

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Маслов Илья Юрьевич

МАСЛОВ Илья Юрьевич

УДК 622.235.215.7

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ
ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДОБЫЧЕ
СУЛЬФИДНЫХ РУД И ВЫПОЛНЕНИИ ЩАДЯЩЕГО ВЗРЫВАНИЯ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой
степени доктора технических наук

г. Донецк – 2026

Работа выполнена в Автономной некоммерческой научной организации «Научно-исследовательский институт технологии и безопасности взрывных работ» (АННО НИИ ТБВР)

Научный консультант:	Адушкин Виталий Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
Официальные оппоненты:	Закалинский Владимир Матвеевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук (г. Москва) Петров Евгений Анатольевич – доктор технических наук, профессор, главный эксперт по энергонасыщенным материалам АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (г. Барнаул) ШЕВКУН Евгений Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН – обособленного подразделения ФГБУН Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Хабаровск)
Ведущая организация:	ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (г. Апатиты Мурманской обл.)

Защита диссертации состоится 21 января 2027 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.02 на базе ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 1.203.

Тел./факс: +7(856) 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, а также на сайте <http://donntu.ru>.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.491.02,
доктор технических наук, доцент

В.О. Гутаревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Добыча твердых полезных ископаемых, являющихся основой тяжелой промышленности, в значительной степени определяется взрывными технологиями. Данные технологии основываются на использовании промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), большая часть которых в настоящее время в нашей стране изготавливается непосредственно на горных предприятиях.

Среди ПВВ, применяемых в России, наибольшая доля приходится на эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), потребление которых составляет более половины всего потребляемого объема ПВВ. Последнее отражает высокие потребительские свойства ЭВВ, связанные с их водоустойчивостью, безопасностью, хорошими разрушительными способностями, стоимостью и глубокой степенью автоматизации и механизации зарядных работ.

Анализ обширного научно-технического материала показывает, что, несмотря на значительные технологические достижения при применении ЭВВ, возникают трудности при осуществлении эффективного и безопасного их использования при разработке сульфидных руд, являющихся основным источником ряда важных цветных металлов, а также при добыче ценных хрупких минералов, имеющих стратегическое значение для страны, и заоткоске бортов карьеров.

Взрывные работы при добыче сульфидных руд с использованием ЭВВ осложнены опасностью экзотермического взаимодействия аммиачной селитры, являющейся основным компонентом ЭВВ, с сульфидными рудами и породами. Данное взаимодействие может служить причиной несанкционированных взрывов скважинных зарядов, приводящих к возникновению аварийных ситуаций, что снижает эффективность и безопасность взрывных работ. При этом сложность обеспечения эффективности и безопасности при производстве взрывных работ обусловлена противоречивыми взглядами на характер экзотермического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами, что отражается на обосновании выбора рецептур ЭВВ, технологии их производства и применения в сульфидных рудах. Таким образом, возникает научно-техническая проблема, которая заключается в разработке эффективной и безопасной технологии применения ЭВВ при добыче сульфидных руд, являющихся основным источником меди, никеля, кобальта, цинка и других ценных цветных металлов.

Высвобождение людей из производства на основе высокой механизации и автоматизации труда является важным вкладом в решение проблемы нехватки производительных сил в нашей стране. Значительный объем добычи твердых полезных ископаемых обуславливает большие объемы шадящего взрывания при выполнении заоткосных работ на карьерах. Анализ технологии производства данных взрывных работ показывает, что в настоящее время для их выполнения требуются значительные трудозатраты, обусловленные необходимостью применения ручного труда при использовании гирляндных или шланговых зарядов.

Использование современных механизированных способов зарядки на основе применения низкоплотных ЭВВ возможно только в сухих скважинах, составляющих незначительную долю в общем объеме взрывных скважин. Таким образом, для решения проблемы повышения эффективности щадящих взрывных работ на основе применения низкоплотных ЭВВ необходимо разработать технологию механизированного заряжения обводненных скважин низкоплотным ЭВВ. Однако эффективность применения указанной технологии затруднена отсутствием физико-математического описания детонации низкоплотных ЭВВ, которое позволяло обосновывать требования к технологическим параметрам данного ЭВВ и параметры буровзрывных работ.

Учитывая важность решения проблем обеспечения эффективности и безопасности взрывных работ при добыче сульфидных руд и выполнении щадящего взрывания с использованием ЭВВ, **целью работы** стала разработка физико-технических и технологических основ эффективного и безопасного применения ЭВВ при добыче сульфидных руд и выполнении щадящего взрывания на карьерах.

Идея работы заключается в том, что безопасное применения ЭВВ при добыче сульфидных руд достигается путем повышения химической стойкости ЭВВ в агрессивных сульфидсодержащих горных породах посредством введения в их состав расчетного количества ингибиторов, предотвращающими разложение и воспламенение ВВ, технологией заряжения скважинных зарядов, исключающей возникновения опасной ситуации в местах контакта ЭВВ и разрушаемых горных пород, а при производстве щадящего взрывания – в использовании низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола, и технологии заряжения нисходящих обводненных скважинных зарядов в специальные рукава-оболочки.

Задачи исследования:

- разработка физико-математической модели очага разогрева сульфидного включения в заряд ЭВВ;
- разработка модели начального химического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами;
- получение физико-математического описания детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола;
- разработка технологии заряжения восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда;
- разработка технологии заряжения нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда в обводненных скважинах.

Объект исследования: технологии эффективного и безопасного применения ЭВВ при производстве взрывных работ, связанных с разработкой сульфидных руд, а также при производстве щадящего взрывания с использованием низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Предмет исследования: процессы разогрева ЭВВ при их контакте с горными породами, ингибирование экзотермических реакций аммиачной селитры с сульфидными рудами, механизм детонации в низкоплотном ЭВВ, сенсibilизированном гранулами пенополистирола, технологии заряжения

восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда в обводненных скважинах.

Методы исследования. В работе использован комплексный метод исследования, включающий анализ и обобщение теории и практики применения эмульсионных взрывчатых веществ при добыче сульфидсодержащих горных пород, низкоплотных ЭВВ, лабораторные и опытно-промышленные исследования с привлечением методов математической статистики для обработки данных, технико-экономическая оценка результатов исследования.

Научная новизна работы:

- разработана математическая модель, описывающая формирование очага разогрева при внесении колчеданной породы в заряд ЭВВ, приводящее к разогреву ЭВВ и формированию условий возникновения теплового взрыва;

- впервые разработана модель начального этапа химического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами, основанная на решающем значении ионов Fe^{3+} в химическом растворении пирита, что позволяет описывать развитие низкотемпературной фазы данного процесса и его переход в высокотемпературную фазу;

- впервые получено физико-математическое описание детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола, учитывающее струйный характер детонации и экзотермическое разложение пенополистирола;

- разработана технология заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и определены условия механической устойчивости заряда ЭВВ в восстающей скважине при размещении его в кососимметричном рукаве-оболочке;

- разработаны методы удержания заряда низкоплотного ЭВВ, размещенного в рукаве-оболочке, в нисходящих обводненных скважинах;

- показано, что при выполнении щадящего взрывания с помощью низкоплотных ЭВВ, представляющим смесь эмульсии с гранулами пенополистирола, наилучшие технико-экономические показатели достигаются при использовании матричной эмульсии с окислительной фазой на основе раствора аммиачной селитры.

