

*На правах рукописи*



**СЕЛИН Иван Юрьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ ПУТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СТОЙКОСТИ ГАЗОПОРОВОЙ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ  
ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ  
К ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ»).

**Научный руководитель –** доктор технических наук, доцент  
**ЖАБКО Андрей Викторович**

**Официальные оппоненты:** **КАЛЯКИН Станислав Александрович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительство зданий, подземных сооружений и геомеханики» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донецкий национальный технический университет» (ФГБОУ ВО «ДонНТУ»);

**МАСЛОВ Илья Юрьевич**  
кандидат технических наук, директор Автономной некоммерческой научной организации «Научно-исследовательский институт технологий и безопасности взрывных работ» (АННО НИИ ТБВР).

**Ведущая организация:**  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН).

Защита диссертации состоится «23» июня 2026 г.  
в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.423.02  
при ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» по адресу:  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» и на официальном сайте  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Уральский государственный горный университет» (<https://www.ursmu.ru/selin-ivan-yurevic>)

Автореферат разослан «29» апреля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



А. Е. Пелевин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время на подземных рудниках страны расширяется применение бестарных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) с химической газогенерацией. Этому способствуют как доступная цена и высокие потребительские свойства данных ЭВВ, так и разработанные технические средства зарядания скважин (шпуров) в подземных условиях.

При химической газогенерации эмульсии в ее объем при зарядании вводятся газогенерирующие вещества, которые в результате реакции или при разложении выделяют газ, который в виде пузырьков распределяется по всему объёму эмульсии. Насыщенная пузырьками газа эмульсия приобретает взрывчатые свойства и является ЭВВ, сенсibilизированным этими пузырьками. Применение данных ЭВВ обеспечивает не только высокий уровень безопасности, так как заряжаемая эмульсия приобретает свойства взрывчатого вещества, будучи уже размещенной в скважине (шпуре), но и наименьшие экономические затраты на сенсibilизацию эмульсии для придания ей взрывчатых свойств.

Условия подземной добычи полезных ископаемых вносят специфику в технологию взрывных работ, связанную с широким применением шпуровых зарядов при проходке выработок и веерных зарядов при отбойке руд, при которых расстояние между зарядами существенно меньше, чем между скважинными зарядами при открытых горных работах. Сближение зарядов ЭВВ приводит к значительному динамическому воздействию взрывов зарядов (групп зарядов) ВВ на еще не детонировавшие заряды в смежных скважинах (шпурах) и способно приводить к снижению в них скорости детонации, а в отдельных случаях – к потере ЭВВ детонационной способности.

Анализ работ, посвященных изучению динамических воздействий на заряды ЭВВ, показал, что в настоящее время, несмотря на несомненные успехи в изучении данного вопроса, при разработке технологии применения бестарных ЭВВ с химической газогенерацией при подземных работах возникают сложности, обусловленные недостаточно разработанными:

- физико-математическими моделями, описывающими влияние динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационные способности заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающими не только плотность, но и вязкость ЭВВ;
- воздействием взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением.

Значительные объемы сульфидных руд, являющихся важнейшими источниками никеля, кобальта, меди, цинка, свинца и других ценных металлов, добываются в России подземным способом. Безопасная технология добычи данных руд с применением бестарных ЭВВ важна и востребована горной промышленностью нашей страны. Анализ научно-технической литературы показал, что применение ЭВВ с пероксидной газогенерацией (в качестве газогенерирующего вещества используется пероксид водорода) способствует повышению безопасности взрывных работ в сульфидных рудах, так как для создания данных ЭВВ используется матричная эмульсия с  $pH > 6$ . Применение ЭВВ с нейтральной и слабощелочной реакцией способствует снижению активности взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами и повышает безопасность их применения.

Учитывая целесообразность применения ЭВВ с пероксидной газогенерацией на подземных горных работах при добыче сульфидных руд, необходимо обеспечить сохранение их способности к детонации при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов). Поэтому разработка технологии применения данных ЭВВ, при которой обеспечивается сохранность их детонационной способности при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов, является важной и актуальной научно-технической задачей.

**Цель работы:** совершенствование технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой заряды ЭВВ сохраняют детонационную способность при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Идея работы** заключается в управлении рецептурно-технологическими характеристиками ЭВВ и параметрами размещения зарядов ЭВВ в массиве горных пород для обеспечения их надежной детонации при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Объектом исследования** является технология взрывных работ на основе применения зарядов бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией.

**Задачи исследования:**

- разработка физико-математической модели влияния динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационную способность заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающей как плотность и пористость, так и вязкость ЭВВ;

- разработка методики экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением;

- разработка эффективной технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, обеспечивающей сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов).

**Методы исследования.** В работе использован комплексный метод исследования, включающий анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных о влиянии ударных воздействий на ухудшение детонационных способностей ЭВВ, аналитические исследования влияния динамических воздействий на изменение параметров бестарных ЭВВ, находящихся в скважинах (шпурах) и сенсibilизированных пузырьками газа, теоретическое изучение особенностей ударного воздействия на массив при взрыве веерного заряда, полевые и опытно-промышленные исследования, технико-экономическая оценка результатов исследования.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- сохранение детонационной способности заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшихся зарядов зависит как от физико-механических свойств взрываемых пород, условий взрывания, плотности ЭВВ, так и от вязкости ЭВВ;

- методика экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением;

- технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией и специальных средств механизации зарядных работ, при использовании которых обеспечивается сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Научная новизна работы:**

- впервые установлено, что сохранение детонационной способности зарядом ЭВВ, сенсibilизированным пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшихся зарядов зависит не только от плотности и пористости ЭВВ, но и от его вязкости;

– показано, что наблюдается существенная неравномерность в скоростях смещения среды в массиве пород при взрыве веерного заряда. Максимальная скорость смещения более чем в 2,5 раза превышает ее минимальное значение;

– разработан способ моделирования динамического воздействия опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер при помощи шпуровых зарядов.

