

На правах рукописи



**Костюнина Ольга Александровна**

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
И ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНОГО РЫХЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД  
НА ОГРАНИЧЕННЫХ РАБОЧИХ ПЛОЩАДКАХ**

2.8.6. – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»

**Научный руководитель:** **Шевкун Евгений Борисович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», профессор кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле»

**Оппоненты:** **Закалинский Владимир Матвеевич**, доктор технических наук, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, ведущий научный сотрудник Отдела проблем геомеханики и разрушения горных пород (отдел №5).

**Шубин Григорий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, доцент кафедры горного дела Горного института.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет».

Защита состоится «23» декабря 2022 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета 24.1.234.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 43. Тел/факс: 8(4112)33-59-30; e-mail: igds@ysn.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ЯНЦ СО РАН <https://prez.ysn.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук



Зубков Владимир Петрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Среди существующих способов разрушения горных пород буровзрывной способ является наиболее эффективным, а для крепких руд и пород - единственно возможным. Разрушение горных пород взрывом сопровождается разлетом кусков породы, что представляет угрозу для безопасности людей, окружающей среды и средств механизации. Особую актуальность проблема обеспечения безопасности взрывных работ приобретает при приближении границ рабочих площадок к населенным пунктам, транспортным коммуникациям, линиям электропередач и другим охраняемым объектам.

Газопроницаемое укрытие из упругих элементов, разработанное ранее в Тихоокеанском государственном университете, явилось эффективным и доступным средством снижения радиуса разлета кусков породы. Укрытие собирают на месте производства работ, связывая в единый мат изношенные автомобильные шины от большегрузных автосамосвалов, например, цепями, канатами или проволокой.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что существующие способы снижения дальности разлета кусков при взрывном рыхлении горных пород на ограниченных рабочих площадках разработаны для порядной схемы взрывания с междурядными замедлениями 20–35 мс и не учитывают влияние интервалов замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов на разлет кусков породы. Появление электронных и неэлектрических систем инициирования значительно расширило возможности выбора схемы взрывания и определило новые направления повышения эффективности и безопасности работ. Новые средства инициирования позволили осуществить переход на поскважинное взрывание зарядов с различными интервалами замедления и увеличить продолжительность действия энергии взрыва на массив горных пород.

**Степень разработанности темы.** Многолетний опыт ведения взрывных работ с применением неэлектрических систем инициирования на предприятиях ООО «АВТ-Амур» показал, что взрывание с интервалами замедления между отдельными зарядами от 150 мс и выше позволяет свести развал горных пород к минимуму, сохраняя взорванную горную массу в контурах эксплуатационного блока. При сохранении качества дробления была расширена сетка скважин, увеличен выход взорванной горной массы, снижен удельный расход ВВ.

За последние десятилетия изменились не только средства и схемы взрывания, но и представления о процессе разрушения горных пород при взрывном воздействии. Теоретические и экспериментальные данные указывают на наличие зоны повышенной микротрещиноватости между разрушенной и ненарушенной средой (зоны предразрушения). Начало исследованию предразрушающего действия взрыва было положено еще в XX веке в работах Н. В. Мельникова, М. А. Кука и др., которые отмечали влияние переходной зоны на результаты взрывной отбойки. Эти идеи получили дальнейшее развитие в трудах отечественных ученых В. В. Адушкина, С. Д. Викторова, А. Н. Кочанова, А. В. Лещинского, С. М. Лупия, В. Н. Мосинца, В. Н. Одинцева, М. А. Садовского, А. А. Спивака, Э. А. Хопунова, Е. Б. Шевкуна, Н. Г. Штукарина и др. Исследование процесса предразрушения

осложняется отсутствием общепринятой универсальной теории разрушения горных пород методом короткозамедленного взрывания, поэтому теоретические подходы зачастую опираются на результаты экспериментальных исследований.

Известно, что процесс предразрушения зависит от амплитуды и времени действия волн напряжений на разрушаемый массив. Было установлено, что только поскважинное взрывание зарядов с интервалами замедления выше 100 мс обеспечивает промежутки времени, необходимые для формирования зоны предразрушения в окрестности заряда. Проблема оценки интенсивности предразрушения при дальнейшем увеличении интервалов замедления нуждается в дополнительных исследованиях.

С ростом нарушенности массива большее количество сильно сжатых газов взрыва проникает в образовавшиеся трещины, а выбросы из устья скважин ослабевают. Выдвигаем гипотезу, что усилить предразрушающее действие взрыва и, как следствие, снизить выброс разрыхленной породы, возможно именно путем увеличения интервалов замедления. Проверка данной гипотезы производится при проведении экспериментальных массовых взрывов. Влияние интервалов замедления на качество дробления породы в данном исследовании не рассматривается.

Переход на поскважинное взрывание зарядов с увеличенными интервалами замедления требует разработки новых подходов к определению основных параметров укрытий мест взрыва. Методика расчета газопроницаемого укрытия из упругих элементов, предложенная Н. К. Лукашевич, основана на предположении о равенстве ударных импульсов, действующих на укрытие от взрыва скважинных зарядов, что было оправдано при порядной схеме взрывания с малыми замедлениями. При обзоре современного состояния вопроса не найдено работ, исследующих влияние интервалов замедления на изменение ударных импульсов в процессе развития массового взрыва.

**Целью исследования** является обоснование эффективных параметров и технологии взрывного рыхления горных пород на ограниченных рабочих площадках, обеспечивающих минимальный разлет кусков взорванной породы.

**Основная идея** – обеспечение минимального разлета кусков взорванной породы достигается за счет увеличения интервалов замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов и локального использования газопроницаемого укрытия из упругих элементов на стартовом комплекте зарядов массового взрыва.

**Объект исследования** – взрывное рыхление горных пород на ограниченных рабочих площадках.

**Предмет исследования** – влияние интервалов межскважинного замедления на процессы в зоне предразрушения и технологию безразлетного рыхления скальных пород под газопроницаемым укрытием из упругих элементов.