Достоверность научных положений, результатов и выводов обеспечивается применением апробированных методов исследования, надежностью исходных данных, оценкой полученных результатов методами математической статистики, хорошей сходимостью лабораторных и опытно-промышленных исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

- физико-математическая модель формирования очага разогрева при внесении колчеданной породы в заряд ЭВВ;

- описание химического взаимодействия аммиачно-селитренных ВВ с колчеданными горными породами, основанное на решающем значении ионов Fe^{3+} , позволяющее объяснить развитие низкотемпературной фазы данного процесса и

его переход в высокотемпературную фазу, способную перерасти в тепловой взрыв ВВ;

- зависимость необходимой концентрации ингибитора в составе ЭВВ от концентрации катализаторов разложения аммиачной селитры, содержащихся в составе шахтных вод, для обеспечения безопасности применения ЭВВ при взрывных работах в сульфидных рудах;

- физико-математическое описание детонации низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола, учитывающее струйный характер детонации;

- технология заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда кососимметричной конструкции;

- технология заряжания нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда в обводненных скважинах.

Личный вклад автора являлся основополагающим на всех стадиях проведения исследований и состояло в определении целей и задач, организации исследований, разработке алгоритмов и схем проведения полигонных и промышленных испытаний ЭВВ. Автором разработаны физико-математическая модель разогрева сульфидного включения в заряд ЭВВ, модель начального этапа химического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами, математическая модель и технология заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек, физико-математическое описание детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола, технология заряжания нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ, в проведении лабораторных и опытно-промышленных исследований, разработке методик проведения экспериментов, обработке результатов исследований, обобщении и технико-экономической оценке полученных результатов.

Практическая значимость работы:

- разработаны новые сульфидустойчивые ЭВВ и предложены методы расчета величины массовой доли ингибитора в ЭВВ, при которой обеспечивается безопасность применения ЭВВ в сульфидных рудах;

- разработана технология заряжания восходящих скважин в специальные предохранительные рукава-оболочки для изоляции заряда ЭВВ от контакта с сульфидными рудами;

- разработана технология заряжания низкоплотного ЭВВ в нисходящие скважины в обводненных массивах.

Реализация работы. Результаты исследований использованы при:

- ведении взрывных работ на горнодобывающих предприятиях, разрабатывающих сульфидные руды, сервисной организацией ООО «Уралвзрывтехнология» с применением разработанных технологий заряжания ЭВВ в предохранительные рукава-оболочки;

- производстве опытно-промышленных взрывов по заоткоске бортов карьера ОАО «Ураласбест» с использованием низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских научных конференциях «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле» в рамках VI (2-4 декабря 2015 г.), VII (17-19 октября 2017 г.), VIII (6-8 ноября 2019 г.), X (22-24 ноября 2022) Уральских горнопромышленных форумов (г. Екатеринбург), на XI Международном симпозиуме по взрывному разрушению горных пород (FRAGBLAST-11) (24-26 августа 2015 г., г. Сидней, Австралия), на XIV (Словения, г. Порторож, 13-20 сентября 2014 г.), XVII (г. Геленджик, 14-20 сентября 2018 г.), XVIII (г. Геленджик, 9-16 сентября 2019 г.), XX (г. Геленджик, 13-19 сентября 2020 г.), XXI (г. Анапа, 13-19 сентября 2021 г.), XXII (с. Красная Пахра, 11-17 сентября 2022 г.), XXIII (с. Красная Пахра, 18-22 сентября 2023 г.), XXIV (г. Кемерово, 25-28 марта 2024 г.) Международных научно-практических конференциях по взрывному делу, на XIV международной конференция «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2-5 апреля 2019 г.), на XII Международном colloквиуме по пульсирующей и непрерывной детонации (ICPCD) (г. С-Петербург, 19-22 октября 2020 г.), на XV Всероссийском симпозиуме по горению и взрыву (г. Москва, 29 ноября – 4 декабря 2020 г.), на «Неделе горняка - 2024» (г. Москва, 29 января – 2 февраля 2024 г.), на Научном Совете РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрыва (г. Москва, 1 февраля 2024 г.), на технических совещаниях по повышению безопасности взрывных работ при добыче сульфидных руд в УГМК (г. Верхняя Пышма), АО «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург), АО «Полимер» (г. Чапаевск), по совершенствованию технологии производства ЭВВ и выполнению зарядных работ в ООО «УралВзрывТехнология» (г. Москва), по применению малоплотных ЭВВ в ОАО «Ураласбест» (г. Асбест) и других горнодобывающих предприятиях.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 37 работ, в том числе 23 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», а также в приравненных к ним изданиях, при этом 6 работ опубликованы в изданиях категории K1 и K2.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 326 страницах компьютерного текста, содержит 53 рисунка, 20 таблиц, список литературы из 218 наименований и 2 приложения.

Автор выражает искреннюю благодарность за ценные советы и научно-методическую помощь в процессе работы над диссертацией научному консультанту д-ру физ.-мат. наук, проф., академику РАН Адушкину В.В., а также д-ру техн. наук Андрееву В.В., д-ру техн. наук, проф. Викторову В.Д., д-ру техн. наук Горинову С.А., д-ру техн. наук, проф. Иляхину С.В., д-ру физ.-мат. наук, проф. Фролову С.М., д-ру техн. наук проф. Кутузову Б.Н. за полезные обсуждения результатов исследований.

Глубокая признательность специалистам ООО «УралВзрывТехнология», ОАО «Ураласбест» и инженеру Брагину П.А. (ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша»), оказавшим помощь при проведении промышленных и полигонных экспериментов.

Диссертационная работа выполнена по материалам НИР, исполненных по договорам с УГМК, ОАО «Ураласбест», ФГБУН ИПКОН и ООО «УралВзрывТехнология», в которых докторант являлся руководителем работ или ответственным исполнителем отдельных этапов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана ее научная новизна, практическая значимость и сформулирована цель исследования.

Первая глава посвящена анализу проблем эффективного и безопасного применения ЭВВ в геотехнологических процессах добычи сульфидных руд и производстве щадящего взрывания.

Отмечено, что значительную роль в развитии геотехнологических процессов в их части технологии ведения взрывных работ при добыче сульфидных руд и разработку рецептурных составов применяемых аммиачно-селитренных взрывчатых веществ (АСВВ) внесли российские ученые: Акинин Н.И., Белин В.А., Викторов С.Д., Горинов С.А., Державец А.С., Десятник В.Н., Ермолаев А.И., Иляхин С.В., Катышев С.Ф., Козырев С.А. и Кутузов Б.Н.

Важное значение в обосновании технологии взрывного разрушения сульфидных руд имеют труды зарубежных исследователей: Коваленко И.Л., Куприна В.П., Син Хуа Ся, Сюй Чжисяна, Томоки Н. и У Чао.

Анализ научно-технической литературы доказал, что в основе физико-химического взаимодействия между АСВВ и сульфидными рудами лежит взаимодействие аммиачной селитры, являющейся наиболее существенной массовой частью АСВВ, с сульфидами металлов, содержащимися в рудах. Однако, ход данного взаимодействия во многом неясен. Наиболее противоречивыми являются представления о процессе возникновения и развития низкотемпературной фазы взаимодействия между АСВВ и сульфидными рудами и ее переход в высокотемпературную фазу. Это препятствует разработке эффективных технологических способов снижения негативных последствий данного взаимодействия. Особенно это относится к ЭВВ.

