

**Институт машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной  
академии наук Кыргызской Республики**

**Жалал-Абадский государственный университет им. Б. Осмонова**

Диссертационный совет Д 25.24.709

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)»

*Автореферат диссертации на соискании ученой степени  
кандидата технических наук*

Научный руководитель:

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

Бишкек-2025

Работа выполнена в Институте Коммуникаций и Информационных технологий Кыргызско-Российского Славянского университета

Научный  
руководитель:

**Усманов Салават Фаргатович,**  
доктор технических наук, профессор, член-кор.  
НАН КР

Официальные оппоненты:

**Усенов Кенешбек Жумабекович,**  
доктор технических наук, профессор, член-кор.  
ИА КР

**Чунуев Ишимбай Карыбаевич**  
кандидат технических наук, профессор

**Турсбеков Серик Вахитович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
маркшейдерского дела и геодезии Казахского  
национального технического университета им.  
К.И. Сатпаева

Ведущая организация:

Кыргызский горно-металлургический институт  
им. У. Асаналиева при Кыргызском  
государственном техническом университете им.  
И. Раззакова, 720044, г. Бишкек, проспект Ч.  
Айтматова, 66.

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 25.24.709 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук при Институте машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики и Жалал-Абадском государственном университете им. Б. Осмонова по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Медерова, 98, конференц-зал. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации: \_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина 98 и Жалал-Абадском государственном университете им. Б. Осмонова по адресу: 715600, г. Жалал-Абад, ул. Ленина, 57 и на сайте НАК РК: <https://vak.kg/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета,

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 упрощенным 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 карьеру: 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 применения воздушного промежутка в скважинных зарядах в условиях неоднородности массива методом численного моделирования.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. 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;
2. Провести уточнение газодинамических процессов при сжатии воздушного зазора продуктами взрыва в процессе детонации методом численного моделирования;
3. Сопоставить результаты экспериментальных исследований эффекта воздушного промежутка в скважинных зарядах с данными численного моделирования;
4. Определить оптимальные параметры конструкции скважинных зарядов с воздушными промежутками с учетом информации о неоднородности массива в виде данных 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 и цифровых технологий в горном производстве.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. уточнены газодинамические процессы в области сжимаемого воздушного промежутка продуктами детонации и определены особенности формирования трещин в ближней зоне при применении воздушного промежутка;
2. предложено применение параметра энергоемкость технологического бурения в качестве информационной базой для проектирования конструкции заряда с воздушным промежутком.

**Практическая значимость полученных результатов заключается в:**

применении численного моделирования зоны дробления скважинных зарядов с воздушными промежутками, что позволяет 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 правильного 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 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 (2015-2024); 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.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, изложенных на 120 страницах, содержит 44 рисунков, 14 таблиц, 3 приложения, список использованной литературы состоит из 55 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, дается общая характеристика и степень ее изученности, раскрываются цель и задачи работы, излагается научная новизна, основные положения, выносимые автором на защиту и их практическое значение, приводится апробация результатов исследования и личный вклад автора.

**В первой главе** приведен обзор исследований в области применения технологии рассредоточения скважинных зарядов воздушными промежутками широко при буровзрывных работах, обоснованы цель и задачи диссертационной работы

Эффект действия воздушного промежутка при взрыве отмечен давно. В работе Н.В. Мельникова в 1940-х годах впервые была выдвинута идея управления взрывом путем применения зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками. Затем эта идея была проработана детально в совместных работах Н.В. Мельникова и Л.Н. Марченко в 1960-х. Принято считать, что применение воздушных промежутков в конструкции заряда приводит к снижению начального пикового давления взрыва в воздушной полости, увеличению времени действия взрыва на породу, а также взаимодействию 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.

В работах И.Ф. Жарикова установлена взаимосвязь между газодинамическими параметрами расширения продуктов детонации во взрывной камере при взрыве зарядов с воздушными промежутками. Показано, что благодаря 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. Выделяется фаза сжатия воздушного промежутка и генерирование ударной воздушной волны при взрыве заряда в воздушной полости.