**Задачи исследования:**

- провести анализ отечественного и зарубежного опыта взрывного рыхления горных пород на ограниченных рабочих площадках;
- выявить наличие зависимости между величиной интервалов межскважинного замедления и интенсивностью предразрушения массива горных пород;

- сравнить ударные импульсы, действующие на элементы газопроницаемого укрытия, при поскважинном инициировании зарядов с различными интервалами замедления;

- разработать математическую модель и алгоритм динамического расчета укрытия при применении технологии безразлетного рыхления скальных пород под газопроницаемым укрытием из упругих элементов и поскважинном инициировании зарядов с увеличенными интервалами замедления;

- обосновать возможность обеспечения минимального разлета кусков взорванной породы путем увеличения интервалов замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов и выбора эффективных параметров газопроницаемого укрытия из упругих элементов.

#### **Научная новизна работы:**

1. Экспериментально установлено возрастание интенсивности предразрушения массива горных пород с увеличением интервалов замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов от 150 до 1000 мс, при этом достаточное время для завершения трещинообразования в зоне предразрушения обеспечивается при интервалах замедления в 1000 мс.

2. Установлена связь между увеличением интервалов замедления и снижением величины ударных импульсов, действующих на элементы укрытия при поскважинном инициировании зарядов.

3. Разработаны математическая модель, алгоритм и программная реализация расчета газопроницаемого укрытия из упругих элементов как динамической нелинейной системы.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определяется разработкой методики оценки интенсивности предразрушения массива горных пород при различных интервалах замедления; установлением величины интервалов замедления, достаточной для завершения трещинообразования в зоне предразрушения; развитием технологии безразлетного рыхления скальных пород с учетом поскважинного инициирования зарядов; возможностью использования полученных результатов на предприятиях горной промышленности при разработке мероприятий по уменьшению радиуса зоны, опасной по разлету отдельных кусков породы, для повышения безопасности взрывных работ и производительности горнотранспортного оборудования, сокращения затрат на подготовительно-восстановительные мероприятия.

**Методы исследования.** Использован комплекс методов исследования: научный анализ и обобщение литературных и патентных материалов; покадровый анализ видеозаписей экспериментальных массовых взрывов с привязкой масштаба к реперным точкам на блоке; статистическая обработка результатов наблюдений; сравнение; идеализация; математическое моделирование; верификация модели. Видеорегистрация массовых взрывов произведена на обычные цифровые видеокамеры с обработкой результатов съёмки на ПК.

#### **Научные положения, представляемые к защите:**

1. Увеличение интервалов замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов от 150 мс до 1000 мс приводит к росту интенсивности предразрушения массива в районах расположения взрывных скважин и

обеспечивает повышенное использование энергии взрыва на дробление, что выражается в снижении пылегазовых выбросов и разлета кусков породы.

2. Для минимизации разлета кусков породы при ведении взрывных работ на ограниченных рабочих площадках, в дополнение к существующим способам снижения дальности разлета кусков, целесообразно использовать поскважинное короткозамедленное взрывание зарядов с увеличенными (до 1000 мс) интервалами замедления и устанавливать газопроницаемое укрытие из упругих элементов только над зарядами стартового комплекта с наибольшими выбросами.

**Личный вклад автора** заключается в:

- анализе и обобщении отечественного и зарубежного опыта взрывного рыхления горных пород на ограниченных рабочих площадках и постановке на его основе задач исследования;

- разработке методики оценки интенсивности предразрушения массива при различных интервалах замедления, обработке результатов экспериментальных массовых взрывов, выявлении зависимостей исследуемых параметров от величины интервалов замедления и обосновании решений по минимизации разлета кусков;

- разработке алгоритма динамического расчета газопроницаемого укрытия из упругих элементов с учетом поскважинного инициирования зарядов и его программной реализации.

**Достоверность результатов** обеспечена применением современных методик экспериментальных исследований, воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, полученных различными способами, использованием корректных математических методов, исследованием внутренней сходимости итерационных процессов.

**Реализация результатов работы** осуществлена на предприятии ООО «АВТ-Амур» г. Благовещенска. Научно-методические результаты, полученные в диссертационной работе, используются в учебном процессе Тихоокеанского государственного университета при изучении дисциплины «Технология и безопасность взрывных работ».

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации доложены и получили одобрение на XXVII Международной конференции «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Основы статического и динамического разрушения МКМ 2017» (Санкт-Петербург, 2017 г.); VII Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (Хабаровск, 2018 г.); XX Краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов (Хабаровск, 2018 г.); Международной научной конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (Хабаровск, 2019 г.); XV Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, г. Апатиты и г. Хабаровск, 2021 г.); VI Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, 2021 г.); XVI Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, г. Апатиты и г. Хабаровск, 2022 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 9 печатных работах, в том числе в 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также в прочих научных изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложений. Работа изложена на 151 странице, содержит 69 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников из 162 наименований, 5 приложений.

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н. А. Д. Ловцову, д.т.н., доценту А. В. Лещинскому, д.т.н., профессору Е. Б. Шевкуну за постоянное внимание к работе, ценные советы и поддержку, а также специалистам ООО «АВТ-Амур» за содействие в организации экспериментальных исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проанализированы технические решения, направленные на снижение пылегазовых выбросов из скважин и разлета кусков породы при проведении массовых взрывов на ограниченных рабочих площадках. Выполнен патентно-литературный анализ существующих способов укрытий мест взрыва. Обоснована необходимость учета новых условий взрывания и предразрушения массива горных пород в окрестностях взрывных скважин при выборе технологии взрывного рыхления горных пород на ограниченных рабочих площадках. Определены цели и задачи исследования.

**Во второй главе** представлена методика оценки интенсивности предразрушения массива горных пород при различных интервалах замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов. Исследованы факторы, влияющие на величину ударного импульса, который сообщается укрытию при взрыве скважинного заряда.