#### **Практическая значимость работы:**

– разработана технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой обеспечивается сохранность их детонационной способности при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов);

– разработана методика экспериментальной проверки устойчивости ЭВВ к динамическим воздействиям со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Достоверность научных положений**, результатов и выводов обеспечивается применением апробированных методов исследования, надежностью исходных данных, хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора** состоит в проведении аналитических и опытно-промышленных исследований, разработке методик проведения экспериментов, обработке результатов исследований, обобщении и технико-экономической оценке полученных результатов.

**Реализация работы.** Результаты исследований использованы при ведении взрывных работ на ООО «Яковлевский ГОК».

**Апробация результатов работы.** Результаты исследований докладывались на XXV Международной научно-практической конференции АНО «НОИВ» по горному и взрывному делу (9–13 сентября 2024 г., Каспийск, Дагестан), на научно-производственном семинаре Ассоциации «Взрывники Урала» и ИГД УрО РАН по буровзрывным работам на базе ЕВРАЗ КГОК (15-16 октября 2024 г., Качканар, Свердловская обл.), на Научном совете РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрыва (г. Москва, 6 февраля 2025 г.), на Международном симпозиуме «Неделя горняка – 2025» (3–7 февраля 2025 г., Москва), на XIV Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» (3-4 апреля 2025 г., Екатеринбург), на Международной научной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (2 июля 2025 г., Пекин, КНР), на технических совещаниях по повышению эффективности взрывных работ на ООО «Яковлевский

ГОК», ОАО «Высокогорский ГОК», АО «Комбинат КМАруда» и других горнодобывающих предприятиях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 работы в рецензируемых научных журналах и изданиях, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, включая 1 работу в научном издании категории К1 и 2 работы – в издании категории К2.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 133 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 31 таблицу, список литературы из 156 наименований и приложение.

Автор выражает искреннюю благодарность за ценные советы и научно-методическую помощь в процессе работы над диссертацией научному руководителю д.т.н., доц. Жабко А. В., а также д.т.н. Горинову С. А. и д.э.н. Вяткину Н. Л. за полезные обсуждения результатов исследований. Глубокая признательность специалистам ООО «РудХим» Клемичеву А. В. и Юрченко М. С., оказавшим содействие и помощь при проведении промышленных и полигонных экспериментов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, изложены научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** проведен анализ научно-технической литературы, посвященной эмульсионным взрывчатым веществам (ЭВВ), их испытаниям на стойкость к внешним воздействиям и особенностям применения при взрывании сульфидных руд. Отмечена значительная роль работ российских ученых Акинина Н. И., Белина В. А., Викторова С. Д., Горинова С. А., Державца А. С., Иляхина С. В., Козырева С. А., Кутузова Б. Н., Лурье Б. А., Парамонова Г. П., Петрова Е. А., Полетаева Н. Л., Рыльниковой М. В., Соснина В. А., Маслова И. Ю. и др., а также иностранных исследователей Куприна В. П., Коваленко И. Л., Син Хуа Ся, У Чао и др. в разработке специальных видов ЭВВ для добычи сульфидных руд.

Проанализированы экспериментальные данные и теоретические представления о влиянии волны напряжений, вызванной опережающими взрывами смежных скважинных (шпуровых) зарядов, на снижение детонационных способностей зарядов ЭВВ, в развитие которых внесли вклад российские ученые С. А. Калякин, С. В. Козырев, В. А. Фо-

кин и др., а также иностранные исследователи Р. Мендос, П. Мертуски, С. Ни, Ф. Сумия, Р. Янг и др.

Показано, что при ведении взрывных работ в сульфидных рудах в подземных условиях значительный интерес представляет применение бестарных ЭВВ с пероксидной газификацией. На основе литературного обзора были сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлены разработанная физико-математическая модель воздействия волны напряжений от опережающих взрывов на детонационные способности скважинных зарядов ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, и экспериментальные исследования влияния динамического воздействия на заряд ЭВВ в зависимости от физико-механических свойств горных пород, расстояния между зарядами и динамической вязкости ЭВВ. Показана корректность расчетных и экспериментальных данных.

Положим, что на вертикальную скважину, расположенную в горной породе и заполненную ЭВВ, сенсibilизированным пузырьками газа, падает ударная волна, фронт которой параллелен оси скважины. Ударная волна в породе вызывается опережающим взрывом смежного скважинного заряда ЭВВ.

Рассмотрим сечение скважинного заряда плоскостью, перпендикулярной оси скважины (рисунок 1а).

