воздушным и инертным промежутками

Процесс развития зон разрушения при применении конструкции заряда с воздушным промежутком зафиксирован в серии экспериментов взрыва в органическом стекле научной группой под руководством Нифадьева В.И. [28]. Исследования производились с помощью скоростной фоторегистрирующей аппаратуры во взрывной камере. В качестве ВВ применялся ТЭН, воздушный промежуток формировался из пенополистирола. Анализ кинокадров процесса позволил выделить последовательность взрыва отдельных участков скважины (рис. 1.3). Таким образом, показано, что воздушный зазор играет роль внутрискважинного замедлителя и позволяет регулировать процесс разрушения. В исследовании отмечена возможность дифференцированной нагрузки уступа согласно сопротивляемости массива. При взрывании зарядов с переменной энергией о высоте в первую очередь разрушение модели до плоскости обнажения происходит на уровне подошвы уступа, что свидетельствует о концентрации энергии в данной области. В дальнейшем разрушение происходит в средней и верхней части уступа. Фронт разрушения от заряда с переменной энергией имеет форму усеченного конуса. Конусный фронт от заряда с переменной энергией позволяет уменьшить разрушения и заколообразования вглубь массива. При взрывании заряда с переменной

энергией по высоте отмечается эффективное использование ВВ за счет повышения коэффициента полезного использования взрыва.



а)

б)

Рис. 1.3 –Сравнение областей разрушения органического стекла на различных этапах развития процесса разрушения при применении ВВ, рассредоточенного воздушным промежутком при а) верхнем и б) нижнем инициировании заряда.

Время указано в мс.

Описанный механизм действия воздушного промежутка наглядно продемонстрирован на кадрах фотосъемки формирования зоны разрушения в органическом стекле [41]. Лабораторные испытания были проведены с целью определения поведения трещин в результате взрывной нагрузки на среды со стороны скважины, заполненной ВВ и воздухом. Цель испытаний состояла в том, чтобы определить поведение трещин, инициированных в стволе скважины, стимулированных взрывная нагрузка. В частности, хотелось сравнить распространение трещин от водонаполненных и скважины, заполненные воздухом. В прямоугольном блоке из оргстекла пробурена вертикальная скважина диаметром 13 мм длиной 254 мм, перпендикулярная к поверхности модели. Скважина заполнялась ВВ типом ТЭН и воздушным промежутком.

Применялась камера для выполнения фотографии во время динамическое событие с частотой от 30-850 тыс. кадров/сек и позволяет определить мгновенное расположение волн напряжения, трещины фронты и продукты детонации или жидкости, которые первоначально заполнил скважину.

По лабораторным исследованиям удалось получить последовательность формирования зоны дробления при применении конструкции заряда с воздушным промежутком, расположенном между забойкой и зарядом. В результате газодинамических процессов в воздушном промежутке образуется среда, состоящая из чередующихся областей, заполненных воздухом и продуктами детонации. Поперечные и продольные ударные волны, проходя через множество областей с различным ударным импедансом, претерпевают многочисленные отражения и преломления, вследствие чего на стенки и торец скважины действуют множество импульсов давления, следующих с высокой частотой. На границе воздушного промежутка и забойки образуется дополнительный источник импульса, обеспечивающий равномерное дробление среды (рис. 1.4).

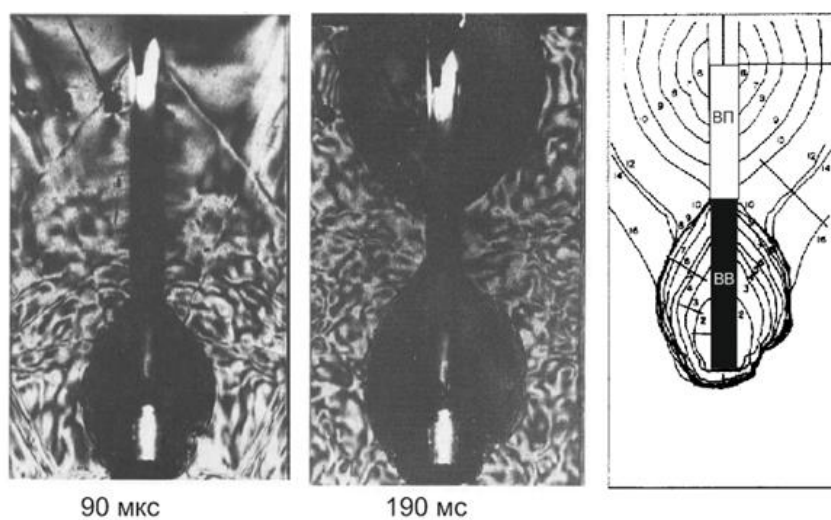


Рис. 1.4 –Формирование зон разрушения в области воздушного промежутка:
фотосъемка и последовательность формирования зоны разрушения в
органическом стекле

Таким образом, на среду действует длительный импульс, образованный воздействием ударной волны и высокочастотного вибрационного воздействия в области воздушного промежутка.

1.3. Эмпирические параметры конструкций скважинных зарядов с воздушным промежутком

Эффективность действия воздушного промежутка зависит от параметров конструкции заряда, применяемого типа взрывчатого вещества и физико-механические свойства среды. Так, воздушные промежутки малой длины не дают эффекта, поскольку значительно сокращается длительность воздействия взрыва и воздействие на среду оказывается аналогичным взрыву от сплошного заряда. Воздушные промежутки завышенной длины могут привести к ухудшению дробления вследствие чрезмерного снижения давления в зарядной камере, поскольку при прохождении детонационной волны в воздушной полости, давление значительно снижается [14]. Высота воздушных промежутков, их число зависят от конкретных горно-геологических условий. Опытным путем установлено, что суммарная высота должна колебаться в пределах 0,15 – 0,4 от длины всего заряда в скважин [3]: для слабых пород — 0,3— 0,4, для пород средней крепости — 0,2— 0,3, для пород крепких — 0,15— 0,2 длины колонки заряда. Также установлен параметр длины воздушного промежутка в зависимости от диаметра скважины и типа взрываемости пород: для легковзрываемых пород — 10-12, для средневзрываемых пород — 9-10, для трудновзрываемых пород — 8-9 диаметров скважинного заряда.

При этом положение воздушных промежутков в скважинном заряде влияет на эффект отработки горного массива. В работе [15] рассматривается конструкция скважинного заряда с воздушной полостью, расположенной между нижним его торцом и забоем скважины. Отраженная от дна скважины ударная волна способствует тому, что газообразные продукты детонации устремляются по оси скважины в сторону забойки и проникают в среду в

области перебура в значительно меньшем объеме, в результате чего в перебуре образовывается часть скважины со слабонарушенными стенками. В результате значительно снижаются величина первоначального пикового давления продуктов взрыва, скорость движения забойки и увеличивается продолжительность действия продуктов взрыва на стенки скважины. Кроме того, в зарядах с воздушной подушкой действие двойной ударной волны в нижней части скважины может создать благоприятные условия для лучшего отрыва по подошве уступа, т.е. обеспечить качественный взрыв при завышенном сопротивлении по подошве.

Положение воздушного промежутка между забойкой и зарядом оказывает положительное влияние на дробление среды, уменьшая выход негабарита за счет запирающего эффекта воздушной полости и ослабления верхних слоев массива за счет отработки вышележащих горизонтов. Экспериментальными исследованиями установлено, что такая конструкция заряда позволяет перераспределить энергию взрыва и увеличить период действия взрыва на массив на 15-35% за счет снижения скорости вылета забойки и тем самым уменьшить выход негабаритных фракций и диаметр среднего куска по сравнению с взрыванием без воздушного промежутка [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Наилучшее дробление обеспечивается при применении укороченной засыпной забойки и воздушного промежутка над зарядом, наихудшее - при взрывании без забойки. Авторы работы [31] считают, что максимальная длина забойки не должна превышать 32 диаметров скважины; минимальная длина забойки равна 16 диаметрам скважины – при уменьшении растет разлет кусков горной массы и падает качество дробления.

Применение воздушных промежутков при рассредоточении заряда обусловлено усилением интерференционных процессов между взрывными волнами в массиве и падающим взрывным воздействием на мягкие участки массива, например, на крутопадающие угольные пласты [7]. Такой подход усложняется необходимостью применения различных конструкций на всем

блоке и тем самым повышением трудозатрат и обеспечением детализированной информации о неоднородности массива.

1.4. Обзор результатов численного моделирования зоны разрушения при применении конструкции заряда с воздушным промежутком

Развитие цифровых инструментов в задачах горного производства открыли возможности для решения параметрических задач в области оценки влияния воздушного промежутка на разрушение породы в конкретных горно-технологических условиях. Для реализации данного подхода требуется обеспечение технических инструментов и соответствующих математических моделей, позволяющих произвести моделирование с одной стороны газодинамических процессов внутри скважины (распространение ударной волны, интерференция волн, сжатие воздушного зазора, воздействие ударной волны на забойку), а с другой стороны – формирование зоны дробления в массиве с заданными физико-механическими свойствами среды. Возможность моделирования взаимодействия воздушного промежутка с продуктами детонации, а также с расширяющимися и разрушаемыми стенками горного массива стало возможным благодаря наличию программных пакетов, зарекомендовавшего себя в областях решения нестационарных задач нелинейной динамики [48].

Численное моделирование открывает возможности рассматривать различные взаимосвязанные факторы, влияющие на окончательный результат взрывов при проведении горных работ. К таким факторам относятся: местоположение промежуточного детонатора для инициирования взрывчатого вещества в скважине, детонационное поведение взрывчатого вещества; взаимодействие между прореагировавшим взрывчатым веществом и воздухом, влияние природных или наведенных трещин и разрывов, влияние близлежащих свободных границ, взаимодействие между скважинами и т.д. С другой стороны,

чем больше факторов учитывается в моделях, тем сложнее математическая модель, что в свою очередь требует повышение вычислительных мощностей. Таким образом, возможности применения инструментов численного моделирования обусловлена интеграцией цифровой технологии на горном производстве. Также важно учесть, что для определения различных коэффициентов присутствующих в моделях требуется проведение серии опытно-промышленных испытаний в конкретных горно-технологических условиях, что требует развитие инструментов для сбора и обработки статистических данных.

В исследовании Lui и Katsabanis [44] воздушный зазор рассматривался как область с внутренней энергией равной нулю, а скважина рассматривалась как одномерный линейный объект. Таким образом, разрушение горных пород моделировалось только воздействием взрывной волны сжатия и растяжения. Вначале производился расчет давления и тепловой энергии внутри скважины, затем рассчитывалось воздействие взрывной нагрузки на стенку скважины. Наличие воздушного зазора рассматривалось как область для перераспределения тепловой энергии от основного заряда в область воздушного промежутка. Таким образом, взрывная нагрузка на массив передавалась не мгновенно, а порционно: вначале передавалась часть тепловой энергии в горный массив и соответственно снижалось пиковое давление детонационной волны, а оставшаяся часть перераспределялась с учетом расширения продуктов детонации в скважину, формируя дополнительную энергию деформации горного массива. Сопоставления результатов моделирования взрывной нагрузки конструкции заряда двух типов: сплошного заряда и с применением воздушного промежутка позволило утверждать, что дополнительная энергия деформации, возникающая только при применении воздушного промежутка, осуществляет дополнительное разрушение пород, что соответствует заметному увеличению зоны дробления.

В работах Lu и Hustrulid произведена серия численных экспериментов с применением воздушного промежутка между ВВ и забойкой [45]. Моделирование показало, что в результате распространения ударной волны в области сжимаемого воздушного промежутка наблюдалась волна отражения от стенки забойки, что являлось дополнительным источником взрывной нагрузки. Другие их наблюдения на общее давление взрывной скважины, разумная воздушная палуба длина и т. д. были в целом согласованы с теми, которые более ранние исследователи.

В серии вычислительных экспериментов, осуществленных научной группой Zhu Z. и др. произведено сопоставление результатов по применению воздушного промежутка в конструкции заряда, с учетом положения патрона-боевика и положения воздушного промежутка [55]. Произведена оценка эффекта дробления горной массы для каждой конструкции заряда. Получено, что наиболее равномерное дробление массива обеспечивается конструкцией заряда с воздушным промежутком между забойкой и зарядом, при положении патрона-боевика на дне скважины.

На основе данных двумерного численного моделирования воздействия конструкции заряда с воздушным промежутком на горный массив, осуществленных в работах Singh T.N., Sazid M. и др. были подтверждены основные предположения о механизме действия воздушного промежутка в скважинных зарядах, а сопоставление с результатами экспериментальных взрывов, подтвердило преимущество конструкции заряда с воздушным промежутком [51]. Подход численного моделирования также позволил получить результаты, которые невозможно измерить в полевых условиях. Так, например, было вычислена динамика передачи взрывной энергии в массив и произведено моделирование формирования зоны во времени.

Таким образом, инструмент численного моделирования открывает возможности для анализа процессов в области оценки эффекта от применения

воздушных промежутков в скважинном заряде и решения оптимизации параметров в конкретных горно-технологических условиях, посредством проведения серии численных экспериментов.

1.5. Методы оценки неоднородности прочностных свойств горного массива по данным удельной энергоемкости бурения

При оценке эффективности применения воздушного в скважинном заряде следует иметь в виду, что наилучший эффект достигается, когда управление взрывом соответствует физико-механическим параметрам разрушаемого массива. Для этого необходимо иметь полную информацию о горном массиве. Набор данных о прочностных характеристиках пород в массиве являются одним из исходных параметров для проведения моделирования зоны разрушения от заряженных скважин. В условиях производства применяют различные методы получения данной информации в зависимости от применяемых инструментов и поставленных задач [32]. Изучение горного массива на предприятии ведется на стадии геологической разведки. Однако горнодобывающие предприятия зачастую оперируют данными, получаемыми при керновом бурении с плотностью разведочной сети 100-200м., что недостаточно для получения информации о залегании крепких и менее прочных участков массива в зоне отработки взрывной скважины [4]. Возникает необходимость уточнения геологической информации, в том числе точного определения положения, например, особо прочных участков на вскрыше, уточнять значения коэффициента крепости по шкале проф. Протоdjяконова, а также рассчитывать оптимальный расход ВВ для отработки конкретного участка массива. Концентрация всех данных в единой информационной системе позволяет иметь полный набор необходимых свойств массива, следить за динамикой их изменения, изучать закономерности и взаимосвязи различных свойств, оперативно планировать горные работы и в результате снижать себестоимость добычи полезного ископаемого.

Один из способов решения поставленной задачи заключается в применении информации об удельной энергоемкости бурения [4, 19, 33]. Данный параметр определяется как затрачиваемая энергия на дробление породы при бурении и является одним из способов оценки буримости пород. После накопления достаточной статистической информации по параметру появляется возможность районирования горного массива по прочностным характеристикам, детализации модели месторождения, выявления тенденций и закономерностей залегания рудных тел. Такой массив информации сопоставим с комплексом геофизических исследований [4, 16]. При этом процесс идентификации массива становится ежедневным и непрерывным.

Возможность идентификации особо прочных и мягких участков массива открывает возможности для эффективного применения конструкции заряда с воздушным промежутком. Один из примеров отработки вскрышных пород при учете крутопадающих угольных пластов приведен в работе [7]. Взрывные скважины во вскрышных породах над угольным пластом с переменной глубиной заряжали с применением воздушного промежутка (Рис. 1.5). С помощью полипропиленового рукава создавали воздушную подушку над забоем скважины длиной 0,5 м, затем в этот рукав формировали заряд из Гранулита М, пропорциональный глубине скважин.

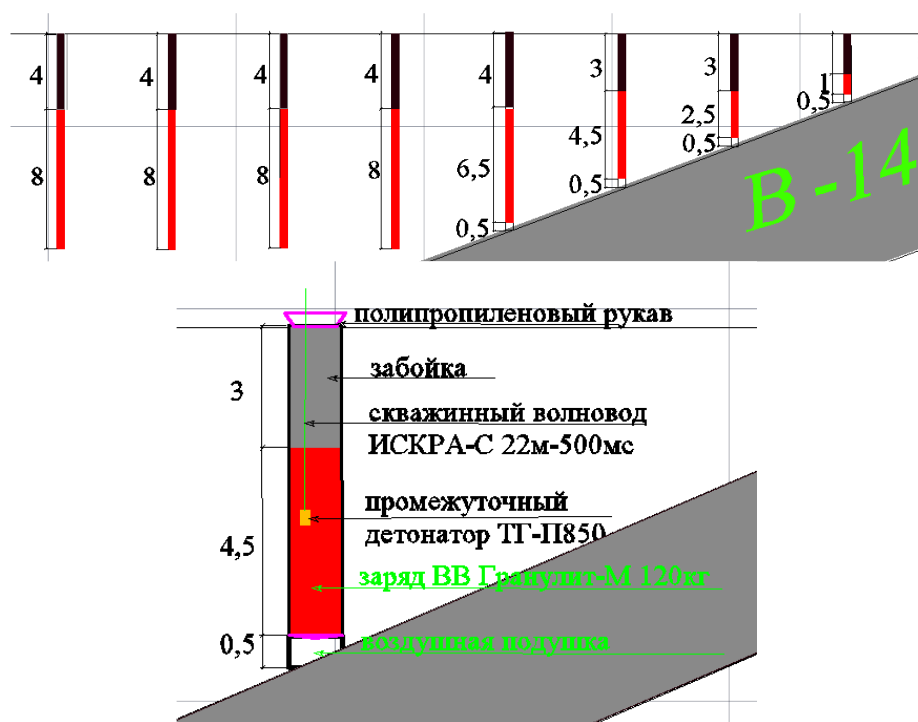


Рис. 1.5 – Расположение скважин переменной глубины с учетом положения угольных пластов и конструкция заряда для обеспечения щадящей взрывной нагрузки

Таким образом, конструкция скважинного заряда с ВП позволяет помимо рыхления вскрышных пород, оказывать местное ослабляющее действие на верхнюю часть угольного пласта и тем самым облегчить его механическое рыхление при последующей селективной выемке. Эффективное применение воздушного промежутка для щадящего воздействия возможно только при точном расположении относительно положения угольного пласта. Возможность определения фактического положения угольного пласта по данным удельной энергоемкости бурения и по данным предварительной георазведки (рис 1.6) указано в работе [34].

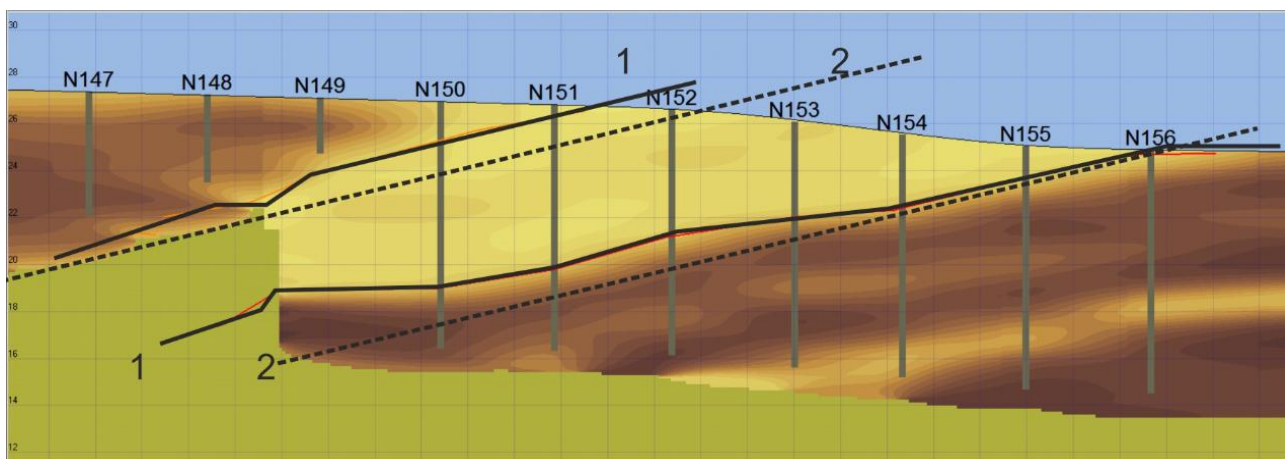


Рис. 1.6 – Фактическое положение угольного пласта по данным удельной энергоемкости бурения (1) и по данным предварительной георазведки (2) по данным работы [34]

В соответствии с данным сопоставлением, проектирование конструкции будет иметь больший эффект при применении данных геологической разведки и параметра удельной энергоемкости бурения. Данный параметр позволяет выделить крепкие и мягкие породы и расставить заряд и ВП по отношению к выделенным участкам массива.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Основные газодинамические процессы, происходящие при взрыве заряда с воздушным промежутком подробно описаны в работах [14, 15, 25, 26]. Лабораторные исследования позволяют выделить особенности применения ВП в скважинном заряде при взрывных процессах [14, 26, 28, 41]. Теоретические основы и экспериментальные исследования применения ВП состоят в том, что основной особенностью импульса получаемого от заряда с воздушным промежутком состоит в появлении двух максимумов, следующих с определенным интервалом. Эксперименты показали, что время следования и амплитуды импульсов зависит от показателя полости при сохранении массы взрывчатого вещества. При этом выделяется фаза сжатия воздушной полости и генерирование дополнительной ударной воздушной волны.

При описании механизма трещинообразования обычно используют теорию ударных труб, из которой следует, что основной причиной образования начальной сети трещин являются периодические продольные нагрузки, образующиеся вследствие многократных продольных отражений ударных волн. При этом возникающие волны разгрузки являются причиной растягивающих нагрузок в горном массиве. Одномерный подход не учитывает эффект поперечных ударно-волновых возмущений. Такие возмущения имеют место при взрывах реальных зарядов и могут оказывать заметное воздействие на формирование зон разрушения. Причиной поперечных возмущений могут являться: кривизна фронта детонации неидеальных промышленных ВВ, неровные стенки скважины, способствующие многократным отражениям ударной волны, источники вторичных ударных волн, например, сами стенки скважины, так как скорость звука в породе, как правило, выше скорости детонации взрывчатых веществ и существенно выше скорости звука в воздухе, заполняющего промежутки, локальные зоны разгрузки давления вследствие образования трещин в породе, различного рода газодинамические неустойчивости потока, образующиеся как на фронте ударной волны, так других областях движущегося газа, несимметричное положение боевиков относительно продольной оси скважины. Учет таких газодинамических процессов в скважине возможно за счет применения инструментов численного моделирования.

Применение инструментов численного моделирования для оценки эффекта от применения ВП в скважинном заряде при разрушении массива было продемонстрировано в работах [44, 45, 51, 55]. Результаты моделирования воздействия конструкции заряда с ВП на горный массив подтвердили основные теоретические предположения о механизме действия воздушного промежутка в скважинных зарядах, а сопоставление с результатами экспериментальных взрывов, подтвердило преимущество конструкции заряда с ВП. При применении численного метода применяется цифровая модель однородного

массива. Тем не менее в условиях месторождений проектирование взрывных работ производится для неоднородного массива.

Проектирование конструкции заряда с учетом неоднородности массива возможно лишь при наличии соответствующих инструментов позволяющих выделять ослабление верхних участков массива в результате отработки вышележащего горизонта или наличие менее крепких слоев массива, производить зонирование особо крепких участков массива. Необходимая детализированная информация о массиве не всегда может быть обеспечена геологическими службами. Информация о неоднородности массива может быть достоверно получена благодаря цифровым технологиям автоматизации сбора данных о физико-механических свойствах среды непосредственно в процессе бурения технологических скважин [4, 19, 33].

Цель исследования состоит в оценке эффективности разрушения неоднородного по прочностным свойствам горного массива при применении воздушного промежутка в скважинных зарядах методом.

Для достижения цели необходимо последовательно решать следующие задачи исследования:

1. Подготовить комплекс вычислительных инструментов для моделирования взрывного воздействия скважинного заряда с воздушным промежутком с учетом неоднородности массива, физико-механических свойств пород и взрывчатых веществ;
2. Провести уточнение газодинамических процессов при сжатии воздушного зазора продуктами взрыва в процессе детонации методом численного моделирования, определить значения давлений в области ВП;
3. Сопоставить результаты экспериментальных исследований эффекта воздушного промежутка в скважинных зарядах с данными численного моделирования;

4. Оценить эффект на разрушение неоднородного по прочностным свойствам горного массива при применения ВП;
5. Определить оптимальные параметры конструкции скважинных зарядов с воздушными промежутками с учетом информации об удельной энергоемкости бурения методом численного моделирования для конкретных горно-технологических условий.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования диссертационной работы является эффект от применения воздушного промежутка в конструкции технологических скважин при разрушении неоднородного горного массива. Считается, что применение воздушного промежутка повышает качество взрыва, при этом снижается расход ВВ и обеспечивается щадящее сейсмическое воздействие на окружающую среду. В качестве предмета исследования выступают газодинамические процессы внутри сжимающегося воздушного промежутка, формирование зон дробления при взрывной нагрузке и сейсмическое воздействие.

2.1. Информационно-вычислительная база для оценки формирования зоны дробления при детонации во взрывной скважине

В задачах горного производства рассматривается комплекс физических явлений - от быстропротекающей детонации в скважине, характеризующейся скоростью распространения ударной волны порядка 3000-7000 м/с до сейсмической нагрузки массового взрыва на окружающую среду, охраняемые сооружения, воздействие которого длится от 1 и более секунд. При этом, геометрические размеры могут варьироваться от, например, 150-250 мм, что соответствует диаметру скважины до 500-1000 м, что соответствует радиусу сейсмически опасной зоны.

Моделирование физических процессов при распространении взрывной нагрузки в горном массиве осуществляется методом конечных элементов [1]. При этом широкий разброс геометрических размеров определяет неравномерность сгущения аппроксимирующей конечно-элементной сетки в пространстве, так и накладывают ограничения на шаг интегрирования для проведения численного моделирования. Таким образом, для обработки

большого объема данных и моделирования процессов в горном производстве необходимы современные технологии вычисления с применением высокопроизводительных вычислительных машин.

Такие расчеты ведутся, в том числе, на базе Института Коммуникаций и Информационных технологий Кыргызско-Российского Славянского университета [11, 12]. Специализированное программное обеспечение с использованием возможностей графических процессоров и применением технологии параллельных вычислений позволяет произвести прогнозирование зоны дробления при взрывных работах, с учетом особенностей горного массива и технологии ведения горных работ.

Моделирование динамических процессов в горных массивах с использованием высокопроизводительного кластера включает в себя подготовку вычислительного комплекса программного обеспечения для подготовки исходных данных, разработку программ для решения пространственно-дискретизированных уравнений динамики с использованием параллельных технологий, настройку параметров используемых алгоритмов на основе опытных данных, проведение вычислительных экспериментов.

Вычислительный комплекс позволяет задать начальные условия, подготовить цифровую модель участка месторождения, произвести расчет методом конечных элементов с применением технологии параллельных вычислений, осуществить оценку зоны дробления, качества дробления и сейсмического воздействия на неоднородный массив от взрывной нагрузки. Комплекс состоит из программных средств, позволяющих произвести подготовку конечно-элементной модели посредством таких программ как TetGen, Gmsh [40, 42], коммерческого программного пакета, посредством которой рассчитывается взрывная нагрузка на стенку скважины, инструменты задания граничных условий в виде диаграммы распределения давления от начала детонации до полной передачи нагрузки на массив посредством

программного средства ImpactMesher, средства моделирования взрывной нагрузки в ближней зоне с применением специализированного программного продукта ANSYS AUTODYN [17], приложения для расчета напряжения в конечных элементах типа стержней BEM [8] и оценка сейсмического воздействия аналитическим методом и инструментами моделирования с применением программного пакета Adventure Impact [35].