В настоящее время ЭВВ и гранэмнты являются наиболее распространенными АСВВ для взрывной подготовки горной массы к выемке и транспортированию. Однако текучесть данных АСВВ вносит осложнение при ведении взрывных работ в сульфидных рудах, связанное с растеканием ЭВВ по естественным трещинам массива. Это приводит не только к нерациональному использованию ЭВВ, но и повышает вероятность его возгорания. Последнее связано с существенным возрастанием площади поверхности соприкосновения ЭВВ с сульфидными рудами. Увеличение поверхности соприкосновения между реагирующими телами при гетерогенных реакциях является фактором увеличения скорости взаимодействия. Кроме этого, физико-химическое взаимодействие дополнительно ускоряется за счет присутствия на поверхности естественных трещин сульфидных минералов повышенной реакционной способности, появляющихся в процессе выветривания сульфидных руд. Рассмотрение многих практически важных

вопросов повышения безопасности и надежности взрывных работ при использовании ЭВВ для разрушения сульфидных руд требует более детального рассмотрения участия сульфатов железа во взаимодействии ЭВВ и колчеданных руд. Поэтому дальнейшее развитие физико-химического описания взаимодействия пирита и аммиачной селитры, учитывающей как наличие в системе сернистой воды, так и сульфатов железа (II) и (III) – является, безусловно важной и актуальной задачей.

Сложности в оценке опасности развития экзотермических процессов взаимодействия АСВВ с сульфидами обусловлены также отсутствием физико-математической модели очага разогрева из сульфидных включений рудной мелочи в заряд АСВВ. Знание последнего важно при решении вопросов обеспечения эффективности и безопасности геотехнологических процессов в их части ведения взрывных работ.

Негативные явления, обусловленные растеканием наливных ЭВВ по трещинам, можно избежать, используя патронированное, в пластиковые оболочки, ЭВВ или применяя рукава-оболочки для формирования скважинных зарядов ЭВВ.

Применение тканевых рукавов при создании нисходящих скважинных зарядов ЭВВ оказалось эффективным технологическим решением и нашло достаточно широкое распространение в практике ведения открытых горных работ. В качестве основных преимуществ использования рукавов указывают на снижение стоимости взрывной скважины, обусловленное уменьшением удельного расхода ВВ, меньшую экологическую нагрузку на окружающую среду и более равномерное дробление взорванной горной массы. Однако значительные объемы сульфидных руд добываются подземным способом, где наибольшее распространение получили восходящие взрывные скважины. Прямая аналогия геотехнологических процессов буровзрывных работ, в их части механизированного заряжания нисходящих взрывных скважин ЭВВ и заряжание восходящих скважин оказалась невозможной, ввиду значительных сложностей удержания заряда в восходящей скважине.

В связи с расширением области применения ЭВВ на подземные горные работы, решение геотехнологических задач при разработке технологических способов заряжания эмульсионными ВВ восходящих скважин, приобретает огромное значение. При этом, в сульфидных рудах, в силу вышесказанных особенностей применения ЭВВ, необходимы технологии формирования скважинных зарядов с использованием рукавов-оболочек. В то же время применение рукавов специальной конструкции затруднено вследствие отсутствия методик расчета параметров таких рукавов.

Трудности возникают с аналитическим обоснованием вида и концентрации ингибиторов, которые добавляют в ЭВВ для снижения активности взаимодействия аммиачной селитры с сульфидными минералами в руде. Несомненно, что получение данных аналитических выражений весьма актуально.

Анализ многочисленных работ, посвященных щадящему взрыванию, показывает, что оно основывается на применении зарядов пониженной мощности. В горных работах для этого используются скважинные заряды с пониженной плотностью заряжания ВВ. Между тем известен опыт успешного применения механизированного заряжания нисходящих скважин ЭВВ, сенсibilизированными

гранулами пенополистирола. При этом скважинные заряды сохраняли стабильность детонации по всей их длине.

Анализ исследований Андреева В.В., Апина А.Я., Ершова А.П., Кузнецова В.М., Баранова Е.Г., Нифадьева В.И. по изучению детонации низкоплотных ВВ показал, что данный процесс существенно отличается от детонации конденсированных ВВ и требуются новые подходы к описанию детонации данных ВВ. Данное обстоятельство делает актуальным разработку физико-математического описания детонации ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола. Это позволит разработать эффективную и безопасную технологию применения низкоплотных ЭВВ, включая методы удержания в обводненной нисходящей скважине низкоплотный заряд, что является важной частью общего геотехнологического процесса добычи полезного ископаемого и проходке необходимых для этого вспомогательных выработок.

Таким образом, проведенный анализ обширного научно-технического материала показал, что при расширении областей использования ЭВВ возникают трудности, связанные с недостаточно разработанными:

физико-химической и физико-математической моделями начального этапа взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами;

физико-математической моделью детонации низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола;

технологиями заряжания как восстающих скважин ЭВВ, так и нисходящих скважин низкоплотными ЭВВ.

Данные обстоятельства создают трудности при обеспечении эффективности и безопасности геотехнологических процессов связанных со взрывными работами с применением ЭВВ при разработке сульфидных руд, а также при разработке высокомеханизированных технологий щадящего взрывания, необходимых как при добыче ценных хрупких минералов, имеющих стратегическое значение для страны, так и при выполнении заоткосных работ на карьерах.

Вторая глава посвящена разработке физико-математической модели взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами.

Физико-химические реакции сульфидных руд с аммиачной селитрой являются топахимическими, так как проходят на поверхности руд (на границе раздела фаз), которая имеет сложную геометрическую структуру и неоднородна по минералогическому составу. При этом скорость реакции пропорциональна доступной для прохождения реакции площади поверхности активных минералов – что обуславливает физичность процесса (зависимость от площади контакта вне связи с химическими факторами, такими как концентрация и состав реагирующих веществ).

Анализ научно-технической литературы показал, что изучение внутренней структуры колчеданных руд при рассмотрении их взаимодействия с аммиачной селитрой не проводилось. Поэтому были выполнены микроскопические и порометрические исследования внутренней структуры различных колчеданных пород.

Микроскопические исследования осуществлялись на сканирующем электронном микроскопе Carl ZeissEVO, а порометрические – на ртутном порозиметре Pascal 440.

Порометрические исследования показали, что дефектность микроструктуры колчеданных руд такова, что удельная поверхность образца может более, чем в 300 раз превосходить удельную поверхность бездефектного образца тех же размеров. Микроскопические размеры поперечных сечений дефектов и извилистость их каналов приводят к возникновению диффузного торможения реакций. Данный эффект снижает скорость физико-химического взаимодействия колчеданных руд с аммиачной селитрой. Расчеты величины эффективного коэффициента увеличения площади взаимодействия частиц руды с аммиачной селитрой по сравнению с площадью внешней поверхности бездефектной частицы, показали, что она изменяется лишь в пределах 2...10.

Для описания разогрева очага, образованного попаданием мелкодисперсных частиц сульфидных руд в заряд ЭВВ, предложена следующая физико-математической модель.