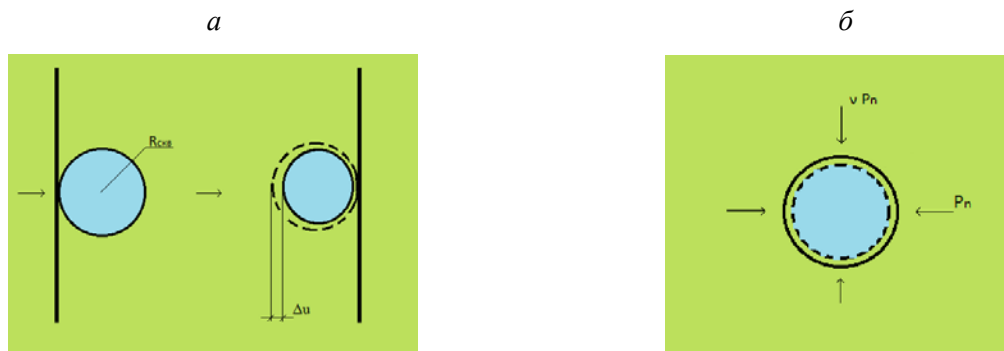


Рисунок 1 – Схема воздействия ударной волны на сенсibilизирующий пузырек (а) и расчетная схема (б)

При падении ударной волны, распространяющейся в породе, на скважинный заряд ЭВВ, в ЭВВ тоже возникает ударная волна, обусловленная воздействием на него резко смещающихся стенок скважины.

Тогда, полагая, что порода находится в плоскодеформированном состоянии, величина радиального смещения стенок скважины при динамическом нагружении может быть определена по формуле (А. М. Ионов, Г. А. Максимов)

$$\Delta u = 2(1 + \mu)P_n R_{\text{СКВ}} E^{-1} (1 - P_3 P_n^{-1}), \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона породы;  $E$  – модуль упругости породы, Па;  $R_{\text{СКВ}}$  – радиус скважины, м;  $P_n$  – фронтальное напряжение в ударной волне в породе, Па;  $P_3$  – фронтальное напряжение в ударной волне в ЭВВ, Па.

Расчеты показывают, что относительная глубина проникновения ударной волны сжатия вглубь скважинного заряда ЭВВ за время охвата рассматриваемого сечения скважины волной напряжения составит лишь 2 % от радиуса заряда, что обусловлено малым значением скорости звука в эмульсии, насыщенной пузырьками газа, по сравнению со скоростью звука в породе. Следовательно, можно считать, что скважина с содержащимся в ней ЭВВ подвергается действию мгновенно приложенной сжимающей нагрузки (рисунок 1б), где  $\nu$  – коэффициент бокового распора.

Теоретически показано, что длина сходящейся волны  $\lambda$  значительно превосходит размеры пузырьков, в среднем равные 0,1 мм и менее, и что пузырек сжимается длинноволновым импульсом давления, создаваемым в ЭВВ цилиндрической сходящейся волной.

Согласно закономерностям, описывающим сходящиеся цилиндрические волны, по мере приближения волны к оси заряда скорость ее возрастает, как показано на рисунке 2 справа.



Рисунок 2 – Сходящаяся цилиндрическая ударная волна в скважинном заряде ЭВВ ( $R/R_{\text{СКВ}}$  – относительный радиус)

Под действием этой ударной волны происходят изменения размеров и количества пузырьков, воспринимающих инициирующий импульс, что находит отражение в снижении детонационных способностей ЭВВ.

Анализ научно-технической литературы показывает, что возможна реализация различных сценариев поведения газовых пузырьков, сенсibiliзирующих ЭВВ, а именно, пузырьки:

- сливаются между собой;
- разбиваются на мелкие пузырьки;

– схлопываются в режиме гидродинамического течения эмульсии при заполнении пузырька;

– частично или полностью заполняются в режиме пластического течения эмульсии при заполнении пузырька.

В диссертации выполнены исследования возможности реализации различных сценариев поведения пузырьков при распространении ударной волны в заряде ЭВВ.

Расчеты, выполненные с привлечением гидродинамических критериев Бошнятова (слияние пузырьков), Нигматулина (разбиение пузырьков), Забабахина (схлопывание пузырьков), показали, что в практически значимых случаях не все возможные сценарии реализуются. Это представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Реализация сценариев поведения пузырьков

Сценарий	Реализация
Слияние пузырьков	Не реализуется из-за высокой динамической вязкости эмульсии
Разбиение пузырьков	При расстоянии между скважинами 12–16 радиусов заряда
Гидродинамическое схлопывание	При расстоянии между скважинами 6–8 радиусов заряда
Пластическое затекание	Возможно как полное, так и частичное заполнение пузырька

При этом наибольший интерес вызывает режим частичного заполнения пузырька, так как в этом случае возникает возможность сохранения у ЭВВ, подвергнувшегося ударному воздействию, способности к детонации.

Для того чтобы в пузырек, расположенный на глубине  $h$  заряда ЭВВ, эмульсия затекала в режиме пластического течения, необходимо выполнение условия  $a_{oh} < 8,4\eta(\rho_3 P_3)^{-0,5}$  (Забабахин Е. И.). Здесь  $\rho_3$  – плотность эмульсии, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости эмульсии, Па·с;  $a_{oh}$  – начальный радиус пузырька на глубине  $h$ , м.

Для того чтобы пузырек на глубине  $h$  и на удалении  $R$  от оси заряда мог после инициирующего воздействия создать «горячую точку», необходимо, чтобы его схлопывание происходило в гидродинамическом режиме (Горинов С. А.). Для этого требуется выполнение условия  $a_h(R) > 8,4\eta(\rho_3 P_{дет})^{-0,5}$ , где  $P_{дет}$  – начальное детонационное давление (~ 8–10 ГПа).

Показано, что для сохранения детонационной способности ЭВВ после динамического воздействия на него размер пузырька на удалении  $R$  от оси заряда на глубине  $h$  должен удовлетворять условию:

$$8,4\eta(\rho_3 P_3)^{-0,5} > a_{oh} > 8,4\eta\left(1 - 0,119 \cdot I_{oh} \eta^{-1} (R_{скв} R^{-1})^{0,5}\right)^{-2} (\rho_3 P_{дет})^{-0,5}, \quad (2)$$

где  $I_{oh}$  – удельный импульс давления на поверхности заряда на глубине  $h$ , кг/(м·с).