2.2. Инструменты подготовки конечно-элементных моделей прочностных свойств горного массива

Для получения максимально достоверных результатов при численном моделировании напряженно-деформированного состояния горного массива и формирования зоны дробления необходимо детально учитывать геологические данные, расположение пород в массиве и их физико-механические свойства. Наличие специального приложения, обладающего необходимым функционалом для подготовки и редактирования конечно-элементных моделей горных массивов, является важным условием при создании системы численного моделирования. Для этих целей в вычислительный комплекс включен интерактивный редактор ImpactMesher [11], который при подготовке соответствующих моделей позволяет эффективно использовать данные геологической разведки, информацию об удельной энергоемкости бурения, получаемой из системы КОБУС, а также топографическую съемку маркшейдерской службы.

Набор инструментов редактора обеспечивает построение трехмерной модели моделируемого участка горного массива, разбиение трехмерной модели на заданные конечные элементы, задание конечно-элементной модели доменов пород на основе геологических данных и информации об удельной энергоемкости бурения, задание и редактирование физико-прочностных свойств горных пород, задание граничных и начальных условий в виде

нагрузок на стенки скважины, выполнение операций геометрического анализа, импорт / экспорт трехмерных сеточных моделей.

Точность результатов численного моделирования определяется количеством и размером конечных элементов. С помощью программы ImpactMesher имеется возможность построения модельных областей, содержащих до 15 миллионов элементов.

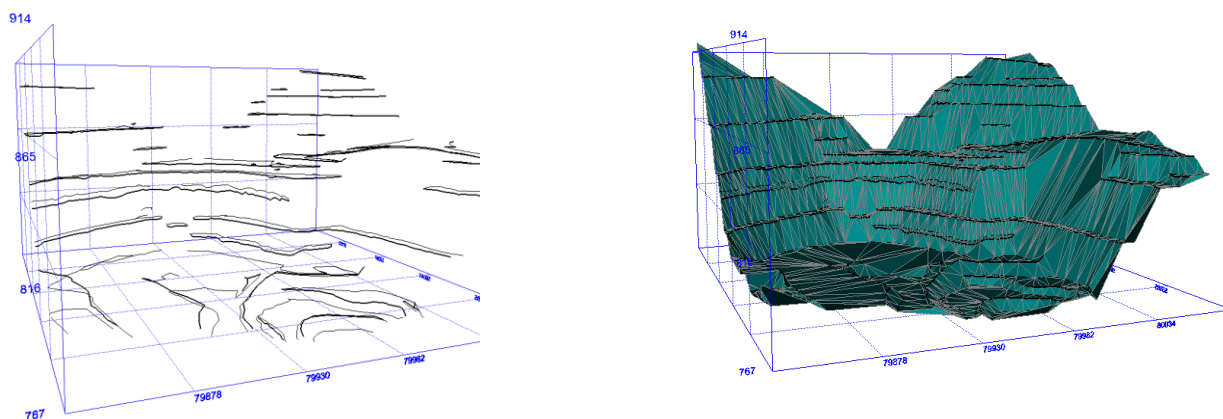


Рис. 2.1 – Построение триангуляционной поверхности рельефа участка карьера по данным маркшейдерской съемки

На основе данных маркшейдерской и топографической съемки в программе производится построение поверхности рельефа методом триангуляции (рис. 2.1). Предварительно данные подготавливаются в специальном тестовом формате и содержат высотные отметки точек на поверхности массива.

Разбиение пространственной модели массива на конечные элементы осуществляется с использованием библиотеки с открытым кодом TetGen [42]. Библиотека позволяет задать размеры шага сетки, задать области сгущения конечно-элементной сетки. Оптимизация сеточной модели позволяет значительно сократить общее количество конечных элементов и существенно снизить требования к вычислительным ресурсам при расчетах. Хранение

сеточных моделей производится в специальном бинарном формате с большим коэффициентом сжатия данных.

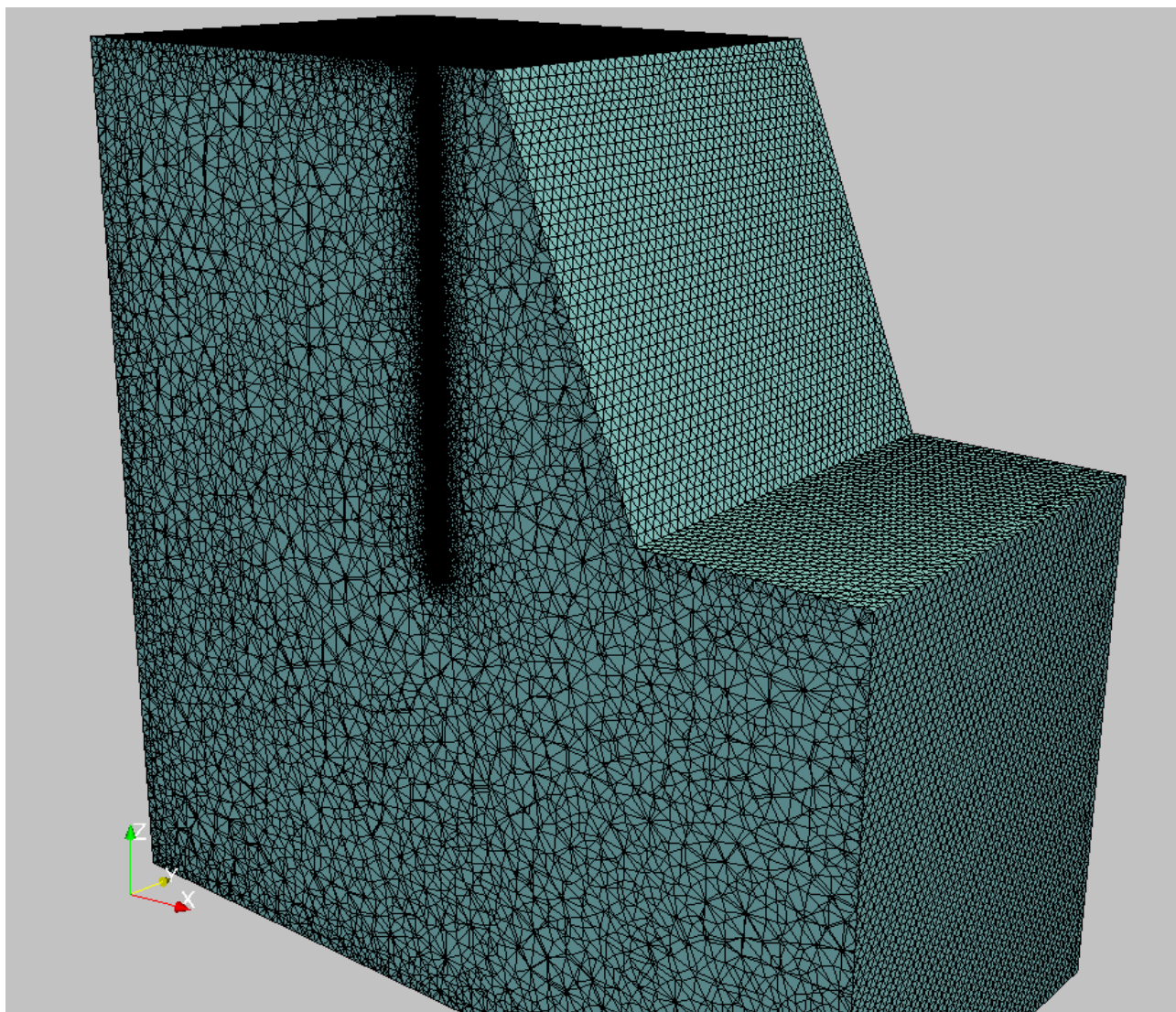


Рис. 2.2 – Разбиение пространственной модели со сгущением в области скважины на конечные тетраэдральные элементы

Библиотека с открытым кодом Gmsh представляет собой автоматический генератор трехмерной конечноэлементной сетки со встроенными пре- и постпроцессорными средствами. Библиотека позволяет создать или импортировать одномерных, двумерные и трехмерные геометрические объекты, строить для них сетки и визуализировать решения [40]. Модуль геометрии библиотеки позволяет произвести импорт поверхности, подготовленной посредством сторонних программных средств, либо готовится

в виде текстового файла с разрешением .geo. Таким образом, задаются основные геометрические объекты модели, например, скважины и поверхность. Модуль задания сетки позволяет задавать размеры сетки и области сгущения, где требуется подробный расчет динамических процессов (рис 2.2).

Инструмент также позволяет задавать различные типы конечных элементов, однако наиболее удобными в оценке зоны дробления являются тетраэдры. Тетраэдральные конечные элементы позволяют обеспечить равномерное распределение элементов и минимизацию количества элементов, что позволяет снизить требуемые вычислительные ресурсы. Выходными данными программы является модель представляющая собой набор файлов со списком конечных элементов, набора пронумерованных узлов и их пространственных координат. Для системы ВЕМ, где применяются элементы типа стержни, тетраэдральные элементы представляются в виде набора стержней, пространственно расположенных в ребрах тетраэдра.

2.3. Программные пакеты для расчета и задания граничных условий взрывной нагрузки на стенки скважины

Подготовка исходных данных для расчета динамических процессов, возникающих при действии ударных и сейсмических нагрузок, включает в себя также ввод граничных и начальных условий различных типов [11]. Инструменты программы ImpactMesher позволяют производить задание значений и направлений внешних динамических нагрузок в виде временных графиков (рис 2.3). Динамические нагрузки и смещения могут быть заданы в векторном виде для отдельного произвольного выбранного элемента или для определенной группы элементов сеточной модели, лежащих на поверхности или внутри горного массива.

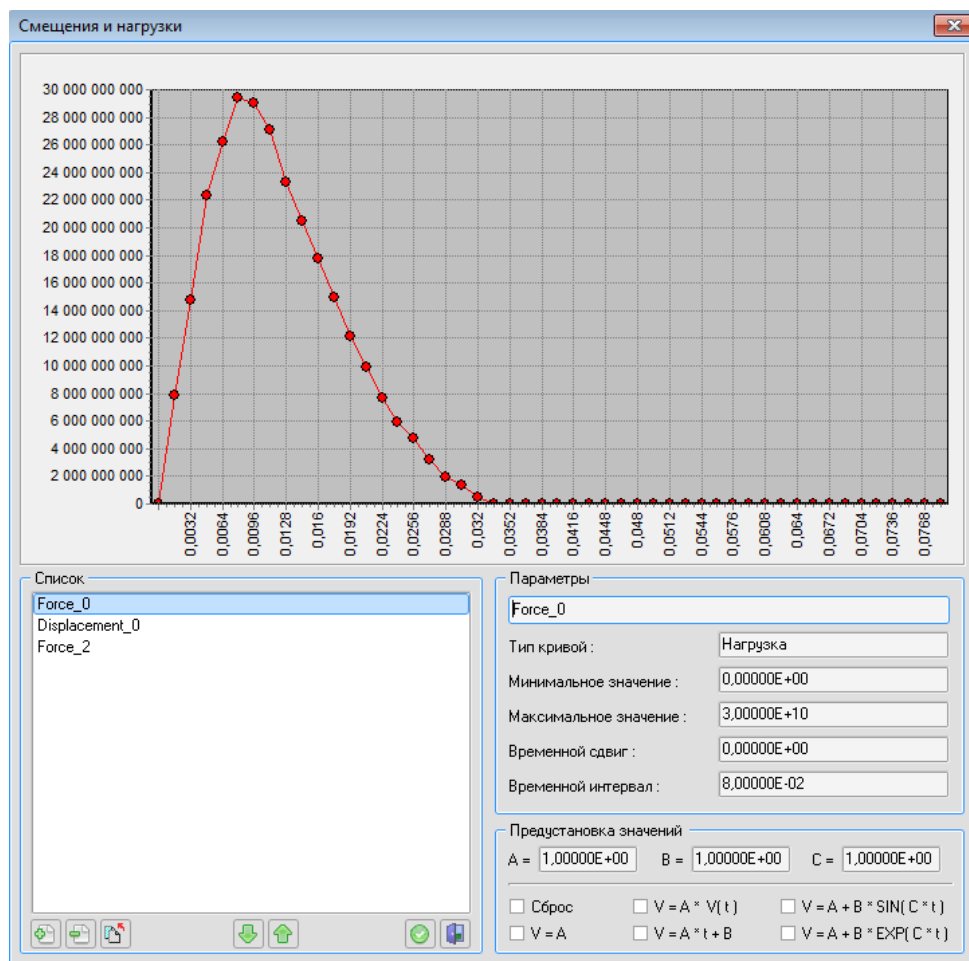


Рис. 2.3 – Примеры временных графиков динамических нагрузок

Информация о нагрузке на стенку скважины импортируется из сторонних программ, в которых рассчитываются детонационные процессы в скважине. Одним из программных пакетов, позволяющих выполнять моделирование газодинамических процессов в скважине и разрушения ближней зоны от составного заряда является программный продукт ANSYS AUTODYN Академический, предназначенный для моделирования высоко нелинейной динамики твердых тел, жидкостей, газов и их взаимодействия и расчета таких быстропротекающих процессов, как высокоскоростной удар или взрыв [46, 47]. Программа позволяет производить моделирование как в двухмерной, так и в трехмерной постановке задачи. Для имитации газодинамических процессов в скважине используются Эйлеровы сетки, размер шага сетки определяется диаметром скважин и должен быть не более, чем 20% от размера диаметра

скважины. Состояния продуктов детонации описываются уравнением Джонса - Уилкинса - Ли (JWL) [17]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0 \rho_e}{V}, \quad (2.1)$$

где A, B, R1, R2, ω - постоянные величины для заданного ВВ. Соответственно, $V = \rho_e / \rho_{пв}$, где ρ_e - плотность ВВ, $\rho_{пв}$ - плотность продуктов взрыва, e_0 - удельная внутренняя энергия.

Давление, создаваемое ПД на стенку скважины, на контакте ВВ-среда задается по формуле:

$$p_{01} = \frac{\rho_e D^2}{\gamma + 1}, \quad (1.2)$$

где D - скорость детонации, γ - показатель адиабаты, определяется для каждого ВВ. Для большинства ВВ данный показатель равен 3. Программа ImpactMesher позволяет выделить узлы на контакте ВВ-порода и передать соответствующие диаграммы нагрузок.

2.4. Численные методы оценки напряженно-деформированного состояния горного массива при взрывных работах

Для моделирования поведения разрушаемой породы в области границы ВВ-порода используются Лагранжевы сетки, минимальный размер шага которых не должен превышать 40% диаметра скважины. Состояние нагружаемой горной породы с высокой точностью описывается моделью Риделя-Тома-Хермайера (RHT Concrete Material Model) [49, 50]. Однако ограничение данной модели определяется ограниченностью требуемых технических средства. Данный расчет для одной скважины может занимать более 12 часов.

Для оценки, модель расчета зоны разрушения в границах блока состоящего из 40 скважин, с длиной скважин до 10 м. может включать в себя более 2 млн. элементов и более 40 тыс. узлов. Для таких больших моделей требуется применения технологии параллельных вычислений. Метод иерархической декомпозиции модельной области и технологии параллельных вычислений, применяются, например, в открытом программном пакете Adventure Impact, обеспечивающем высокую производительность при использовании на кластерных системах. Выходными данными программы являются величины смещений в узлах конечно-элементной модели для различных моментов времени [35].

С целью создания простого и скоростного метода трехмерного моделирования динамических процессов при произвольно заданной нагрузке, с простой и понятной моделью разрушения был разработан программный комплекс, использующий метод конечных элементах типа стержней ВЕМ. Особенность предлагаемого подхода состоит в том, что в качестве базовых конечных элементов используются стержни, а пространственная картина выглядит в виде сетки из стержневых элементов, соединённых в узлах (рис. 2.4). Распределение масс по пространству выполняется в соответствии с плотностью среды таким образом, чтобы сохранялся закон сохранения массы. Толщина каждого стержня вычисляется таким образом, чтобы соблюдался закон сохранения объема. Сетка бинарных элементов строится на основе тетраэдральной сетки.

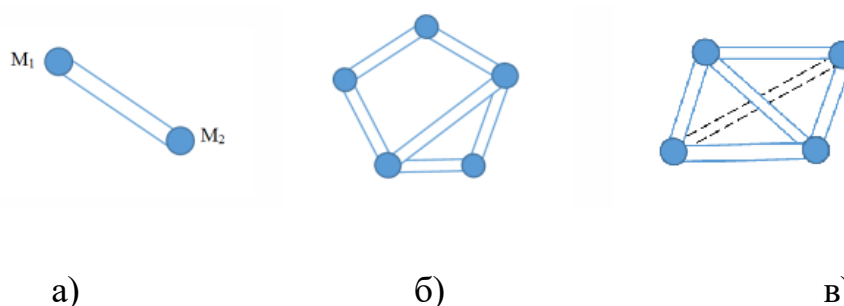


Рис. 2.4 – Бинарные элементы и их пространственные комбинации

Для простоты численного моделирования при расчете напряженно-деформированного состояния массива используется упруго-хрупкая модель. Если растягивающие напряжения превышают предел прочности на растяжение, то напряжения в таком элементе обнуляются. Фиксируется признак разрушения такого элемента и в дальнейшем он уже не может нести растягивающую нагрузку, но продолжает нести сжимающую нагрузку. Если сжимающие напряжения в элементе превышают предел прочности на сжатие, то фиксируется такой признак разрушения и элемент не передает сжимающую нагрузку превышающую предел прочности на сжатие. Таким образом, условия разрушения бинарного элемента определяются соотношением:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &> \sigma_p, \quad \text{при растяжении,} \\ -\sigma_{ij} &> \sigma_{сж}, \quad \text{при сжатии.} \end{aligned} \quad (2.3)$$

где σ_{ij} - напряжение ij -элемента, σ_p - предел прочности на растяжение, $\sigma_{сж}$ - предел прочности на сжатие.

Динамика процесса и схема интегрирования по времени в редакторе приводятся с применением явной схемы, что позволяет отказаться от громоздкой матрицы жесткости и тем самым на порядки сократить время расчетов. Явный метод подразумевает, что заданный интервал времени делится на отрезки времени – шаги. Основываясь на состоянии системы на предыдущем шаге можно, используя известные методы интегрирования по времени (конечно-разностную схему или метод Ньюмарка), определить ускорение, скорости и смещения в узлах. Затем, используя метод приращений, по перемещениям вычисляются деформации и напряжения в каждом элементе. Полученные напряжения анализируются используя принятую модель разрушения.

Для описания распространения сейсмических волн применяется уравнение Ляме:

$$(\gamma + \mu)grad(div\vec{U}) + \mu\Delta\vec{U} = \rho \frac{d^2\vec{U}}{dt^2}, \quad (2.4)$$

где $\vec{U}(x, y, z)$ - смещение частиц среды, γ, μ, ρ - параметры среды. Один из способов решения задачи является метод виртуальной работы. Для тела состоящего из конечного числа элементов записывается уравнение виртуальной работы. Предположим, что массы сосредоточены в узлах элемента, тогда можно получить задачу в виде явной схемы

$$M\{\ddot{U}\} = \{F\} - K\{U\}, \quad (2.5)$$

где K - матрица жесткости, матрица, M - матрица масс, $\{F\}$ - вектор сил, $\{U\}$ - вектор смещения. Решая уравнение (2.5), получаем данные поля смещения и деформации в пространстве в течении времени, которые характеризуют сейсмическое воздействие. Результаты моделирования вблизи охраняемых сооружений могут быть сопоставлены с принятыми на предприятии ограничениями [27] и таким образом, еще на стадии проектирования возможно провести прогнозирование результата взрыва.

Распространения динамических полей в ближней и дальней зоне при взрыве в горном массиве можно также описать с учетом пластических свойств среды в рамках упруговязкопластичной модели Бигмана. Данная модель является упругой для области напряжений $\sigma < \sigma_B$, пластичной при $\sigma > \sigma_B$ и записывается в следующем виде [23]:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, & \text{если } \sigma < \sigma_B; \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - \sigma_B}{\eta}, & \text{если } \sigma \geq \sigma_B. \end{cases} \quad (2.6)$$

Здесь σ - напряжение, σ_B - предельное напряжение, η - динамическая вязкость, ε - деформация, E - модуль Юнга.

Вычислительная схема включает в себя также матрицу демпфирования. Расчет временных последовательностей абсолютных смещений каждого из узлов конечно-элементной модели под действием динамических нагрузок осуществлялся решением пространственно-дискретизированных уравнений структурной динамики с использованием явных методов:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\}, \quad (2.7)$$

где $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ - векторы ускорений, скоростей и смещений, $[M]$, $[C]$, $[K]$ - матрицы масс, демпфирования и жесткости, $\{f\}$ - вектор нагрузок. Матрица жесткости n -ого элемента определяется в виде:

$$[K^n] = [B^n]^T [E^n] [B^n] V^n, \quad (2.8)$$

где $[B^n]$ - градиентная матрица, $[E^n]$ - матрица напряжений, V^n - объем n -ого элемента.

Вычисление текущего вектора деформации $\{\varepsilon^n(t)\}$ и вектора напряжения $\{\sigma^n(t)\}$ каждого элемента для упругой зоны осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} \{\varepsilon^n(t)\} &= [B^n] \{U(t)\}, \\ \{\sigma^n(t)\} &= [E^n] \{\varepsilon^n(t)\}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Аппроксимируя значение ускорений и скоростей на временном шаге t , используя метод центральных разностей получаем дискретизацию по времени:

$$\frac{1}{(\Delta t)^2} [M] \{U(t + \Delta t)\} = \{f\}_n - \left([K] - \frac{2}{(\Delta t)^2} [M] \right) \{U(t)\} - \frac{1}{(\Delta t)^2} [M] \{U(t - \Delta t)\}. \quad (2.102)$$

Временной шаг расчета определяется из условия Куранта, согласно которому за промежуток времени Δt распространяющаяся волна не должна пройти расстояния большего, чем половина минимального размера элемента ΔL , т.е.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta L}{c}, \quad (2.11)$$

где c - максимальная скорость звука в породах.

Метод иерархической декомпозиции модельной области и технологии параллельных вычислений, применяемые в программе Adventure Impact, обеспечивают высокую производительность при использовании на кластерных системах. Таким образом, физико-механические свойства горных пород, в рассматриваемой модели, определены через модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность породы и динамическую вязкость. Выходными данными программы являются величины смещений в узлах конечно-элементной модели для различных моментов времени.

2.5. Методы оценки неоднородности прочностных характеристик массива по данным удельной энергоемкости бурения

Информация об удельной энергоемкости бурения позволяет на различных участках определять залегание особо прочных участков и при некоторых условиях даже идентифицировать физико-механические свойства пород [4, 16].

В ряде исследований отмечалась линейная зависимость между сопротивлением породы сжатию $\sigma_{сж}$ (МПа) и удельной энергоемкостью бурения E (МДж/куб.м), которую обобщенно можно представить в виде [39, 53]:

$$\sigma_{сж} = b_1 E + b_2, \quad (2.12)$$

где b_1 , b_2 - коэффициенты, определяемые для условий месторождения. В силу особенностей физико-механических свойств пород, такая зависимость наиболее часто наблюдается для месторождений, где выделяются особо мягкие участки. Таким образом, для определения прочностных свойств пород по данным удельной энергоемкости бурения требуется определить соответствующие

коэффициенты входящие в формулу (2.12). Полученная информация о прочностных характеристиках массива может быть использована для расчета рекомендуемого удельного расхода ВВ. Так, для дробления породы до среднего кондиционного куска 500 мм при диаметре скважины 250 мм рекомендуемый удельный расход q_p (кг/куб.м) в пересчете для эталонного ВВ (6ЖВ) рассчитывается по формуле [30]:

$$q_p = 0,13\rho\sqrt[4]{f}(0,6+0,8d_0), \quad (2.13)$$

где ρ - плотность породы, т/куб м, d_0 - средний размер отдельности в массиве, м. Как следует из формулы (2.13), отсутствие подробной и верной информации о прочностных характеристиках массива приводит к снижению точности расчета необходимого расхода ВВ и, как следствие повышает риски появления негабаритов на более прочных участках массива.

Расчет удельного расхода может быть также произведен по данным удельной энергоемкости бурения согласно линейной зависимости [33]:

$$q_p = k_1 E + k_2, \quad (2.14)$$

где k_1 и k_2 - коэффициенты, E - удельная энергоемкость бурения. Формула (18) демонстрирует удобство оценки прочностных свойств массива по удельной энергоемкости бурения. Вместо ряда параметров, которые необходимо постоянно определять посредством геологической разведки, достаточно одного интегрального параметра e , позволяющего оценивать оптимальный расход ВВ. Параметр удельной энергоемкости бурения позволяет при проектировании взрывных работ принять меры по обеспечению рационального распределению удельного расхода ВВ: например, с увеличением удельной энергоемкости бурения необходимо увеличить удельный расход ВВ, и наоборот.

Наряду с линейной зависимостью применяется формула, имеющая логарифмический вид [10]:

$$q_p = k_1 \ln(k_2 E + k_3), \quad (2.15)$$

где k_1 , k_2 и k_3 - коэффициенты, уточняемые для условий конкретного месторождения.

Информация об удельной энергоемкости бурения является результатом обработки информации о параметрах бурения, таких как нагрузка на шарошечное долото (осевое давление), сечение скважины, тип шарошечного долота, скорость вращения бурового става, вращающий момент шарошечного долота, скорость проходки скважины, и др. Результатами соответствующей обработки полученных данных являются детализированное пространственное распределение удельной энергоемкости бурения вдоль обуриваемой скважины [18, 52]. Полученные данные об удельной энергоемкости бурения непрерывно сопоставляются с коэффициентом крепости по шкале проф. Протодяконова, предоставляемыми геологической службой, на основе которого устанавливается закономерность между этими показателями.

Предварительная настройка кривой расчета удельного расхода по удельной энергоемкости бурения осуществляется на основе сбора и анализа таких данных, как диаметр скважины, примененный удельный расход, информация о качестве взрыва, положение обуренных скважин и их основные геометрические параметры, точная информация о свойствах ВВ и др. Удельный расход пересчитывается для эталонного ВВ (Аммонит 6ЖВ), диаметра скважина 250 мм и среднего кондиционного куска 500 мм, затем определяется зависимость удельного расхода по данным удельной энергоемкости бурения путем подбора коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 , входящих в формулу (2.15) для достижения соответствующей зависимости. Для уточнения полученных коэффициентов рекомендуется периодическое проведение экспериментальных

взрывов и оценки качества взрыва. В случае неудовлетворительных результатов необходимо произвести корректировку ранее настроенных коэффициентов.

По данным удельной энергоемкости бурения удается получить ожидаемую карту неоднородности массива (рис. 2.5). Положение более прочных прослоек соответствует ожидаемому положению прочных пород. При этом данный параметр позволяет уточнить структуру массива, положение и особенность геометрии прочных участков.