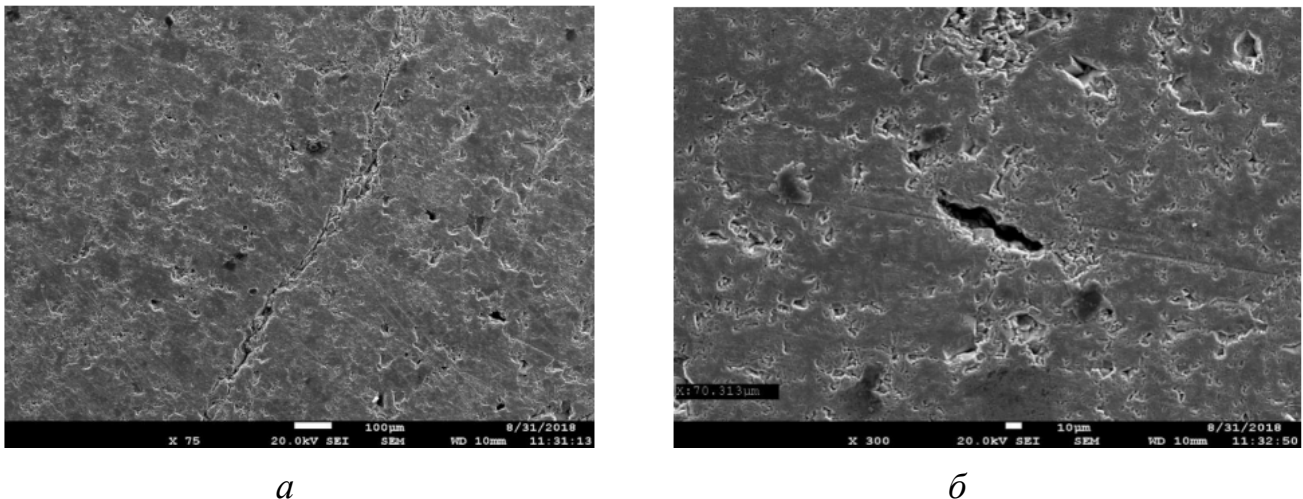


Рисунок 1 – Фотографии поверхности колчеданных руд при кратности увеличения:
а – 75; б – 300

Очаг разогрева представляется в виде некоторой области аммиачно-селитренного ВВ, в которую внесена сульфидсодержащая горная порода. Принято, что:

область имеет форму шара радиуса R_0 ;

сульфидсодержащая порода представлена дискретным (раздробленным) материалом, частицы которого имеют характерный начальный размер δ_0 ;

частицы сульфидсодержащей породы равномерно распределены по объему и имеют размер значительно меньший, чем размер объема V_* , то есть выполняется условие $\delta_0 \ll R_0$;

сульфидсодержащая горная порода содержит в своем составе минерал (минералы), способные вступать в экзотермическую реакцию с аммиачной селитрой, при этом реакция проходит на границе раздела фаз.

Показано, что изменения температуры в области ($0 \leq r \leq R_o$ – расстояние от центра области до рассматриваемой точки очага разогрева) описываются следующим интегро-дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \varepsilon \exp \left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T} \right) \right) \cdot \left(1 - \varepsilon \int_0^t \exp \left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T} \right) \right) d\tau \right)^2 \quad (1)$$

где $\varepsilon = \frac{2v_*}{\delta_o}$ (величина обратная времени разложения частицы сульфидсодержащей

породы при постоянной скорости реакции v_*); $\lambda = \frac{6\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{q\varpi}{c_{cm}}$ (величина

пропорциональная увеличению температуры смеси при отсутствии оттока тепла из области v_* и фазовых переходов веществ в этой области).

Начальные и граничные условия:

$$T(r, 0) = T_c; \quad T(R_o, t) = T_c; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0.$$

Принятые обозначения: σ – отношение массы сульфидсодержащей породы к массе ВВ в объеме v_* ; q – теплота реакции, выделяющаяся при взаимодействии единицы массы активного минерала с аммиачной селитрой, Дж/кг; c_{cm} , χ – удельная теплоемкость и температуропроводность смеси аммиачно-селитренного ВВ с сульфидсодержащей породой, соответственно; ϖ – коэффициент увеличения площади эффективного взаимодействия частиц руды с аммиачной селитрой по сравнению с площадью внешней поверхности бездефектной частицы; R – универсальная газовая постоянная; E_a – энергия активации реакции активного минерала с аммиачной селитрой; v_* – скорость реакции при температуре; T – текущая температура в очаге разогрева; T_o , T_c , $T_{хар}$ – начальная температура ВВ, температура массива, окружающего заряд ВВ, и характерная температура, при которой начинается активное разложение аммиачной селитры, взаимодействующей с данной сульфидсодержащей породой, с выделением газообразных продуктов.

Точное решение уравнения (1) возможно только численными методами. Однако ряд важных результатов можно получить на основе анализа общего вида решения этого уравнения.

Рассмотрим изменение температуры в наиболее разогреваемой точке области v_* – точке соответствующей центру этой области (начало координат – $r = 0$). Решение определяем в области значений T : $T_c < T < T_{krit}$, где T_{krit} – температура, при которой начинается активное разложение аммиачной селитры с выделением окислов азота (величина зависит от минералогического состава сульфидсодержащей породы, кислотности шахтных вод и наличия в составе ВВ компонентов, оказывающих каталитическое или ингибиторное воздействие на аммиачную селитру).

На рисунке 2 представлен общий вид решения уравнения (3) для условий (4). На временном промежутке $0 \leq t < t_m$ количество выделяемого в ходе реакций тепла превышает его потери из-за теплоотдачи. В момент времени количество

выделяемого в ходе реакций тепла равно его потери из-за теплоотдачи. Возможны два варианта развития процесса:

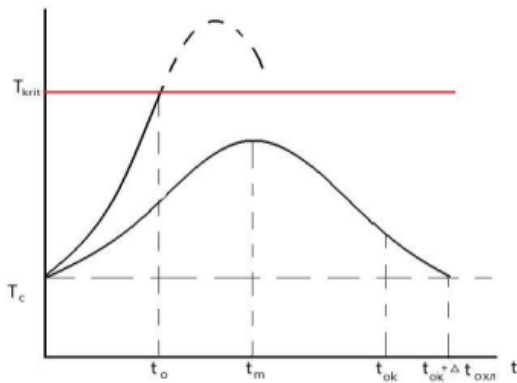


Рисунок 2 – Общие закономерности изменения температуры в центре очага разогрева

Температура в точке $t = t_m$ меньше T_{krit} . Тогда, при $t > t_m$ температура вещества в точке $r = 0$ (а также в других точках области V_*) начинает снижаться. В момент $t = t_m$ в точке $r = 0$ достигается наибольший нагрев вещества в области V_* . Снижение температуры до момента $t = t_{ок}$ ($t_{ок}$ – момент окончания химической реакции вследствие полного расходования сульфидсодержащей породы или аммиачной селитры в области V_*)

происходит более медленно, чем охлаждение нагретого шара в более холодной внешней среде, вследствие тепловыделения при реакции. При $t_{ок} < t \leq t_{ок} + \Delta t_{охл}$ ($\Delta t_{охл} \cong \chi R_o^2$ – примерное время охлаждения области при отсутствии выделения в ней тепла) происходит охлаждение области V_* , как обычного нагретого шара, до температуры. Температура в точке $r = 0$ в момент времени $t = t_m$ больше T_{krit} . При этом, в некоторый момент времени $t = t_o$ температура в центре области V_* достигнет критической величины. Аммиачная селитра начинает активно разлагаться. Возникает опасность поражения людей ядовитыми газами и возможность самопроизвольного взрыва заряда ВВ.

Наибольший практический интерес представляет определение условий, когда температура в центре очага разогрева (центр области) будет превышать критическую температуру.

На основе анализа решения уравнения (1) получено следующее условие достижения в центре очага разогрева критической температуры

$$\frac{6q\rho_n\varpi}{1 + \frac{\rho_n}{\sigma\rho_{BB}}} \cdot \frac{v_*}{\delta_o} \left(\frac{\delta_m}{\delta_o} \right)^2 \exp \left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T_{krit}} \right) \right) > \frac{\pi^2 k_{cm}}{R_o^2} (T_{krit} - T_c), \quad (2)$$

где δ_m – размер сульфидного включения в момент времени.