**В третьей главе** разработаны математическая модель и алгоритм расчета газопроницаемого укрытия из упругих элементов как динамической конструктивно и геометрически нелинейной системы с учетом поскважинного инициирования зарядов с увеличенными интервалами замедления. Произведено сравнение результатов численного и натурального экспериментов.

**В четвёртой главе** приведены результаты экспериментальных массовых взрывов по определению высоты выбросов из скважин и ударных импульсов, действующих на элементы газопроницаемого укрытия (автошины). Определены интервалы межскважинного замедления, обеспечивающие достаточное время для завершения трещинообразования в зоне предразрушения. Обоснована возможность обеспечения минимального разлета кусков взорванной породы путем увеличения интервалов межскважинного замедления. Для заданных условий ведения работ произведен расчет основных параметров укрытия.

**В заключении** диссертации представлены результаты выполненных исследований в соответствии с поставленными задачами.

**В приложении** представлены экспериментальные данные и акты внедрения результатов исследования.



Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. Увеличение интервалов замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов от 150 мс до 1000 мс приводит к росту интенсивности предразрушения массива в районах расположения взрывных скважин и обеспечивает повышенное использование энергии взрыва на дробление, что выражается в снижении пылегазовых выбросов и разлета кусков породы.**

Сотрудниками кафедры ТТС ТОГУ под руководством А. В. Лещинского предложен графоаналитический метод определения интенсивности предварительного разрушения окрестностей взрывных скважин. Графическое представление зон разрушения и предразрушения позволяет оценить вклад каждого взорванного заряда в предразрушение окрестностей соседних скважин. Накопление микродефектов в зоне предразрушения заряда описывается коэффициентом интенсивности предразрушения  $K_{и}$ , значения которого изменяются от нуля (отсутствие предразрушения) до единицы (полное разрушение породы):

$$K_{и} = \left( \frac{r}{R_i} \right)^2,$$

где  $r$  – радиус зоны разрушения;  $R_i$  – расстояние от оси  $i$ -той скважины до взрываемой.

Наличие зависимости между величиной интервалов межскважинного замедления и интенсивностью предразрушения массива горных пород установлено при производстве экспериментальных массовых взрывов. Разработана методика оценки интенсивности предразрушения массива в окрестностях зарядов по изменению высоты пылегазовых выбросов из скважин без забойки, забоечного материала из скважин с забойкой, а также по ударным импульсам, действующим на свободно уложенные над зарядами автошины.

Для исследования динамики пылегазовых выбросов при производстве массовых взрывов с различными интервалами замедления введен коэффициент подобия  $k$ , который показывает, насколько функция изменения высоты пылегазовых выбросов из первой скважины близка к функции  $i$ -той скважины блока:

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^n H_{1,j} \cdot H_{i,j}}{\sum_{j=1}^n (H_{1,j})^2},$$

где  $n$  – количество кадров видеозаписи, характеризующих динамику выброса из одной скважины;  $H_{i,j}$  – высота выброса из  $i$ -той скважины блока на  $j$ -м кадре.

При взрыве сосредоточенного скважинного заряда рыхления, выполняемого согласно рекомендациям Союзвзрывпрома, ударный импульс, который сообщается укрытию, зависит от длины линии наименьшего сопротивления  $W$  и показателя



действия взрыва  $n$ . Влияние интервалов замедления на снижение ударных импульсов  $S_z^{y\partial}$  учитывается введением коэффициента  $k_s$ :

$$S_z^{y\partial} = s_z^{y\partial} W k_n k_s,$$

где  $s_z^{y\partial}$  – удельный ударный импульс (ударный импульс на единицу глубины заложения заряда);  $k_n$  – коэффициент, учитывающий показатель действия взрыва.

При взрыве удлиненного заряда рыхления ударный импульс также зависит от интервалов замедления, и эта зависимость выявлена экспериментально. Для сравнения ударных импульсов, которые действуют на укрытие при различных интервалах межскважинного замедления, использованы изношенные автомобильные шины, которые укладывали на скважины соосно без применения связей и фиксаторов. Для расчета ударных импульсов по кадрам видеозаписей взрывов определяли время полета автошины от начала движения до момента приземления и максимальную высоту подброса.

Экспериментальные массовые взрывы произведены в карьерах ООО «АВТ-Амур» в период с 2016 по 2020 г. Произведено 6 массовых взрывов (таблица 1) с интервалами замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов от 150 до 1000 мс. Взрывы произведены с применением неэлектрической системы инициирования скважинных зарядов RIONEL. На блоке MB1 скважины диаметром 215 мм и глубиной 11 м расположены по сетке 6,0×6,0 м. Скважины остальных блоков глубиной 5,5 м расположены с шагом 5 м. Зарядка скважин осуществлялась с использованием нитронита Э70 и ПТП-750 для боевиков. На отдельных участках блоков MB1 и MB5 сформирована забойка скважин из бурового шлама. Коэффициент крепости пород  $f = 10-12$ . При многорядном взрывании автошины укладывали на десять скважин, расположенных в конце блока, а при однорядном – на каждую скважину блока.

Таблица 1 – Параметры экспериментальных блоков

Обозначение блока	Количество скважин, шт.	Масса заряда, кг	Расположение скважин	Интервалы замедления, мс	Масса автошины, кг
MB1	221	300	многорядное	150×200	-
MB2	1223	120,75	многорядное	150×200	70
MB3	421	120,75	многорядное	300×400	70
MB4	20	100,75	однорядное	150-400	70
MB5	20	50,75	однорядное	150-400	400
MB6	20	60,75	однорядное	150-1000	400

Экспериментальные данные подтвердили, что зона предразрушения формируется при поскважинном взрывании зарядов с интервалами замедления не менее 100 мс. Отказ системы инициирования зарядов при замедлениях 150 мс привел к снижению интенсивности предразрушения массива и увеличению выброса из устья скважин. При замедлениях 1000 мс отклонения от номиналов в пределах допустимых изготовителем значений оказали наименьшее влияние на исследуемые параметры.