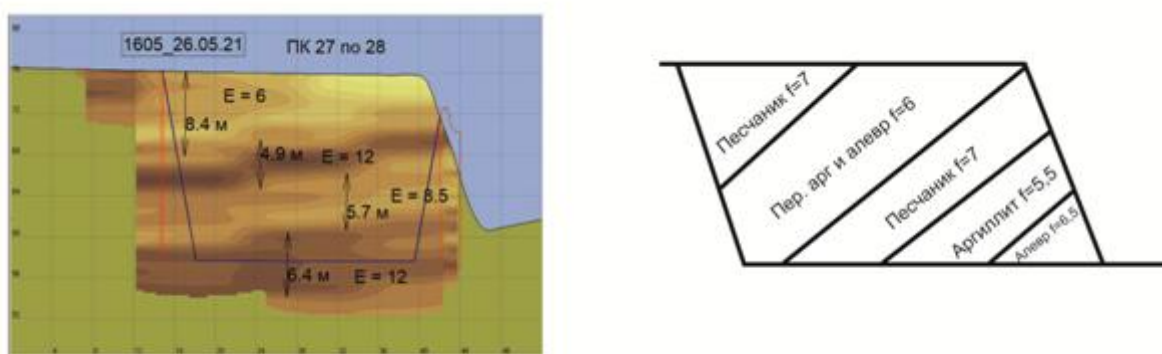


Рис. 2.5 - Сопоставление удельной энергоемкости бурения на сечении с горно-технологической картой, полученной от геологической службы

Совместная работа с отделом БВР предприятия позволяет получить зависимость оптимального удельного расхода ВВ для эталонного ВВ (6ЖВ) от удельной энергоемкости бурения. Первоначально производился анализ применяемого удельного расхода ВВ при проектировании в зависимости от характера массива. Анализ массива осуществлялся отделом БВР на основе горно-технологической карты, качественной оценки массива при выезде на участок и информации об удельной энергоемкости бурения. Информация о применяемом расходе ВВ, качестве взрыва заносился в Базу Данных ПО BlastMaker. На основе первоначального анализа получена предварительная логарифмическая зависимость $q_p = q_p(E)$.

Уточнение полученных коэффициентов производится на основе проведения экспериментальных взрывов. Для осуществления экспериментальных взрывов на предприятии необходимо обеспечить бесперебойность передачи данных об удельной энергоёмкости бурения от станков до рабочего места проектировщика, оперативная зачистка блока от предыдущей взорванной горной массы и непрерывный мониторинг за качеством взрыва. В результате для каждого блока собираются данные о примененном удельном расходе ВВ, качестве взрыва и средней удельной энергоёмкости бурения (рис. 2.6).

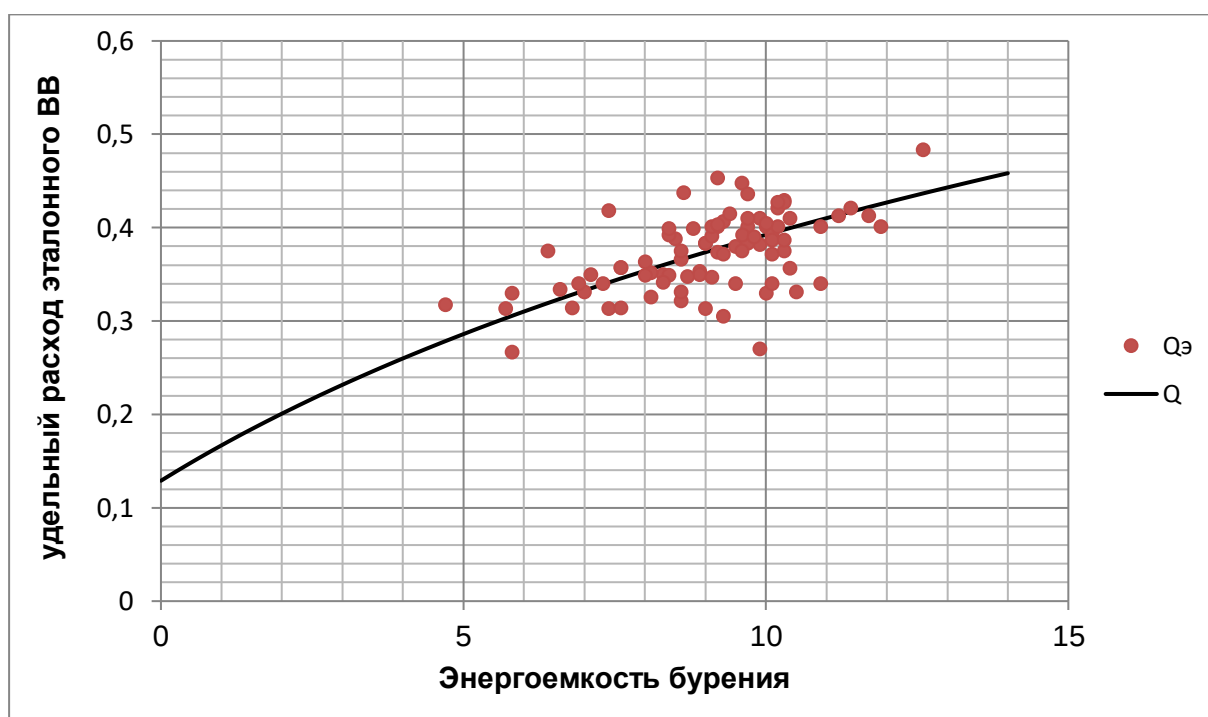


Рис. 2.6 - Пример сопоставления расчетного (линия) и фактического удельного расхода ВВ (точки) в зависимости от удельной энергоёмкости бурения. Удельный расход приведен в эквивалент эталонного ВВ, диаметра скважины 250 мм и среднего кондиционного куска 500 мм

Такой набор информации позволяет получить зависимость рекомендуемого удельного расхода для эталонного ВВ (6ЖВ), диаметра скважины 220 мм и среднего размера кондиционного куска 500 мм. от удельной энергоёмкости бурения в виде (3). Полученная зависимость позволяет

проектировщику получить рекомендуемый расход ВВ в соответствии с импортируемыми данными из системы КОБУС о режимах бурения.

Линейная зависимость между удельной энергоемкостью бурения и крепостью пород по шкале проф. Протодяконова позволяет получить полную картину о неоднородности массива в границах обуреваемого блока, в том числе, уточнять пространственное залегание прочных и мягких прослоек, количественно определять крепость слагающих пород, выделять особо прочные участки массива, требующие специального внимания при составлении проекта на массовый взрыв.

Статистическая информация об удельной энергоемкости бурения на выбранном участке массива является подсказкой при проектировании взрывных работ. Если распределение удельной энергоемкости бурения является типичным, то и технология взрывных работ может быть также привычной. Если, наоборот, распределение удельной энергоемкости бурения существенно отличается от типичного распределения, то это информацию взрывнику о том, что возможно необходимо изменить удельный расход ВВ.

Информация о неоднородности массива может быть также использована и для решения задачи оптимизации конструкции заряда, например, с применением воздушного промежутка (рис. 2.7). При этом для каждой группы скважин может быть определена такая конструкция заряда, чтобы заряд был расположен напротив прочных участков, а воздушный промежуток напротив мягкого прослойка.

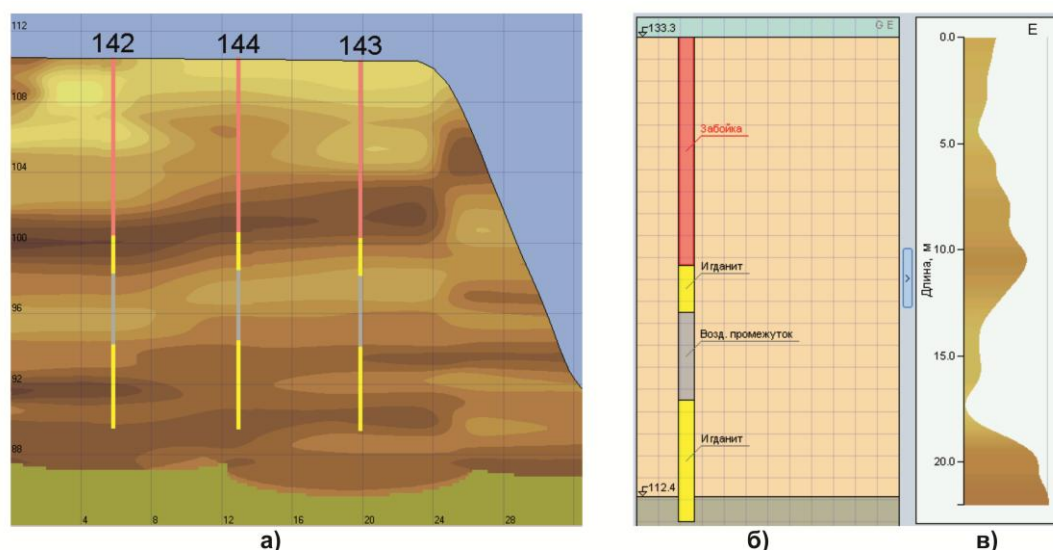


Рис. 2.7 - Конструкция заряда с применением воздушного промежутка в условиях угольного разреза «Богатырь»: а) вертикальное сечение и положение воздушных промежутков напротив мягких участков массива, б) конструкция заряда, в) распределение удельной энергоемкости бурения вдоль скважины

Установленная зависимость между удельным расходом для эталонного ВВ и удельной энергоемкостью бурения (2.15) позволяет рассчитать оптимальное распределение выбранного заряда по блоку в соответствии с прочностными свойствами массива. Чем точнее особенности массива учитываются, тем больше возможностей для рационального распределения заряда. Так, удельная энергоемкость по блоку может быть районирована на 2-3 участка, в зависимости от размера блока и степени неоднородности. При этом для каждого участка рассчитывается свой удельный расход. Если же массив достаточно однороден по удельной энергоемкости бурения, то заряд также распределяется равномерно по блоку.

2.6. Оценка погрешности моделирования зоны дробления при взрывной нагрузки на породу

Погрешность результатов численного моделирования определяется несколькими факторами:

- полнотой исходных данных: информации о физико-механических свойствах горного массива, свойствах ВВ;
- точностью данных маркшейдерской службы и данных системы КОБУС о пробуренных скважинах;
- ограниченностью исходной моделью газодинамических процессов в области воздушного промежутка и разрушение среды;
- размером шага сетки модели конечных элементов и шага интегрирования по времени и др.

При моделировании в качестве свойств применяемых ВВ используются паспортные данные. Однако фактические свойства ВВ могут отличаться от паспортных.

Совокупность перечисленных источников погрешностей относятся к неконтролируемым, поэтому оценка погрешности производилась на основе сопоставления моделируемого результата с лабораторным исследованием разрушения бетонной плиты при кумулятивном взрыве на его поверхности (рис. 2.8). Экспериментальные данные были взяты из статьи [48]. Характеристики бетона представлены в табл. 2.1. Нагрузка на контактную поверхность ВВ-среда была вычислена при помощи инструмента ANSYS AUTODYN. Вычисляемое состояние элемента определялась, как разрушенное или не разрушенное. Данный эксперимент использован для тестирования программного комплекса моделирования разрушения при динамических нагрузках методом бинарных элементов.

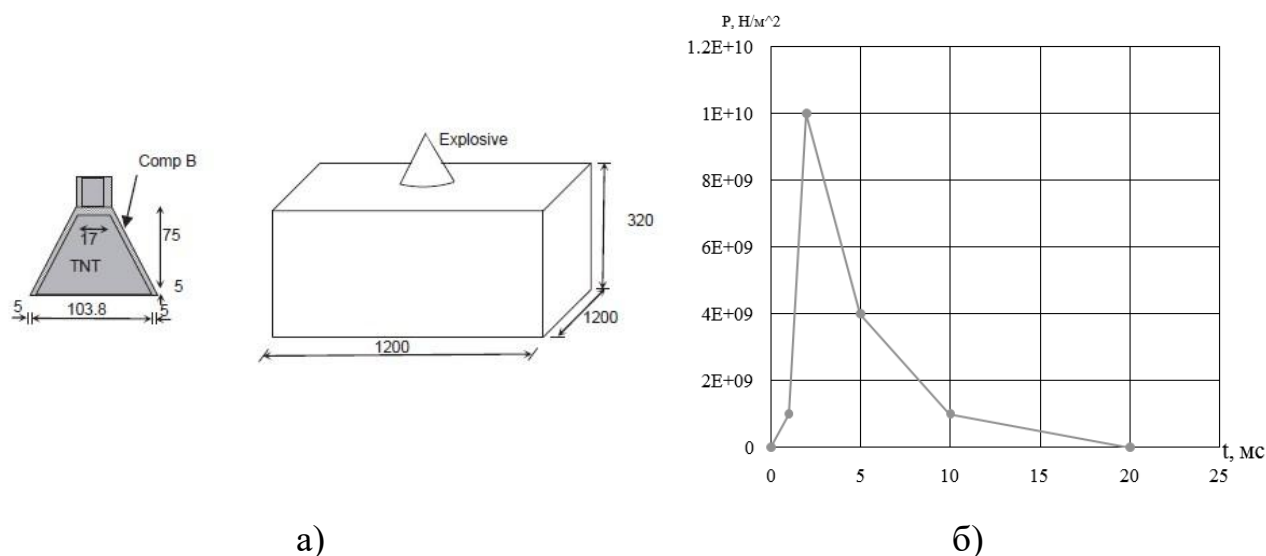


Рис. 2.8 – Постановка задачи для оценки погрешности вычисления зоны разрушения: а) задание нагрузки на контактную поверхность ВВ-среда, б) геометрические размеры модели, значения представлены в мм

Таблица 2.1 – Параметры материала, применяемые для моделирования зоны разрушения

Наименование параметра	Значение
модуль Юнга	$2,158 * 10^{10} \text{ H/м}^2$
коэффициент Пуассона	0,3
плотность	$2.75 * \text{кг/м}^3$
предел прочности на растяжение	$3.984 * 10^6 \text{ H/м}^2$
предел прочности на сжатие	$4.8 * 10^7 \text{ H/м}^2$
предел прочности на сдвиг	$8.64 * 10^6 \text{ H/м}^2$

Результаты сравнения с экспериментом дают основание использования метода бинарных элементов в практических задачах определения зон разрушения при взрывной нагрузке.

Для сопоставления рассматривалась плоскость разрушения со стороны положения взрывчатого вещества. Область была разбита равномерно на театральные элементы с характеристическим размером 40мм. Таким образом,

плоскость была разбита на 3600 элементов. Далее сопоставлялось состояния каждого элемента треугольника с результатами съемки (рис. 2.9).

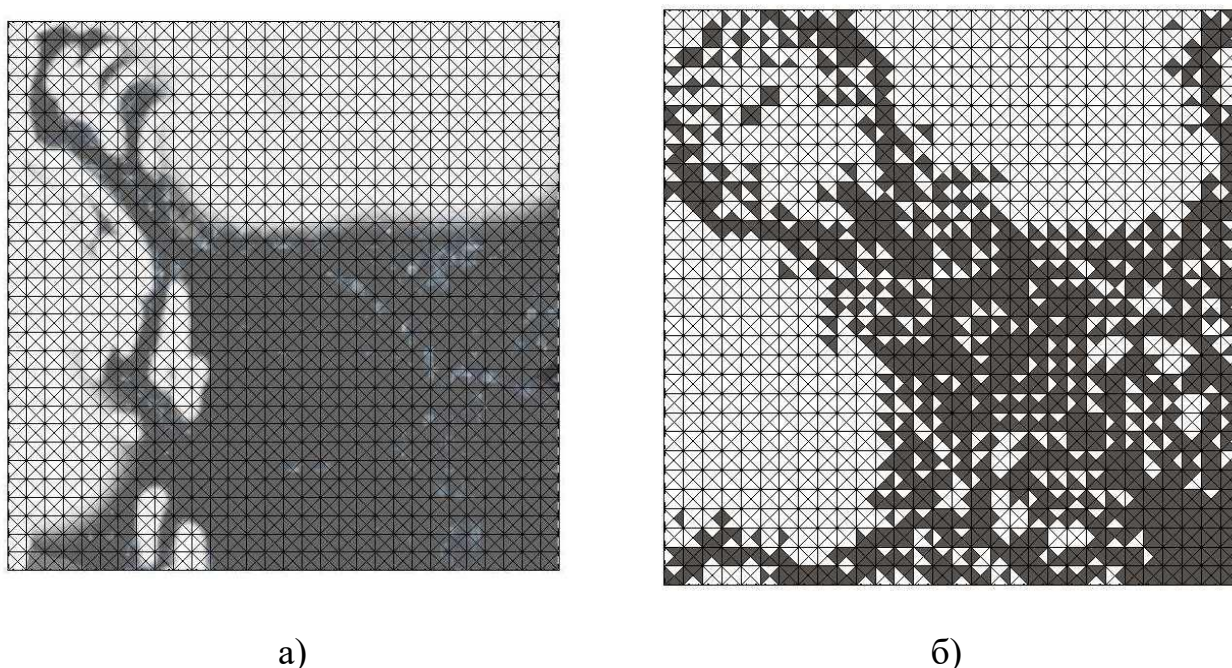


Рис. 2.9 – Пример сопоставления зон разрушения по а) данным фотосъемки и б) моделируемая область дробления

Погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \frac{N - N_1}{N} * 100\% \quad (2.16)$$

N_1 - количество элементов, моделируемое состояние которых совпадает с результатами фотосъемки, N - общее количество элементов. По результатам сопоставления, получено $N_1 = 2700 - 3000$ элементов, поэтому погрешность моделирование оценивается, как $\delta = 15 - 25\%$.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработан вычислительный комплекс программ для моделирования взрывного воздействия скважинного заряда с воздушным промежутком с учетом неоднородности массива, физико-механических свойств пород и взрывчатых веществ. Вычислительный комплекс включает инструменты

для разбиения пространственной модели массива на конечные элементы с использованием библиотек с открытым кодом Gmsh [40] и TetGen [42]. Геологические данные, расположение пород в массиве и их физико-механические свойства, информация об энергоемкости бурения и задание граничных условий взрывной нагрузки на стенки скважины осуществляется в специальном редакторе конечно-элементных моделей ImpactMesher. Нагрузка на стенку скважины рассчитывается в программном продукте ANSYS AUTODYN Академический;

2. Зависимость между удельной энергоемкостью бурения и крепостью пород по шкале проф. Протодяконова позволяет получить информацию о неоднородности массива в границах обуреваемого блока, в том числе, уточнять пространственное залегание прочных и мягких прослоек, количественно определять крепость слагающих пород, выделять особо прочные участки массива, требующие специального внимания при подготовке проекта на массовый взрыв;
3. Применение метода конечных элементах типа стержней позволяет сократить время расчета зоны разрушения для трехмерной модели неоднородного массива;
4. При сопоставлении результатов моделирования зоны дробления методом конечных элементов и фотосъемки результатов экспериментальных работ погрешность вычислений составила 15 – 25%.

ГЛАВА 3. ПРОВЕДЕНИЕ СЕРИИ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА В СКВАЖИНЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ

3.1. Исследование газодинамических процессов в области воздушного промежутка при детонации взрывчатых веществ в скважинном заряде

Для анализа газодинамических процессов внутри области воздушного промежутка рассматривалась двухмерная осесимметричная задача воздействия взрывной скважины диаметром 250 мм на породу средней крепости. Геометрические размеры области приведены на рис. 3.1. В модели в качестве ВВ был выбран игданит, размер воздушного промежутка задан равным 1 м и расположен на дне скважины. Параметры воздушного промежутка заданы в соответствии с моделью идеального газа. Патрон-боевик устанавливался на расстоянии 1 м от контактной поверхности ВВ-воздух. В расчетной задаче патрон-боевик был задан точечным источником инициирования. Горный массив моделировался слабым бетоном с предельной прочностью на сжатие - 60 МПа, что соответствует коэффициенту прочности по шкале Протодяконова $f=6$ (табл. 3.1).

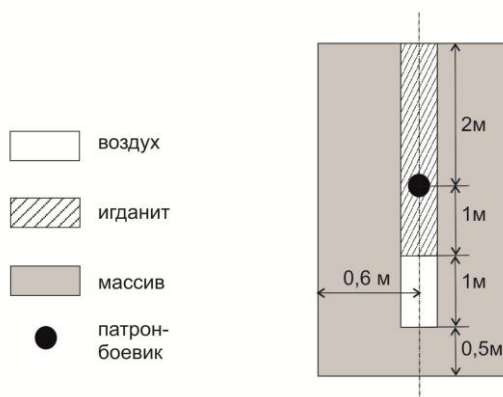


Рис. 3.1 - Постановка задачи для проведения численного моделирования

Таблица 3.1 – Заданные параметры материалов

Игданит	Воздух (идеальный газ)	Порода
Плотность - $0,93 \text{ г/см}^3$ Скорость детонации - 4160 м/с Показатель политропы - $1,56$ Давление на фронте детонационной волны - $5,150 \cdot 10^6 \text{ КПа}$ Теплота взрыва - $2,484 \cdot 10^6 \text{ КДж/м}^3$	Плотность - $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ Показатель адиабаты - $1,4$ Внутренняя энергия - $2,068 \cdot 10^5 \text{ кДж/кг}$	Плотность - $2,75 \text{ г/см}^3$ Объемный модуль упругости - $3,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ Модуль сдвига - $8,3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ Предел прочности на сжатие - 60 МПа Предел прочности на растяжение - $6,8 \text{ МПа}$

Деформации в горном массиве рассчитывались методом конечных элементов в лагранжевой постановке. Для вычисления распространения УВ и расширения ПД в скважине применены эйлеровы сетки. Для лагранжевых сеток определены граничные условия импедансного типа. Поведение системы рассчитывалось для промежутка времени от момента срабатывания патрона-боевика до 1,2 мс. Этот интервал соответствует времени достаточного для циркуляции УВ до торца скважины вдоль воздушного промежутка и обратно.

На рис. 3.2 представлены профили давления вдоль оси скважины от точки инициирования до торца скважины в различные моменты времени ($t=0 - 1,2 \text{ мс}$). Распределение давления вдоль оси скважины в различные моменты времени показано на рис. 3.3 Рис. .

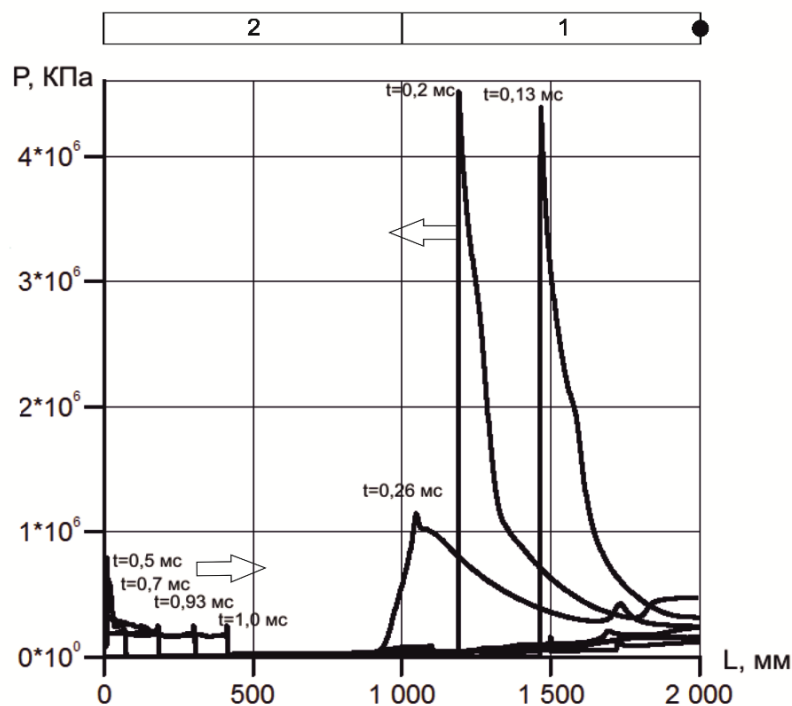


Рис. 3.2 – Волновая картина при сжатии воздушного промежутка: 1 - ПД, 2 - ВП

Как видно на рис. 3.3 при достижении УВ контактной поверхности воздушного промежутка и ПД, волна преломляется и распространяется по сжимаемому продуктам взрыва воздушному промежутку. Отразившись от дна скважины, волна движется обратно в сторону контактной границы воздух - ПД.

Получены моделируемые записи давления в области дна скважины (рис. 3.4). Пришедшая первая отраженная волна №1 распространяется вдоль сжимаемого воздушного промежутка, отразившись от контактной поверхности между ПД и воздухом, УВ увеличивает амплитуду и распространяется в сторону дна скважины. Отразившись от дна скважины формируется волна №2 и последующие отраженные и преломленные волны (№3 - №6).

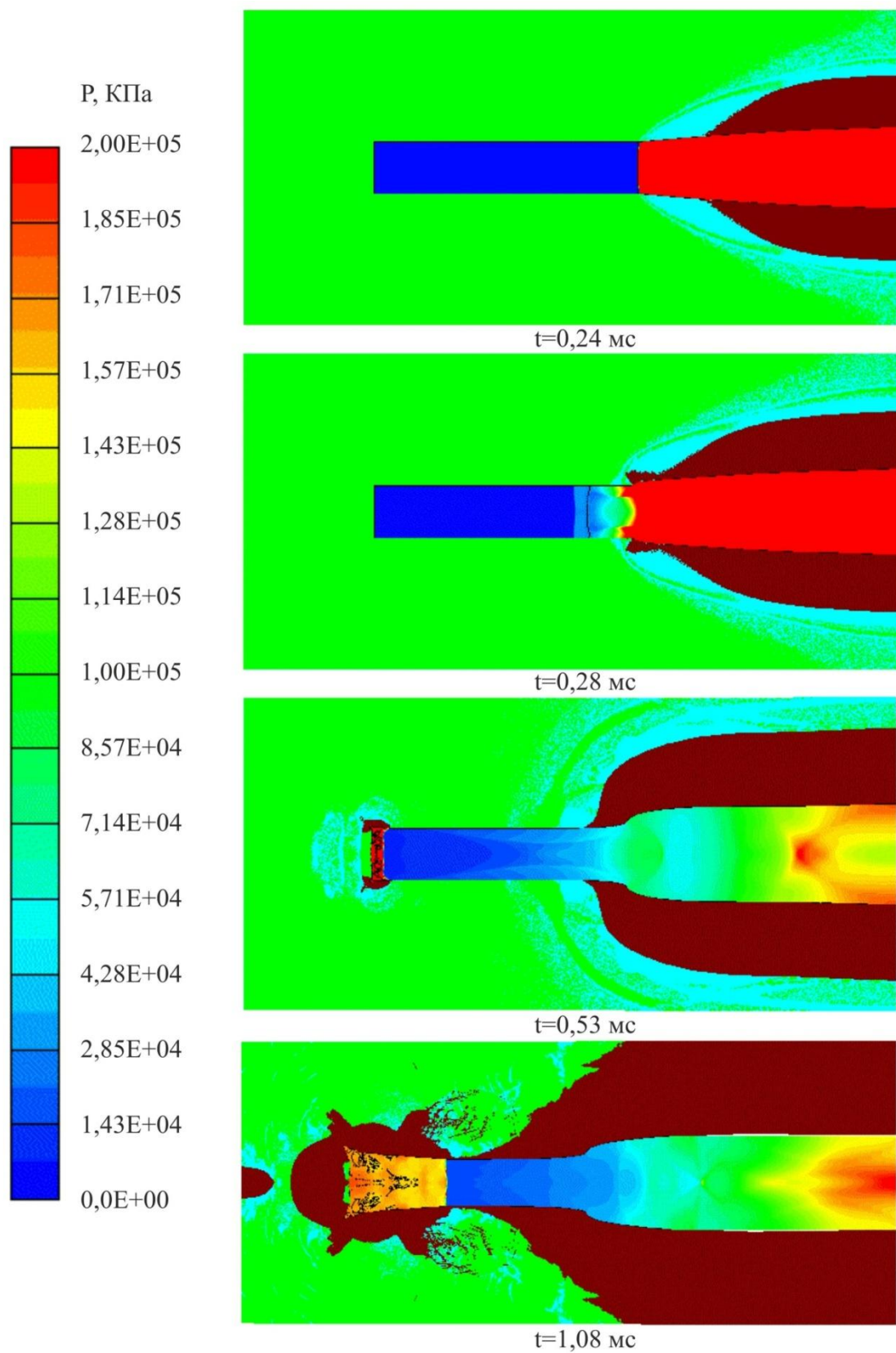


Рис. 3.3 - Распределение давления вдоль оси скважины в различные моменты времени

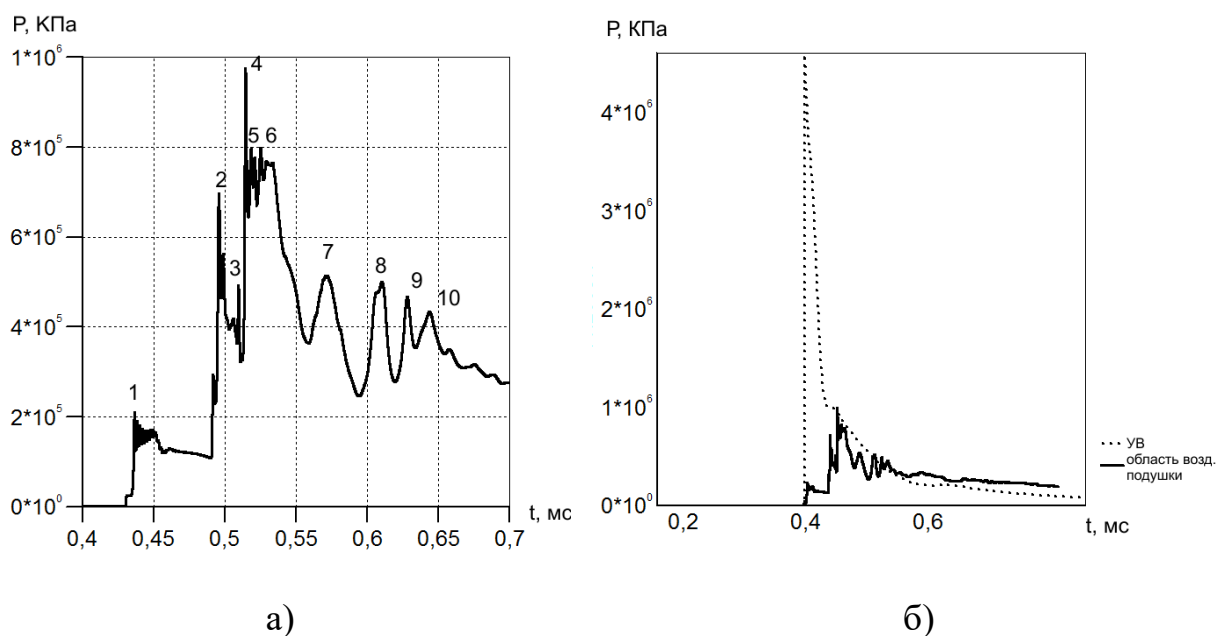


Рис. 3.4- Давление в области дна скважины (а). Сравнение совмещенных по времени профилей давления отраженной и падающей УВ (б).