Полученные решения позволили показать, что опасные размеры очага разогрева зависят от размера сульфидсодержащих включений

$$R_o > 2,9 \sqrt{\delta_o}. \quad (3)$$

При $\delta_o = 0,074$ мм (при истирании материала в лабораторных условиях, в ступке) – $R_o > 25$ мм.

При $\delta_o = 1$ мм (в производственных условиях) – $R_o > 90$ мм.

Радиусы взрывных скважин при подземных горных работах составляют 40-50 мм, поэтому вероятность образования опасных очагов разогрева в зонах высокой трещиноватости и нарушенности горных пород, пересекаемых скважиной, достаточно высока. При этом опасность увеличивается при механизированных способах зарядки.

Предложенная физико-математическая модель взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами нашла экспериментальное подтверждение в ходе изучения физико-химического взаимодействия АСВВ с колчеданными породами. При проведении опытов образцы колчеданных пород измельчались на шаровой мельнице до крупности 40 мкм горных пород, смешивались с аммиачной селитрой и смесями селитр (АСВВ), а затем исследовались методом термогравиметрического анализа на ТГА-спектрометре «МХ-50» (производства «AND», Япония) со скоростью нагрева 10 градусов/минуту, до 200 градусов Цельсия (время опыта – 20 минут).

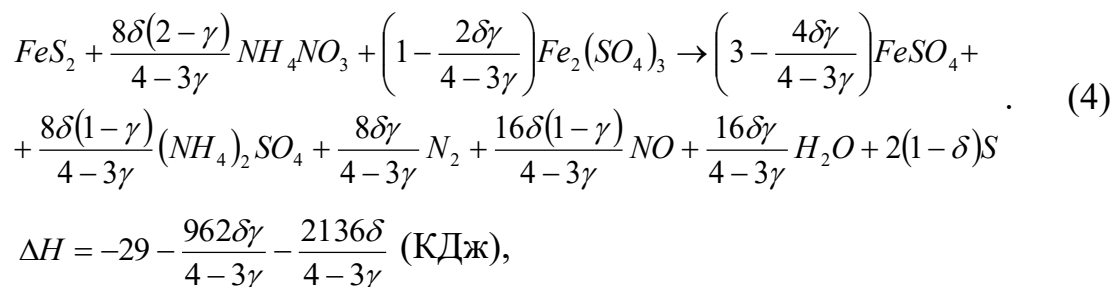
Таким образом, разработана физико-математическая модель возникновения и развития очага разогрева сульфидного включения в ЭВВ, что соответствует выполнению **первого научного положения**.

На основании разработанной физико-математической модели возникновения и развития очага разогрева сульфидного включения в ЭВВ предложена методика оценки допустимого времени нахождения АСВВ во взрывных скважинах в сульфидном массиве при формировании локальных очагов разогрева. В частности, определено, что при снижении величины отношения массы ВВ к массе пирита в очаге разогрева менее 0,05, температура разогрева не достигает критических значений даже при значительном увеличении температуры массива и существенных размерах очага разогрева.

Третья глава посвящена изучению физико-химического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами.

В результате выветривания колчеданных руд происходят поверхностные изменения сульфидных минералов, что способствует повышению их реакционной способности, связанные с накоплением сульфатов двух и трехвалентного железа.

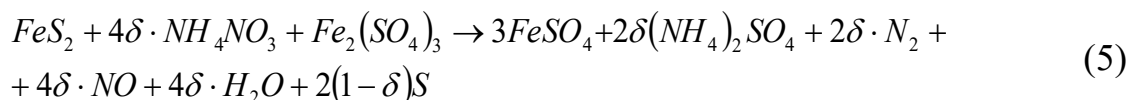
Учитывая, что основную опасность представляют реакции взаимодействия аммиачной селитры с пиритом, предложено следующее уравнение, описывающее взаимодействие пирита с аммиачной селитрой) в присутствии сернокислой воды и сульфатов железа (последнее соответствует реальным условиям):



где δ – доля пирита, выделяющего при взаимодействии с сульфатом железа (III) серную кислоту; γ – доля азотной кислоты, окисляющей сульфата железа (II) с выделением двуокиси азота.

Показано, что γ является функцией температуры. При невысоких температурах ($t^\circ < 30^\circ\text{C}$), а при существенных температурах ($t^\circ \rightarrow 100^\circ\text{C}$ и выше) - $\gamma \approx 0,8 - 0,9$.

При невысоких температурах имеем $\gamma \approx 0$. Тогда из (4) получаем

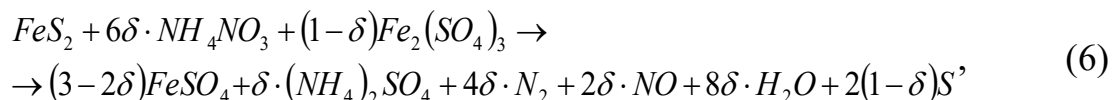


$$\Delta H = -29 - 534\delta.$$

При малом количестве влаги ($\delta \rightarrow 0$) тепловыделение составляет 0,24 МДж/кг пирита (около 2% от тепла, выделяемого при сгорании 1 кг дров). Данного количества тепла недостаточно для разогрева взаимодействующих масс пирита и аммиачной селитры.

При достаточном количестве влаги ($\delta \rightarrow 1$) тепловыделение составляет 4,7 МДж/кг пирита, что в определенных условиях может приводить к разогреву взаимодействующих масс пирита и аммиачной селитры.

При высоких температурах ($\gamma \rightarrow 0,8$). Из (4) имеем



$$\Delta H = -29 - 1816\delta.$$

При достаточном количестве влаги ($\delta \rightarrow 1$) тепловыделение будет составлять 15,4 МДж/кг пирита, что сравнимо с теплом, выделяемым при сгорании 1 кг бурого угля. Это чрезвычайно опасно, так как при определенных условиях способно привести к критическому разогреву взаимодействующих масс пирита и аммиачной селитры.

Анализ представленной модели взаимодействия пирита и аммиачной селитры показывает, что его интенсивность существенно зависит от наличия в системе сернокислой воды и сульфатов железа (II), (III).

Для проверки положения о влиянии наличия в реакционной смеси пирита и аммиачной селитры сульфатов железа (II) и железа (III) были проведены лабораторные опыты. Методика испытаний заключалась в определении промежутка времени от начала опыта до момента фиксации выделения оксидов азота по йодкрахмальной пробе.

В опытах, в качестве руды использовался серный колчедан АО «Святогор» (Красноуральск).

Состав: основной минерал – пирит, из нерудных присутствуют кварц, хлорит, эпидот. Текстура – массивная, структура – скрытно кристаллическая. Содержание компонентов: меди – 0,10%, цинка – 0,10%, серы – 45,8%. Характерный размер микрокристаллов руды – 50 мкм. Руду предварительно измельчали до 100 мкм и менее.

Опыты проводили с тремя видами добавляемой жидкости:

первый вид (Ж1) — 200 мл дистиллированной воды, 1,7 г серной кислоты (39%), 15 г гептагидрата сульфата железа (II) и 30 г нонагидрата сульфата железа (III);

второй вид (Ж2) — 200 мл дистиллированной воды, 15 г гептагидрата сульфата железа (II) и 30 г нонагидрата сульфата железа (III);

третий вид (Ж3) — 200 мл дистиллированной воды, 3,0 г серной кислоты (39%).