Процесс развития зон разрушения при применении конструкции заряда с воздушными промежутками зафиксирован в серии экспериментов взрыва в органическом стекле в работах академика В.И. Нифадьева. Анализ кинокадров процесса позволил выделить особенности в последовательности взрыва скважин. Показано, что воздушный зазор играет роль внутрискважинного замедлителя и доказана возможность регулирования процесса разрушения.

Качественное и количественное описание механизма действия воздушных промежутков приведено в работе К. Жунусова. Автор справедливо считает, что основной эффект возникает в результате сложного взаимодействия детонационных волн, воздушного промежутка и продуктов детонации.

Определение параметров оптимальной конструкции заряда с воздушным промежутком обсуждаются в работах Б.Б. Бажанова, W. Lu и др.

Анализ и обзор работ показал отсутствие полноценного метода оптимизации конструкции заряда с воздушным промежутков в условиях неоднородности массива, что обусловлено отсутствием детализированной информации о массиве в границах обрабатываемого блока. Один из эффективных способов получения необходимых сведений о изменяемых прочностных свойствах массива – использование информации, полученной в процессе бурения технологических скважин буровыми станками. Данный подход привлекателен прежде всего тем, что не нарушает существующего на карьере режима работ и не требует затрат на проведение дополнительных геофизических работ по детализации свойств горных пород взрываемого блока. В программно-техническом комплексе «BlastMaker», разработанного сотрудниками Института Коммуникаций и Информационных технологий Кыргызско-Российского Славянского Университета под руководством В.А. Коваленко, практически реализован данный подход с применением передовых цифровых технологий. В основу работы комплекса положена методика определения прочностных характеристик массива по данным удельной энергоемкости бурения, которая зависит от параметров бурения скважины.

Применение цифровых технологий в условиях возрастающих вычислительных мощностей современных серверов позволяет быстро и эффективно принимать, обрабатывать большой массив данных, анализировать характер распределения энергии взрыва в неоднородном массиве, производить редактирование проекта конструкции скважинного заряда и оперативно оценивать эффект от применения воздушного промежутка в конструкции скважинных зарядов с учетом особенностей массива.

**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. Объектом исследования является эффект от применения воздушного промежутка в конструкции взрывных скважин при отработки неоднородного горного массива на примере особенностей месторождения Кумтор. Считается, что применение воздушного промежутка повышает качество взрыва, при этом снижается расход ВВ и сейсмическое воздействие на окружающую среду. Поэтому в качестве предмета исследования выступают газодинамические процессы внутри сжимающегося воздушного промежутка и формирование зон дробления при взрывной нагрузке.

Информационно-вычислительной базой для проведения численного моделирования является высокопроизводительный кластер T-Edge64 на базе 64 процессоров Intel Xeon с максимальной производительностью 286.7 Gflops и решатель Tesla K40, 1536 ядер CUDA, пиковой производительностью 3 TFlops на базе графических решателей. В расчетах применяется метод конечных элементов, основная идея которого состоит в разделении сложных моделируемых областей на конечное количество простых подобластей -

конечных элементов. Информация о неоднородности массива может быть получена в среде программно-технического комплекса «BlastMaker». На основе сбора и анализа данных о бурении рассчитывается энергоемкость бурения и строится трехмерная цифровая модель неоднородности массива.

Сейсмическое воздействия от массовых взрывов при применении воздушного промежутка в скважинном заряде оценивается на основе аналитического метода по формуле Садовского и методом конечных элементов. В главе рассматриваются методики оценки сейсмического воздействия.

**Во третьей главе** приводится описание вычислительного комплекса программных и технических средств для численного моделирования эффекта применения воздушного промежутка в скважинном заряде.