На рис. 3.5 представлено поведение УВ в области сжимаемого воздушного промежутка. Рис. 3.5а соответствует моменту удара преломленной в воздухе волны о дно скважины и действию импульса № 1 на рис. 3.4а. Импульсы №2 и №3 на рис. 3.4а соответствуют ударам о дно скважины волны отраженной от контактной поверхности ПД-воздух. Также эти импульсы видны на рис. 3.5в и рис. 3.5д. Как показывает моделирование, при многократных отражениях ударных волн от дна скважины и контактной поверхности формируются волны сжатия, распространяющиеся по ПД.

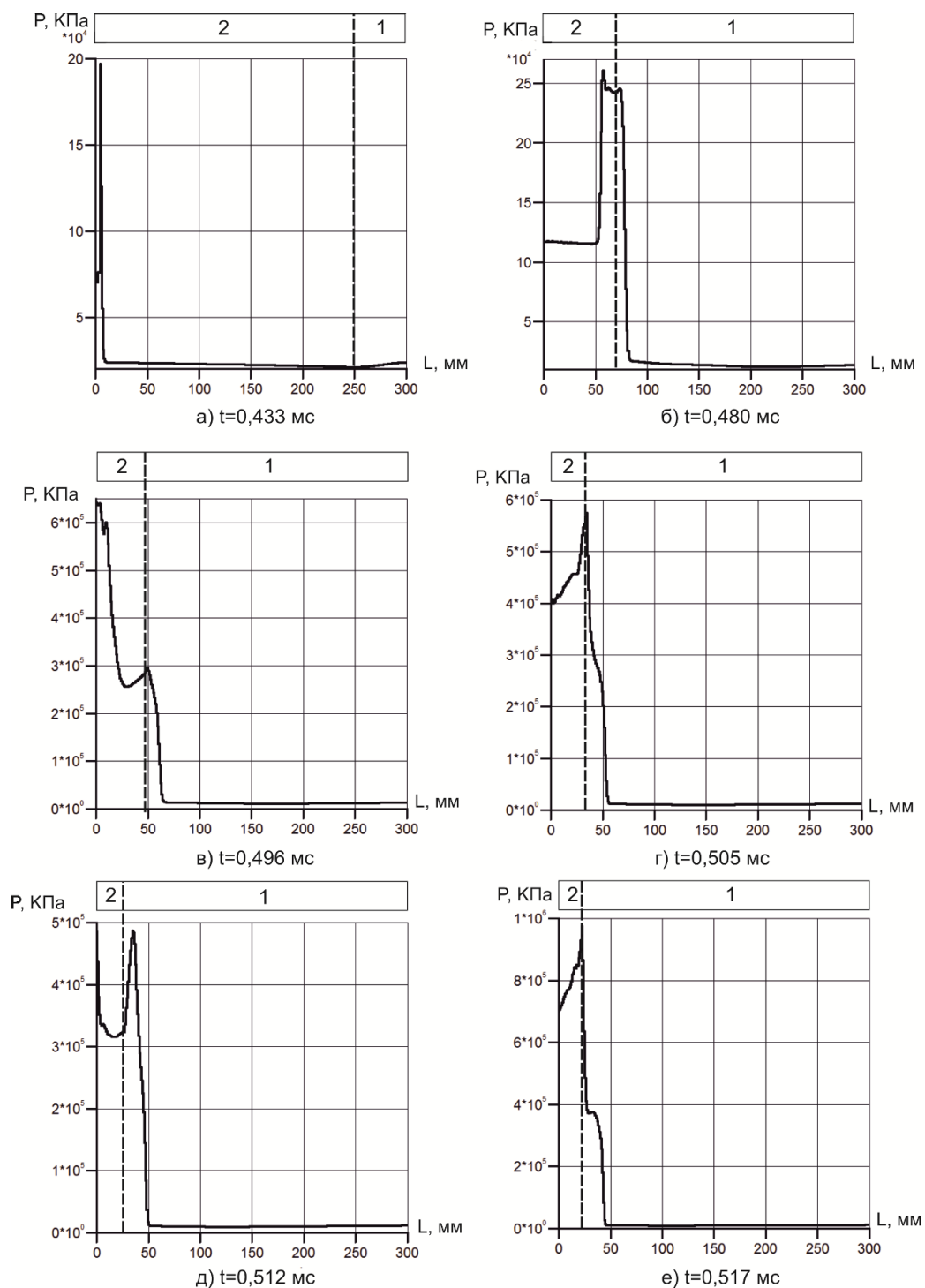


Рис. 3.5 - Распределение давления вдоль оси скважины в различные моменты времени: 1- ПД, 2 - воздушный промежуток

В результате интерференционных процессов во взрывных волнах в области ПД рождается направленная волна сжатия, обеспечивающая усиленное действие на дно скважины. Эта волна соответствует импульсам №7-10 на рис.

3.4 а. С течением времени, колебательный процесс затухает и на дне скважины устанавливается равномерное распределение давления.

Для учета влияния поперечных ударных волн на формирование начальной сети трещин в горном массиве проведены двумерные расчеты в программе ANSYS AUTODYN Академический на мелких сетках с размером ячейки в 1х1 мм. В качестве ВВ в расчете используются свойства игданита.

Результаты моделирования позволили наблюдать особенности поперечных волн в области сжатия воздушной полости. На рис. 3.6 видно, что детонационный фронт имеет некоторую кривизну до момента выхода на границу раздела ВВ/воздух, а массовая скорость продуктов детонации имеет поперечную составляющую, направленную к стенке.

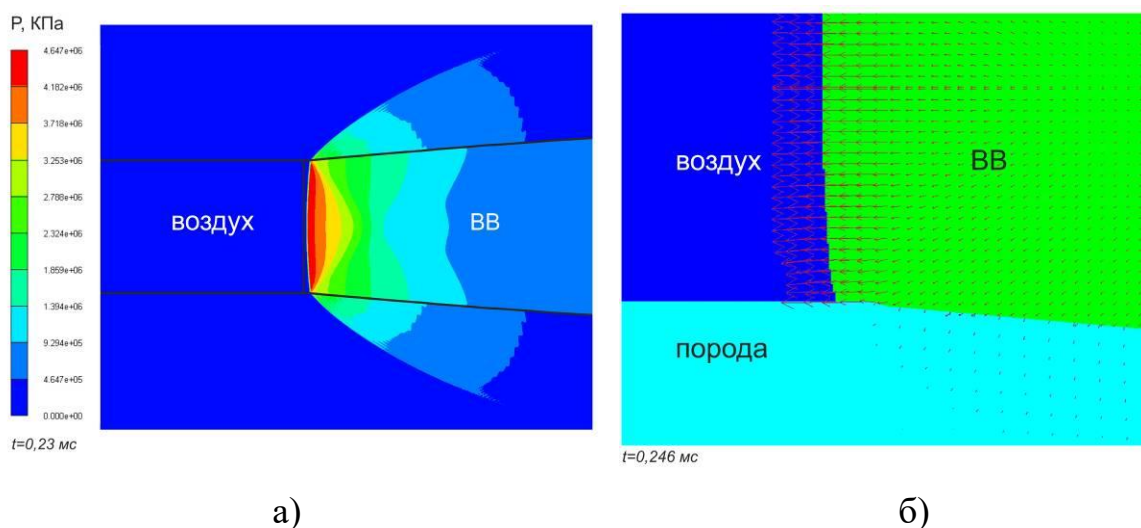


Рис. 3.6 - а) Распределение давления в ВВ до момента выхода ДВ на границу раздела ВВ/воздух. Видна сферическая форма детонационного фронта.

б) Вектора массовой скорости газа на фоне карты распределения материала в области контакта ДВ со стенкой скважины

В данном случае кривизна определяется геометрической постановкой задачи. Действительно при точечном инициировании детонационный фронт имеет форму сферы, радиус которой равен расстоянию до точки инициирования. Рассмотрим, к чему приведет такая форма фронта, и как это

повлияет на ударно-волновую картину в воздушном зазоре и окружающем скальном массиве. Движение детонационной волны под некоторым углом к стенке скважины приводит к скачку давления из-за отражения ударной волны от стенок. Этот скачок давления способствует течению продуктов детонации вдоль стенок, что приводит к "выгибанию" контактной поверхности в обратную сторону (вблизи стенок) относительно начальной кривизны фронта детонации (рис. 3.7).

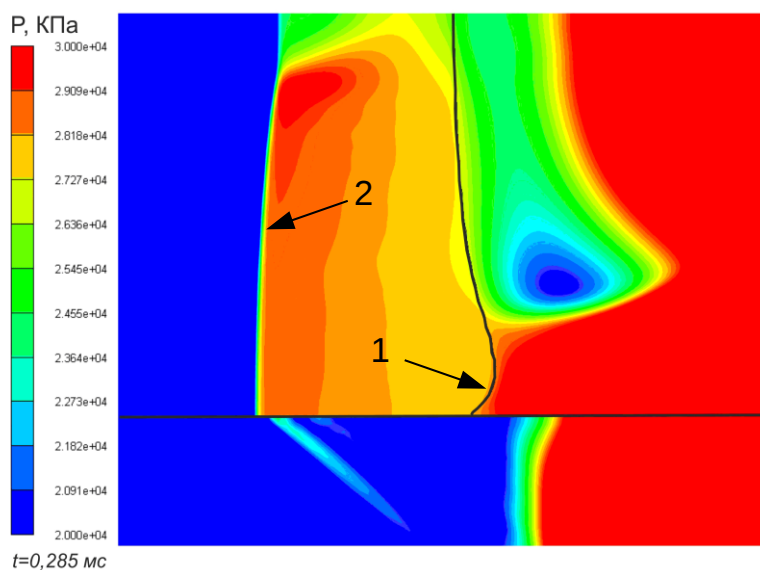


Рис. 3.7 - Распределение давления в воздухе и продуктах детонации в момент после отрыва УВ от контактной поверхности: 1 - "выгибание" контактной поверхности, 2 - сходящаяся ударная волна

Как показывают результаты моделирования после отрыва УВ от контактной поверхности, из-за источников давления у стенок рождается сходящаяся ударная волна, распространяющаяся с большей скоростью у стенок, чем в середине скважины. В результате образуется характерная волновая конфигурация с двойным скачком давления на стенке. Двойной скачок давления должен больше влиять на разрушение породы, чем продольное движение ударной волны вдоль стенки, так как пульсации давления будут вызывать знакопеременные нагрузки в породе.

На рис. 3.7 показана зона разрушения, образовавшаяся вследствие эффекта отражения детонационной волны от стенок скважины. Трещины образовались вследствие разгрузки в момент выхода детонационной волны в воздушный зазор. На рис. показан момент, когда ударная волна ушла влево в воздушную полость, а контактная поверхность также заметно сместилась влево.

Рассмотрим процессы, происходящие вблизи торца воздушного промежутка сопутствующие отражению ударной волны. Здесь можно выделить ряд газодинамических эффектов. Пристеночная область контактной поверхности значительно обгоняет центральную часть. Ударная волна приближается к торцу воздушного промежутка выгнутой в обратную сторону относительно начальной кривизны фронта детонационной волны (рис. 3.8). Поэтому первое воздействие испытывают области торца близкие к стенкам скважины. Причина такой формы УВ описана выше.

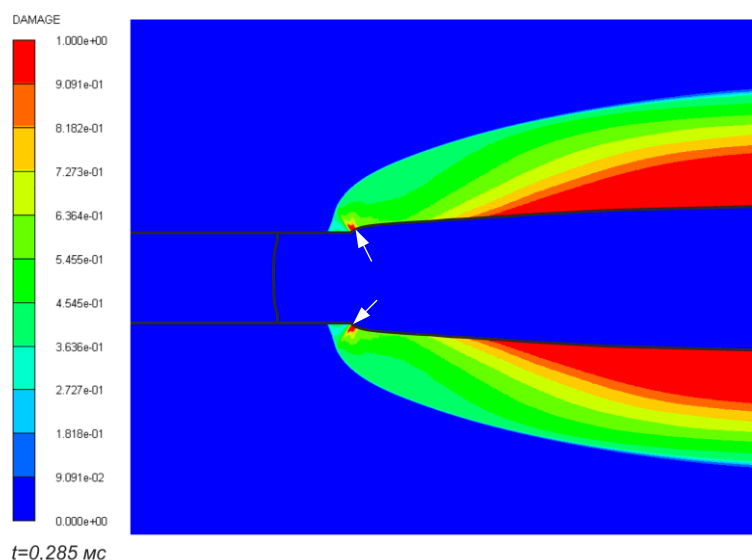


Рис. 3.8 - Формирование трещин (отмечено стрелками) в зоне скачка давления вызванного отражением детонационной волны от стенки скважины на карте распределения вероятностей разрушения по расчетной области

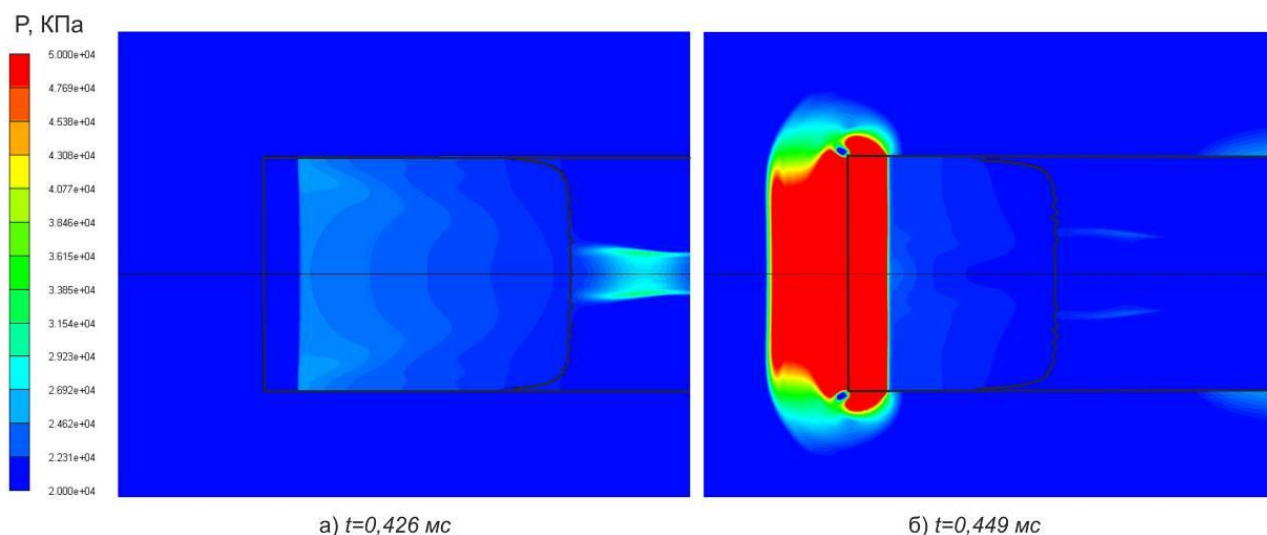


Рис. 3.8 - Газодинамическая картина в моменты до (а) и после (б) отражения УВ от торца воздушного зазора

На периферийной части торца происходит разрушение породы. Это является причиной появления областей разгрузки. После появления таких зон разгрузки распространение ударной волны влево по массиву приостанавливается.

Два примечательных газодинамических события происходят при столкновении отраженной от торца ударной волны с контактной поверхностью продуктов детонации. Во-первых, в пристеночной зоне при скольжении воздуха за фронтом отраженной волны вдоль пристеночного слоя продуктов образуется газодинамическая неустойчивость Кельвина-Гельмгольца [24] (рис. 3.9). Это приводит к сильной турбулизации и образованию множественных зон газа с переменными параметрами (составом, температурой и плотностью). Во-вторых, из-за разности скоростей и плотностей в центральной области скважины на контактной поверхности появляется неустойчивость Рэлея-Тейлора [24] (рис. 3.10).

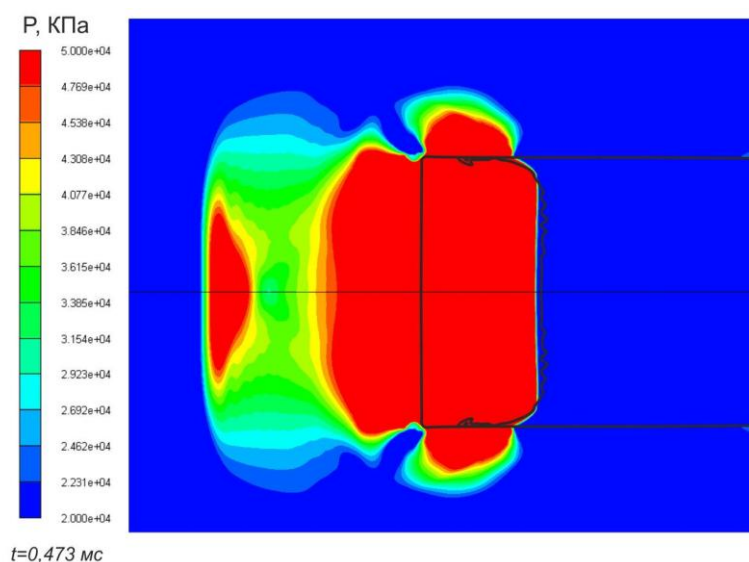


Рис. 3.9 - Распределение давления в момент столкновения отраженной УВ с контактной поверхностью

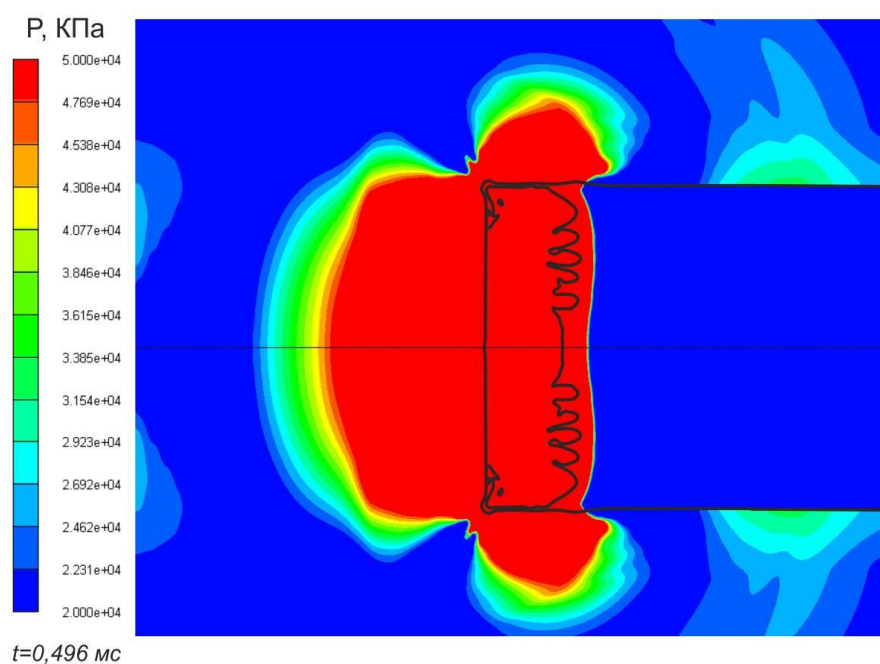


Рис. 3.10 - Возникновение неустойчивости Рэля-Тейлора на контактной поверхности

Таким образом, в области ограниченной торцом воздушного промежутка с одной стороны и контактной поверхностью с другой образуется среда, состоящая из чередующихся областей, заполненных воздухом, либо продуктами детонации. Поперечные и продольные ударные волны, проходя

через множество областей с различным ударным импедансом, претерпевают множественные отражения и преломления, вследствие чего на стенки и торец скважины действуют множество импульсов давления, следующих с высокой частотой. Вероятно, это приводит к образованию множественных трещин в этой зоне. Таким образом, формирование начальной сетки трещин в области торца воздушного промежутка существенным образом зависит и контролируется трехмерной газодинамической картиной.

Таким образом, численное моделирование позволило наглядно представить механизм действия воздушного промежутка с учетом поперечных ударных волн и возникающей неустойчивости. Расчеты в двумерной постановке показали существенно влияние поперечных ударных волн на характер разрушения породы. В частности показано, что:

- распространение фронта детонационной волны под некоторым углом отличным от нормали к стенке скважины из-за естественной кривизны фронта детонационной волны в неидеально детонирующем ВВ может приводить к пульсациям давления в зоне взаимодействия фронта детонационной волны и продуктов детонации со стенкой скважины;
- возникающие на контактной поверхности между продуктами детонации и воздухом газодинамические неустойчивости различной природы являются причиной вибрационного воздействия на породу многократно отраженных и преломленных продольных и поперечных ударных волн.
- как показали проведенные расчеты, учет влияния поперечных волн и газодинамической неустойчивости позволяет оценить размеры зоны вибрационного воздействия на породу, а следовательно и степень дробления в этой зоне. Из этого следует важный вывод: в случае для подтверждения представленной гипотезы численным экспериментом и прогноза разрушения горной породы при применении рассредоточенных зарядов с воздушными

промежутками необходимо предварительно проводить двумерное моделирование газодинамической картины течения в воздушном зазоре.

- несмотря на упрощенную геометрию задачи, используемую в расчете, было показано существенное влияние двумерных явлений на картину разрушения.

3.2. Численное моделирование формирования зоны разрушения в органическом стекле при применении воздушного промежутка

Анализ характера разрушения среды при применении воздушного промежутка в скважинных зарядах осуществлен на примере процесса формирования зоны дробления в органическом стекле. Рассматривался взрыв смеси ТЭНа (70%) и полистирола (30%) в органическом стекле с геометрическими размерами 150x150x150 мм. и вырезанным уступом высотой 75 мм. ВВ размещалось в высверленном отверстии диаметром 4,5 мм. и глубиной 90мм. В конструкции заряда задан воздушный промежуток высотой 15 мм и забойкой - 20 мм в соответствии с параметрами, заданными в исследованиях научной группы под руководством Нифадьева В.И. [28]. Применяемые параметры материалов представлены в табл. 3.2.

Анализ кинокадров процесса позволил выделить последовательность взрыва отдельных участков ВВ, рассредоточенных воздушным промежутком. Таким образом, воздушный зазор играет роль внутрискважинного замедлителя и позволяет регулировать процесс разрушения [28]. Данные результаты удалось полностью повторить методом численного моделирования (рис. 3.11).

Таблица 1.2 – Параметры материалов модели взрывного воздействия ВВ на органическое стекло

Смесь ТЭНа (70%) и полистирола (30%)	Воздух (идеальный газ)	Органическое стекло
Плотность полистирола - 450 кг/м ³ Плотность ТЭНа - 920 кг/м ³ Скорость детонации - 4100 м/с Пиковое давление - 3,4*10 ⁶ Па Теплота взрыва - 4,3*10 ⁶ Дж/м ³	Плотность - 1,2 кг/м ³ Показатель адиабаты - 1,4 Внутренняя энергия - 2,068*10 ⁵ кДж/кг	Плотность - 1180 кг/м ³ Скорость звука - 2550 м/с Модуль сдвига - 0,21*10 ¹⁰ Па Константа Ляме - 0,5*10 ¹⁰ Па Модуль Юнга - 0,55*10 ¹⁰ Па Коэффициент Пуассона - 0,316 Временное сопротивление растяжению - 55-60*10 ⁶ Па

На рис. 3.11 продемонстрирован процесс формирования зоны дробления в органическом стекле при применении конструкции заряда с ВП, расположенном между забойкой и ВВ. В результате газодинамических процессов в воздушной полости образуется среда, состоящая из чередующихся областей, заполненных воздухом и продуктами детонации. Поперечные и продольные ударные волны, проходя через множество областей с различным ударным импедансом, претерпевают многочисленные отражения и преломления, вследствие чего на стенки и торец скважины действуют множество импульсов давления, следующих с высокой частотой.