Исследовали следующие смеси:

А). АС (78 г) + руда (17 г) + Ж1 (10 г);

Б). АС (78 г) + руда (17 г) + Ж2 (10 г);

В). АС (78 г) + руда (17 г) + Ж3 (10 г).

Смесь загружали в двухгорлую колбу и плотно закрывали резиновыми пробками.

В пробке бокового горлышка колбы имелось отверстие для крючка с йодкрахмальной пробой (находилась над исследуемой смесью). В пробке центрального горлышка колбы вставляли газоотводную трубку с неплотной ватной пробкой и трубку с краном для подачи огнетушащей воды.

Колбу с исследуемой смесью помещали в водяную баню температурой 55°C и выдерживали до появления полосы на йодокрахмальной пробе. Время начала реакции между рудой и аммиачной селитрой (по йодокрахмальной пробе) приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Время начала реакции между рудой и аммиачной селитрой (по йодокрахмальной пробе)

Номер смеси	А	Б	В
Время, ч	0,25	1,0	4,0
Особенности протекания реакции	Реакция остановлена из-за бурного газовыделения подачей воды на 20-й минуте	Реакция остановлена из-за бурного газовыделения подачей воды на 115-й минуте	Реакция протекает вяло без существенного разогрева даже через 10 часов

Опыты показали, что активность реакций в смесях А, Б, В различная: А > Б > В.

Следовательно, одним из важнейших факторов агрессивности колчеданных руд по отношению к аммиачной селитре является наличие в реакционной смеси пирита и аммиачной селитры – сульфатов железа (II) и железа (III).

Для повышения безопасности геотехнологических процессов ведения взрывных работ при добыче сульфидсодержащих пород с использованием АСВВ, в них добавляют ингибиторы: вещества, способствующие снижению скорости взаимодействия аммиачной селитры с сульфидами металлов.

Для получения аналитических зависимостей по определению необходимого количества ингибитора рассмотрена система «ЭВВ + пирит + шахтная вода». Известно, что пирит в присутствии воды окисляется как кислородом воздуха, так и ионами Fe^{3+} с образованием свободной серной кислоты.

При этом скорость окисления пирита ионами Fe^{3+} в десятки раз превосходит окисление под действием кислорода [Соболев А.Е., Ву Чао]. Данное обстоятельство обычно приводит к быстрому расходованию ионов Fe^{3+} в системе и дальнейшему медленному окислению пирита кислородом воздуха. Однако наличие в системе аммиачной селитры (АС) обуславливает достаточно быстрое пополнение системы ионами Fe^{3+} , которые ускоряют растворение пирита и выделение серной кислоты.

При взаимодействии серной кислоты с АС, содержащейся в ЭВВ, выделяется азотная кислота. В сернокислой среде нитрат-ионы окисляют $FeSO_4$ в $Fe_2(SO_4)_3$ – и система пополняется ионами. Химическая модель экзотермических взаимодействий в системе «АС + пирит + шахтная вода» представлена выше.

В дальнейшем, под активными агентами системы будем понимать вещества, способствующие появлению в системе азотной кислоты: серная кислота, сульфаты железа и меди. Положим, что в некоторую область ЭВВ внесена смоченная шахтной водой пиритная мелочь. Данную область можно представить в виде множества ячеек, состоящих из частиц пирита, имеющих форму куба (что соответствует практике: сульфидная мелочь имеет кубическую структуру частиц) и покрытых снаружи слоем шахтной воды, а затем - слоем ЭВВ (рисунок 3).

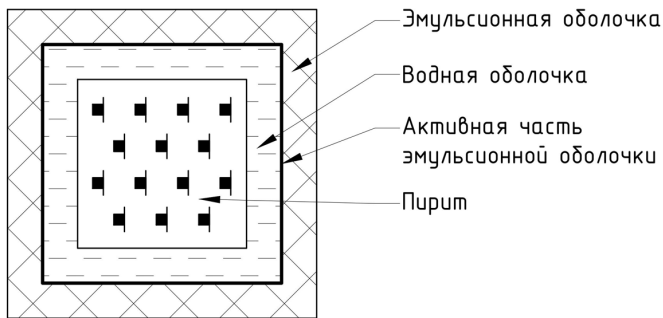


Рисунок 3 – Разрез ячейки

Введем обозначения: Δ – размер частицы пирита, м; δ_e и δ_s – толщина слоев шахтной воды и эмульсии, соответственно, м; $\beta_e = m_e / m_n$ – отношение массы слоя шахтной воды m_e к массе частицы пирита m_n ; ρ_e и ρ_n – плотности шахтной воды и пирита, соответственно; $\beta_s = m_s / m_n$ – отношение массы слоя эмульсии m_s к массе частицы пирита m_n ; ρ_s – плотность ЭВВ, кг/м³.

Размеры слоев шахтной воды и эмульсии вокруг частиц пирита равны:

$$2\delta_e / \Delta = \sqrt[3]{1 + \beta_e \rho_n / \rho_e} - 1; \quad 2\delta_s / \Delta = \sqrt[3]{1 + \beta_e \rho_n / \rho_e + \beta_s \rho_n / \rho_s} - \sqrt[3]{1 + \beta_e \rho_n / \rho_e}. \quad (7)$$

Расчеты по формулам (7) показывают, что для наиболее распространенных методик экспериментальной оценки химической совместимости АСВВ и сульфидсодержащих пород [ГосНИИ «Кристалл», AEISC] выполняется условие $\delta_e / \delta_s < 0,5$.

Коэффициенты диффузии в концентрированных обратных эмульсиях чрезвычайно малы и по порядку $10^{-15} \dots 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{с}$ составляют [Королева М.Ю.]. Это на несколько порядков меньше, чем значения коэффициентов диффузии серной и азотной кислот, а также сульфатов железа в водной оболочке ячейки.

Оценочные расчеты, основанные на анализе диффузионных процессов, показали, что в реакцию с активными агентами вступит ингибитор, содержащийся во внутреннем слое эмульсионной оболочки ячейки, объем которого равен объему водного слоя.

Эффективная масса ингибитора в эмульсии ячейки равна

$$m_{\text{ингб}}^* = c_{\text{ингб}} \rho_{\text{эм}} V_{\text{эм}}^*, \quad (8)$$

где $c_{\text{ингб}}$ – массовая доля ингибитора в эмульсии; $V_{\text{эм}}^*$ – эффективный объем эмульсии в ячейке.

Масса активного i -агента, содержащегося в водной оболочке ячейки:

$$m_{(i)\text{агент}} = c_{(i)\text{агент}} \rho_{\text{в}} V_{\text{в}}, \quad (9)$$

где $c_{(i)\text{агент}}$ – массовая доля активного i -агента в шахтной воде; $V_{\text{в}}$ – объем воды в ячейке.

Необходимое количество ингибитора должно быть достаточно для нейтрализации активных агентов, содержащихся в шахтной воде. Это выполняется при выполнении условия

$$\frac{m_{\text{ингб}}^*}{\mu_{\text{ингб}}} \geq \sum_i \frac{m_{(i)\text{агент}}}{\mu_{(i)\text{агент}}} A_i, \quad (10)$$

где $\mu_{\text{ингб}}$, $\mu_{(i)\text{агент}}$ – молекулярная масса ингибитора и i -агента, соответственно; A_i – коэффициент, определяемый отношением количества молей азотной кислоты, появляющейся в системе вследствие действия одного моля i -агента на аммиачную селитру к количеству молей азотной кислоты, дезактивированных одним молем ингибитора.