Кроме условий, определяющих размеры пузырьков, необходимо учитывать существование минимального значения пористости ЭВВ  $\beta_{krit}$ , ниже которого детонация не происходит ввиду низкой плотности «горячих точек»,  $\beta_{krit} \approx 0,04$  (Жученко Е. И.).

Условие, что пористость ЭВВ после динамического воздействия будет не ниже минимальной, в соответствии с (1), запишется в виде

$$a_h(R) > a_o (\beta_{krit} \beta_o^{-1})^{\frac{1}{3}} [(1 - \beta_o)(1 - \beta_{krit})^{-1}]^{\frac{1}{3}} \approx 0,347 a_o [\beta_o (1 - \beta_o)^{-1}]^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где  $a_o$  – радиус пузырька при атмосферном давлении, м;  $\beta_o$  – начальная пористость ЭВВ.

Соотношения (2), (3) позволяют оценить влияние динамических воздействий на способность к детонационному разложению ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, и выработать технологические решения по обеспечению сохранения способности ЭВВ к детонации в этих условиях.

Верификация полученных теоретических результатов осуществлялась в условиях подземного рудника ООО «Яковлевский ГОК», где представилась возможность проведения опытного взрывания шпуровых зарядов ЭВВ с пероксидной газогенерацией в самых различных условиях.

Микроскопические наблюдения показали, что ЭВВ с пероксидной газификацией вида «Аргунит РХ» имеют характерный размер газовых сенсibilизирующих пузырьков 300–500 мкм.

Были выполнены опыты по изучению влияния физико-механических свойств горных пород, расстояния между зарядами ЭВВ и вязкости ЭВВ на детонационные свойства.

Опыты заключались в выполнении взрывов шпуровых зарядов различной плотности заряжания в забоях, представленных железистыми кварцитами, хлорит-серицитовыми железистыми сланцами, хлорит-лимонит-мартитовой плотной рудой и мартит-железно-слюдковой рыхлой рудой. В ходе каждого отдельного опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились по два шпура диаметром 51 мм и длиной 4000 мм на заданном расстоянии между осями шпуров. Оба шпура заряжались на 1500 мм ЭВВ. Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш.

При проведении опыта первоначально взрывался «активный заряд», затем с замедлением 50–100 мс взрывался «испытываемый заряд». В последнем измерялась скорость детонации. Измерения осуществлялись при помощи приборов «VOD Vate» и «HandyTrap», позволяющим непрерывно измерять величину сопротивления электрической цепи аксиального датчика-проводника, проложенного вдоль заряда ЭВВ. Приборы записывают

процесс взрыва в виде цифрового файла, который впоследствии расшифровывается на компьютере посредством специальной программы, давая зависимость пути, пройденного детонационной волной, от времени. Перед выполнением указанного опыта проводился взрыв одиночного заряда и измерялась скорость детонации в заряде, не подверженном динамическому воздействию до взрыва. В таблицах 2–4 приведены некоторые характерные результаты измерений и расчеты скорости детонации зарядов.

Опыты подтвердили, что детонационные способности заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшегося заряда зависят как от физико-механических свойств взрывае- мых пород, условий взрывания, плотности ЭВВ, так и от вязкости ЭВВ. При расчете скорости детонации (см. таблицы 2, 3) исходили из того, что в «испытуемом заряде» ЭВВ после динамического воздействия часть заряда теряла способность к детонации.

Тогда, учитывая общее уменьшение тепловыделения из-за пассивации части заряда при его взрыве, имеем  $D/D_0 \approx \sqrt{D}$ , где  $D_0, D$  – скорости детонации заряда ЭВВ в кварците при отсутствии динамического воздействия и при проведении эксперимента, соответственно;  $D$  – доля заряда ЭВВ, способного к детонации (определялась расчетом, основанным на полученных теоретических результатах).

Таблица 2 – Значения экспериментальных и расчетных скоростей детонации ЭВВ в различных породах при  $\bar{r} = 30$  ( $\bar{r}$  – относительный радиус)

Показатели		Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
Среднее значение крепости по М. М. Протодьяконову		8	4	3	1
Плотность ЭВВ: 1,28–1,31 г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации (эксперим.), м/с	4280	4200	4150	4020
	Доля заряда ЭВВ, способного к детонации	1,00	0,96	0,94	0,87
	Скорость детонации (расчет), м/с	4250	4164	4121	3964

Таблица 3 – Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при различном расстоянии между шпурами (плотность 1,20–1,22 г/см<sup>3</sup>)

Показатель	Железистые кварциты			Хлорит-серицитовые железистые сланцы			Мартит-железно-сланцевая рыхлая руда		
	относительный радиус			относительный радиус			относительный радиус		
	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Скорость детонации (опыт), м/с	4380	4680	4680	4130	4570	4650	Не детонирует	3750	4350
Доля заряда ЭВВ, способного к детонации	0,9	1	1	0,8	0,96	1	–	0,66	0,89
Скорость детонации (расчет), м/с	4411	4650	4650	4159	4556	4650	–	3778	4387

Таблица 4 – Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах и при различной вязкости эмульсии (плотность ЭВВ 1,10–1,12 г/см<sup>3</sup>, относительное расстояние –  $\bar{r} = 30$ )

Вязкость эмульсии, Па·с	Показатель	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-сланцевая рыхлая руда
40	Скорость детонации, м/с	4980	4970	4900	4850
60	Скорость детонации, м/с	4980	4940	4800	4610
90	Скорость детонации, м/с	4980	4310	4160	3900

Анализ полученных результатов показал, что наблюдается соответствие между экспериментальными данными и результатами теоретических расчетов по предложенной физико-математической модели описания воздействия волны напряжений от опережающего взрыва скважинного заряда на детонационные способности расположенных в смежном заряде ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа.