Особенности воздействия конструкции заряда с применением воздушного промежутка на процесс дробления массива горных пород удается наиболее полно воспроизвести методом численного моделирования с применением инструмента явного динамического анализа. Одним из программных пакетов, реализующих возможность двумерного и трехмерного моделирования разрушения ближней зоны от составного заряда является коммерческий продукт ANSYS AUTODYN, предназначенный для моделирования высоко нелинейной динамики твердых тел, жидкостей, газов и их взаимодействия, позволяющий рассчитывать такие быстропротекающие процессы, как высокоскоростной удар или взрыв.

Пакет ANSYS AUTODYN позволяет подробно рассмотреть газодинамические процессы в скважине. Однако для оценки зоны дробления некоторые возможности программы ограничены. Например, в задании сложной геометрии прослоек неоднородного горного массива ANSYS AUTODYN достаточно трудоемко, отсутствует возможность параллелизации расчета на графических процессорах, что при нынешнем уровне вычислительных мощностей, способствовало бы заметному ускорению расчета. Задание физико-механических свойств пород в библиотеке материалов программы осуществляется посредством настройки не менее 15 параметров, в то время как геологическая служба на производстве оперирует не более, чем тремя основными параметрами пород. Для моделирования взрывной нагрузки требуется длительное время расчета.

Для оценки зоны дробления был разработан инструмент численного моделирования с применением стержневых элементов, обеспечивающие простоту и быстроту вычислений. В данном инструменте значительно сокращено количество вводимых параметров. Неоднородность массива может быть импортирована в виде блочной модели энергоемкости из системы «BlastMaker» или быть задана в программе ImpactMesher. Данная программа собственная разработка ИКИТ КРСУ, позволяющая задавать домены пород и нагрузки на массив горных пород.

Для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива использована упруго-хрупкая модель, удовлетворяющая следующему условию разрушения:

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\sigma_{ij} > \sigma_p, \text{ при растяжении,}$$

$$-\sigma_{ij} > \sigma_{сж}, \text{ при сжатии.}$$
(1)

где  $\sigma_{ij}$  - напряжение  $ij$ -элемента,  $\sigma_p$  - предел прочности на растяжение,  $\sigma_{сж}$  - предел прочности на сжатие. Динамика процесса и схема интегрирования по времени приводятся с применением явной схемы, что позволяет отказаться от громоздкой матрицы жесткости и тем самым на порядки сократить время расчетов.

Сопоставление времени, необходимого для расчета зоны дробления на одном процессоре для одинакового количества тетраэдральных элементов, показало преимущество метода стержневых элементов по сравнению с коммерческим продуктом ANSYS AUTODYN до 30% по затраченному времени, а технологии параллельного вычисления позволили достичь ускорения задачи расчета зоны дробления более чем в 5 раз.

**В четвертой 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.

Тестирование и настройка инструмента численного моделирования осуществляется на примере процесса формирования зон разрушения в органическом стекле при применении конструкции заряда с воздушным промежутком, зафиксированным научным коллективом под руководством академика В.И.Нифадьева. В эксперименте рассматривался взрыв смеси ТЭНа (70%) и полистирола (30%) в органическом стекле. В конструкции заряда применялся воздушный зазор. Анализ кинокадров процесса позволил выделить последовательность взрыва отдельных участков скважины. Таким образом, установлено, что воздушный зазор играет роль внутрискважинного замедлителя и позволяет регулировать процесс разрушения. Данные результаты удалось полностью повторить методом численного моделирования (рисунок 1).

Как показывают расчеты численного двухмерного моделирования в среде ANSYS AUTODYN, основной особенностью импульса получаемого от заряда с воздушным промежутком состоит в появлении двух максимумов, следующих с определенным заметным интервалом. Длительность определяется временем, затрачиваемым на сжатие воздушного промежутка. Сопоставление графиков позволило утверждать, что в области воздушного промежутка также снижена амплитуда взрывной волны в 10-16 раз. Основной механизм процесса передачи энергии в породе обусловлен длительным воздействием, что соответствует результатам экспериментальных.