Значения для оценочных расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента для различных агентов и ингибиторов

Агент	Значения A_i	
	Карбамид	Уротропин
H_2SO_4	2	1
$Fe_2(SO_4)_3$	2	1
$FeSO_4$	1	0,5
$CuSO_4$	1	0,5

На основании (7)-(10), получаем

$$c_{\text{ингб}} \geq \mu_{\text{ингб}} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{эм}}} \sum_i \frac{c_{(i)\text{агент}}}{\mu_{(i)\text{агент}}} A_i. \quad (11)$$

Для проверки корректности полученной зависимости (11), рассмотрим экспериментальные методики оценки химической совместимости АСВВ и сульфидсодержащих пород.

Расчет для ЭВВ (с окислительной фазой на основе монораствора АС) плотностью равной 1,0 г/см³, на основании (11) показывает, что критические значения массой доли карбамида в ЭВВ составят:

1. По методике ГосНИИ «Кристалл» – 0,03;
2. По методике AEISC – 0,04.

Экспериментальные исследования химической стойкости ЭВВ при взаимодействии с пиритом показали, что массовая доля карбамида должна составлять – 2-3% [Соснин В.А.].

ЭВВ «Фортис Эклипс», предназначенное для работы в сульфидных рудах, химическая стойкость которого проверялась по методике AEISC, содержит до 4 % карбамида [Столяров П.Н., Феодоритов М.И.].

Таким образом, предложенная методика теоретического определения необходимого содержания ингибитора в ЭВВ, предназначенном для разрушения сульфидсодержащих пород, позволяет получать результаты весьма близкие к экспериментально найденным значениям разными исследователями. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать зависимость (11) для определения необходимой массовой доли ингибитора в ЭВВ, обеспечивающей безопасность применения данных ЭВВ при разрушении сульфидных руд.

В случае, когда применяется ЭВВ с окислительной фазой на основе монораствора аммиачной селитры, а ингибитором является карбамид, имеем следующую инженерную формулу для определения массовой доли карбамида в эмульсии:

$$c_{\text{карбамид}} \geq 1,224c_{H_2SO_4} + 0,395c_{FeSO_4} + 0,300c_{Fe_2(SO_4)_3} + 0,376c_{CuSO_4}. \quad (12)$$

Согласно приведенным выше теоретическим исследованиям и экспериментальным данным [Соснин В.А.] количество ингибитора в ЭВВ не должно превышать 3%, так как в противном случае ухудшаются чувствительность и работоспособность ЭВВ. Таким образом, при

$$0,03 < \mu_{\text{ингиб}} \frac{\rho_v}{\rho_z} \sum_i \frac{c_{(i)\text{агент}}}{\mu_{(i)\text{агент}}} A_i \quad (13)$$

использование неизолированных от контактов с сульфидными рудами заряды ЭВВ становится нецелесообразным.

Известно, что содержание сульфатов железа в шахтных водах уральских колчеданных рудников при $pH < 2$ может достигать значений: $c_{FeSO_4} = 0,12$; $c_{Fe_2(SO_4)_3} = 0,05$ [Комаров В.А.].

Тогда, при плотности ЭВВ равной 1,0 г/см³ и использовании карбамида в качестве ингибитора, имеем (13):

$$\mu_{\text{ингиб}} \frac{\rho_v}{\rho_z} \sum_i \frac{c_{(i)\text{агент}}}{\mu_{(i)\text{агент}}} A_i = 60 \cdot \frac{1,0}{1,0} \cdot \sum \left(\frac{0,12}{152} \cdot 1 + \frac{0,05}{400} \cdot 2 \right) = 0,062 > 0,03. \quad (14)$$

В этом случае необходимо предотвращать непосредственный контакт ЭВВ с сульфидными рудами, например, использовать специальные рукава-оболочки при формировании скважинных зарядов ЭВВ.

Таким образом, разработана химическая модель взаимодействия аммиачно-селитренных ВВ с колчеданными горными породами в присутствии шахтных вод, основанная на решающем значении ионов Fe^{3+} в химическом растворении пирита.

Модель позволяет описывать развитие низкотемпературной фазы данного процесса и его переход в высокотемпературную фазу.

Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что одним из важнейших факторов агрессивности колчеданных руд по отношению к аммиачной селитре является наличие в реакционной смеси пирита и аммиачной селитры сульфатов железа (II) и железа (III).

Показано, что необходимая массовая доля ингибитора в ЭВВ, при которой обеспечивается безопасность применения ЭВВ в сульфидных рудах, определяется массовыми долями активных агентов (веществ) в составе шахтных вод.

Следовательно, **второе и третье научные положения** – обоснованы.

Соотношения (11)-(13) позволяют также осуществлять научно обоснованное прогнозирование возможности возникновения опасных ситуаций, обусловленных экзотермическим взаимодействием ЭВВ с сульфидными рудами, что безусловно исключительно важно для обеспечения безопасности труда.

Четвертая глава посвящена разработке физико-математического описания детонации низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированные гранулами пенополистирола, которые в дальнейшем будем называть Эмульпорами.

Для объяснения детонационного процесса в низкоплотных Эмульпорах выдвинуты следующие положения:

а) при малой плотности рассматриваемого ЭВВ в нем образуется связанная система «гранулы пенополистирола-воздушные поры»;

б) наличие сквозных каналов меняет механизм возбуждения ЭВВ. Возбуждение низкоплотного Эмульпора будет осуществляться под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления. При этом химическая реакция будет происходить в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа.

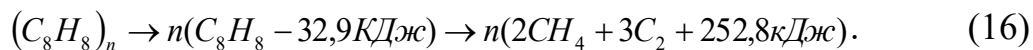
Расчеты показали, что связанная «гранульно-воздушной система» возникает при $\zeta > 1,9$, где ζ – отношение насыпного объема гранул пенополистирола к объему матричной эмульсии.

Гранулы пенополистирола образуются путем нагревания суспензионного вспенивающегося полистирола в пароводяной среде. Суспензионный вспенивающий полистирол получают из эмульсии изопентана в стироле при полимеризации и гранулирования стирола. Для расчета технологической плотности Эмульпора с учетом сортности исходных гранул полистирола и коэффициента вспенивания их, предложена формула

$$\rho_{\text{оо}} = \frac{1 - \chi_{\text{возд.}}}{1 + 0,555\zeta(1 - \chi_{\text{возд.}})} \left(\rho_{\text{эм}} + \frac{0,589\zeta}{K_{\text{вспен.}} \left(1 + \frac{1,613m_o}{1 - m_o} \right)} \right). \quad (15)$$

В уравнении (15) величина m_o известна из паспорта на суспензионный полистирол, $K_{\text{вспен.}}$ задается заказчиком (производителем Эмульпора), $\chi_{\text{возд.}}$ – технологический параметр смешивания эмульсии с гранулами пенополистирола, ζ – задается взрывником-технологом.

Известно, что процесс ударного разложения пенополистирола сопровождается карбонизацией продуктов распада и происходит по схеме [Нифадьев В.И.]:



Общий тепловой эффект ударной газификации пенополистирола равен

$$q_{nn} = 219,9 \text{ КДж / моль} = 52,55 \text{ Ккал / моль}. \quad (17)$$

Показано, что удельная теплота взрыва Эмульпора равна

$$Q_{\text{эмульпор}} = q^* \rho_{nn}^{\text{нас}} + \frac{Q_v \rho_{\text{эм}}}{\zeta}, \quad (18)$$

где $q^* = 505,3$ – удельная теплота ударного разложения пенополистирола, Ккал/кг.