Таким образом, теоретически и экспериментально доказано, что сохранение детонационной способности зарядом ЭВВ, сенсibilизированным пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшихся зарядов зависит как от

физико-механических свойств взрывааемых пород, условий взрывания, плотности ЭВВ, так и от вязкости ЭВВ. Таким образом, **первое научное положение доказано.**

В **третьей главе** рассмотрена экспериментальная оценка возможности применения ЭВВ с пероксидной газогенерацией при массовой отбойке руд веерными зарядами.

Экспериментальная оценка стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, при шпуровом взрывании не вызывает сложностей. В забое бурятся два параллельных между собой шпура. Шпуры заряжаются и взрываются с замедлением друг от друга. При этом производится измерение скорости детонации в обоих шпурах. Если в заряде, взрываемом последним, скорость детонации не уменьшилась, то считается, что при данном расстоянии между зарядами ухудшения сенсibilизации не происходит.

Сложности возникают при экспериментальной оценке стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, в случае их использования в веерных зарядах. Прямая аналогия с экспериментальной оценкой стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, при шпуровом взрывании затратна и может привести к аварийной ситуации, когда «испытываемый веер» не сдетонирует.

Для моделирования действия взрыва веерного заряда на смежный веер была предложена ранее описанная схема одновременного взрыва двух параллельных шпуровых зарядов, удаленных друг от друга на такое расстояние, при котором скорость смещения стенок «испытываемого шпура» была бы равна максимальной скорости смещения породы при взрыве веерного заряда на удалении, равном линии наименьшего сопротивления (л.н.с.) веера.

Оценка величины начальной скорости смещения в массиве пород при взрыве веерного заряда осуществлялась методом эквивалентных зарядов, позволяющим определять для системы зарядов ВВ величину эквивалентного ей по воздействию на среду сосредоточенного заряда.

Так как взрывы выполняются в одинаковых средах, то для соблюдения подобия необходимо выполнение условия равенства начальных скоростей смещения стенок шпура и скважины. Расчеты, учитывающие неравномерность распределения ВВ в плоскости веера, показали, что данное условие выполняется при

$$W_{\text{веер}} = W_{\text{шпур}} \left( \beta^* \gamma_{\text{шпур}} q_{\text{шпур}} \left( \beta^* \gamma_{\text{веер}} q_{\text{веер}} \right)^{-1} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

где  $q_{\text{шпур}}$  и  $q_{\text{веер}}$  – удельная теплота взрыва шпурового и веерного зарядов, соответственно, Дж/кг;  $\gamma_{\text{шпур}}$  и  $\gamma_{\text{веер}}$  – линейная плотность шпурового и скважинного зарядов, соответственно, кг/м;  $W_{\text{шпур}}$  и  $W_{\text{веер}}$  – расстояние между осями шпуров и л.н.с. веерного заряда, соответствен-

но;  $\beta^* = 1,285$  и  $\beta_{\text{всер}}^* \approx 3,2$  – максимальные значения коэффициентов приведения шпурового и веерного зарядов к эквивалентному сосредоточенному заряду, соответственно.

При использовании в «активном» и «испытуемом» зарядах ЭВВ одинаковой плотности, в соответствии с формулой (4), имеем

$$W_{\text{шпур}} = 0,63W_{\text{всер}} d_{\text{шпур}} D_{\text{шпур}} (d_{\text{всер}} D_{\text{всер}})^{-1}, \quad (5)$$

где  $d_{\text{шпур}}$  и  $d_{\text{всер}}$  – диаметр шпуровых и веерных зарядов, соответственно, м;  $D_{\text{шпур}}$  и  $D_{\text{всер}}$  – скорость детонации шпуровых и веерных зарядов, соответственно, м/с.

Для экспериментальной проверки предлагаемой схемы были проведены опытные взрывы. Эксперименты заключались в выполнении взрывов шпуровых и скважинных зарядов, имеющих плотность заряжания  $1,20\text{--}1,22 \text{ г/см}^3$ , в забоях, представленных мармит-железно-сланцевой рыхлой рудой.

Выбор плотности заряжания ЭВВ в горной породе основывался на чувствительности к расстоянию между «активным» и «испытуемым» зарядами, а также на сохранении детонационных способностей такого заряда ЭВВ после динамического воздействия.

Каждый эксперимент проводился для сравнения действий веерного и шпурового зарядов и включал по два отдельных опыта.

В ходе первого опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились 2 шпура диаметром 51 мм и длиной 4000 мм на расчетном расстоянии  $W_{\text{шпур}}$  между осями шпуров. Оба шпура заряжались на 1500 мм ЭВВ «Аргунит РХ». Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш. При проведении опыта первоначально взрывался «активный заряд», затем с замедлением 50–100 мс взрывался «испытуемый заряд». В последнем измерялась скорость детонации. Измерения осуществлялись при помощи приборов «VOD Vate» и «NandyTrap», позволяющих непрерывно измерять величину сопротивления электрической цепи аксиального датчика-проводника, проложенного вдоль заряда ЭВВ.