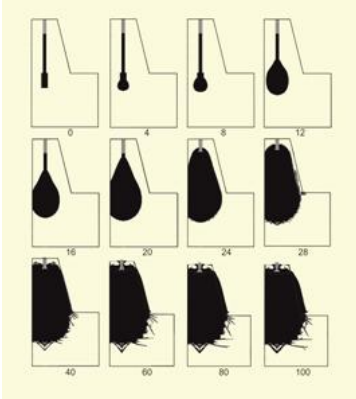
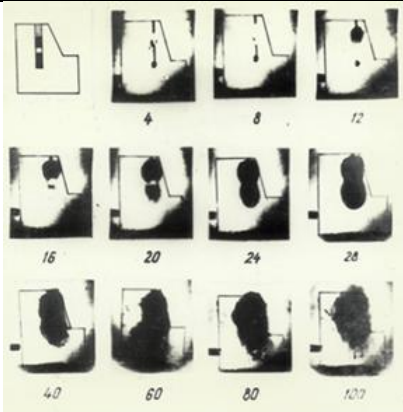
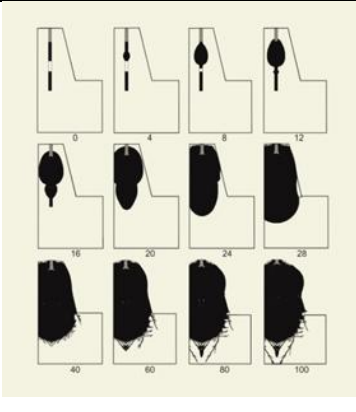
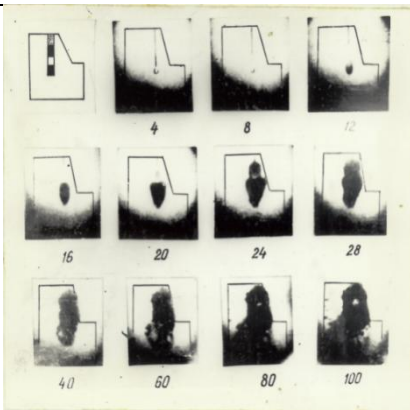
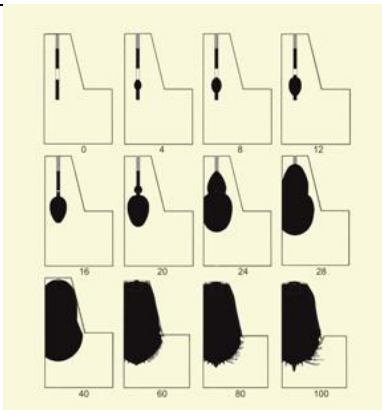
Фотосъемка эксперимента	Численное моделирование
Заряд с расширенной частью в области перебура	
	
Заряд, рассредоточенный ВП с верхним инициированием	
	
Заряд, рассредоточенный ВП с нижним инициированием	
	
а)	б)

Рис. 3.11 - Сравнение областей разрушения органического стекла для задачи взрыва скважины с различной конструкции заряда на различных этапах развития процесса разрушения, время указано в мс: а) эксперимент [28], б) численное моделирование

На границе ВП и забойки образуется дополнительный источник импульса, обеспечивающий равномерное дробление среды. Таким образом, на среду действует длительный импульс, образованный воздействием ударной волны в ВВ и высокочастотного вибрационного воздействия в области ВП. Указанные положения о процессе формирования зоны разрушения при применении ВП в конструкции заряда подтверждаются результатами численного моделирования трещинообразования в горной породе (рис. 3.12в).

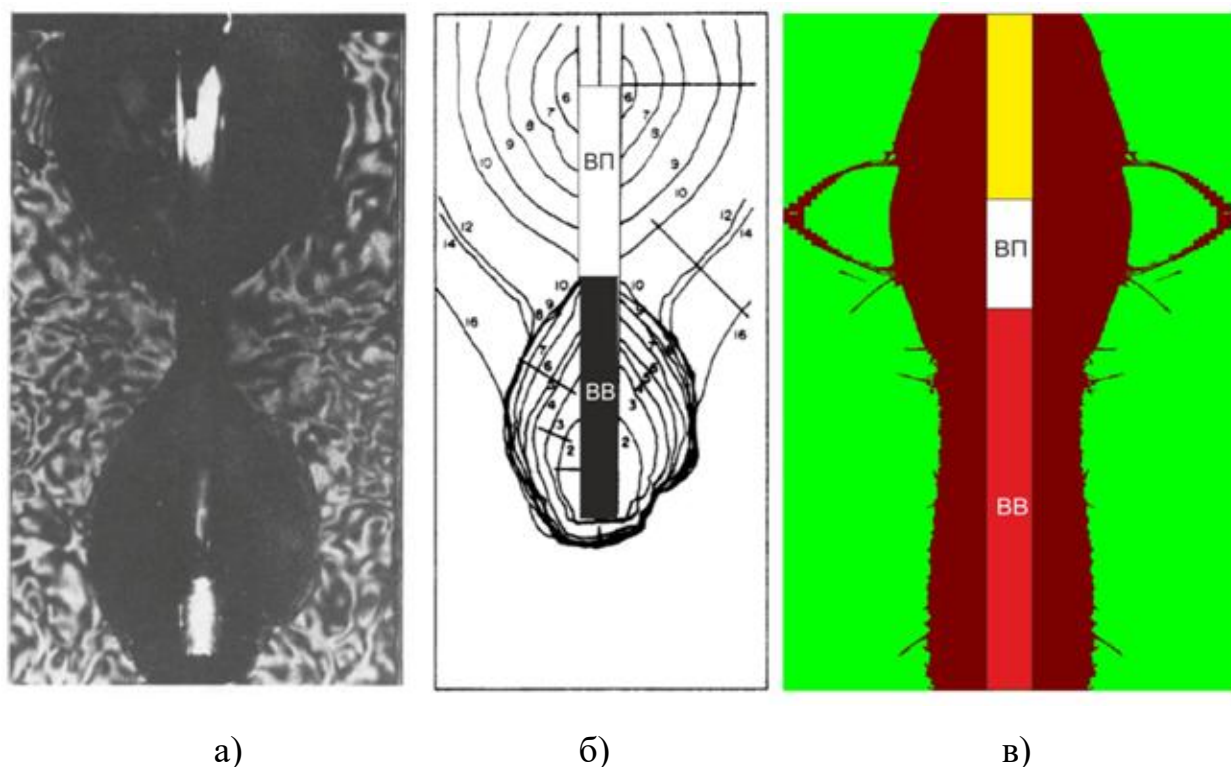


Рис. 3.12 –Формирование зон разрушения в области ВП: а) фотосъемка и б) последовательность формирования зоны разрушения в органическом стекле [41], в) численное моделирование зоны дробления в породе с коэффициентом крепости по проф. Протодяконову 3,5.

Как показывают расчеты, основной особенностью импульса получаемого от заряда с ВП состоит в появлении двух максимумов, следующих с определенным заметным интервалом (рис. 3.13а). Длительность определяется временем, затрачиваемым на сжатие ВП и генерированием ударной воздушной волны при взрыве заряда ВВ в воздушной полости.

Сопоставление графиков на рис. 3.13 позволило утверждать, что в области ВП значительно снижена амплитуда взрывной волны. Так, для мягких пород амплитуда давления снижена в 16 раз, а для крепких пород - в 10 раз, при этом длительной импульса увеличилась примерно в 1,5 раза. Длительность импульса преимущественно определяется геометрическими параметрами ВП. Чем длинее ВП, тем длиннее импульс. Амплитуда волны определяется геометрическими размерами ВП и свойствами пород. Чем крепче порода, тем больше амплитуда волны. Чем длиннее ВП, тем меньше амплитуда волны.

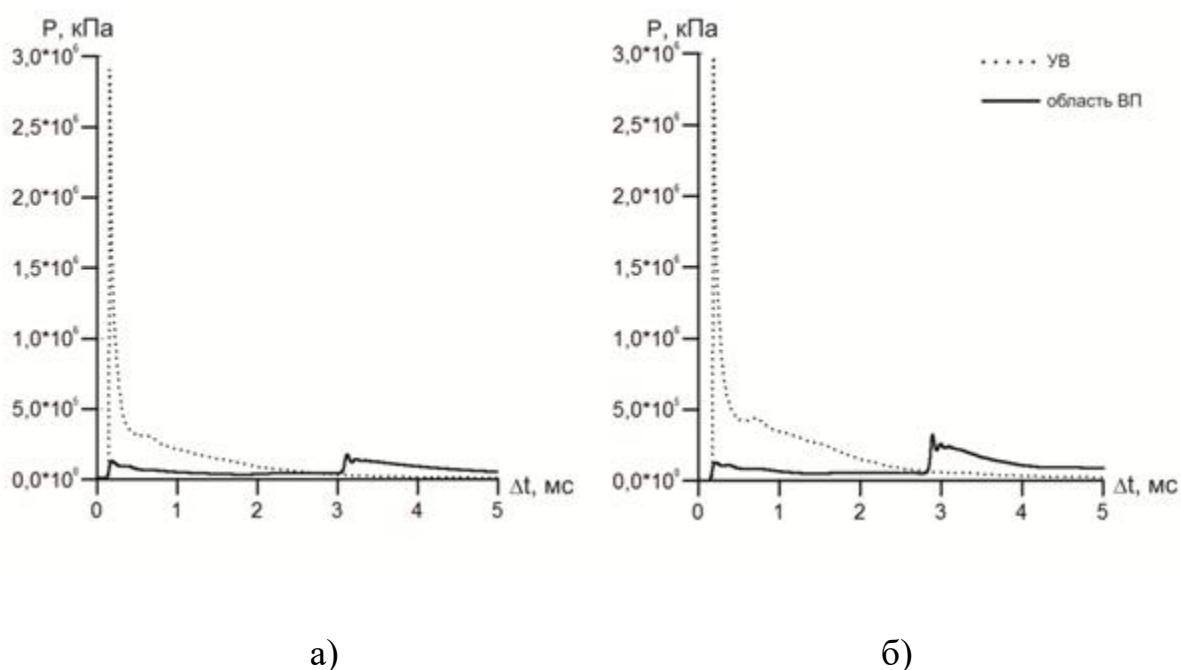


Рис. 3.13 –Сравнение совмещенных по времени профилей давления в области ВВ и в области ВП для а) мягких пород $f=3,5$ и б) крепких пород $f=14$. Длина воздушного промежутка – 2м

Основной механизм процесса передачи энергии в породу обусловлен длительным воздействием, что соответствует предположению сделанному в работе [14]. Такие расчеты соответствуют задачам горнодобывающей практики и позволяют принципиально рассматривать область ВП как второй, дополнительный источник взрывной нагрузки.

Таким образом, инструмент численного моделирования основанный на методе бинарных элементов в комплексе с возможностями программы ANSYS AUTODYN позволил воспроизвести основной процесс формирования зон разрушения при применении различных конструкций заряда, описать механизм трещинообразования при применении ВП, оценить зону дробления и эффект от применения воздушного промежутка в скважинном заряде. Основные теоретически описанные механизмы, подтвержденные экспериментально, удалось детально воспроизвести методом численного моделирования.

3.3. Проведение трехмерных численных экспериментов формирования зоны дробления в неоднородном массиве при применении различных конструкций заряда с воздушным промежутком

3.3.1. Описание трехмерной цифровой модели горного массива неоднородного по прочностным свойствам

Горные породы в массиве характеризуются переменными свойствами в горизонтальном и вертикальном направлениях. Изменчивость массива между скважинами и по высоте уступов требует детализированного учета неоднородностей и соответствующего распределения ВВ и ВП в колонке скважинного заряда. Информация о неоднородности массива передается с бортового компьютера КОБУС в виде набора данных по удельной энергоемкости бурения. Обработка в среде системы автоматизированного проектирования «BlastMaker» получаемых данных позволяет получить подробную информацию о реальном строении обуриваемого массива горных пород в плане и в трехмерном виде, учитывать эту информацию при проектировании составных зарядов с применением ВП.

Особый интерес представляет расположения зарядов ВВ напротив положения прочных прослоек. На рис. 3.14 представлены результаты

предварительного численного моделирования зоны распределения максимальных относительных деформаций в неоднородном массиве горных пород. Из представленных результатов следует, что без учета особенностей залегания пород в неоднородном массиве большая доля энергии расходуется на разрушение мягких прослоек, при этом снижается проработка прочных участков массива. В результате неэффективного использования взрывной энергии возможно неравномерное дробление породы и повышение выхода негабаритов.

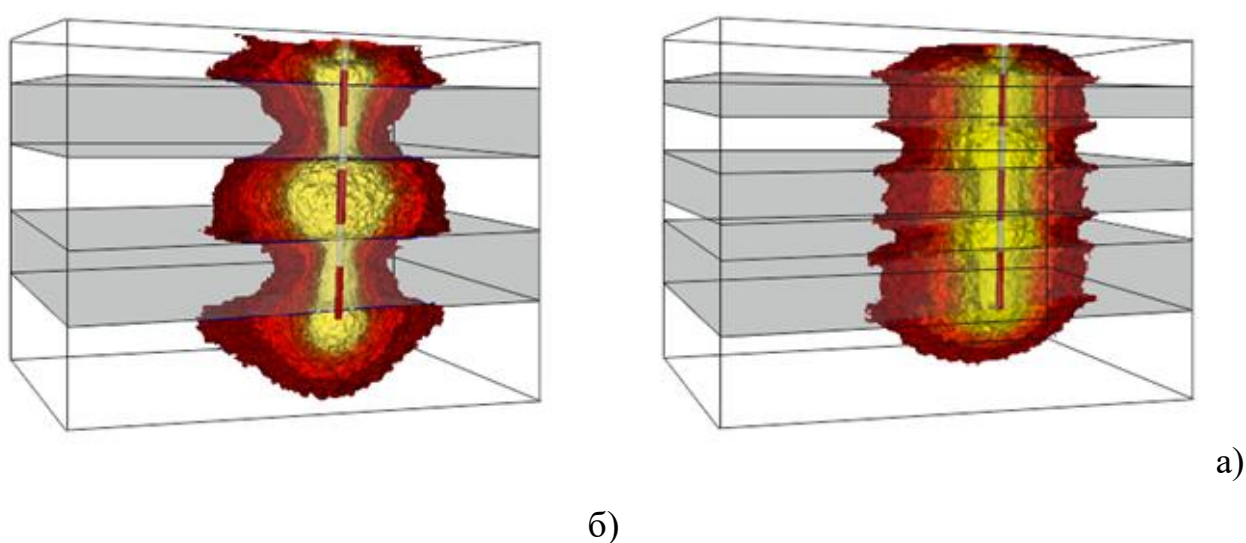


Рис. 3.14 – Максимальные относительные деформации в зависимости от положения заряда относительно прочных прослоек(темные области): а) смещенное расположение зарядов, б)точное расположение зарядов напротив прочных прослоек

Для определения характера формирования зон дробления проведена серия численных экспериментов. Рассмотрена цифровая модель блока размером 36м x 36м x 26м со скважиной диаметром 250мм и глубиной – 18м. Разбиение пространственной модели массива на конечные элементы осуществляется с использованием специального редактора Gmsh. При помощи данного редактора были заданы области сгущения конечно-элементной сетки вокруг скважины, что позволило в последующем получить более точные

расчетные данные в расчетной зоне. Конечно-элементная модель исследуемого участка состоит из 4,2 млн. бинарных элементов (3,5 млн. тетраэдральных элементов) и 645 тыс. узлов (Ошибка! Источник ссылки не найден. рис. 3.15).

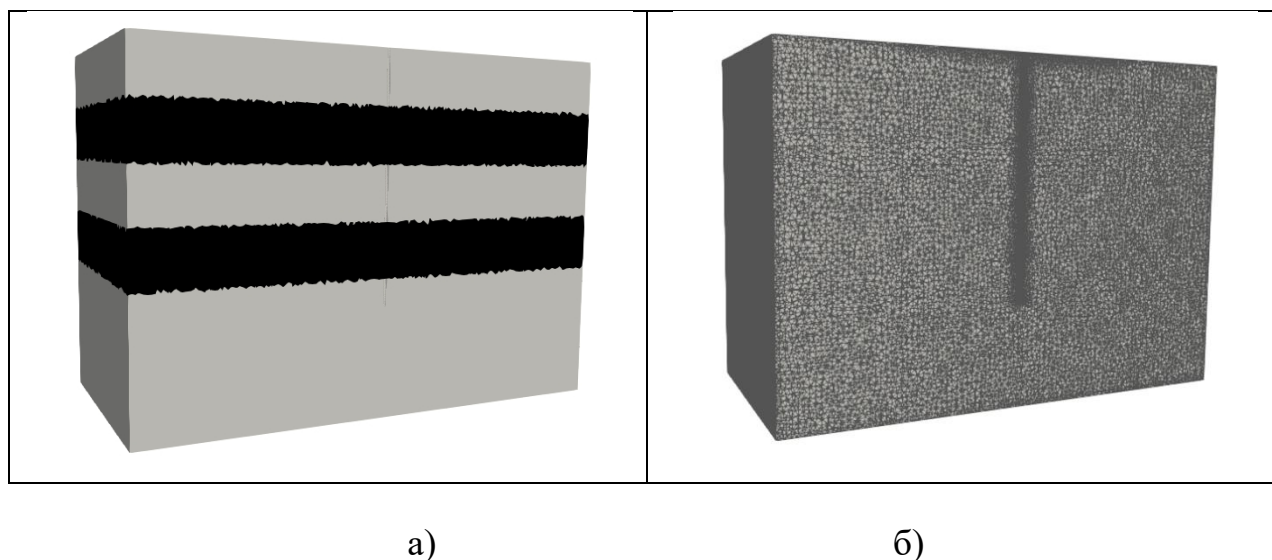


Рис. 3.15 – Пространственная модель блока состоящая из относительно прочных (темные области) и слабых (светлые области) прослоек массива (а) и конечно-элементная сетка с детализацией вокруг скважины (б)

Задание геологической структуры модели осуществлялась в интерактивном редакторе ImpactMesher. Модель разбита на геологические домены, каждому из которых присвоен определенный тип породы с заданными физико-прочностными характеристиками: удельная плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел прочности на сжатие и на растяжение и т.д. Сведения о физико-прочностных свойствах пород представлены в табл. 3.3. Среда задана в виде слоистой структуры массива, состоящей из относительно мягких и крепких пород. Толщина каждого прослойка – 4м. Прочные породы характеризуются коэффициентом крепости по Протоdjяконову – 14, а мягкие породы – 3.

Таблица 3.3 – Параметры горных пород, применяемые для задания модели неоднородного по прочностным характеристикам горного массива

Мягкие породы	Очень крепкие породы
Плотность - 1400 кг/м ³	Плотность - 2520 кг/м ³
Модуль Юнга - 8,6*10 ⁹ Па	Модуль Юнга - 5,7*10 ¹⁰ Па
Коэффициент Пуассона - 0,26	Коэффициент Пуассона - 0,3
Предел прочности на сжатие -30 МПа	Предел прочности на сжатие -140 МПа
Предел прочности на растяжение -6,3 МПа	Предел прочности на растяжение - 8,64 МПа

Для оценки формирования зоны дробления в массиве, разрушенного взрывными работами от вышележащего горизонта с учетом взаимодействия взрывных волн также осуществлялся расчет цифровой модели блока размером 20м x 8м x 13м. с одновременно взрывающимися скважинами глубиной – 11м, и с заданной забойкой – 3м. При помощи редактора Gmsh была подготовлена конечно-элементная модель и заданы области сгущения сетки вокруг скважины. Конечно-элементная модель участка блока состоит из 1млн 270 тыс. бинарных элементов (1млн 22 тыс. тетраэдральных элементов), 200 тыс. узлов (рис.3.16). Породные домены заданы в среде ImpactMesher, физико-механические свойства пород представлены в табл. 3.4.

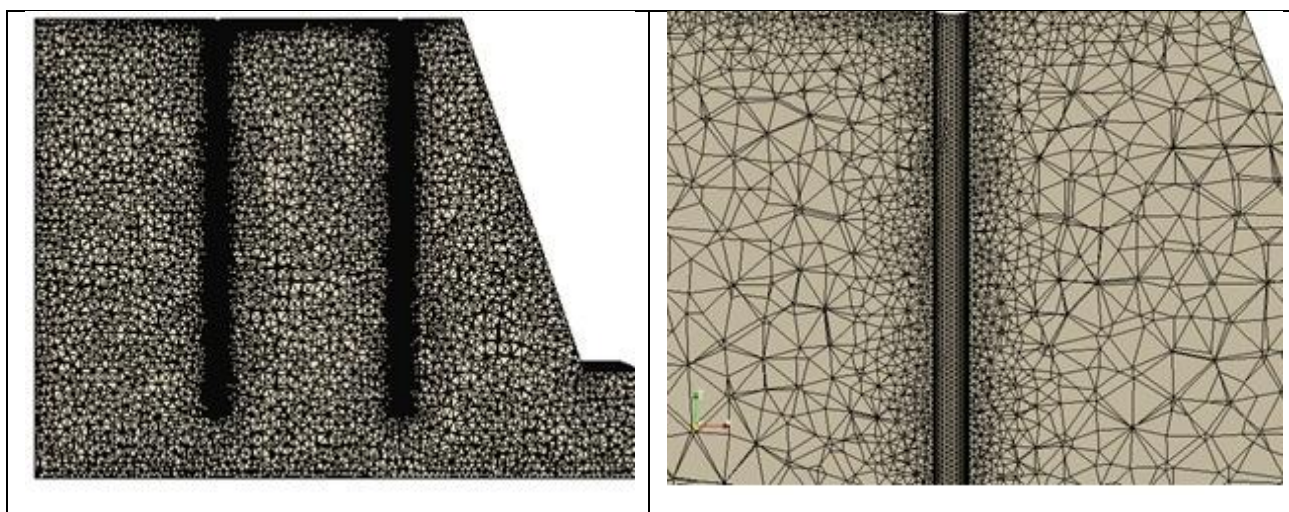


Рис. 3.16 – Пространственная конечно-элементная модель среды и детализация сетки вблизи скважины

Таблица 3.4 – Параметры горных пород, применяемые для задания модели горного массива, разрушенного взрывными работами от вышележащего горизонта

Разрушенные породы	Преобладающий тип пород
Плотность - 2314 кг/м ³	Плотность - 2500 кг/м ³
Модуль Юнга - 2,7*10 ¹⁰ Па	Модуль Юнга - 2,8*10 ¹⁰ Па
Коэффициент Пуассона - 0,3	Коэффициент Пуассона - 0,3
Предел прочности на сжатие -35 Мпа	Предел прочности на сжатие -48 Мпа
Предел прочности на растяжение -6,3 Мпа	Предел прочности на растяжение - 8,6 Мпа

Основной массив задан породой, с коэффициентом крепости по шкале проф. Протоdjяконова 5, а разрушенные породы заданы с коэффициентом крепости около 4. Мощность мягкой прослойка задана значению 4м и расположена в верхней части разрушаемого массива.

3.3.2. Особенности задание нагрузок на стенки скважины при применении воздушного промежутка в конструкции скважины

Задание нагруженных узлов в скважине произведено также в интерактивном приложении ImpactMesher. При этом рассмотрены два случая:

- точное позиционирование заряда: ВВ расположено напротив твердых прослоек, ВП – напротив мягких;
- смещенное положение заряда: ВВ и ВП расположены без учета положения твердых и мягких прослоек (рис. 3.17).

Сведения о свойствах ВВ и ВП представлены в табл. 3.5.

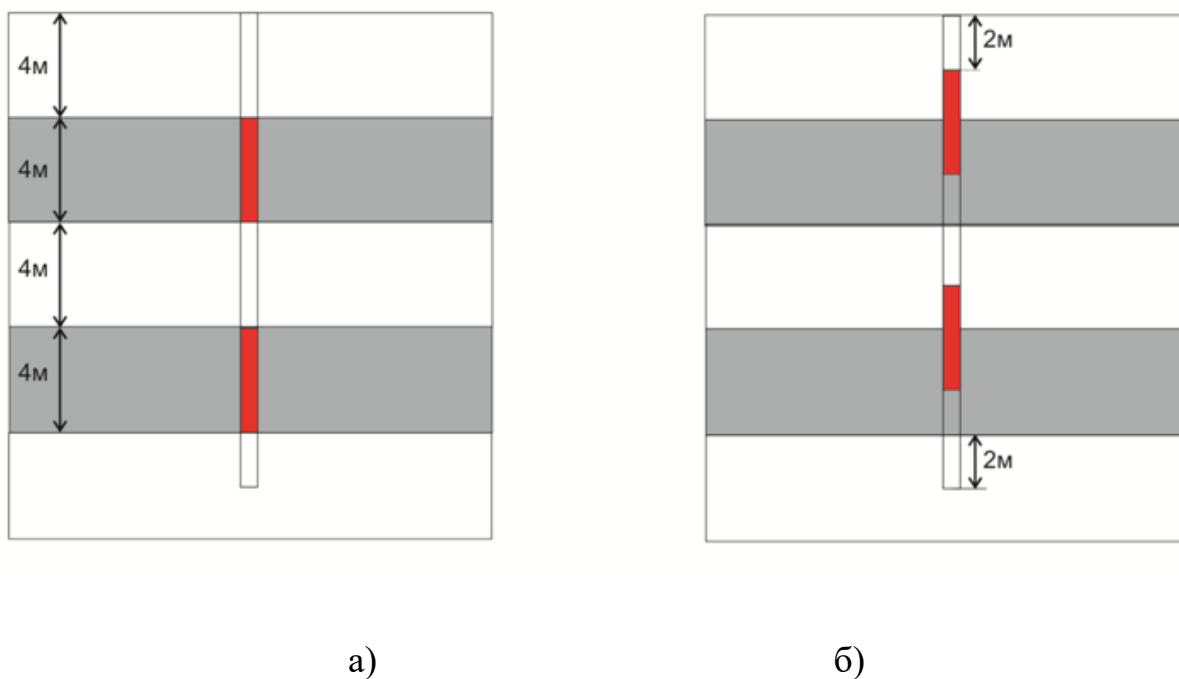


Рис. 3.17 – Расположение зарядов ВВ в скважине относительно прочных (темные области) и слабых (светлые области) прослоек массива: а) точное положение заряда с учетом прочных участков и б) смещенное положение заряда

Таблица 3.5 – Свойства материалов для задания параметров конструкции заряда

Игданит	Воздух
Плотность - $0,93 \text{ г/см}^3$	Плотность - $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$
Скорость детонации - 4160 м/с	Показатель адиабаты - $1,4$
Показатель политропы - $1,56$	Внутренняя энергия -
Давление на фронте детонационной волны - $5,150 \cdot 10^6 \text{ КПа}$	$2,068 \cdot 10^5 \text{ кДж/кг}$
Теплота взрыва - $2,484 \cdot 10^6 \text{ кДж/м}^3$	

Зона контакта ВП-среда задана в виде двух последовательных импульсов, каждый из которых характеризуется своим максимальным значением P_1 и P_2 . Импульсы следуют друг за другом с определенным временным интервалом (рис. 3.18). Длительность Δt_{12} определяется временем, затрачиваемым на сжатие ВП и генерированием ударной воздушной волны при взрыве заряда ВВ в воздушной полости.

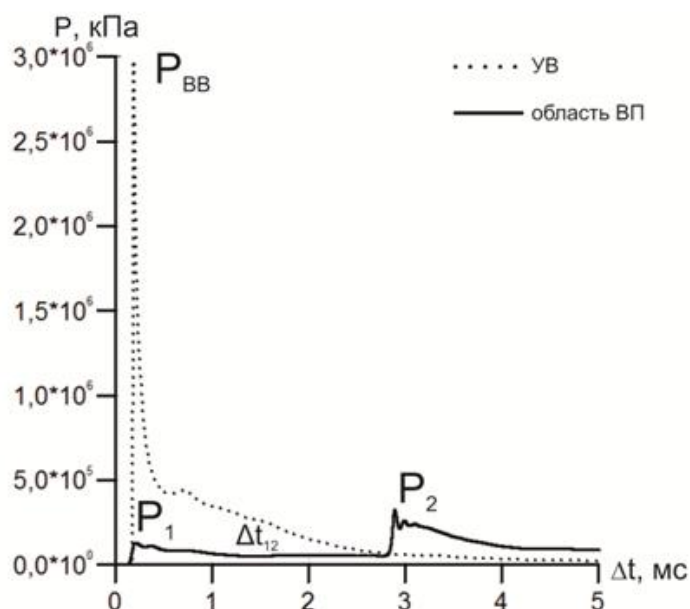


Рис. 3.18 – Основные параметры задания нагрузки в скважинных зарядах

На основе сбора данных о распределении нагрузки вдоль ВП для пород с коэффициентом крепости по шкале проф. Протодяконова $f=3,5, 4,8$ и 14 при моделировании длины ВП $=1\text{м}, 2\text{м}$ и 3м найдена аппроксимирующая степенная зависимость затухания УВ в области ВП (рис. 3.19):

$$P_1 \approx \frac{P_{01}}{(10x+1)^{4/3}}, \quad (3.1)$$

где $P_{01} = \alpha P_{BB}$, α - коэффициент преломления и соответствует значению $0,226-0,28$, $x = (0, L_{ВП})$ - расстояние от исходной границы ВВ-ВП до дна скважины.