При многорядном взрывании проанализирована динамика выбросов из 26 скважин блока MB1, 83 скважин блока MB2 и 54 скважин блока MB3. Установлено, что с ростом расчетных значений  $K_{и}$  от нуля до единицы значения коэффициентов  $k$  снижаются. Максимальный рост интенсивности предразрушения происходит при взрыве первых зарядов блока, впоследствии трещинообразование замедляется. Ударные импульсы, воздействовавшие на автошины от взрыва зарядов без забойки, при диагональной схеме взрывания с интервалами замедления  $300 \times 400$  мс в среднем в 1,3 раза ниже, чем при схеме  $150 \times 200$  мс. При взрыве горная масса осталась в контуре взорванного блока. Не обнаружены резкие перепады высотных отметок на поверхности развала и негабаритные куски породы.

При однорядном расположении зарядов и интервалах замедления 150-400 мс (рисунок 1) установлено снижение высоты пылегазовых выбросов из скважин без забойки (рисунок 2) и ударных импульсов в процессе развития взрыва.

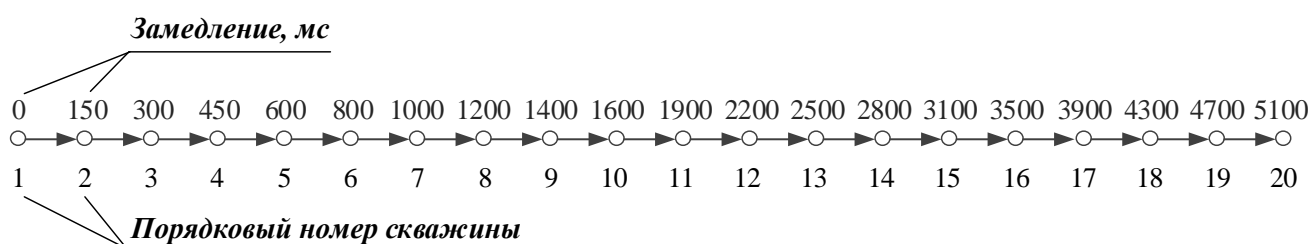


Рисунок 1 – Схема взрывания экспериментальных блоков MB4 и MB5

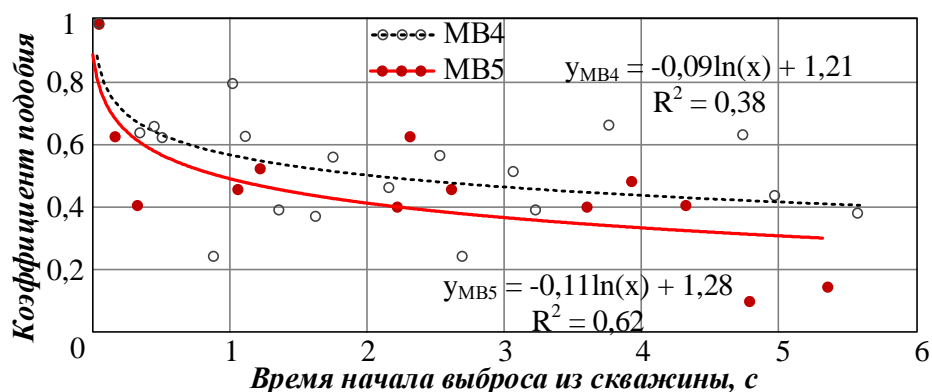


Рисунок 2 – Коэффициенты подобия скважин блоков MB4 и MB5

Ударные импульсы на автошины блока MB4 снизились с  $4,0 \cdot 10^3$  до  $1,4 \cdot 10^3$  кг·м/с, а на автошины блока MB5 с  $7,5 \cdot 10^3$  до  $4,4 \cdot 10^3$  кг·м/с. Ударный импульс на автошину 17 блока MB5 составил  $9,4 \cdot 10^3$  кг·м/с. При взрыве блока MB5 наибольший ударный импульс подействовал на автошину 17, а не на первую автошину блока. Отметим, что блок MB5 расположен вдоль взорванного ранее блока MB4, при взрыве которого произошел отказ внутрискважинного замедлителя скважины 17. В данном случае отказ скважины одного блока привел к более интенсивному выбросу из скважины рядом расположенного блока, т. е. взрыв блока MB4 повлиял на предразрушение окрестностей зарядов блока MB5, подтверждая предположение о том, что предразрушение осуществляется даже на удаленных расстояниях от заряда.

На кадрах видеозаписей массовых взрывов MB4 и MB5 при интервалах замедления от 150 до 400 мс обнаружены мелкие осколки породы от взрыва зарядов

без забойки (рисунок 3, а). В скважинах 4, 5, 9, 10, 14, 15 блока МВ5 (рисунок 1) была сформирована забойка, которая позволила исключить пылегазовые выбросы из скважин (рисунок 3, б). Пять из шести автошин, уложенных на скважины с забойкой, при взрыве практически не отрывались от поверхности уступа. На шестую автошину, уложенную на скважину 15, подействовал ударный импульс, равный  $3,4 \cdot 10^3$  кг·м/с (рисунок 3, в).



Рисунок 3 – Кадры развития массовых взрывов МВ4 и МВ5

Произвести количественную оценку снижения ударных импульсов с увеличением интервалов замедления от 150 мс до 400 мс при последовательном взрыве 20 зарядов блока не удалось. Поэтому при взрыве блока МВ6 замедления были увеличены до 1000 мс, и каждая группа зарядов взорвана отдельно. Расстояние между группами составило 10 м.