В ходе второго опыта перпендикулярно поверхности забоя пробурили 4 скважины диаметром 89 мм и длиной 4000 мм согласно схеме, представленной на рисунке 3.

Скважины заряжались на 1500 мм ЭВВ. Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш. Три скважины инициировались мгновенно («активный заряд», моделирующий максимальное воздействие веерного заряда), а четвертая («испытуемый заряд», моделирующий скважину смежного веерного заряда) – с замедлением 50–100 мс. При проведении опыта первоначально взрывался «активный заряд», затем с замедлением 50–100 мс взрывался

«испытуемый заряд». В последнем заряде измерялась скорость детонации. Измерения осуществлялись при помощи приборов «VOD Vate» и «HandyTrap», позволяющих непрерывно измерять величину сопротивления электрической цепи аксиального датчика-проводника, проложенного вдоль заряда ЭВВ.

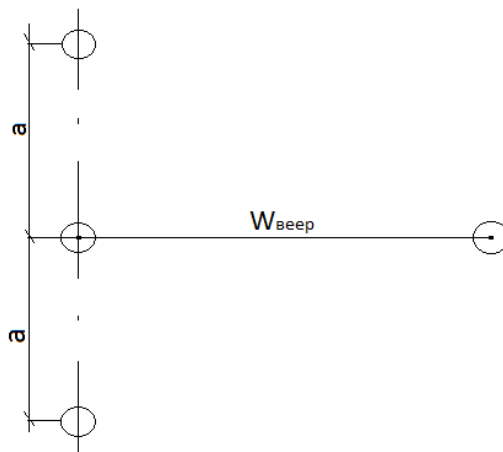


Рисунок 3 – Схема расположения скважин при имитации действия веерного заряда на соседний веер

Три параллельные скважины оказывали действие, эквивалентное действию веерного заряда на смежный веер в области его наиболее интенсивного воздействия.

Показано, что расстояния между скважинами должны удовлетворять условию

$$a / W_{\text{веер}} = 2 / (\beta_{\text{веер}}^* / \beta^* - 1) - 1 \approx 0,34. \quad (6)$$

Результаты экспериментальных взрывов приведены в таблицах 5 и 6 (средние значения по трем сериям опытов).

Таблица 5 – Результаты испытаний влияния динамического воздействия шпуровых и скважинных зарядов, имитирующих веерный заряд ЭВВ, в мартит-железно-слюдковой рыхлой руде при  $\bar{r}=20$

Показатели заряда	Вид динамического воздействия	
	шпуровой заряд	веерный заряд
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,20	1,20
Скорость детонации, м/с	Детонации нет	Детонации нет

Таблица 6 – Результаты испытаний влияния динамического воздействия шпуровых и скважинных зарядов, имитирующих веерный заряд ЭВВ в мартит-железно-слюдковой рыхлой руде при  $\bar{r}=30$

Показатели заряда	Вид динамического воздействия	
	шпуровой заряд	веерный заряд
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,20	1,20
Скорость детонации, м/с	3750	4120

Анализ полученных результатов свидетельствует о корректности предлагаемой методики оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда, взрываемого с замедлением, при использовании ЭВВ с пероксидной газогенерацией.

Таким образом, разработана и обоснована методика экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibiliзирoванного пузырьками газа, взрываемого с замедлением. **Это подтверждает второе научное положение.**

В четвертой главе приведены технологии взрывных работ с применением ЭВВ с пероксидной газогенерацией, устойчивой к внешним динамическим нагрузкам.

ЭВВ «Аргунит РХ» специально разработано для применения в подземных условиях, включая добычу сульфидных руд. ЭВВ имеет высокую водостойкость и малый критический диаметр. Матрица эмульсионная «Аргунит РХ» способна к пероксидной газогенерации в холодном состоянии, а высокая вязкость и липучесть позволяет ЭВВ удерживаться в восходящих скважинах (шпурах) после зарядных работ без дополнительных запорных устройств и рукавов. На рисунках 4–6 приведены некоторые из разработанных шпуровых зарядчиков и зарядно-смесительных модулей, позволяющих осуществлять зарядание шпуров и скважин высоковязким ЭВВ «Аргунит РХ». Технические характеристики представленных устройств приведены в таблицах 7–9.

### **I. Шпуровые зарядчики**

Механизмы, приведенные на рисунке 4, способны получать ЭВВ плотностью 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и осуществлять зарядание шпуров и скважин при вязкости эмульсии 40–140 Па·с.



Рисунок 4 – Зарядчики шпуровые:

*a* – РХ-1; *б* – РХ-2.002

Таблица 7 – Технические характеристики шпуровых зарядчиков

Показатели	PX-1	PX-2.001.1	PX-2.001.2	PX-2.002
Вес нетто, кг	16	27	40	35
Ёмкость для эмульсии, л	10 или 20	20	20	21
Ёмкость для сенсibilизатора, л	1	2,5–5,0	2,5–5,0	3
Размеры Д×Ш×В, мм	350×270×375	700×330×319	700×550×900	530×510×1155
Длина зарядного шланга до, м	5	7	7	10
Диаметр зарядного шланга, мм	25	32	32	32
Производительность, кг/мин	10–12	15–20	15–20	15–10
Мощность, Вт	200	600	600	600
Для пневмопривода минимальное давление сжатого воздуха, бар	3	3	3	3
Для электропривода аккумулятор, В	24	24	24	24
Плотность ЭВВ, г/см <sup>3</sup>	0,85–1,3	0,85–1,3	0,85–1,3	0,85–1,3
Зарядчик порционный, порция, г	250	1000	1000	1000
Дистанционное включение на зарядном шланге	Да	–	–	–

## II. Транспортируемые смесительно-зарядные модули

Механизмы, приведенные на рисунках 5 и 6, способны получать ЭВВ плотностью 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и осуществлять зарядание шпуров и скважин при вязкости эмульсии 40–140 Па·с.