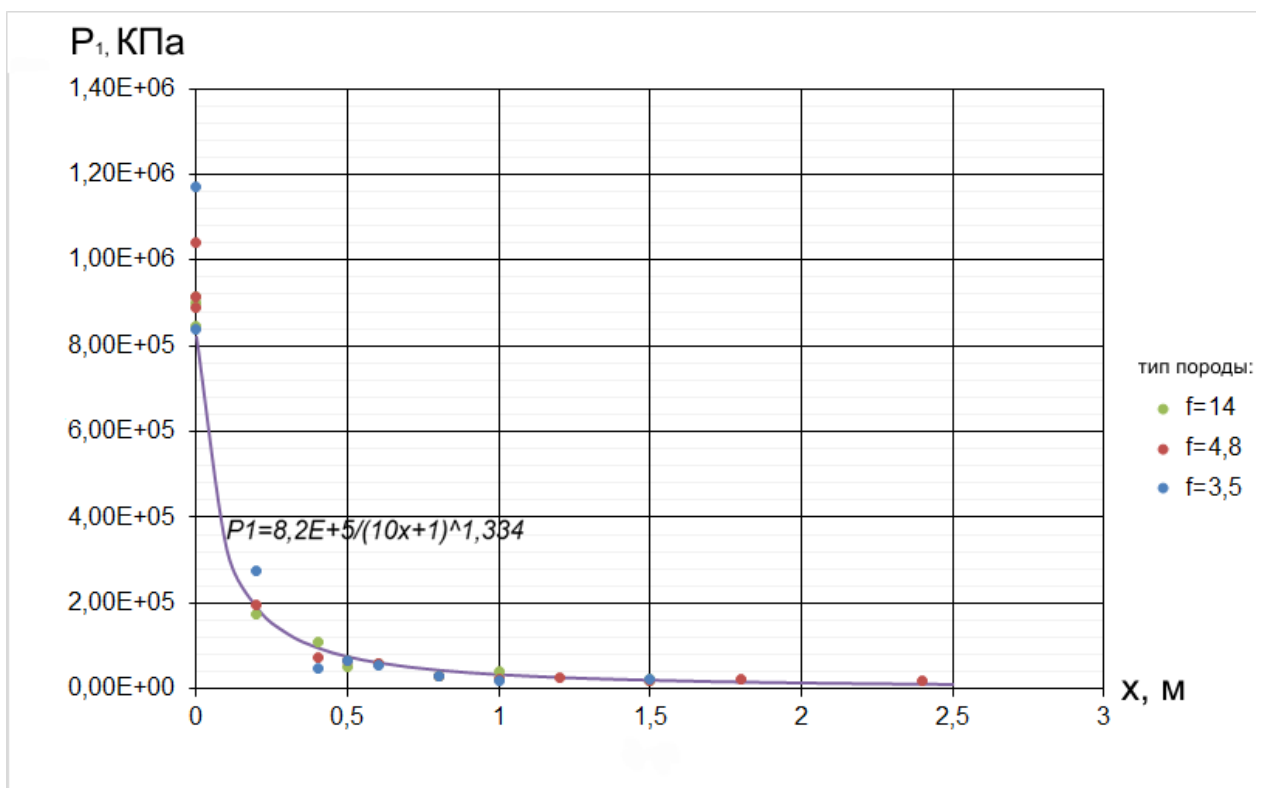


Рис. 3.19 – Сопоставление аппроксимирующей функции затухания УВ в области ВП с данными моделирования газодинамических процессов в области ВП, $x=0$ соответствует границе ВП-ВВ

Таким образом, в результате распространения УВ в ВП происходит степенное затухание давления, при этом на дно скважины давление УВ достигает значения:

$$P_1(L_{ВП}) \approx \frac{P_{01}}{(10L_{ВП}+1)^{4/3}}, \quad (3.2)$$

Усредненное давление P_1 по всей длине ВП определяется посредством интегрирования выражения (3.2):

$$\langle P_1 \rangle \approx \frac{3P_{01}}{10L_{ВП}} \left(1 - \frac{1}{(10L_{ВП}+1)^{1/3}} \right). \quad (3.3)$$

На основе сбора данных о распределении нагрузки вдоль ВП для пород с крепостью $f=3,5, 4,8$ и 14 выведена аппроксимирующая степенная зависимость второго максимума:

$$P_2 \approx \frac{P_{02}}{\sqrt{(10(L_{ВП}-x)+2)}}, \quad (3.4)$$

где $P_{02} = \exp\left(\frac{14,2}{L_{ВП}^{0,032}}\right)$, $x = (0, L_{ВП})$ - расстояние от исходной границы ВВ-ВП до дна скважины в случае применения в качестве ВВ игданита. Данный параметр характеризует давление формирующееся в результате сжатия ВП и многократного отражения УВ внутри ВП:

$$P_{02} = \sqrt{2}P_2(L_{ВП}). \quad (3.5)$$

Усредненное давление P_2 по всей длине ВП определяется посредством интегрирования, следующим выражением:

$$\langle P_2 \rangle \approx \frac{P_{02}}{5L_{ВП}} \left(\sqrt{(10L_{ВП}+2)} - \sqrt{2} \right), \quad (3.6)$$

В результате сопоставлений найденных закономерностей определена связь между давлением пришедшим на дно скважины $P_1(L_{ВП})$ и давлением, формирующимся на дне скважины в результате сжатия ВП $P_2(L_{ВП})$. Данная зависимость была определена в следующем виде:

$$P_2(L_{ВП}) = \sqrt{2}P_{02} = 33,13 * \frac{\alpha P_{ВВ}}{(10L_{ВП}+1)^{4/3}} + 10,31. \quad (3.7)$$

Таким образом, давление формирующееся на дне скважины зависит от свойств ВВ и геометрических размеров ВП. При этом в результате сжатия ВП и многократного отражения от границ раздела сред, давление на дне скважины возрастает на порядок возрастает относительно первого пришедшего импульса. В этом и состоит один из эффектов применения ВП в скважинных зарядах. Другой существенный эффект ВП обусловлен длительностью воздействия нагрузки на стенки скважин. Как показывает анализ данных для пород с крепостью $f=3,5, 4,8$ и 14 при моделировании длины ВП $=1\text{м}, 2\text{м}$ и 3м , длительность между импульсами P_1 и P_2 определяется соотношением:

$$\Delta t_{12} \approx 1,6(L_{ВП} - x), \text{мс.} \quad (3.8)$$

Длительность воздействия зависит от места регистрации давления, при этом чем больше длина ВП тем длительнее воздействие нагрузки на стенки скважины.

Усредненный временной промежуток Δt_{12} всей длине ВП определяется следующим выражением:

$$\langle \Delta t_{12} \rangle \approx 0,8L_{ВП}, \text{мс.} \quad (3.9)$$

Полученные закономерности применялись при моделировании трехмерных задач воздействия конструкции скважины с ВП на неоднородный массив горных пород.

3.3.3. Обсуждение результатов численного моделирования формирования зоны дробления при взрыве скважинных зарядов

Результаты моделирования представлены на рис. 3.20 и позволяют проследить последовательность формирования зоны дробления. Как показывают расчеты, зона дробления формируется уже на 12-15 мс. При смещенном заряде наблюдается избыточное переизмельчение мягких прослоек, особенно в верхнем слое, состоящим из менее прочной породы.

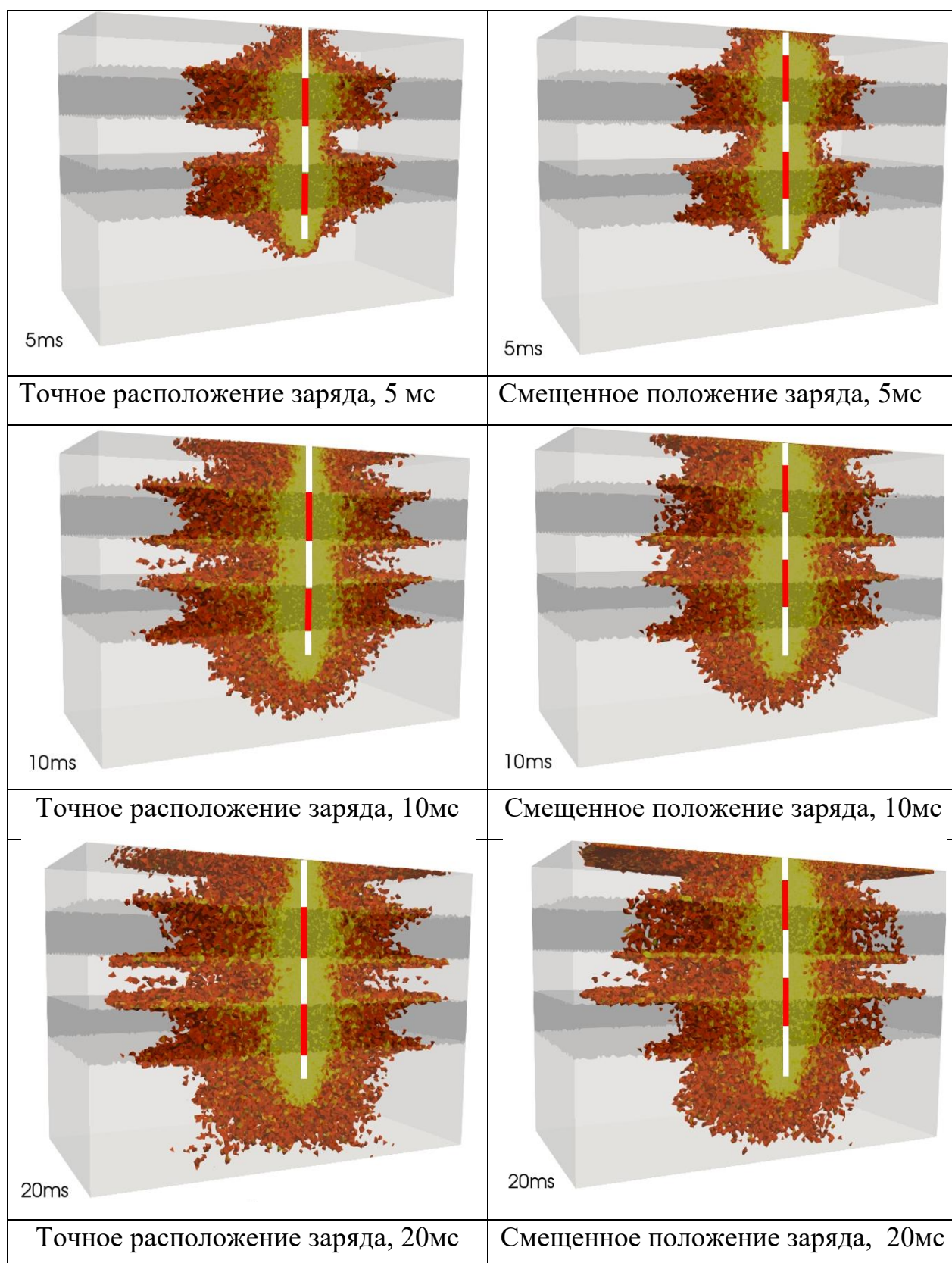


Рис. 3.20 – Процесс формирования зон разрушения при точном позиционировании заряда и смещенном положении заряда прочных (темные области) и мягких (светлые области) прослоек массива

Точное положение обеспечивает более равномерное распределение энергии между мягкими и твердыми прослойками. Как показывают расчеты с детализированной сеткой за 15-16 мс формируется основная зона дробления, при этом

- при точном расположении заряда получено дробление 86 – 95% объема модели,
- при неточном расположении заряда, разрушенный объем составил 80 – 85% объема модели.

Таким образом, точное позиционирование заряда обеспечивает улучшение проработки массива, равномерное дробление всего массива и увеличение зоны дробления на 6-10%. Посредством численного моделирования представлено, что учет особенностей залегания менее прочных пород позволяет добиться эффекта от применения ВП в конструкции скважинного заряда. Точное позиционирование ВП в скважине относительно залегания менее прочных пород обеспечивает повышение равномерного дробления и повышения зоны разрушения.

Результаты оценки формирования зоны дробления в неоднородном массиве с учетом взаимодействия взрывных рассмотрены на рис. 3.21. Как показывают результаты, при расположении ВП напротив мягких прослоек, энергия взрывной волны оказывается достаточной для обеспечения равномерного дробления пород и необходимой проработки подошвы. Применение сплошного заряда для рассматриваемого массива приводит к избыточному переизмельчению, а следовательно и к снижению эффективности отработки.

Из представленных результатов численного моделирования следует, что учет особенностей залегания пород в неоднородном массиве позволяет добиться более равномерного дробления обрабатываемого блока,

эффективности отработки массива и при этом возможно добиться даже некоторой экономии ВВ.

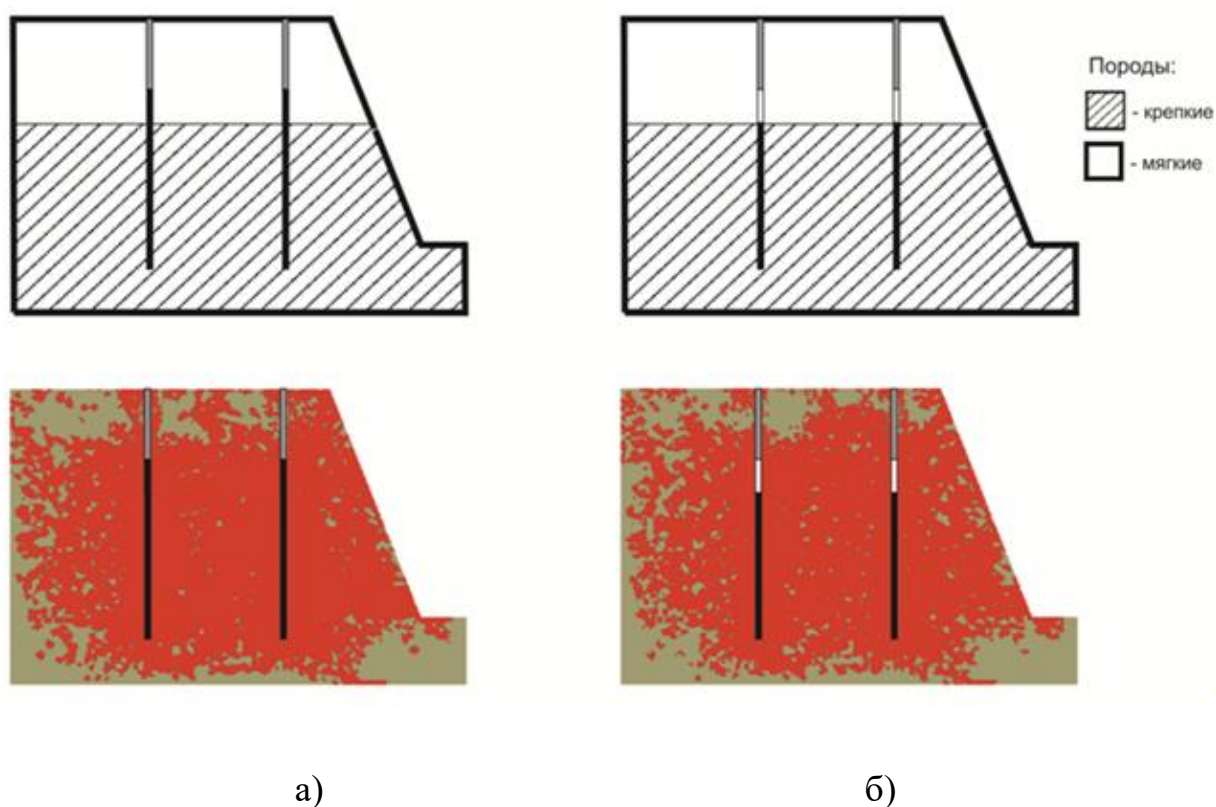


Рис. 3.21 – Постановка задачи и результаты моделирования формирования зон дробления (красный цвет) в неоднородном массиве для сплошного заряда и конструкции заряда с применением ВП

В целях обобщения полученных результатов моделирования, был рассмотрен массив с разрушенной областью в верхнем участке и произведен анализ характера зоны разрушения в зависимости от положения ВП в конструкции заряда. Коэффициент крепости по Протодяконову $f=6$ для преобладающего типа пород, для верхнего разрушенного участка массива коэффициент крепости по Протодяконову $f=4$. В качестве ВВ рассмотрен игданит. В расчете была задана скважина со следующими характеристиками: глубина скважины - 10 м, диаметр - 250 мм, перебур - 1м, ЛНС - 5м, забойка -

4м. Моделировался процесс протекающий в течении 15 мс. Это время является достаточным для передачи основной энергии взрыва в горный массив и установления основной зоны разрушения (табл. 3.6).

Таблица 3.6 - Параметры материалов для проведения оценки параметров конструкции заряда на формирование зоны разрушения и сейсмического воздействия

Игданит	Воздух (идеальный газ)	Горный массив, $f=6$
Плотность - $0,93 \text{ г/см}^3$ Скорость детонации - 4160 м/с Показатель политропы - $1,56$ Давление на фронте детонационной волны - $5,150 \cdot 10^6 \text{ КПа}$ Теплота взрыва - $2,484 \cdot 10^6 \text{ КДж/м}^3$	Плотность - $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ Показатель адиабаты - $1,4$ Внутренняя энергия - $2,068 \cdot 10^5 \text{ КДж/кг}$	Плотность - $2,75 \text{ г/см}^3$ Модуль Юнга - $9,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ Модуль сдвига - $1,74 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ Предел прочности на сжатие - 60 МПа Предел прочности на растяжение - $4,4 \text{ МПа}$

Вначале было рассчитано воздействие сплошного заряда на горную породу, а затем проведено моделирование взрывного воздействия различных конструкций заряда с ВП длиной 1 м. Таким образом, определялся вклад ВП на характер трещинообразования в ближней зоне от заряда. В расчетах рассматривались две группы зарядов. Первая группа - заряды, конструкция которых не обеспечивает экономию ВВ. Вторая группа - заряды, конструкция которых, в том числе, обеспечивает экономию ВВ на 16 вес.%. Для каждой группы проведено моделирование следующих конструкций зарядов:

- заряд с воздушным промежутком на дне скважины,

- заряд в котором воздушный промежуток расположен между забойкой и ВВ,
- рассредоточенный заряд с воздушным промежутком.

Первая группа зарядов характеризуется установлением ВП за счет увеличения перебура, либо уменьшения забойки. Масса ВВ при этом соответствовала массе ВВ сплошного заряда. ВП для конструкций второй группы устанавливается за счет уменьшения ВВ, что обеспечивает экономию на 16 вес.%.

Для оценки воздействия заряда на горный массив сравнивались следующие характеристики: степень проработки подошвы, скорость вылета забойки и сейсмическое воздействие на горный массив.

Эффект оценивался относительно количественных характеристик дробления сплошным зарядом (рис. 3.22).

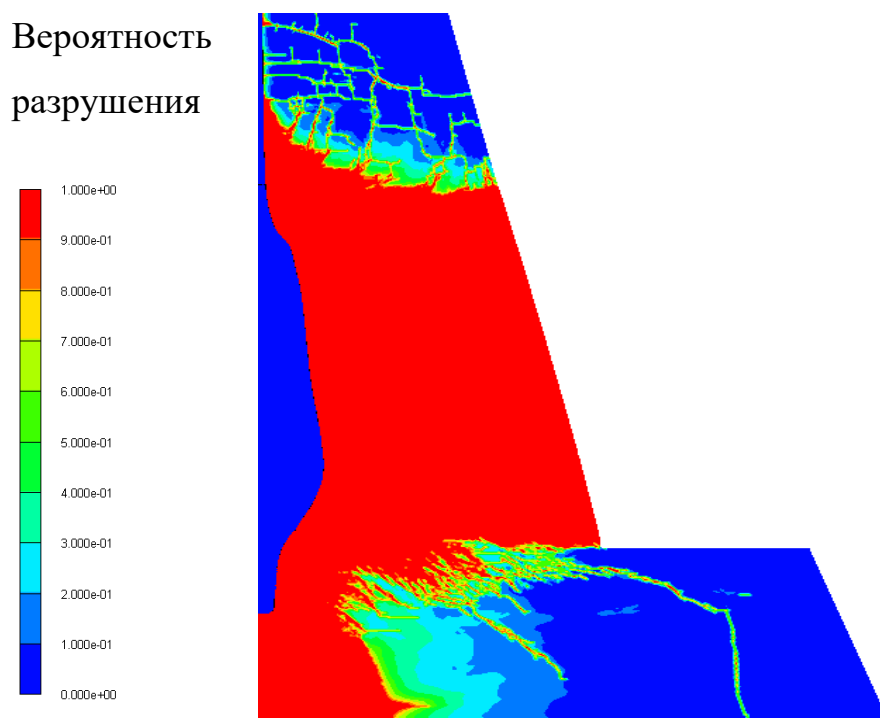


Рис. 3.22—Формирование зоны разрушения при применении сплошного заряда для породы с коэффициентом крепости по шкале проф. Протодяконова 6: проработка подошвы: 90-96%, скорость вылета забойки: 40-42 м/с, сейсмическое воздействие: 0,7-0,74 м/с

В качестве количественной характеристики проработки подошвы было принято среднее значение вероятности разрушения породы по подошве блока, а сейсмическое действие определялось средневзвешенной скоростью колебаний. Под средневзвешенной скоростью колебаний понималась средняя скорость колебаний, распространяющихся в область ниже нижней площадки уступа.

Анализ сопоставления результатов моделирования показал, что первая группа зарядов характеризуется избыточностью воздействия на забойку и горный массив, что сказывается на увеличении скорости вылета забойки и усилении сейсмических колебаний (рис.3.23). При этом возможно ухудшение проработки подошвы. Наибольший эффект влияния ВП проявляется для второй группы конструкции зарядов. Из этой серии выделяются конструкции заряда с ВП на дне скважины и ВП между забойкой и ВВ. Серия численных экспериментов показала, что наличие ВП на дне скважины позволяет добиться значительного снижения сейсмического воздействия. Максимальная интенсивность сейсмической волны конструкции заряда второй группы может быть снижена от 12%-30% в зависимости от влияния свободной поверхности. Применение ВП на дне скважины снижает сейсмическую интенсивность до 40%-50% в зависимости от влияния свободной поверхности. Данный эффект обусловлен снижением общей массы ВВ до 16%, что отрицательно сказывается на снижении проработки подошвы до 30%. Если сохранить массу ВВ и установить дополнительно ВП, как в случае первой группы зарядов, то можно добиться улучшения проработки подошвы, при этом усиливается сейсмическое действие на 4%, что может быть объяснено тем, что ВП работает как дополнительный источник взрывной нагрузки на горный массив.

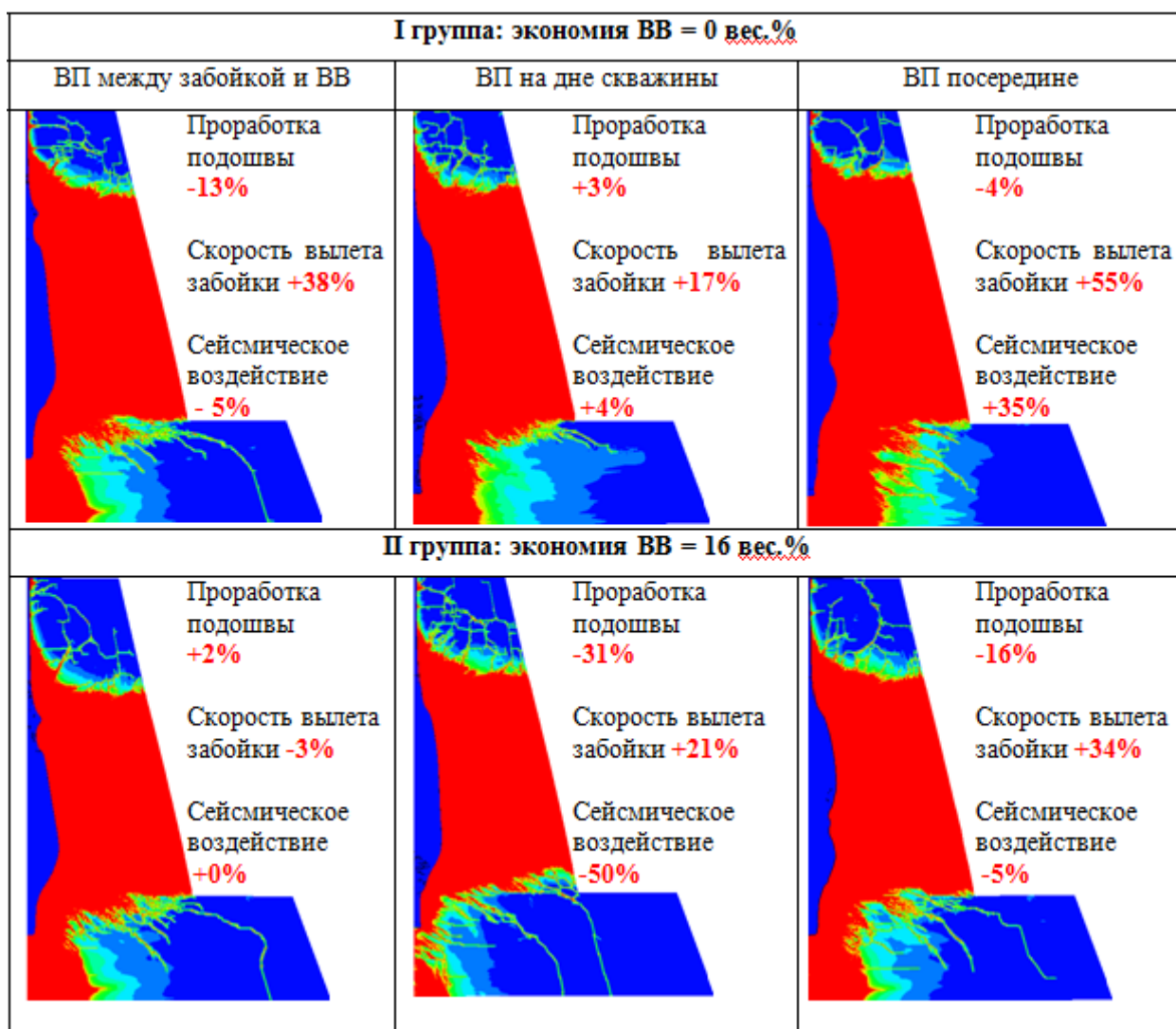


Рис. 3.23 - Расчетная область разрушения для различных конструкций заряда для средней крепости пород

Примечательна конструкция заряда с ВП между забойкой и ВВ. Данная конструкция характеризуется уменьшением скорости вылета забойки на 3% и увеличением проработки подошвы на 2%. Качество взрыва улучшается за счет эффекта запирания ПД и повышения степени проработки подошвы. Таким образом, численным моделированием обосновано, что конструкция заряда с ВП в верхней части заряда и положением патрона-боевика в нижней части заряда приводит к улучшению дробления пород.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Основные теоретически описанные механизмы, подтвержденные экспериментально, удалось детально воспроизвести методом численного моделирования. По результатам численного моделирования выделены основные этапы действия ВП на стенки скважинного заряда: 1) сжатие воздуха продуктами взрыва, 2) многократное отражение преломленной волны от границ в области сжимаемого воздушного промежутка, 3) формирование вторичной ударной волны, 4) перемешивание продуктов детонации и воздушного промежутка, 5) интерференция отраженных волн и формирование направленной волны сжатия, действующей на дно скважины.
2. Газодинамические процессы типа неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и неустойчивость Рэлея-Тейлора в сжатом воздушном слое могут являться причиной формирования в породе начальной сети трещин. Как показывают результаты численного моделирования, пиковые значения давления действительно значительно снижаются в области воздушного промежутка за счет взаимодействия детонационных волн с воздухом, а время действия увеличивается. В результате многократного отражения преломленной УВ от подвижных границ породы, воздуха и контактной поверхности, в тонком слое сжатого воздуха возникает источник начальной сети трещин в горной массе;
3. Точное позиционирование заряда и ВП относительно положения крепких и мягких пород обеспечивает улучшение проработки массива, равномерное дробление всего массива и увеличение зоны дробления на 6-10%;
4. Применение конструкции заряда с ВП между забойкой и ВВ позволяет уменьшить скорость вылета забойки на 3% и увеличить проработку подошвы на 2%. Качество взрыва улучшается за счет эффекта запираания ПД и повышения степени проработки подошвы.

ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗАРЯДА С ВОЗДУШНЫМИ ПРОМЕЖУТКАМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУМТОР

Месторождение Кумтор является объектом, входящим в число крупнейших золоторудных месторождений мира. Месторождение Кумтор приурочено к одноименному разлому, который прослежен на поверхности вдоль северо-западного склона хребта Акшийрак. Наибольшая зона концентрации золотого оруднения проявлена на 10-ти километровом отрезке от ледника Сарытор до ледника Петрова, которая определяет месторождение Кумтор [22, 36].

Анализ практики эксплуатации месторождения показывает, что использование рациональных методов в процессе добычных работ на действующем предприятии (оптимальные методы взрывания, экскавации, формирования рудопотоков, усреднение качества руд) и эффективное выполнение главной задачи первой стадии усреднения оказывается недостаточным для стабильности качества взрыва и обеспечения сейсмической безопасности. Поэтому задача оптимизации БВР в условиях карьера Кумтор представляется одной из приоритетных.

4.1. Особенности распределения удельной энергоемкости бурения в условиях месторождения

В результате соответствующей обработки полученных данных, полученных из системы КОБУС удалось определить детализированное пространственное распределение удельной энергоемкости бурения для карьера, характеризующей прочностные характеристики пород, распределение крупных трещин и др.

На рис. 4.1 представлены примеры сечений с отображением удельной энергоемкости бурения на руднике «Кумтор». На сечениях представлены пространственные области от 10 и более уступов. По данным картирования имеется возможность установить характер прочностной картины массива, что является полезным для последующей подготовки проекта на взрыв. Например, достаточно отчетливо выделяются распределение особо крепких участков и менее прочных пород по глубине.

Пространственное распределение удельной энергоемкости бурения на участке массива является статистической информацией, получаемой на основе длительной эксплуатации системы КОБУС в процессе обурирования массива на разных горизонтах. Такая информация может быть полезна в том числе задачах прогнозирования залегания особо прочных пород на нижележащих горизонтах и таким образом, подготовить проект БВР так, чтобы избежать появления негабаритов.

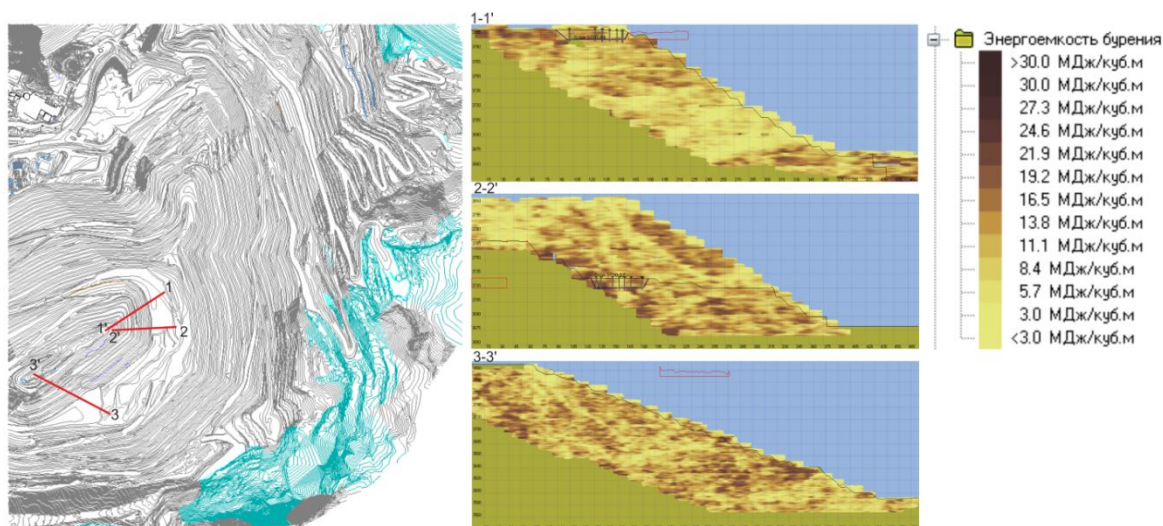


Рис. 4.1– Удельная энергоемкость бурения для различных вертикальных сечений месторождения Кумтор

Гистограммы распределения удельной энергоемкости бурения позволяют получить представление о прочностных особенностях и неоднородности взрываемого массива на участках рудника Кумтор (рис. 4.2). Распределения удельной энергоемкости бурения близко к нормальной кривой распределения Гаусса. Выделяется наиболее часто встречаемые породы с удельной энергоемкостью бурения 18-21. При этом большой вклад в распределение вносят породы с меньшими значениями удельной энергоемкости бурения, это могут быть разрушенные породы от вышележащих горизонтов, что подтверждается анализом данных распределения удельной энергоемкости бурения на вертикальных сечениях.

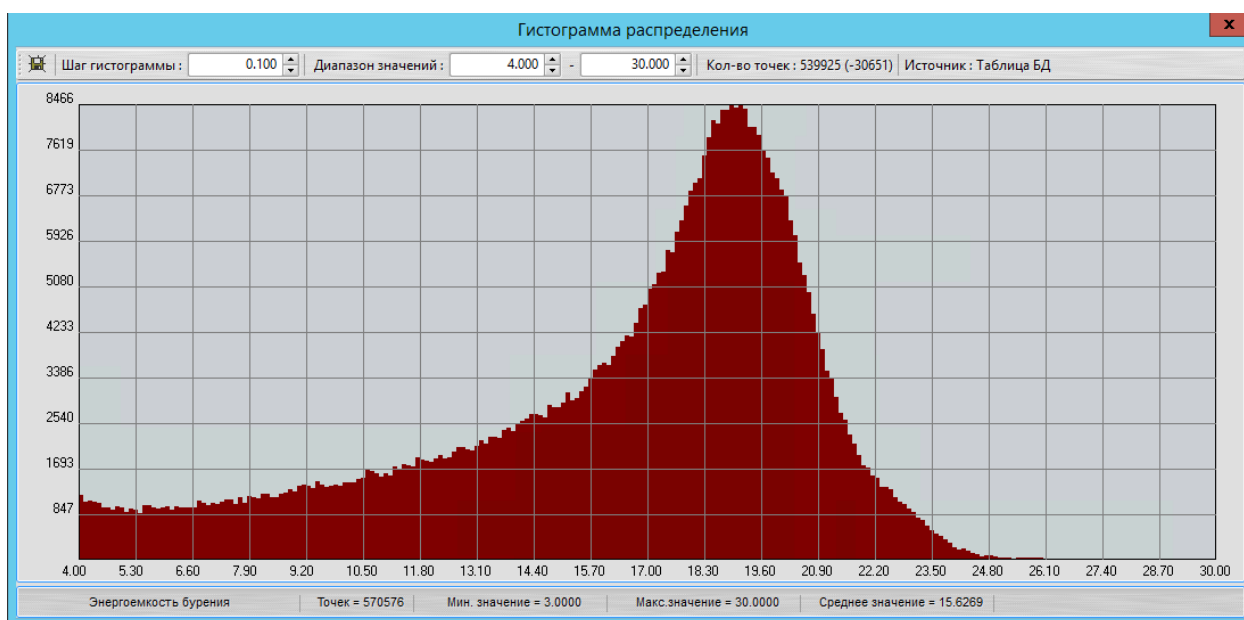


Рис. 4.2 –Гистограмма распределение удельной энергоемкости бурения с выраженной преобладающей породой от 18-20, что предположительно представляет собой массив пород $f=10$ филиты светлые

Как показывает предварительный анализ, горный массив на руднике «Кумтор» имеет неоднородный характер, преобладающий тип пород - филиты светлые. Удельная энергоемкость бурения которого варьируется в диапазоне от 3 до 21, коэффициент крепости по шкале проф. Протоdjяконова от 3,8 до 12. Как показывает сопоставление с данными удельной энергоемкости бурения для

преобладающей породы, значение удельной энергоемкости бурения составляет значения 20. Данные по удельной энергоемкости бурения позволяют производить расчет средних значений как по блоку, так и вдоль скважины. Распределение параметра в плане и на вертикальных сечениях характеризует неоднородность массива и позволяет выделить более крепкие и менее прочные участки массива.

Распределение удельной энергоемкости бурения на вертикальных сечениях позволило выделить верхний слой - толщиной около 3 - 3,5 метров, представляющий собой участок со значением удельной энергоемкости бурения 10-12 и нижний участок блока, представленный крепкими породами со значением удельной энергоемкости бурения 18-20 (рис. 4.3). Верхний ослабленный слой сформирован в результате интенсивного воздействия горных работ от вышележащего горизонта на обуренный блок.

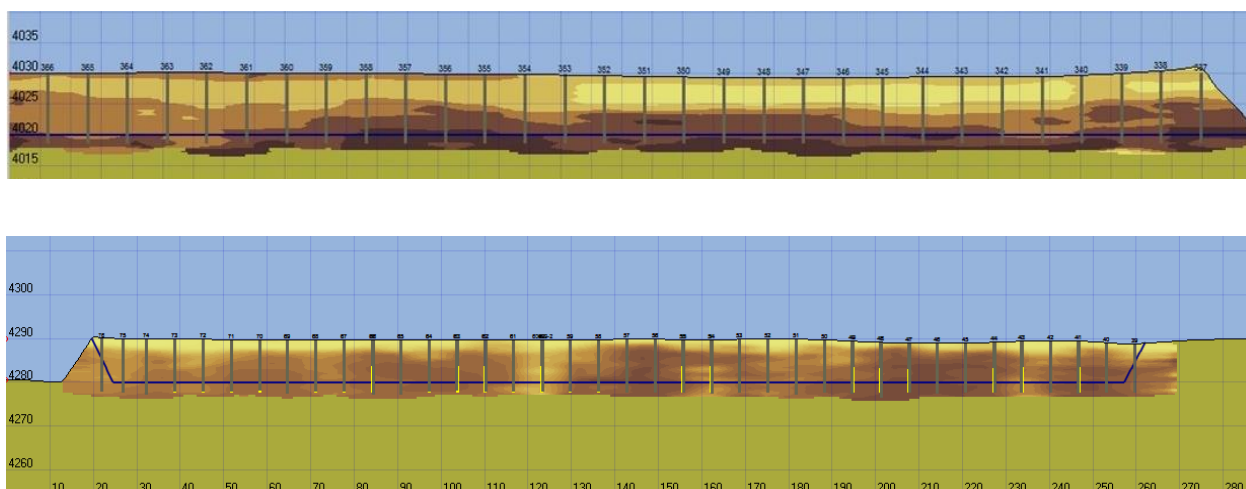


Рис. 4.3 – Пример визуализации удельной энергоемкости бурения в сечении в условиях карьера Кумтор

Таким образом, информация об удельной энергоемкости бурения позволила утверждать, что массив на месторождении Кумтор неоднородный, менее прочные участки и особо крепкие породы удастся выделить как в плане, так и на вертикальных сечениях.

4.2. Применение данных удельной энергоемкости бурения в условиях месторождения для определения физико-механических свойств пород в массиве

Для моделирования разрушения пород при взрыве скважины с ВП в качестве преобладающих типов пород взяты филлиты светлые. Информация о прочностных данных пород были получены от геологической службы предприятия. Далее подбирались такие значения предела прочности на растяжения и трещиноватости для разрушенной прослойки так, чтобы соотношении энергии дробления $E_{1др}$ соответствовало соотношению удельной энергоемкости бурения $E_{1б}$.

$$E_{1др} / E_{2др} = E_{1б} / E_{2б} \quad (4.1)$$

В результате сопоставления данных об удельной энергоемкости бурения для нижнего, не разрушенного участка и верхней разрушенной прослойки получены физико-механические свойства для двух участков блока получены следующие свойства пород:

- для разрушенного участка (верхний участок): коэффициент прочности по шкале проф. Протодяконова составил значение 5, а предел прочности на сжатие 50 МПа, III категория трещиноватости;
- для преобладающего типа породы (нижний участок): коэффициент прочности по шкале проф. Протодяконова составил значение 10, а предел прочности на сжатие 100 МПа, предел прочности на растяжение 16 МПа, IV категория трещиноватости.

Исходя из характеристик взрываемого массива, а также технологии ведения БВР, породы, подлежащие взрыванию, по условиям сейсмического воздействия взрыва на борт карьера классифицированы следующим образом:

- скальные породы, характеризующиеся значительной естественной трещиноватостью, крепостью по шкале проф. М. М. Протодяконова $f = 4-5$, скоростью распространения продольных волн $C_p = 3500$ м/с и допустимой скоростью колебаний $U_{\text{доп}} = 28,4$ см/с;
- скальные породы относительно монолитные с отдельными трещинами и пустотами, крепостью по шкале проф. М. М. Протодяконова $f = 10-11$, со скоростью распространения продольных волн C_p до 4000 м/с и допустимой скоростью колебаний $U_{\text{доп}} = 36,7$ см/с;
- мёрзлые породы отвалов и морена с включениями льда и наличием пустот, отличающиеся высокой неоднородностью и трещиноватостью, крепостью по шкале проф. М.М.Протодяконова $f = 1,5-3$, скоростью распространения продольных волн $C_p = 2000$ м/с и допустимой скоростью колебаний $U_{\text{доп}} = 20,3$ см/с.

Данные о скорости распространения сейсмической волны и плотности пород позволили рассчитать модуль Юнга, что составило 61 ГПа.

Для расчета трещиноватости рассмотрен показатель качества породы RQD. Показатель качества породы RQD, % – отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к длине пробуренного интервала в скважине. Данный параметр варьируется от 0 до 100. Принята линейная зависимость данного показателя RQD в категорию трещиноватости пород, что представлено в табл. 4.1. Наиболее трещиноватыми породами являются породы для которых $RQD < 25\%$, а монолитными являются породы, для которых $RQD > 90\%$.

Таблица 4.1 – Сопоставление параметров пород по свойствам трещиноватости

	RQD, %	Категория пород по трещиноватости
Практически монолитные	90-100	V
Малотрещиноватые	75-90	IV
Среднетрещиноватые	50-75	III
Сильнотрещиноватые	25-50	II
Чрезвычайно трещиноватые	<25.	I

Определена зависимость отношения предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение в зависимости от степени трещиноватости. Данная зависимость выводится из следующих формул определяющих зависимость соотношения предела прочности на сжатие и растяжение σ_t от показателя RQD [54]:

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = 10^{0,012RQD-1,34}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\sigma_{tm}}{\sigma_t} = \frac{0,278RQD+68,6}{0,278RQD+68,6+6(31,4-0,278RQD)}, \quad (4.3)$$

где σ_c - предел прочности на сжатие и σ_t - предел прочности на растяжение для неразрушенной породы, σ_{cm} - предел прочности на сжатие и σ_{tm} - предел прочности на растяжение для разрушенной породы. Соотношения предела прочности на сжатие, растяжение в зависимости от параметра RQD приведено в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Сопоставление данных предела прочности на сжатие/растяжение в зависимости от физико-механических свойств пород

RQD, %	σ_{tm}/σ_t	σ_{cm}/σ_c	σ_{cm}/σ_{tm}
0	0,27	0,46	1,71
20	0,32	0,80	2,45
40	0,40	1,40	3,48
60	0,50	2,40	4,90
80	0,62	4,16	6,70
100	0,82	7,24	8,87

Как видно из рис. 4.4 зависимость соотношения предела прочности на сжатие и растяжение в зависимости от параметра RQD, чем более трещиноватая порода, тем ниже показатель предела прочности на растяжение. Действительно наличие трещин в массиве затрудняет передачу нагрузки при растяжении. Основная полученная и рассчитанная информация о свойствах участков массива для моделируемого участка месторождения представлена в табл. 4.3.

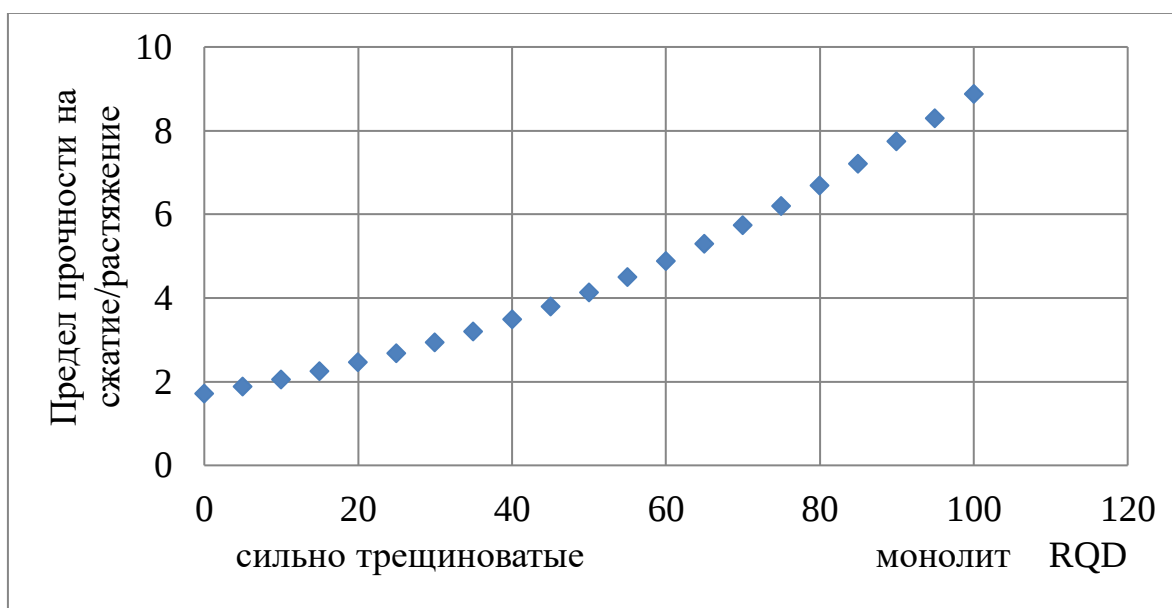


Рис. 4.4 – Зависимость соотношения предела прочности на сжатие и растяжение в зависимости от показателя RQD

Таблица 4.3 – Основные параметры для пород в цифровой модели участка
карьера Кумтор

	Преобладающая порода (филлиты светлые)	Верхний слой разрушенной породы
Плотность, кг/м ³	2850	2850
Коэффициент прочности по шкале проф. Протодыконова	10	5
Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	100	50 (в результате пересчета по RQD)
Удельная энергоемкость бурения по данным прибора Кобус $E_{бур}$	20	12
Энергия дробления, рассчитанная по данным трещиноватости, плотности и прочности $E_{др}$, МДж/м ³	3.97	2.37
Удельная трещиноватость $K_{тр}$, 1/м	1.00	2.00
Категория трещиноватости	IV	III
RQD, %	75	50
$\sigma_{сж}/\sigma_r$ (RQD)	6,2	4,13
Предел прочности на растяжение σ_r , МПа	16	0,12
Скорость распространения продольных волн, м/с	4000	4000
Модуль Юнга, ГПа	61	61
Коэффициент Пуассона	0.3	0.3

Установленные закономерности позволяют, получив сведения об удельной энергоемкости бурения и сопоставляя их с данными геологической разведки, уточнять информацию об основных свойствах пород. Разрушенные участки от взрывных работ на смежных участках удастся выделить при картировании удельной энергоемкости бурения и определить их численные значения. По этим значениям могут быть определены прочностные свойства.

4.3. Оптимизация параметров конструкции заряда по результатам численного моделирования в условиях месторождения

Для определения оптимальной конструкции заряда в условиях карьера «Кумтор» подготовлена трехмерная цифровая модель участка блока с уступом соответствующая реальным параметрам ведения БВР на производстве. Шаг сетки между скважинами принят 6,5м х6м. Применяемая забойка - 4,5-5м., переbur 2,5м. линия сопротивления по подошве - 8,5м. Горный массив представлен верхним разрушенным слоем пород, а нижний слой - преобладающим типом пород с определенными физико-механическими свойствами среды. Основные размеры модели отображены на рис. 4.5.

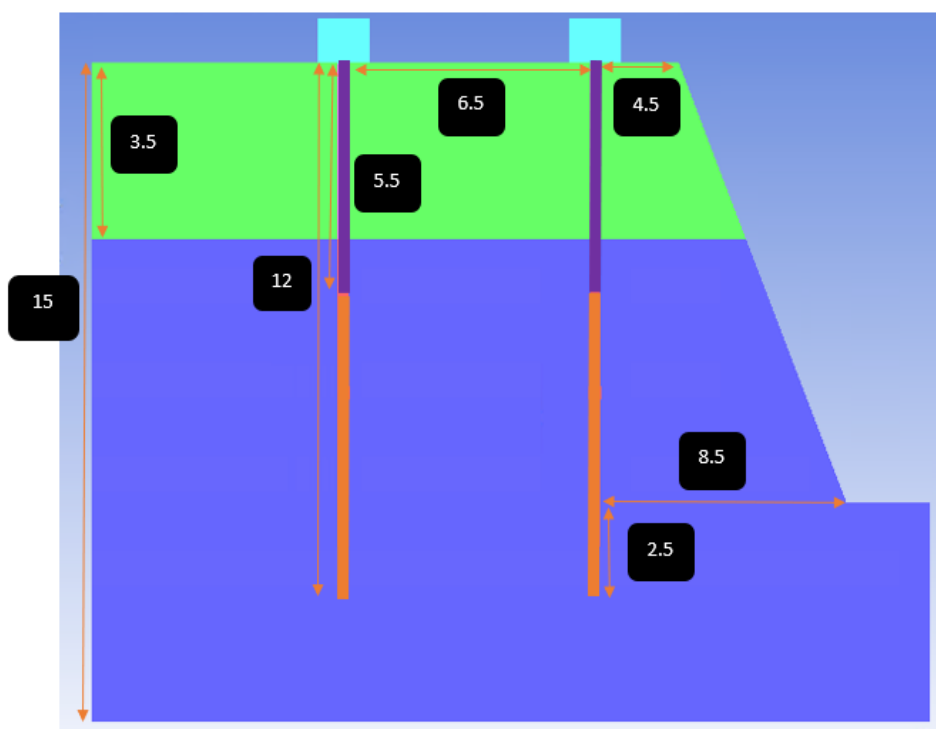


Рис. 4.5 – Основные параметры цифровой модели на примере применения сплошного заряда в условиях неоднородности массива карьера Кумтор

Для проведения вычислительных экспериментов для оценки ического воздействия с применением ВП в конструкции заряда подготовлена цифровая модель блока размером 1000 х 800 х 600 метров со скважинами – 40 шт. глубиной 10 м, с учетом физико-механических свойств пород (рис. 4.5).

Конечно-элементная модель исследуемого участка состоит из 80 тыс. узлов и 5 млн. тетраэдральных элементов. Модель разбита на геологические домены, каждому из которых присвоен определенный тип породы и соответствующие физико-механические свойства среды. В качестве ВВ для необводненных скважин задан игданит в соответствии с технологией, принятой на производстве в условиях месторождения. Для проведения серии численных экспериментов варьировались размеры ВП от 10% до 70% от длины скважины. Основные параметры ВП и ВВ представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Основные параметры материалов, применяемого в конструкции скважинного заряда для условий карьера Кумтор

Игданит	Воздух (идеальный газ)
Плотность - 0,93 г/см ³	Плотность - $1,2 \cdot 10^{-3}$ г/см ³
Скорость детонации - 4160 м/с	Показатель адиабаты - 1,4
Показатель политропы - 1,56	Внутренняя энергия -
Давление на фронте детонационной волны - $5,150 \cdot 10^6$ КПа	$2,068 \cdot 10^5$ кДж/кг
Теплота взрыва - $2,484 \cdot 10^6$ кДж/м ³	

Рассматривалась конструкция заряда с положением ВП в верхней части скважины. Обоснование данной конструкции было выполнено при сравнение эффекта зон дробления при различных конструкциях заряда. Основным подбираемым параметром рассматривался размер ВП, при котором обеспечивается снижение сейсмического воздействия, уменьшения скорости вылета забойки и оптимальная проработка массива.

В численных экспериментах варьировалась доля ВП относительно ВВ от 10% до 70%. Для сравнения проведены расчеты для сплошного заряда. Оценка зоны дробления производилась посредством вычисления количества разрушенных бинарных (тетраэдральных) элементов (табл. 4.5). Принято, что

тетраэдральный элемент разрушен, если разрушено от 50% и более ребер элемента. Сопоставление оценки доли дробления по бинарным и тетраэдральным элементам показало, что разница между расчетами составила 2%, что не существенно при данной постановке задачи. Также зависимость зоны дробления от доли ВП по обоим методикам одинакова.

Результаты моделирования показали, что для сплошного заряда доля разрушенных элементов составляет от 23,4-24,5%. В результате применения ВП, размер которых не превосходит 15-20% от длины ВВ, доля разрушенных элементов может быть сохранена на том же уровне, что и при применении сплошной конструкции заряда, а может даже и быть повышена (рис. 4.6).