При взрыве четырех групп зарядов блока МВ6 с замедлениями 150, 400, 600, 1000 мс выявлено, что интервал замедления 1000 мс является достаточным для завершения трещинообразования в зоне предразрушения. Изменение интенсивности предразрушения при дальнейшем увеличении интервалов замедления не исследовалось, т. к. в настоящее время промышленность не поставляет поверхностные замедлители номиналом выше 200 мс. При интервалах замедления 1000 мс высота выброса из второй скважины группы снизилась примерно на 60% по отношению к первой скважине и незначительно менялась при взрыве следующих зарядов (рисунок 4, а), а разброс значений ударных импульсов минимальный по сравнению с другими взрывами (рисунок 4, б). По результатам массового взрыва МВ6 установлена статистически значимая связь между величиной интервалов замедления в группе и значениями ударных импульсов.

Автошины не препятствуют выходу газов из устья скважины, и снижение высоты подброса автошины свидетельствует об уменьшении высоты и радиуса разлета осколков. Учитывая основной недостаток неэлектрических систем инициирования, который заключается в отклонении времени срабатывания устройств замедления от номинала, при взрыве пяти зарядов без забойки с интервалами замедления 150 мс ударные импульсы снизились в 1,8 раза. При взрыве первого заряда этой группы в ненарушенном массиве горных пород

автошина массой 400 кг достигла поверхности уступа через 8,5 секунд после начала выброса из скважины, при этом максимальная высота ее подброса составила 89 м. При замедлениях 1000 мс высота подброса крайней автошины в группе составила 11 м. Ударный импульс на последнюю автошину группы с замедлениями 1000 мс составил  $5,9 \cdot 10^3$  кг·м/с, что в 1,6 раза меньше, чем ударный импульс на последнюю автошину группы с замедлениями 150 мс.

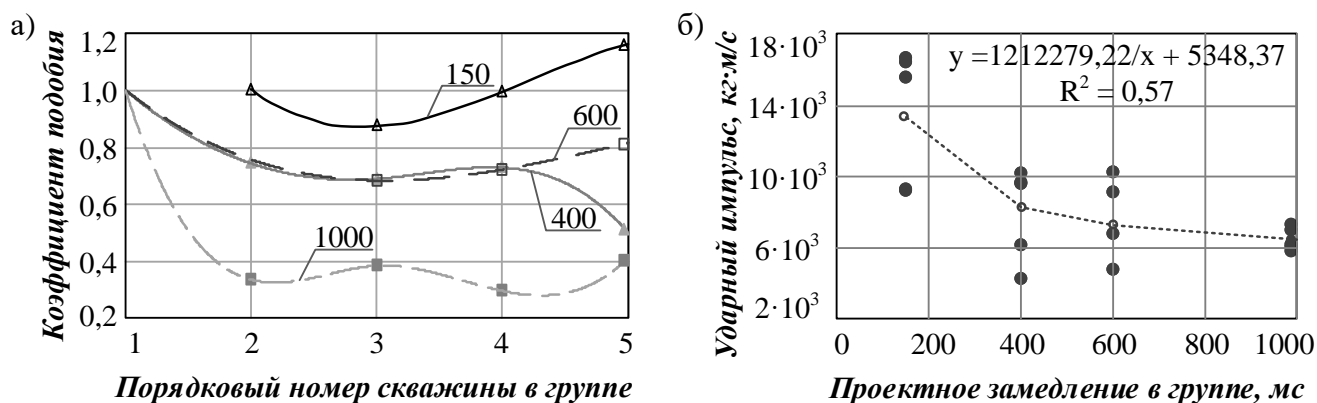


Рисунок 4 – Результаты массового взрыва МВ6:

а) снижение высоты пылегазовых выбросов; б) снижение ударных импульсов

При одинаковой схеме расположения зарядов результаты взрывов при различных интервалах замедления качественно отличаются. При замедлениях 150 мс (рисунок 5, а) наблюдается мощный выброс газовой струи и разрыхленной породы. С увеличением интервалов замедления большее количество энергии уходит на дробление и меньшее – на выброс разрыхленной породы. При интервалах замедления 1000 мс (даже при отсутствии забойки) не наблюдалось разлета осколков горных пород за пределы блока (рисунок 5, б).

Предложенная методика оценки интенсивности предразрушения позволила установить нарастание предразрушения горных пород с увеличением интервалов замедления от 150 до 1000 мс. Минимальный разлет кусков породы зафиксирован в диапазоне от 600 до 1000 мс, что объясняется полным раскрытием трещин в зоне предразрушения и распространением газов взрыва вглубь массива. Таким образом, затрачиваемая на перемещение породы энергия может быть преобразована в энергию дополнительного дробления путем увеличения интервалов замедления.



Рисунок 5 – Кадры развития взрывов блока МВ6 при замедлениях: а) 150 мс; б) 1000 мс

2. Для минимизации разлета кусков породы при ведении взрывных работ на ограниченных рабочих площадках, в дополнение к существующим способам снижения дальности разлета кусков, целесообразно использовать поскважинное короткозамедленное взрывание зарядов с увеличенными (до 1000 мс) интервалами замедления и устанавливать газопроницаемое укрытие из упругих элементов только над зарядами стартового комплекта с наибольшими выбросами.

Техническими правилами ведения взрывных работ на дневной поверхности предусмотрены специальные меры защиты зданий, сооружений и оборудования от разлета кусков взорванной горной массы: рассредоточение зарядов во взрываемом массиве, применение плотной забойки, применение короткозамедленного взрывания для ограничения разлета в определенном направлении. Поверхность взрываемого массива должна быть полностью защищена укрытиями (рисунок 6, а). Предложенные способы снижения дальности разлета кусков разработаны для порядной схемы взрывания зарядов с малыми замедлениями.