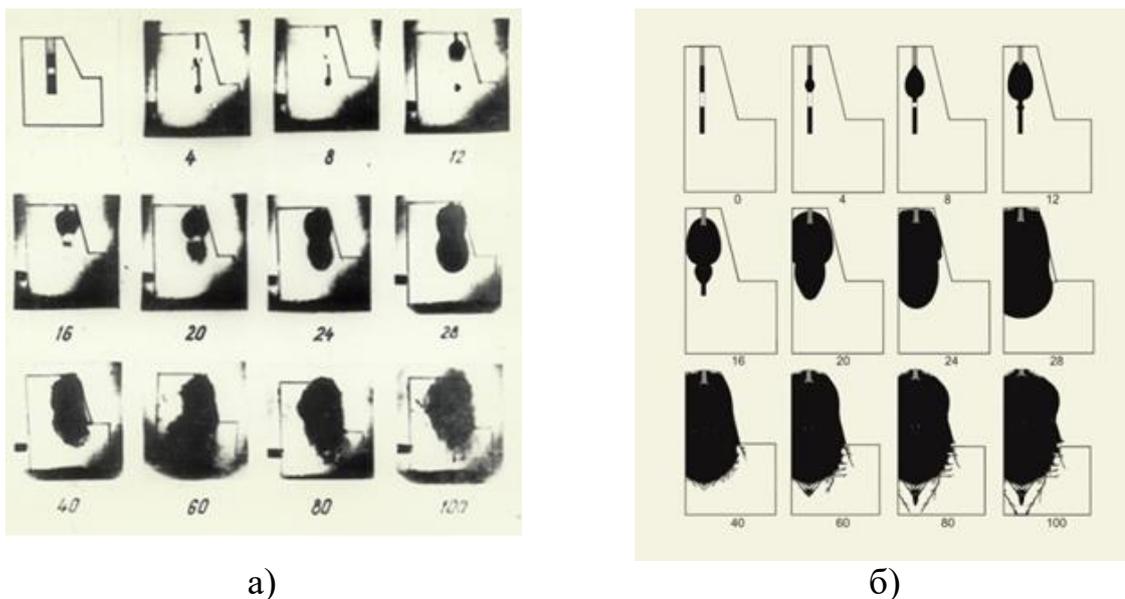


Рисунок 1 – Сравнение областей разрушения органического стекла при применении воздушного промежутка на различных этапах развития процесса разрушения, время указано в мс: а) эксперимент, б) численное моделирование

Расчеты позволили также выделить 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 взрывчатом веществе 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 и др.

Таким образом, инструменты численного моделирования позволяет воспроизвести различные газодинамические процессы в области сжимаемого воздушного промежутка и наглядно представить основной процесс формирования зон разрушения при применении различных конструкций заряда с применением воздушного промежутка.

**В пятой 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.

Горные породы в массиве характеризуются переменными прочностными свойствами, которые необходимо учитывать при распределении взрывчатых веществ и воздушных промежутке в скважине. Рассматривается возможность применения информации о неоднородности массива, получаемой в среде программно-технического комплекса «BlastMaker» в виде распределения удельной энергоемкости бурения в границах обруиваемого блока.

Особый интерес представляет расположения взрывчатых веществ напротив положения прочных прослоек. Как показывают результаты численного моделирования, в результате неэффективного использования взрывной энергии повышаются риски неравномерного дробления породы и выхода негабаритов. При смещенном положении взрывчатых веществ относительно прочных участков массива наблюдается избыточное переизмельчение менее крепких прослоек. Точное позиционирование взрывчатого вещества напротив прочных прослоек обеспечивает равномерное распределение энергии в массиве. При этом улучшается проработка массива на 6-10%.

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 взрывчатых веществ.

На примере данных с месторождения «Кумтор» обосновывается применение воздушных промежутков на основе данных об энергоемкости бурения. Детализированное пространственное распределение энергоемкости бурения для рудника позволяет выделить верхний участок массива толщиной около 3 - 3,5 метров, представляющий собой слой разрушенной породы от горных работ на вышележащих горизонтах.