Таблица 4.5 – Результаты численного моделирования по определению зоны дробления методом численного моделирования

Длина ВВ (м)	Длина забойки (м)	Соотношение ВП/ВВ	Доля разрушенных элементов, %	
			Бинарные элементы	Тетраэдры
4,5	4,5	0,67	18,41	19,81
5	4,5	0,5	19,48	21,2
5,5	4,5	0,36	20,3	22,28
5,75	4,5	0,3	20,58	22,63
6	4,5	0,25	20,88	23,03
6,25	4,5	0,2	21,53	23,94
6,5	4,5	0,15	21,66	24,06
6,5	5,5	0	21,16	23,37
6,82	4,5	0,10	21,66	24,05
7,5	4,5	0	22,04	24,63

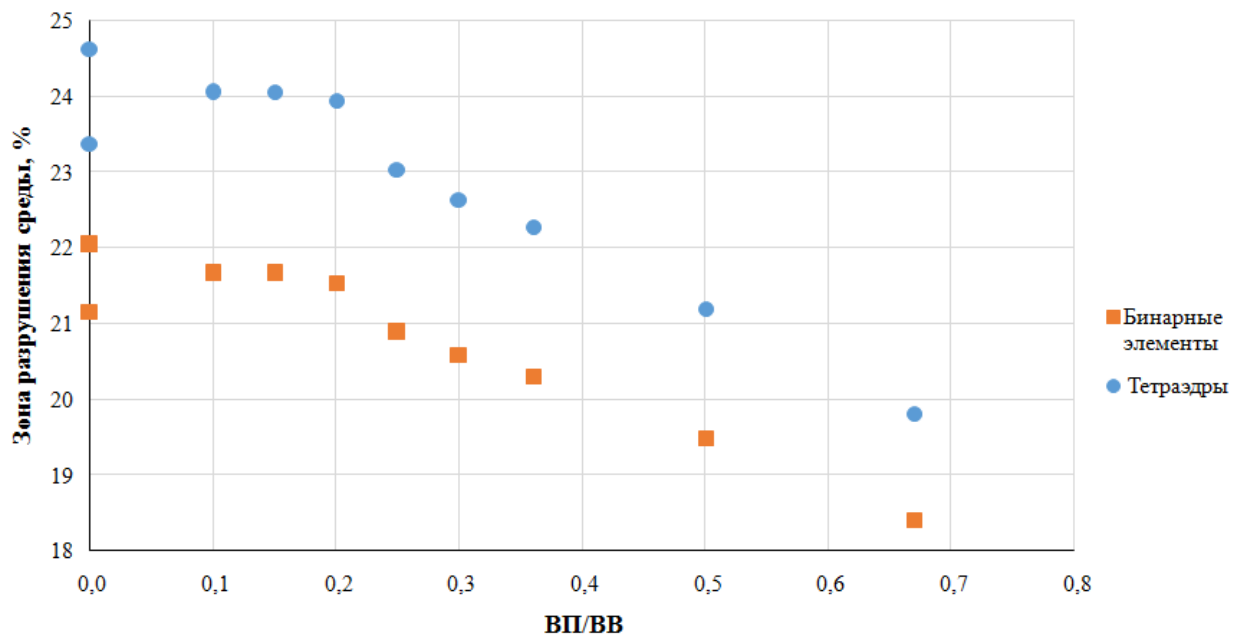


Рис. 4.6 – Зависимость доли разрушенных элементов в зависимости от доли ВП относительно длины ВВ

При применении ВП, доля которого более 20% от длины ВВ наблюдается линейное понижение доли разрушенных элементов, что повышает вероятность ухудшению проработки массива и появлению негабаритов. Такой вывод позволяет рассматривать конструкцию заряда с долей ВП 15-20% как оптимальную конструкцию заряда.

Для оценки сейсмического воздействия при массовом взрыве аналитическим методом применялась формула Садовского:

$$u = 165 * \left(\sqrt[3]{Q/R} \right)^{1,5}, \text{ см/с} \quad (4.4)$$

где u - пиковая скорость смещения грунта, определяемая по известным значениям массы ВВ, взрывающей в одной серии замедления Q и расстоянию от источника взрыва до точки мониторинга R . Как показывают расчеты, с увеличением доли ВП и уменьшением доли ВВ, снижается сейсмическая нагрузка на горный массив. В табл. 4.3 представлены результаты вычислений

сейсмической нагрузки при применении различных конструкций заряда по сравнению со сплошным зарядом. Из расчетных данных следует, что применение оптимальной конструкции заряда позволяет снизить сейсмическое воздействие на 4-6%. Такой эффект особенно важен при ведении БВР вблизи зон деформаций.

Таблица 4.6 –Оценка сейсмического воздействия массовых взрывов при применении различных конструкций скважинных зарядов в условиях карьера Кумтор

Длина ВВ (м)	Длина забойки (м)	Соотношение ВП/ВВ	Соотношение пиковых скоростей колебания	Снижение сейсмической нагрузки, %
4,5	4,5	0,67	0,84	15
5	4,5	0,5	0,87	12
5,5	4,5	0,36	0,9	9
5,75	4,5	0,3	0,92	8
6	4,5	0,25	0,92	7
6,25	4,5	0,2	0,94	6
6,5	4,5	0,15	0,95	4
6,82	4,5	0,10	0,97	3
7,5	4,5	0	1	0

В среде ANSYS AUTODYN произведена также оценка средней скорости вылета забойки при различных конструкциях заряда (табл. 4.7). Как известно, уменьшение скорости вылета забойки обеспечивает увеличение эффекта действия продуктов детонации на массив, уменьшает загрязнение окружающей среды. Как показывают результаты моделирования, скорость вылета забойки выше при применении доли ВП меньше 20%-25% относительно длины ВВ.

Таблица 4.7 –Средняя скорость вылета забойки при различных конструкциях
заряда в условиях карьера Кумтор

Длина ВВ (м)	Длина забойки (м)	Соотношение ВП/ВВ	Средняя скорость вылета забойки, м/с
4,5	4,5	0,67	239
5	4,5	0,5	252
5,5	4,5	0,36	285
5,75	4,5	0,3	309
6	4,5	0,25	330
6,25	4,5	0,2	266
6,5	4,5	0,15	377
6,82	4,5	0,10	444
7,5	4,5	0	798

Таким образом, путем варьирования параметрами воздушного промежутка можно управлять распределением энергии взрыва скважинных зарядов. Результаты численных методов показали, что в условиях предприятия Кумтор, для средней крепости пород наиболее оптимальный размер ВП составляет 15-20% от длины ВВ. Как показывает моделирование, такая конструкция заряда определяется следующими причинами: при снижении доли ВП относительно оптимального параметра повышается сейсмическая нагрузка на массив при взрывных работах, увеличивается скорость вылета забойки и снижается экономия ВВ, а при повышении доли ВП ухудшается проработка массива.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Распределение удельной энергоемкости бурения в условиях карьера Кумтор позволило выделить верхний слой мощностью 3 - 3,5 метров, ослабленный взрывными работами на вышележащих горизонтах, нижний

участок блока, представлен крепкими породами со значением удельной энергоемкости бурения;

2. В условиях карьера в качестве рациональной конструкции может быть предложено установление воздушного промежутка между забойкой и взрывчатым веществом. Такая конструкция предлагается на основе анализа данных по удельной энергоемкости бурения: и результатов численного моделирования формирования зоны дробления;
3. Результаты моделирования показали, что размер ВП составляющий 15-20% от длины ВВ является оптимальной конструкцией заряда. При данной конструкции объем разрушенной горной массы сохраняется по сравнению со сплошной конструкцией заряда, при этом снижается сейсмическое воздействие на 4-8%. При применении ВП, доля которого более 20% от длины ВВ наблюдается линейное понижение зоны разрушения, что повышает вероятность ухудшению проработки массива и появлению негабаритов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЦИОНАЛИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЗАРЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА ДЛЯ УСЛОВИЙ КАРЬЕРА КУМТОР

В условиях карьера Кумтор в качестве рациональной конструкции может быть предложено установление воздушного промежутка между забойкой и взрывчатым веществом. Такая конструкция предлагается на основе анализа данных по удельной энергоемкости бурения: в результате буровзрывных работ верхний слой массива ослаблен на 2-3м.

По результатам численного моделирования установлено, что при взрыве зарядов с воздушными промежутками качественно изменяется механизм передачи энергии взрыва горной породе. Это изменение основано на особенностях газодинамических процессов в результате взаимодействия продуктов детонации и воздушного промежутка.

При режиме многократного импульсного взаимодействия при снижении пикового давления увеличивается длительность и доля передаваемой энергии в горный массив. По результатам анализа данных численного моделирования, определена средняя длительность воздействия взрывной нагрузки на стенки скважины $\langle \Delta t_{12} \rangle$. Длительность воздействия линейно зависит от длины воздушного промежутка $L_{ВП}$ и определяется выражением:

$$\langle \Delta t_{12} \rangle \approx 0,8 L_{ВП}, \text{ мс.}$$

Воздушный промежуток, расположенный между забойкой и взрывчатым веществом также служит демпфером, в результате чего снижается скорость вылета забойки, уменьшается потери ВВ, снижается количество выброшенных в атмосферу газов взрыва по сравнению с обычной забойкой.

Как показывают результаты моделирования, наибольшая эффективность применения зарядов рациональной конструкции достигается при оптимальных параметрах взрывных работ. Критерием выбора оптимальных взрывных работ принята скорость вылета забойки, сейсмическое воздействие при взрывных работах и формирование зоны дробления.

Результаты моделирования показали, что для сплошного заряда доля разрушенных элементов составляет от 23,4-24,5%. В результате применения ВП, размер которых не превосходит 15-20% от длины ВВ, объем разрушенной горной массы сохраняется по сравнению со сплошной конструкцией заряда. При применении ВП, доля которого более 20% от длины ВВ наблюдается линейное понижение зоны разрушения, что повышает вероятность ухудшению проработки массива и появлению негабаритов.

Оценка сейсмического воздействия показывает, что с увеличением доли ВП и уменьшением доли ВВ, снижается сейсмическая нагрузка на горный массив. Применение оптимальной конструкции заряда позволяет снизить сейсмическое воздействие на 4-8%.

В условиях месторождения Кумтор, рекомендуется применять заряды с воздушными промежутками в сухих и слабо обводненных скважинах, когда высота столба воды с ней не превышает 15-20% глубины скважины. При конструкции заряда, где воздушный промежуток установлен между ВВ и забойкой рекомендуется оставлять воздушный промежуток, длина которого определяется по формуле:

$$L_{ВП} = (0,15 - 0,2)L_3,$$

где L_3 - длина заряда, а длину забойки установить равной 4-4,5м. При использовании зарядов с воздушными промежутками снижается удельный расход ВВ на 15-20% при этом обеспечивается удовлетворительное дробление пород.

Состояние горных пород на блоке рекомендуется определять на основе данных удельной энергоемкости бурения и сведений геологической службы. Методы и параметры взрывных работ, ВВ и способов инициирования должны выбираться с учетом крепости пород и данных удельной энергоемкости бурения.

Таким образом, наиболее оптимальный размер ВП для условий предприятия Кумтор составляет 15-20% от длины ВВ. При снижении доли ВП относительно оптимального параметра повышается сейсмическая нагрузка на массив при взрывных работах, увеличивается скорость вылета забойки и снижается экономия ВВ, а при повышении доли ВП ухудшается проработка массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе по данным результатов численного моделирования формирования зоны разрушения уточнены газодинамические процессы в области сжимаемого воздушного промежутка продуктами детонации и определены особенности формирования трещин в ближней зоне разрушаемых пород. В качестве информационной базой для проектирования конструкции заряда с воздушным промежутком обосновано применение параметра удельной энергоемкости технологического бурения.

Основные методические и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработан вычислительный комплекс программ для моделирования взрывного воздействия скважинного заряда с воздушным промежутком с учетом неоднородности массива, физико-механических свойств пород и взрывчатых веществ.
2. Зависимость между удельной энергоемкостью бурения и крепостью пород по шкале проф. Протоdjяконова позволяет получить информацию о неоднородности массива в границах обуреваемого блока, в том числе, уточнять пространственное залегание прочных и мягких прослоек, количественно определять крепость слагающих пород, выделять особо прочные участки массива, требующие специального внимания при подготовки проекта на массовый взрыв;
3. Основные теоретически описанные механизмы, подтвержденные экспериментально, удалось детально воспроизвести методом численного моделирования. По результатам численного моделирования выделены основные этапы действия ВП на стенки скважинного заряда.
4. Определены дополнительные газодинамические процессы типа неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и неустойчивость Рэлея-Тейлора в

сжатом воздушном участвующие в формировании начальной сети трещин в породе.

5. Точное позиционирование заряда и ВП относительно положения крепких и мягких пород обеспечивает улучшение проработки массива, равномерное дробление всего массива и увеличение зоны дробления на 6-10%;
6. Результаты моделирования показали, что размер ВП составляющий 15-20% от длины ВВ является оптимальной конструкцией заряда в условиях карьера Кумтор. При данной конструкции объем разрушенной горной массы сохраняется по сравнению со сплошной конструкцией заряда, при этом снижается сейсмическое воздействие на 4-8%. При применении ВП, доля которого более 20% от длины ВВ наблюдается линейное понижение зоны разрушения, что повышает вероятность ухудшению проработки массива и появлению негабаритов.

Материалы диссертации будут использованы в дальнейшем:

1. При обосновании конструкции заряда с применением воздушного промежутка в условиях карьера Кумтор;
2. При обосновании проектных решений по обеспечению снижения сейсмической нагрузки на горный массив;

Основные результаты автора исследований опубликованы в 18 печатных изданиях и вошли в состав Проектов НИР в качестве госбюджетных по заказу Министерства Образования и Науки Кыргызской Республики. Отдельные результаты диссертации внедрены в учебный процесс КРСУ и в задачах горного производства (акты внедрения прилагаются в диссертационной работе).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдылдаев, Э.К.** Метод конечных элементов при решении прикладных задач [Текст] / Э.К. Абдылдаев. – Алматы: Полиграфия-сервис, 2011. – 111 с.
2. **Андреев, С.Г.** Теория критического диаметра детонации неидеальных взрывчатых веществ / С.Г. Андреев, И.А. Перевалов, М.М. Бойко, В.Ю. Клименко// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Машиностроение». – 2010. – С. 172-181.
3. **Бажанов, Б.Б.** Совершенствование параметров буровзрывных работ на карьерах/ Б.Б. Бажанов, С.С. Мырзахметов, С.А. Пальцев, Т.Н. Абдильдин// Горный журнал Казахстана. – 2012.– №5.– С. 16-20.
4. **Белкина, Т.А.** Геологическое сопровождение отработки Олонь-Шибирского месторождения с использованием возможностей ПТК Blast Maker/ Т.А. Белкина// Передовые технологии на карьерах: сборник докладов. – 2015. – С. 65–67.
5. **Богацкий, В.Ф.** Сейсмическая безопасность при взрывных работах [Текст]/ В.Ф. Богацкий, В.Х. Пергамент. – М.: Недра, 1978. – 128 с.
6. **Богацкий, В.Ф.** Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов [Текст]/ В.Ф. Богацкий, А. Г. Фридман. – М.: Недра, 1982. – 162 с.
7. **Галимьянов, А.А.** Разработка группы угольных пластов с валовым взрывным рыхлением вскрышных пород / А.А. Галимьянов, А.И. Добровольский, Е.Б. Шевкун, А.В. Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015.–S1 (1). – С.424-432.
8. **Григорьев, В.В.** Метод бинарных элементов в задачах динамики разрушения горных пород/ В.В. Григорьев // Добывающая промышленность. –2019. – Т.13. – №1. – С.140–142.
9. **Додис, Я.М.** Разрушение горных пород при бурении и взрывании [Текст]/ Я.М. Додис, В.И. Нифадьев. – Бишкек: КРСУ, 2006. – 374 с.

10. **Долгушев, В.Г.** Система автоматизированного проектирования буровзрывных работ на карьерах «BlastMaker» / В.Г. Долгушев // Горный журнал Казахстана. – 2013. – №11. – С. 28—32.
11. **Долгушев, В.Г.** Система численного моделирования влияния динамических воздействий на горный массив / В.Г. Долгушев, В.А. Коваленко// Передовые технологии на карьерах: Сборник докладов. – Бишкек: КРСУ. – 2010. – С. 59-67.
12. **Долгушев, В.Г.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния борта карьера Кумтор / В.Г. Долгушев, В.А. Коваленко, С.Ф. Усманов// Вестник Российского университета дружбы народов. – 2008. – №3. – С. 49-52.
13. **Друкованый, М.Ф.** К вопросу о влиянии величины забойки на качество дробления горных пород взрывом в карьерах / М.Ф. Друкованый, В.М. Комир, И.А. Семенюк // Сб. Взрывное дело. – 1966. – № 59. – Т.16. – С. 166-177.
14. **Жариков, И.Ф.** Эффективность разрушения горных пород зарядами различных конструкций / И.Ф. Жариков// Взрывное дело. –1986.–№89.– Т.46.–С. 31-42.
15. **Жунусов, К.** Отбойка скальных пород зарядами с воздушной подушкой [Текст]/ К. Жунусов. – Алма-Ата: Наука,1979.– 89 с.
16. **Игнатьев, Н.Н.** Применение бескернового бурения для целей эксплуатационной разведки и оценки зольности угля на Олонь-Шибирском каменноугольном месторождении/ Н.Н. Игнатьев// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. –№ 3. – С.134-141.
17. **Камянский, В.Н.** Моделирование взрыва скважинных зарядов в среде Ansys / В.Н. Камянский // Проблемы недропользования. – 2017. –№1. – С. 119-126.

18. **Киселев, А.О.** Современные способы и средства определения буримости и взрываемости горных пород/ А.О. Киселев// Передовые технологии на карьерах: сборник докладов. – Бишкек, 2006. – 11-15.
19. **Коваленко, В.А.** Автоматизированная подготовка производства на карьерах/ В.А. Коваленко//Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2009. – №11(9). – С. 118–123.
20. **Коваленко, В.А.** Энергетический принцип контроля и оптимизации технологических процессов на карьере/ В.А. Коваленко, И.А. Тангаев// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №10. – С. 293-301.
21. **Коваленко, В.А.** Цифровая технология подготовки производства ПТК BlastMaker в условиях Михайловского ГОКа/ В.А. Коваленко, Э.А. Умрихин, М.А. Райымкулов // Глобус. – 2020. – № 3 (62). – С. 146–151.
22. **Кожогулов, К.Ч.** Особенности условий разработки высокогорного месторождения Кумтор/ К.Ч. Кожогулов, С.Ф. Усманов// Научно-техническое обеспечение горного производства. – Алматы, 2008. –Т. 75. – С.127-132.
23. **Комир, В.М.** Повышение эффективности действия взрыва в твердой среде/ В.М. Комир, В.В. Воробьев, В.Н. Чебенко. –М.: Недра, 1988. – 209 с.
24. **Лабунцов, Д.А.** Механика двухфазных систем [Текст]/ Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 374 с.
25. **Мельников, Н.В.** Использование энергии взрывчатых веществ и кусковатость пород при взрывных работах/ Н.В. Мельников // Горный журнал. – 1940. – № 5-6.– С. 61-64.
26. **Мельников, Н.В.** Энергия взрыва и конструкция заряда [Текст]/ Н.В. Мельников, Л.Н. Марченко. – М.: Недра, 1964. –138 с.
27. **Мосинец, В.Н.** Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах [Текст]/ В. Н. Мосинец – М.: Недра, 1976. – 271 с.

28. **Нифадьев, В.И.** Управление разрушением горных пород на основе регулирования энергетических и детонационных характеристик ВВ [Текст]: автореф. дис. докт. техн. наук: 25.00.22 /В.И. Нифадьев. – М.: 1993. – 39 с.
29. **Нифадьев, В.И.** Информационные технологии при открытой разработке высокогорных карьеров/ В.И. Нифадьев, В.А. Коваленко, С.Ф. Усманов, К.Ч. Кожогулов // Современные проблемы механики сплошных сред. – Бишкек, 2011. – № 13. – С. 154-163.
30. Справочник. Открытые горные работы [Текст] / [Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виноцкий К.Е., Мельников Н.Н. и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.
31. **Сумин, И.П.** Исследование влияния длины забойки на степень дробления горной массы взрывом скважинных зарядов / И.П. Сумин, П.А. Гордеев, В.В. Зольников// Взрывное дело. –1964.–№54.–Т.11.–С. 185-189.
32. **Тажибаев К.Т.** Физика горных пород. Методические указания к курсовому проектированию [Текст] / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М. С. Акматалиева.– Бишкек: Издательство КРСУ.– 2014.–32 с.
33. **Тангаев И.А.** Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых [Текст] / И.А. Тангаев.– М.: Недра.– 1986.–231 с.
34. **Татарчук С. Ю.** Опыт внедрения и эксплуатации ПТК BlastMaker на карьерах/ С. Ю. Татарчук // Горный журнал. –2013. – № 11 . – Т. 103 . – 29–32.
35. **Усманов С.Ф.** Численное моделирование сейсмического воздействия на борт карьера / С.Ф. Усманов, В.А. Коваленко, В.Г. Долгушев //Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. –№11. – 2009. – С.189-193.
36. **Усманов С.Ф.** Особенности условий разработки высокогорного месторождения Кумтор/ С.Ф. Усманов, К.Ч. Кожогулов// Научно-техническое обеспечение горного производства: Труды Института горного дела им. Д.А. Кунаева. – Алматы, 2008. – Том 75. – С.127-132.

37. **Ханукаев, А.Н.** Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом / А.Н. Ханукаев. – М.: Госгортехиздат.– 1962. – 199 с.
38. **Шевкун, Е.Б.** Управление действием взрыва скважинных зарядов/ Е.Б. Шевкун. – М.: Недра. –1992. –181 с.
39. **Bogusz, A.** Specific energy of hard coal under load/ A. Bogusz, M. Bukowska // *Studia Geotechnica et Mechanica*. – 2015. – № 1(37). – PP. 9-16.
40. **Geuzaine, C.** Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities/ C. Geuzaine and J.-F. Remacle // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2009. – № 79. – PP. 1309–1331.
41. **Fourney, W.L.** Model studies of explosive well simulation techniques./ W.L. Fourney, D.B. Barker, D.C. Holloway// *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*.–1981. – PP.113–127.
42. **Hang, Si.** TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator. 2015/ Si. Hang // *ACM Transactions on Mathematical Software*.– 2015. – №11. – PP. 1-36.
43. **Kaushik, D.** Concept of Blastability – An Update/ D. Kaushik, S. Phalguni// *The Indian Mining&Engineering Journal*.– 2003.– № 9.– PP. 24-31.
44. **Liu, L.** Numerical modeling of the effects of air decking/ decoupling in production and controlled blasting/ L. Liu, P.D. Katsabanis // *Proceeding 5th international conference on rock fragmentation by blasting*. –1996.– PP. 319–330.
45. **Lu ,W.** A further study on the mechanism of air decking / W. Lu, W. Hustrulid // *International Journal For Rock Fragmentation by Blasting*. – 2003. –Vol. 7. – №4. –PP. 231–255.
46. **Luccioni, B.** Erosion criteria for frictional materials under blast load / B. Luccioni, G. Araoz // *Mecanica Computacional*. – 2011. – № 30. – PP. 1809-1831

47. **Luccioni, B.** Effects of large and spread explosives loads/ B. Luccioni, D. Ambrosini, S. Yuen, G. Nurick // International Journal of Protective Structures. – Vol. 1. – №3. – PP. 319-344.
48. **Rabczuk, T.** Modelling dynamic failure of concrete with mesh free methods/ T. Rabczuk, J. Eibl // International Journal of Impact Engineering. – 2006. – № 32. – PP. 1878–1897.
49. **Riedel, W.** Beton unter dynamischen Lasten. Meso und makromechanische Modelle und ihre Parameter [Текст]/ W. Riedel. – Fraunhofer: IRB Verlag, 2004. –. 220 p.
50. **Riedel, W.** Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials/ W. Riedel, N. Kawai, K. Kondo // Int. J. Impact Eng. – 2009. – № 36. – PP. 283–293.
51. **Singh, T.N.** A study to simulate air deck crater blast formation-A numerical approach/ T.N. Singh, M. Sazid and M.R. Saharan // ISRM Regional Symposium-7th Asian Rock Mechanics Symposium. –2012. – PP. 495-505.
52. **Teale, R.** The concept of specific energy in rock drilling / R. Teale // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1965. – № 2. – PP. 57-73.
53. **Wang, Q.** Relationship between rock drilling parameters and rock uniaxial compressive strength based on energy analysis/ Q. Wang, Q. Qin, S. Gao, S. Li, H. Gao // Journal of China Coal Society. – 2018. – № 43 . – PP. 1289–1295.
54. **Zhang, Y.** An improved method for estimating the strength of Jointed Rock mass using drilling technology/ Y. Zhang, P. Li , F. Liu //Geofluids. –2022. – Vol. 2022. – PP. 1-12.
55. **Zhu, Z.** Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks / Z. Zhu, H. Xie, B. Mohanty // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. –2008. –№ 45. –Vol.2.–PP.111-121.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКОГО СЛАВЯНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Утверждаю

Ректор ГОУ ВПО КРСУ

Д.В. Фомин-Нилов

«15» / 04 / 2023г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Райымкулова Марата Аширбековича на тему «Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования»

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Райымкулова Марата Аширбековича на тему «Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования» внедрены в учебный процесс кафедры «Физические процессы разработки полезных ископаемых» Кыргызско-Российского Славянского университета.

Современные требования в подготовке специалистов в области горного дела требуют профессиональных навыков использования в инженерной и научной практике современных специализированных высокоточных компьютерных технологий для решения задач оптимизации горных работ. Представленные в диссертационной работе результаты применения численных методов и цифровых инструментов для получения информации о неоднородности горного массива и моделирования зоны разрушения массива горных пород при применении воздушного промежутка в скважинном заряде открывают возможности уточнения газодинамических процессов в скважине и определения оптимизации буровзрывных работ.

Материал научных исследований соискателя Райымкулова М.А. используется при чтении лекций на кафедрах «Физические процессы разработки полезных ископаемых», а предлагаемые в диссертационной работе программные пакеты и методики вычислений применяются при проведении лабораторных и практических занятий со студентами и магистрантами кафедры.

И.о. первого проректора, к.т.н., доцент

Г.В. Лоцев

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОЕКТНУЮ РАБОТУ ПИЦ «КЕН-ТОО»



УТВЕРЖДАЮ
Директор, к.э.н.
Кожогулов Б.К.

» 06.10.2023 г.

АКТ

внедрения в производство результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Райымкулова Марата Аширбековича на тему «Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования»

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Райымкулова Марата Аширбековича на тему «Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования» внедрены и применяются для проектирования карьеров в условиях высокогорья.

Применение воздушных промежутков в буровзрывных работах является одним из традиционных способов ведения горных работ. Однако отсутствуют соответствующие инструменты, позволяющие обосновать нужный параметр конструкции заряда еще на стадии проектирования. Применении цифровых технологий является перспективным направлением для решения данной задачи. Так, благодаря оснащению бурового станка датчиками, регистрирующими процесс бурения, появляется возможность определить характер неоднородности массива. Такая информация позволяет контролировать применение воздушных промежутков в скважинных зарядах, так, чтобы энергия дробления распределялась в прочных и менее прочных участках равномерно, обеспечивая нужное качество взрыва.

Моделирование динамического воздействия массового взрыва позволяет детально произвести анализ формирования зоны разрушения при применении воздушного промежутка. Методические разработки Райымкулова М.А. будут учитываться при подготовке проектов на массовый взрыв с применением воздушных промежутков в скважинных зарядах для различных карьеров.

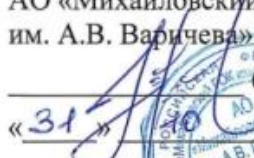
Главный горняк
ПИЦ «Кен-Тоо»

Чернова Е.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В АО «МИХАЙЛОВСКИЙ ГОК ИМ. А.В. ВАРИЧЕВА»

УТВЕРЖДАЮ

Директор по производству
АО «Михайловский ГОК
им. А.В. Варичева»


«31» 10 2023 г.



АКТ

внедрения в производство результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Райымкулова Марата Аширбековича на тему «Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования»

Представители АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», входящего в группу предприятий горно-металлургической компании ООО УК «МЕТАЛЛОИНВЕСТ», ознакомились с научными и практическими результатами исследований, представленных в диссертационной работе Райымкулова Марата Аширбековича на тему «Исследование воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования».

Предлагаемый в диссертационной работе подход применения цифровых технологий для оптимизации буровзрывных работ является перспективным направлением для компании. Так, благодаря оснащению бурового станка датчиками, регистрирующими процесс бурения, появляется возможность определить значение энергоемкости бурения. Данный параметр позволяет выделить участки раздробленной горной массы, подобрать оптимальный удельный расход взрывчатых материалов для разных участков и горизонтов карьера, а также скорректировать параметры буровзрывных работ с учётом полученных данных.

Результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, представляют большой практический и научный интерес для АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». В настоящее время специалисты буровзрывного управления АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» применяют рекомендации Райымкулова Марата Аширбековича для определения оптимальных параметров буровзрывных работ.

Главный специалист по БВР


30.10.2023

Э.А. Умрихин

Главный инженер БВУ


30.10.2023

С.Н. Чернышов

г. Железногорск, Курская область, Российская Федерация