При поскважинном взрывании зарядов с увеличенными интервалами замедления наибольший выброс пыли, газов и разрыхленной породы происходит при взрыве зарядов в ненарушенном массиве горных пород. С увеличением интенсивности предразрушения массива горных пород, вызванном увеличением интервалов межскважинного замедления, разброс кусков породы снижается, что позволяет уменьшать площадь укрытия места взрыва. Размеры укрываемой части блока и параметры газопроницаемого укрытия из упругих элементов (масса автошин, диаметр соединительных элементов) необходимо определять в условиях поскважинного взрывания зарядов и снижения ударных импульсов, действующих на укрытие, с увеличением интервалов замедления.



Рисунок 6 – Газопроницаемое укрытие из упругих элементов: а) общий вид; б) схема

Для определения основных параметров укрытия разработаны математическая модель и алгоритм расчета газопроницаемого укрытия как динамической конструктивно и геометрически нелинейной системы. Геометрическая нелинейность вызвана большими перемещениями узлов системы, соизмеримыми с размерами ее элементов (при этом деформации остаются малыми, и работа материала подчиняется закону Гука). Конструктивная нелинейность обусловлена наличием односторонних связей и трения Кулона.



Пространственная динамическая модель представлена сосредоточенными массами, соединенными упругими невесомыми элементами, работающими только на растяжение. Расчетная (рабочая) схема конструкции зависит от действительного состояния односторонних связей (связь "включена" - "выключена"). За включенные связи (рисунок 7) принимаются растянутые соединительные элементы и сжатые опорные связи.

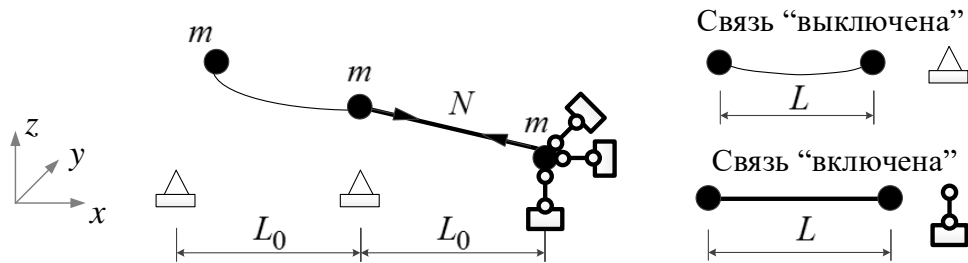


Рисунок 7 – Схема к определению зон контакта и отрыва

Задача сведена к исследованию поведения системы под действием собственного веса и мгновенных импульсов, приложенных в разные моменты времени  $t$  к разным массам. Рассматриваемые виды воздействий и короткие интервалы наблюдения позволили не учитывать в уравнении движения силы демпфирования:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{R}(t)\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{F}(t, x, y), \quad \mathbf{z}(0) = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{z}}(0) = \dot{\mathbf{z}}_0,$$

где  $\mathbf{M}$  – диагональная матрица масс;  $\mathbf{z}(t), \dot{\mathbf{z}}(t), \ddot{\mathbf{z}}(t)$  – соответственно узловые перемещения, скорости и ускорения;  $\mathbf{R}(t)$  – динамическая матрица жесткости системы в момент времени  $t$ ;  $\mathbf{F}(t, x, y)$  – внешнее воздействие.

В силу одностороннего взаимодействия автошин с поверхностью уступа допускаются только неотрицательные вертикальные перемещения  $\mathbf{w}(t)$ :

$$\mathbf{w}(t) \geq 0, \quad \mathbf{z}(t) = (\mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t), \mathbf{w}(t))^T,$$

где  $\mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)$  – горизонтальные перемещения масс (рисунок 8).

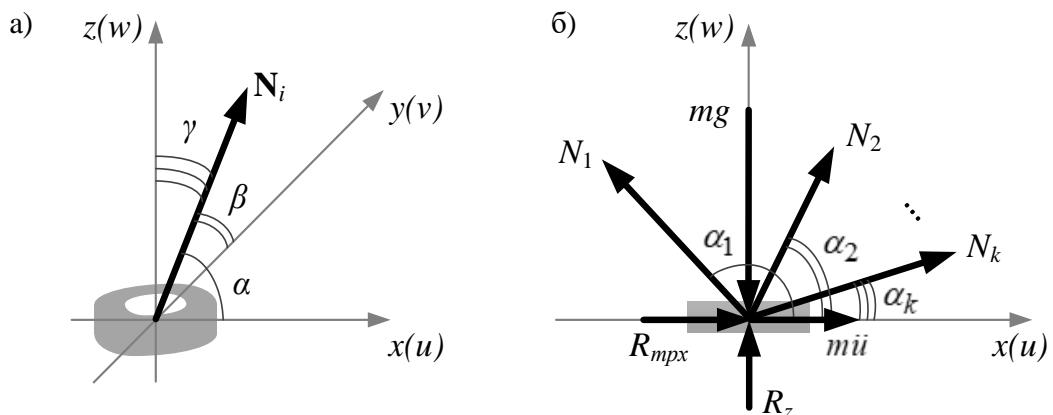


Рисунок 8 – Схема для составления уравнений равновесия: а) система координат; б) силы, действующие на автошину в плоскости xz

Возможны три состояния контакта автошины с поверхностью уступа: состояние отрыва, сцепления и скольжения.

**Состояние отрыва.** При  $w(t) > 0$  все опорные связи выключены из работы:

$$\sum F_x = 0: m\ddot{u} + N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cdot \cos \alpha_2 + \dots + N_k \cdot \cos \alpha_k = 0,$$

$$\sum F_y = 0: m\ddot{v} + N_1 \cos \beta_1 + N_2 \cdot \cos \beta_2 + \dots + N_k \cdot \cos \beta_k = 0,$$

$$\sum F_z = 0: m\ddot{w} + N_1 \cdot \cos \gamma_1 + N_2 \cdot \cos \gamma_2 + \dots + N_k \cdot \cos \gamma_k - mg = 0,$$

где  $N_i$  – величина усилия в  $i$ -м соединительном элементе  $i \in 1 \dots k$ ;  $\cos \alpha_i, \cos \beta_i, \cos \gamma_i$  – направляющие косинусы  $i$ -го элемента по отношению к неподвижной системе осей  $x, y, z$  соответственно;  $m$  – масса автошины.