Для определения оптимальной конструкции заряда в условиях карьера «Кумтор» подготовлена трехмерная цифровая модель участка блока с уступом соответствующая основным параметрам буровзрывных работ на предприятии и заданы физико-механические свойства среды на основе данных геологической службы и распределения энергоемкости бурения.

Проведена серия численного моделирования зоны дробления для сплошного заряда и конструкции заряда, в которых варьировалась доля воздушного промежутка в диапазоне 0,1-0,7 от длины взрывчатого вещества. По результатам моделирования получено, что наиболее оптимальная длина воздушного промежутка составляет 0,1-0,2 от длины взрывчатого вещества. Если доля воздушного промежутка больше, наблюдается линейное понижение доли разрушенных элементов, что повышает вероятность ухудшению проработки массива и появлению негабаритов. С другой стороны, с увеличением доли воздушного промежутка и уменьшением доли взрывчатого вещества, в соответствии с уравнением Садовского снижается сейсмическая нагрузка на горный массив. Снижение заряда на 10-20% за счет эффекта воздушного промежутка позволяет снизить сейсмическое воздействие на 4-6%. Такой эффект особенно важен при ведении взрывных работ вблизи зон деформаций.

Таким образом, применение численных методов позволило утверждать, что в условиях месторождений предприятия Кумтор, для средней крепости пород наиболее оптимальный размер воздушного промежутка составляет 10-20% от длины взрывчатого вещества.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке методов практического применения цифровых инструментов в оптимизации конструкции зарядов с применением воздушного промежутка в условиях неоднородного горного массива.

### **Основные научные результаты работы и выводы:**

1. Удельная энергоемкость бурения позволяет получать оперативную информацию о характере неоднородности прочностных свойств массива в процессе и является информационной базой для проектирования конструкции заряда;
2. Расчеты в двумерной постановке показали существенно влияние поперечных ударных волн на характер разрушения породы. В частности показаны эффекты влияния кривизны фронта ударной волны, множественных отраженных волн рожденных неоднородностями газа вследствие газодинамической неустойчивости;
3. Точное позиционирование заряда с учетом положения прочных участков обеспечивает улучшение проработки массива, равномерное дробление всего массива и увеличение зоны дробления на 6-10%;
4. Применение воздушного промежутка между забойкой и зарядом с длиной 10-20% от длины заряда в скважинах для отработки блока на карьере «Кумтор» обеспечивает снижение удельного расхода взрывчатого вещества и щадящее сейсмическое воздействие.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Коваленко В.А. Сравнительный анализ сейсмического воздействия взрывных работ, проводимых на карьере, на подземные горные выработки методом численного моделирования [Текст]/ В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, Д.А. Воробьев// Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета. – 2015. – Т.15. – № 3. – С. 116-119. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestnik.krsu.edu.kg/ky/archive/54/2134>.
2. Коваленко В.А. Моделирование сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые сооружения методом конечных элементов [Текст]/ В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, Д.А. Воробьев // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: Сб. материалов 2-й Междунар. конф.– Томский политехнический университет, Томск, 2015. – С.51-54.
3. Нифадьев В.И. Механизм действия воздушного промежутка скважинных зарядов [Текст]/ В.И. Нифадьев, В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, П.В. Комиссаров, С.С. Басакина// Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета. – 2017. – Т.17. – № 12. – С. 170-174. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/34/1506>.
4. Коваленко В.А. Моделирование сейсмического воздействия при массовых взрывах с учетом геологической неоднородности горного массива [Текст]/ В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, Д.А. Воробьев, В.А. Борисенко // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов 9-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов– Бишкек: НС РАН, 2017. – С.221-225. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29150579&pff=1>.
5. Коваленко В.А. Моделирование взрыва различных конструкций скважинного заряда в массиве [Текст]/ В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, Д.А. Воробьев // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов 9-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов– Бишкек: НС РАН, 2017. – С.225-228.
6. Нифадьев В.И. Газодинамическая неустойчивость при взрыве рассредоточенного воздушными промежутками скважинного заряда как причина начальной сети трещин в породе [Текст]/ В.И. Нифадьев, В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, П.В. Комиссаров, С.С. Басакина// Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета. –2018. –Т.18. –№ 4. –С. 175-179. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestnik.krsu.edu.kg/ky/archive/4/62>.
7. Комиссаров П.В. Поперечные эффекты в воздушном промежутке при взрыве сегмента рассредоточенного скважинного заряда [Текст]/ П.В. Комиссаров, В.И. Нифадьев, В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, С.С. Басакина// Горение и взрыв. –2018. –Т.11. –№ 3. –С. 103-109. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36008996>.
8. Коваленко В.А. Оценка эффективности использования воздушного промежутка в скважинных зарядах / В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, П.В.