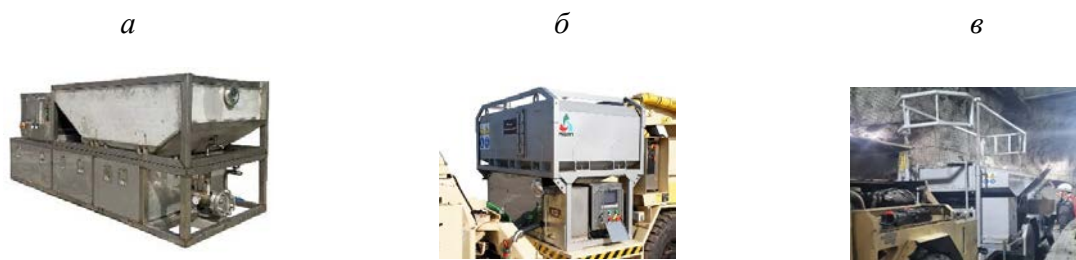


Рисунок 5 – Транспортируемые смесительно-зарядные модули:

*a* – на ж/д платформе – PX-3; *б, в* – на самоходном шасси – PX-4 и PX-5

Таблица 8 – Технические характеристики транспортируемых смесительно-зарядных модулей

Показатели	PX-3	PX-4	PX-5
Вес нетто, кг	970	600	1900
Ёмкость для эмульсии, л	730	1000	3,3 м <sup>3</sup>
Ёмкость для сенсibilизатора, л	100	40	180
Ёмкость для воды, л	200	80	280
Размеры Д×Ш×В, мм	2600×1110×1100	1906×1152×1480	3285×1950×1300
Длина зарядного шланга до, м	350	20 для шпуров 50 для скважин	50

Показатели	PX-3	PX-4	PX-5
Диаметр зарядного шланга, мм	32	32	32
Плотность ЭВВ, г/см <sup>3</sup>	0,85–1,3	0,85–1,3	0,85–1,3
<b>Характеристики приводов</b>			
Мощность, КВт	8	4	4
Производительность, кг/мин	75	45	75
Минимальное давление сжатого воздуха, бар	3	4	–
Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	8–10	24	–
<b>Для гидропривода</b>			
Производительность, кг/мин		75	75
Давление масла, бар	–	110	110
Поток масла, л/мин	–	90	90
Для электропривода напряжение, В	380	–	–

### III. Смесительно-зарядные модули, совместимые с ИВС-контейнерами

Анализ технических показателей разработанных шпуровых зарядчиков и зарядно-смесительных модулей показывает, что они позволяют эффективно осуществлять взрывные работы при подземной добыче полезных ископаемых в любых условиях. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать представленную технологию взрывных работ для применения горным предприятиям, особенно разрабатывающим подземным способом сульфидные руды.



Рисунок 6 – Модули смесительно-зарядные:

*a* – PX-6; *б* – PX-6P

Применяемая технология обеспечивает экологически чистое и безопасное производство промышленных ВВ. Технология не использует токсичные вещества, относящиеся к 1 классу опасности по воздействию на организм человека.

Технико-экономический анализ показал, что применение ЭВВ с пероксидной сенсибилизацией более экономично, чем при использовании штатных и гранулированных ВВ. При применении ЭВВ «Аргунит РХ» при слоевой системе разработки, затраты на БВР по

сравнению с использованием штатного ВВ (Аммонит № 6ЖВ) снижаются на 37 %, в то время как при использовании гранулированных ВВ снижение данных затрат происходит лишь на 25-26 %.

Таблица 9 – Технические характеристики смесительно-зарядных модулей РХ-6 и РХ-6Р

Показатели	РХ-6	РХ-6Р
Вес нетто, кг	130	85
Эмульсия поступает из ИВС-контейнера	1 м <sup>3</sup>	1 м <sup>3</sup>
Сенсibilизатор поступает из п/э канистры, л	20-30	40
Размеры Д×Ш×В, мм	1906×1152×1480	640×425×1400
Длина зарядного шланга до, м	50	100
Диаметр зарядного шланга, мм	32	32
Плотность ЭВВ, г/см <sup>3</sup>	0,85–1,3	0,85–1,3
<b>Для пневмопривода</b>		
Мощность, КВт	4	4
Производительность, кг/мин	75	–
Минимальное давление сжатого воздуха, бар	5	–
Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	3	–
<b>Для гидропривода</b>		
Производительность, кг/мин	75	200
Давление масла, бар	110	110
Поток масла, л/мин	90	90
Для электропривода напряжение, В	380	–

Таким образом, обоснована эффективная технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией и специальных средств механизации зарядных работ, при использовании которых обеспечивается создание зарядов необходимой плотности и вязкости для обеспечения сохранности их детонационной способности при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов. **Это подтверждает третье научное положение.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований разработаны научно обоснованные положения и практические способы совершенствования технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой заряды ЭВВ сохраняют детонационную способность при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов, что является решением важной и актуальной научно-технической задачи.

Основные научные выводы и практические результаты, полученные лично автором в процессе исследования:

1. Разработана и обоснована физико-математическая модель влияния динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационную способность заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающей как плотность и пористость, так и вязкость ЭВВ. Определены условия для ЭВВ, которые должны выполняться для сохранения детонационной способности ЭВВ после динамического воздействия на него.