При контакте автошины с поверхностью уступа ( $w(t) = 0$ ) возникает сила трения  $F_{mp}$ , которая не может превышать предельную силу трения  $F_{np}$ :  $F_{mp} \leq F_{np}$ .

**Состояние сцепления.** Если условие  $F_{mp} < F_{np}$  выполняется:

$$\sum F_x = 0: N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cdot \cos \alpha_2 + \dots + N_k \cdot \cos \alpha_k + R_x = 0,$$

$$\sum F_y = 0: N_1 \cos \beta_1 + N_2 \cdot \cos \beta_2 + \dots + N_k \cdot \cos \beta_k + R_y = 0,$$

$$\sum F_z = 0: N_1 \cdot \cos \gamma_1 + N_2 \cdot \cos \gamma_2 + \dots + N_k \cdot \cos \gamma_k - mg + R_z = 0,$$

где  $R_x, R_y, R_z$  – опорные реакции во введенных связях.

В состоянии сцепления величина силы трения определяется выражением:

$$F_{mp} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

**Состояние скольжения.** Если  $F_{mp} = F_{np}$ :

$$\sum F_x = 0: m\ddot{u} + N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cdot \cos \alpha_2 + \dots + N_k \cdot \cos \alpha_k + R_{mpx} = 0,$$

$$\sum F_y = 0: m\ddot{v} + N_1 \cos \beta_1 + N_2 \cdot \cos \beta_2 + \dots + N_k \cdot \cos \beta_k + R_{mpy} = 0,$$

$$\sum F_z = 0: N_1 \cdot \cos \gamma_1 + N_2 \cdot \cos \gamma_2 + \dots + N_k \cdot \cos \gamma_k - mg + R_z = 0.$$

В состоянии скольжения величина сила трения определяется значениями реакции  $R_{mpx}$  и  $R_{mpy}$ , которые обеспечивают выполнение условия  $F_{mp} = F_{np}$ .

Величина предельной силы трения определяется законом Кулона:

$$F_{np} = \mu \cdot R_z,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

**Учет односторонних соединительных элементов.** В процессе деформирования системы о состоянии односторонней связи можно судить по ее текущей длине  $L$  (рисунок 7). Если текущая длина элемента, определяемая координатами его узлов, меньше начальной  $L < L_0$ , то односторонний соединительный элемент выключен из работы, и в приведенных выше уравнениях равновесия не учитывается.

Математическое моделирование выполнено с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений. На основе предложенной модели разработан алгоритм динамического расчета газопроницаемого укрытия, который реализован в вычислительной программе, зарегистрированной в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности. Последовательность основных операций приведена в таблице 2.



Таблица 2 – Последовательность расчета газопроницаемого укрытия

<p><b>А. Ввод данных.</b></p> <p><b>Б. Пока выполняется условие <math>t &lt; T</math> (<math>T</math> – время наблюдения):</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>t = t + \Delta t</math>.</li> <li>2. Определяется текущая рабочая схема конструкции, соответствующая измененному деформированному состоянию.</li> <li>3. Если рабочая схема изменилась по сравнению с предыдущим шагом, то для поиска момента смены рабочих схем <math>t_c</math> внутри шага и вычисления реакции системы <math>\mathbf{z}_{t_c}</math>, <math>\dot{\mathbf{z}}_{t_c}</math>, <math>\ddot{\mathbf{z}}_{t_c}</math> реализуется метод бисекции, после выполнения которого шаг интегрирования временно принимается равным <math>\Delta t = t - t_c</math>.</li> <li>4. С учетом текущей рабочей схемы конструкции реализуется шаг Ньюмарка и вычисляются приближенные значения <math>\mathbf{z}_{t+\Delta t}</math>, <math>\dot{\mathbf{z}}_{t+\Delta t}</math>, <math>\ddot{\mathbf{z}}_{t+\Delta t}</math>.</li> <li>5. Приближенное решение уточняется с помощью метода Ньютона-Рафсона. На каждой итерации до вычисления внутренних усилий проверяется условие <math>L &lt; L_0</math>.</li> <li>6. Возврат к первоначальному шагу интегрирования <math>\Delta t</math>.</li> </ol>
---

Адекватность математической модели подтверждена сравнением с результатами эксперимента, проведенного с использованием газопроницаемого укрытия при сооружении выемки на строящейся федеральной автодороге №58 «Амур» в 2007 году. Анализ результатов расчета показал, что при разработке математической модели учтены основные параметры системы, отражающие ее поведение при различной последовательности инициирования зарядов.

Разработанный алгоритм используется при выборе технологии безразлетного взрывного рыхления горных пород под газопроницаемым укрытием из упругих элементов. Расчет основных параметров укрытия произведен на примере массового взрыва МВ5. В подобных условиях (рисунок 3, б, в) при наличии прочной забойки скважин укрытие должно быть установлено как минимум на первые три скважины блока, дающие наибольший выброс. Автошины укладываются на скважины соосно. Схема укрытия представлена на рисунке 6, б. Согласно результатам расчета при воздействии на центральную автошину массой 400 кг ударного импульса равного 3543,6 кН·м, что соответствует высоте подброса свободной автошины на высоту 4 м, высота ее подброса в составе укрытия составила 0,4 м, время подъема – 150 мс, диаметр соединительных элементов – 17 мм. Величина горизонтальных смещений соседних автошин не превысила значения 0,05 м.