Комиссаров, С.С. Басакина// Добывающая промышленность. –2018. –Т.10. –№ 2. – С. 216-218. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dprom.online/mining/otsenka-effektivnosti-ispolzovaniya-vozdushnogo-promezhutka-v-skvazhinnyh-zaryadah/>.

9. Коваленко В.А. Эффективность использования воздушного промежутка в скважинных зарядах [Текст]/ В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов// Передовые технологии на карьерах. Сб. материалов конф.– КРСУ, Бишкек, 2018. – С.42-48.

10. Райымкулов М.А. Высокопроизводительные вычислительные ресурсы для решения задач горного производства [Текст]/ М.А. Райымкулов// Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов 11-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов– Бишкек: НС РАН, 2019. – С.158-159. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mmk.gdirc.kg/archive/>.

11. Райымкулов М.А. Инструменты численного моделирования для прогнозирования зон дробления неоднородного горного массива при взрыве скважинных зарядов [Текст]/ М.А. Райымкулов, Э.Ш. Сыдыков// Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов 12-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов– Бишкек: НС РАН, 2020. – С.450-452. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mmk.gdirc.kg/archive/>.

12. Коваленко В.А. Возможности управления взрывом скважинных зарядов на основе системы «Blast Maker» [Текст]/ В.А. Коваленко, В.В. Григорьев, М.А. Райымкулов // Современные проблемы механики. Сер.3. – 2020. – № 41. – С.99-109.

13. Коваленко В.А. ПТК «Blast Maker»: цифровые технологии на пути к управлению взрывом скважинных зарядов [Текст]/ В.А. Коваленко, В.В. Григорьев, М.А. Райымкулов // Золото и технологии.– 2020. – Т.48. – №2. – С.74-78. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://zolteh.ru/technic/ptk\\_blast\\_maker\\_tsifrovye\\_tekhnologii\\_na\\_puti\\_k\\_upravleniyu\\_vzryvom\\_skvazhinnykh\\_zaryadov/](https://zolteh.ru/technic/ptk_blast_maker_tsifrovye_tekhnologii_na_puti_k_upravleniyu_vzryvom_skvazhinnykh_zaryadov/).

14. Коваленко В.А. Цифровая технология подготовки производства ПТК «Blast Maker» в условиях Михайловского ГОКа [Текст]/ В.А. Коваленко, Э.А. Умрихин, М.А. Райымкулов// Глобус.– 2020. –Т.62. – №3. – С.146-151. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/informacionnye-tehnologii/czifrovaya-tehnologiya-podgotovki-proizvodstva-ptk-blast-maker-v-usloviyah-mihajlovskogo-goka-11361/>.

15. Григорьев В.В. ПТК BlastMaker: опыт применения данных энергоемкости бурения [Текст]/ В.В. Григорьев, М.А. Райымкулов // Глобус. –2022. –Т.72. –№ 3. –С. 130-134. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/ptk-blast-maker-opyt-primeneniya-dannyh-energoyomkosti-bureniya-18868/>.