Показано, что:

- физико-механические свойства горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газогенерацией при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

- при плотности ЭВВ 1,10–1,12 г/см<sup>3</sup> наблюдается бóльшая скорость детонации в зарядах, подвергнутых динамическому воздействию, по сравнению с зарядами ЭВВ другой плотности;

- при любой плотности ЭВВ снижение прочности горной породы уменьшает стойкость ЭВВ к динамическим воздействиям;

- расстояние между зарядами, в зависимости от физико-механических свойств горных пород, оказывает существенное влияние на сохранение детонационных свойств заряда ЭВВ с пероксидной газогенерацией при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

- в прочных породах ( $f = 10–12$ ) в средней зоне действия взрыва величина расстояния между зарядами практически не влияет на скорость детонации ЭВВ. В то же время в слабых породах ( $f = 1–2$ ) в средней зоне действия взрыва скорость детонации в «исследуемом заряде» зависит от расстояния между зарядами;

- при расстояниях между шпуровыми зарядами менее 25 радиусов зарядов в слабых породах возможно затухание детонации заряда ЭВВ из-за критического повреждения сенсibilизирующих пузырьков;

- динамическая вязкость эмульсии оказывает существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газогенерацией при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

- наблюдается снижение скорости детонации при возрастании динамической вязкости эмульсии свыше 80–90 Па·с;

- оптимальная вязкость эмульсии для подземных условий ООО «Яковлевский ГОК» составляет 60–80 Па·с.

2. Впервые разработана и обоснована методика экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением.

Разработана методика определения величины сосредоточенного заряда, эквивалентного по воздействию на данную точку массива пород веерному заряду, что позволяет прогнозировать начальную скорость смещения среды в массиве при взрыве веерного заряда.

Показано, что наблюдается существенная неравномерность в скоростях смещения среды в массиве пород при взрыве веерного заряда. Максимальная скорость смещения более чем в 2,5 раза превышает ее минимальное значение.

Разработан способ моделирования динамического воздействия опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер при помощи шпуровых зарядов.

Показано, что расстояние между модельными шпуровыми зарядами зависит от величины л.н.с. веерного заряда, отношений диаметров, плотностей и удельной теплоты взрыва ВВ шпуровых и веерных зарядов.

3. Разработана эффективная технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, имеющих рациональную плотность и вязкость, с размещением зарядов на необходимом расстоянии друг от друга, при которой обеспечивается сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов).

Предложена линейка механизмов, имеющих различную производительность, габаритные размеры и различные источники энергии для привода их в действие, для выполнения работ по сенсibilизации и заряданию ЭВВ в подземных условиях. Данные механизмы способны получать ЭВВ плотностью 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и осуществлять зарядание шпуров и скважин при вязкости эмульсии 40–140 Па·с, что достаточно для получения ЭВВ оптимальных параметров для обеспечения сохранности детонационной способности зарядов ЭВВ при динамических нагрузках на них.

Показано, что технические параметры шпуровых зарядчиков и зарядно-смесительных модулей позволяют эффективно и экономично осуществлять взрывные работы при подземной добыче полезных ископаемых в любых горно-геологических условиях. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать разработанную технологию взрывных работ для применения горным предприятиям, особенно разрабатывающим подземным способом сульфидные руды.

Результаты исследований успешно используются при ведении взрывных работ в условиях рудника подземного ООО «Яковлевский ГОК».

**Список опубликованных по теме диссертации работ** в рецензируемых научных журналах и изданиях, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в приравненных к ним изданиях:

1. *Горинов, С. А.* Воздействие ударных волн на детонационную способность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного пузырьками газа / С. А. Горинов, **И. Ю. Селин**. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Горный журнал. – 2025. – № 2. – С. 67–76. – DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-67-76. **(К1)**

2. *Селин, И. Ю.* Ударное воздействие на массив при взрыве веерного заряда / И. Ю. Селин. – Текст : непосредственный // Взрывное дело. – 2025. – № 147/104. – С. 121–137. **(К2)**

3. *Селин, И. Ю.* Оценка стойкости сенсibilизации ЭВВ микропузырьками газа к динамическим воздействиям / И. Ю. Селин. – Текст : непосредственный // Взрывное дело. – 2025. – № 148/105. – С. 67–76. **(К2)**

**В прочих изданиях:**

4. *Горинов, С. А.* Технология применения ЭВВ «Аргунит РХ» при подземных горных работах / С. А. Горинов, А. В. Жабко, **И. Ю. Селин**. – Текст : непосредственный // XIV Международная научно-техническая конференция «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений»: сборник докладов. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ. – 2025. – С. 24–30.

5. *Горинов, С. А.* Воздействие ударных волн на детонационную способность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного пузырьками газа / С. А. Горинов, **И. Ю. Селин**. – Текст : непосредственный // Технология и безопасность взрывных работ : Материалы научно-производственных конференций по взрывным работам, 2024 г. / отв. ред. Г. П. Берсенёв. – Екатеринбург : Типография «Печатное поле», 2025. – С. 110–121.

6. *Gorinov, S. A.* Mechanization of charging operations when using bulk emulsion explosives in underground conditions / S. A. Gorinov, A. V. Zhabko, **I. Ju. Selin** / International Scientific Conference "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration". Beijing, China – July 2, 2025. – P. 147–155. – DOI:10.34660/INF.2025.24.20.053.

Подписано в печать 16.04.2026. Формат 60×84 1/16.  
Усл.-печ. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ № 140426  
Типография \_\_\_\_\_