Производство экспериментальных взрывов требует значительных затрат, а соблюдение условий подобия в реальном массиве горных пород затруднено, поэтому параметры укрытия и размеры укрываемой части блока должны определяться с учетом конкретных условий производства работ (например, горно-геологических условий, средств инициирования зарядов, способов зарядки скважин, особенностей применяемого укрытия) и действующих на площадке ограничений. В результате проведенного исследования разработаны основы технологии безразлетного рыхления горных пород с учетом предразрушения массива в окрестностях взрывных скважин. Реализация этих основ в конкретных условиях является задачей дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований решена актуальная научная задача по обоснованию параметров и технологии взрывного рыхления горных пород, обеспечивающих минимальный разлет кусков взорванной породы за счет увеличения интенсивности предразрушения массива в окрестностях зарядов, что имеет важное значение для повышения эффективности и безопасности процессов разрушения горных пород.

**Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:**

1. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта взрывного рыхления горных пород на ограниченных рабочих площадках выделены основные способы снижения разлета кусков взорванной породы: уменьшение массы заряда, повышение прочности забойки, короткозамедленное взрывание, применение неэлектрических и электронных систем инициирования, использование защитных укрытий. Технология безразлетного взрывного рыхления скальных пород под газопроницаемым укрытием из упругих элементов показала наиболее высокую надежность и экономическую эффективность в сравнении с другими способами укрытия мест взрыва.

2. По результатам экспериментальных массовых взрывов установлено увеличение интенсивности предразрушения массива в окрестностях скважинных зарядов при увеличении интервалов замедления от 150 до 1000 мс, что выражено в снижении высоты пылегазовых выбросов и ударных импульсов, воздействующих на свободно уложенные над зарядами автошины. При взрыве четырех групп зарядов с интервалами замедления 150, 400, 600, 1000 мс выявлено, что интервал в 1000 мс является достаточным для завершения трещинообразования в зоне предразрушения.

3. Наибольшие ударные импульсы действуют при взрыве зарядов в ненарушенном предшествующими взрывами массиве горных пород. При взрыве группы из пяти зарядов без забойки с интервалами замедления 150 мс ударные импульсы на автошины массой 400 кг снизились в 1,8 раза, а при увеличении интервалов до 1000 мс – еще в 1,6 раза. Значения коэффициентов, уменьшающих величину ударного импульса, соответствуют заданным условиям ведения работ и могут меняться в зависимости от горно-геологических условий.

4. Разработаны математическая модель и алгоритм расчета газопроницаемого укрытия как динамической конструктивно и геометрически нелинейной системы. В результате расчета определяются перемещения автошин и внутренние усилия в соединительных элементах укрытия при заданной последовательности инициирования зарядов, что позволяет подобрать параметры укрытия, обеспечивающие его эффективную работу. Адекватность предложенной модели подтверждена сравнением с результатами натурального эксперимента.

5. Снижение высоты подброса автошин свидетельствует об уменьшении высоты и радиуса разлета осколков. При массе заряда 50,75 кг и замедлениях от 150 мс до 400 мс пять из шести автошин, уложенных на скважины с забойкой, при

взрыве практически не отрывались от поверхности уступа. При интервалах замедления 1000 мс и массе заряда 60,75 кг (даже при отсутствии забойки) не наблюдалось разлета кусков породы за пределы блока. Поскважинное взрывание зарядов с увеличенными интервалами замедления, в дополнение к существующим способам снижения дальности разлета кусков, позволяет уменьшать размеры укрываемой части блока. Параметры укрытия и размеры укрываемой части блока должны определяться с учетом конкретных условий производства работ, величины зоны предразрушения и существующих на площадке ограничений. Развитие технологии безразлетного рыхления горных пород под газопроницаемым укрытием в конкретных условиях является задачей дальнейших исследований.

6. Внедрение результатов диссертационной работы на предприятии ООО «АВТ-Амур» в Амурской области позволило сократить затраты времени на подготовительно-восстановительные мероприятия исключением демонтажа ЛЭП и снижением расстояния перегона техники в пределах опасной зоны при производстве 124 массовых взрывов.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

***Статьи в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий», рекомендованных ВАК РФ:***

1. Лещинский, А. В. Определение ударных импульсов на газопроницаемые укрытия при увеличенных интервалах замедления / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун, О. А. Костюнина // Взрывное дело. – 2021. – № 130/87. – С. 80-93.

2. Лещинский, А. В. Влияние новых условий взрывания горных пород на проектирование газопроницаемых укрытий / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун, О. А. Костюнина, А. Р. Вершинина // Маркшейдерия и недропользование. – 2021. – № 2(112). – С. 33-37.

3. Костюнина, О. А. Оценка интенсивности предразрушения массива скальных пород при увеличенных интервалах замедлений / О. А. Костюнина // Взрывное дело. – 2021. – № 132/89. – С. 88-107.

4. Костюнина, О. А. Влияние интервалов замедлений на разлет осколков горных пород / О. А. Костюнина, Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. № 12–1. – С. 107–120.

***Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:***

5. Программа для расчета трансформируемого газопроницаемого укрытия взрывных скважин : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021612663 РФ / О. А. Костюнина, А. Д. Ловцов : правообладатель Тихоокеан. гос. ун-т. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.02.2021.

***В прочих научных изданиях:***

6. Kostyunina, O. A. Dynamic analysis of gas permeable blasting mat as geometrically nonlinear system with unilateral constraints / A. D. Lovtsov, O. A. Kostyunina // Procedia Structural Integrity. – 2017. – № 6C. – P. 122-127.

7. Костюнина, О. А. Динамическая пространственная модель газо-проницаемого трансформируемого укрытия взрывных скважин / О. А. Костюнина // Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XX краевого конкурса молодых ученых и аспирантов – г. Хабаровск, 2018 г. – С. 225-231.

8. Internal forces analysis of gas permeable shelter with emphasis on short-delay blasting / A. Leshchinskiy, E. Shevkun, A. Lovtsov, O. Kostyunina // VII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources» : Web of Conferences. – 2018. – № 56. – P. 01014.

9. Blasting strong rocks in the constrained conditions / A. Piotrovich, A. Leshchinsky, E. Shevkun, O. Kostyunina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 403. – P. 012212