16. Апакашев Р.А. Метод численного моделирования в задачах прогнозирования эффекта от применения воздушного промежутка в конструкции скважинного заряда [Текст]/ Р.А. Апакашев, С.Ф. Усманов, М.А.

Райымкулов // Известия Уральского государственного горного университета–2022. – Т22. – №6. - С.114-124.

17. Григорьев В.В. Программно-технический комплекс «BlastMaker»: возможности применения данных об энергоёмкости бурения в различных горно-технологических условиях [Текст]/ В.В. Григорьев, М.А. Райымкулов, А.О. Киселев // Горный журнал Казахстана –2023. – №6. - С.9-16. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minmag.kz/ru/программно-технический-комплекс-blastmaker/>.

18. Колосов В.А. Использование системы автоматизированного проектирования буровзрывных работ «BlastMaker» на предприятиях Акционерного общества «Полиметалл Управляющая Компания» [Текст]/ В.А. Колосов, В.Г. Долгушев, А.И. Илларионов, М.А. Райымкулов// Горный журнал Казахстана –2023. – №6. - С.18-21. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minmag.kz/kk/2023/07/03/использование-системы-автоматизиро-5/>.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Райымкулова Марата Аширбековича на тему: «Исследования воздействия массового взрыва с применением заряда с воздушным промежутком на горный массив методом численного моделирования» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.22 - «Геотехнология (подземная, открытая)»

**Ключевые слова:** конструкция заряда, воздушный промежуток, энергоемкость бурения, проект буровзрывных работ, зона дробления.

**Объект исследования:** оптимальная конструкция заряда с воздушным промежутком.

**Цель исследования:** оценка эффективности применения воздушного промежутка в скважинных зарядах в условиях неоднородности массива 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 и цифровых технологий в горном производстве.

### **Полученные результаты и их новизна:**

- предложено применение параметра удельной энергоемкости бурения в качестве информационной базой для проектирования конструкции заряда с воздушным промежутком;

- расчеты в двумерной постановке показали существенное влияние кривизны фронта ударной волны, формирования множественных отраженных волн обусловленных неоднородностями газа вследствие газодинамической неустойчивости поперечных ударных волн на характер разрушения породы;

- точное позиционирование заряда с учетом положения прочных участков обеспечивает улучшение проработки массива, равномерное дробление всего массива и увеличение зоны дробления на 6-10%;

- применение воздушного промежутка между забойкой и зарядом с длиной 10-20% от длины заряда в скважинах для отработки блока на карьере «Кумтор» обеспечивает снижение удельного расхода взрывчатого вещества и щадящее сейсмическое воздействие.

**Степень использования:** результаты исследований внедрены в систему автоматизированного проектирования «BlastMaker» как часть функционала задания заряда с воздушным промежутком с учетом неоднородности массива и используются на таких горных предприятиях как «Кумтор», «Полиметалл» и др.

**Область применения:** прогнозирование качества взрывных работ при проектировании буровзрывных работ, оптимизация горных работ на карьерах.

## КОРУТУНДУ

**25.00.22 – « Геотехнология (жер астындагы, ачык түрдөгү)» адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн Райымкулов Марат Аширбековичтин «Сандык моделдөө ыкмасын колдонуу менен тоо массасына аба боштугу бар зарядды колдонуу менен массалык жарылуунун таасирин изилдөө» деген темасындагы диссертациясына.**

**Негизги сөздөр:** заряддын конструкциясы, аба боштугу, бургулоонун энергиясынын параметри, бургулоо жана жардыруу иштеринин проекти, жардыруу менен майдалуу зона.

**Изилдөөнүн объектиси:** аба боштугу бар заряддын оптималдуу конструкциясы.

**Изилдөөнүн максаты** массивдердин гетерогендүүлүгүнүн шарттарында скважиналардын заряддарындагы аба боштугун пайдалуу сандык моделдөө менен болуп саналат.

**Изилдөө ыкмалары:** диссертацияда скважиналардын заряддарындагы аба боштугун пайдалануу жаатындагы анализди, теориялык жана эксперименталдык изилдөөлөрдү илимий жалпылоону, тоо-кен иштеринде сандык моделдөө куралдарын жана санарип технологияларды колдонууну айкалыштырган комплекстүү метод колдонулат.

**Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы:** бургулоонун энергиясынын параметри бул заряд конструкциясы аба боштугу менен параметри үчүн маалыматтык база катары пайдалануу сунушталды;

- эки өлчөмдүү формуладагы эсептөөлөр сокку толкунунун фронтунун ийрилигинин, тоо тектердин бузулуу табиятына туурасынан кеткен сокку толкундарынын газ-динамикалык туруксуздугунан улам газдын бир тектүү эместигинен келип чыккан көп чагылдырылган толкундардын пайда болушунун олуттуу таасирин көрсөттү;

- күчтүү участоктордун абалын аба боштугу колдоо массивдин жакшыртылган иштетилишин, бүт массивдин бир калыпта майдаланышын жана майдалоо зонасын 6-10%ке көбөйтүүнү камсыз кылат;

- Кумтөр карьеринде блоку иштетүү үчүн скважиналардагы аба боштугу 10-20% узундуктагы менен скважинанын ортосундагы аба боштугун пайдалануу жардыргыч заттардын салыштырма чыгымын жана жумшак сейсмикалык таасирди азайтууну камсыз кылат.

**Колдонуу чөйрөсү:** изилдөөлөрдүн натыйжалары массивдин бир тектүү эместигин эске алуу менен аба боштугу бар зарядды орнотуу функционалынын алкагында «BlastMaker» автоматташтырылган долбоорлоо системасына киргизилген жана «Кумтөр», «Полиметалл» жана башка тоо-кен ишканаларында колдонулат.

**Колдонуу чөйрөсү:** бургулоо жана жардыруу иштерин долбоорлоодо жардыруу иштеринин сапатын болжолдоо, карьерлерде тоо-кен иштерин оптималдаштыруу.

## SUMMARY

**of the dissertation of Marat Ashirbekovich Raimkulov on the topic: "Research of the impact of a mass explosion using a charge with an air gap on a rock mass using the numerical modeling method" for the degree of candidate of technical sciences in specialty 25.00.22 - "Geotechnology (underground, open)"**

**Keywords:** charge construction design, air gap, drilling energy intensity, drilling and blasting project, crushing zone.

**Objective of the dissertation:** optimal design of a charge with an air gap.

**The subject of the research:** evaluation of the efficiency of using an air gap in borehole charges in conditions of heterogeneity of the massif using the numerical modeling method.

**Research methods:** the dissertation uses a comprehensive method combining analysis, scientific generalization of theoretical and experimental research in the field of using an air gap in borehole charges, the use of numerical modeling tools and digital technologies in mining.

**The results obtained and their novelty:**

- the use of the parameter of specific energy intensity of drilling as an information base for designing the design of a charge with an air gap is proposed;
- calculations in a two-dimensional formulation showed a significant influence of the curvature of the shock wave front, the formation of multiple reflected waves caused by gas inhomogeneities due to gas-dynamic instability of transverse shock waves on the nature of rock destruction;
- precise positioning of the charge taking into account the location of strong sections ensures improved massif development, uniform crushing of the entire massif and an increase in the crushing zone by 6-10%;
- the use of an air gap between the stemming and the charge with a length of 10-20% of the charge length in wells for block development at the Kumtor quarry ensures a reduction in the specific consumption of explosives and a gentle seismic impact.

**Degree of use:** the research results have been implemented in the automated design system "BlastMaker" as part of the functionality for setting a charge with an air gap taking into account the heterogeneity of the massif and are used at such mining enterprises as "Kumtor", "Polymetal" and others.

**Scope of application:** forecasting the quality of blasting operations when designing drilling and blasting operations, optimization of mining operations in quarries.