Для объяснения детонации низкоплотных Эмульпоров была выдвинута гипотеза, что передача детонации внутри заряда осуществляется распространяющимися вперед зоны химической реакции, струями высокоэнтальпийных продуктов детонации самого ЭВВ. При этом, химическая реакция происходит в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа. Для доказательства утверждения, что детонации в Эмульпорах осуществляется под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления были проведены экспериментальные и теоретические исследования. При полигонных исследованиях осуществлялись опыты по измерению полноты и скорости детонации при подрыве открытых цилиндрических зарядов исследуемого ЭВВ в картонных оболочках.

Для измерения скорости детонации использовалась аппаратура: «VODMate» («Instantel») и «HandyTrap» («MREL»), реализующая реостатный метод измерения скорости детонации. Для создания Эмульпоров использовалась эмульсия следующего состава: NH_4NO_3 – 75,0 % массы; H_2O – 18 % массы; эмульгатор – 1,0 % массы; индустриальное масло – 6,0 % массы. Плотность эмульсии при данном химическом составе на основании лабораторных измерений составила 1328 кг/м.

В *первой серии* опытов (рисунок 4) изучалась передача детонации через медную пластинку, перекрывающую сечение заряда и имеющую толщину 4 мм. Пластинка размещалась перпендикулярно оси заряда на расстоянии от места инициирования заряда. ЭВВ изготавливалось смешением гранул пенополистирола с эмульсией. Диаметр зарядов в первой серии опытов составлял 90 мм. Средний диаметр гранул пенополистирола – 1. Насыпная плотность – 30 кг/м³. Плотность Эмульпора – 0,70 г/см³.

Вывод из первой серии опытов: при плотности заряда ниже 0,70 г/см³ передачи детонации через медную пластинку не наблюдалось.

Во *второй серии* опытов измерялась скорость распространения взрывного процесса по заряду ВВ. Взрывались заряды диаметром 130 и 240 мм.

ЭВВ Эмульпор, изготавливалось смешением гранул пенополистирола с эмульсией. Средний диаметр гранул пенополистирола – 2...3 мм. Насыпная плотность – 40 кг/м³.

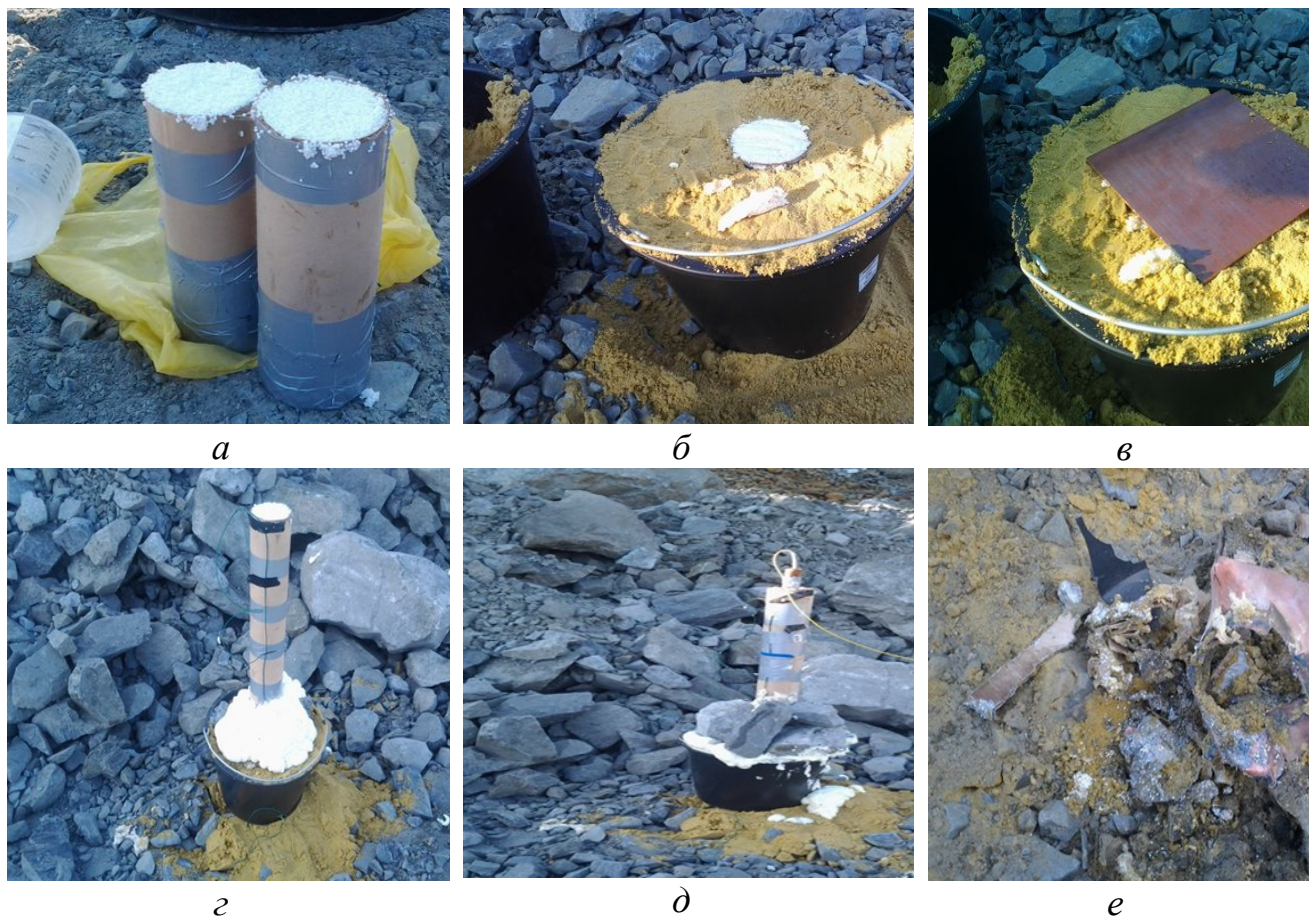


Рисунок 4 – Иллюстрация первой серии опытов (буквы под фотографиями указывают на последовательность действий)

В результате опытов установлено, что при инициировании состава промежуточными детонаторами из тротильовых шашек Т-1000-Л-ПО, Эмульпор полностью детонирует. При этом скорость детонации (VOD) составляет 4123 м/с при взрывании заряда диаметром 240мм (рисунок 5) и 4065 м/с – при диаметре заряда 130мм (рисунок 6).

ЭВВ Эмульпор, изготавливалось смешением гранул пенополистирола с эмульсией. Средний диаметр гранул пенополистирола – 2...3 мм. Насыпная плотность – 40 кг/м³.

В результате опытов установлено, что при инициировании состава промежуточными детонаторами из тротильовых шашек Т-1000-Л-ПО, Эмульпор полностью детонирует. При этом скорость детонации (VOD) составляет 4123 м/с при взрывании заряда диаметром 240мм (рисунок 5) и 4065 м/с – при диаметре заряда 130мм (рисунок 6).

В рассматриваемом случае $\zeta = 1,95$; $\rho_{oo} = 600$ кг/м³; $\rho_{эм} = 1328$ кг/м³; $\rho_{nn} = 40$ кг/м³.

Расчеты показывают, что условие низкоплотности Эмульпора выполняется ($\zeta < 1,9$).

ЭВВ Эмульпор, изготавливалось смешением гранул пенополистирола с эмульсией. Средний диаметр гранул пенополистирола – 2...3 мм. Насыпная плотность – 40 кг/м³.

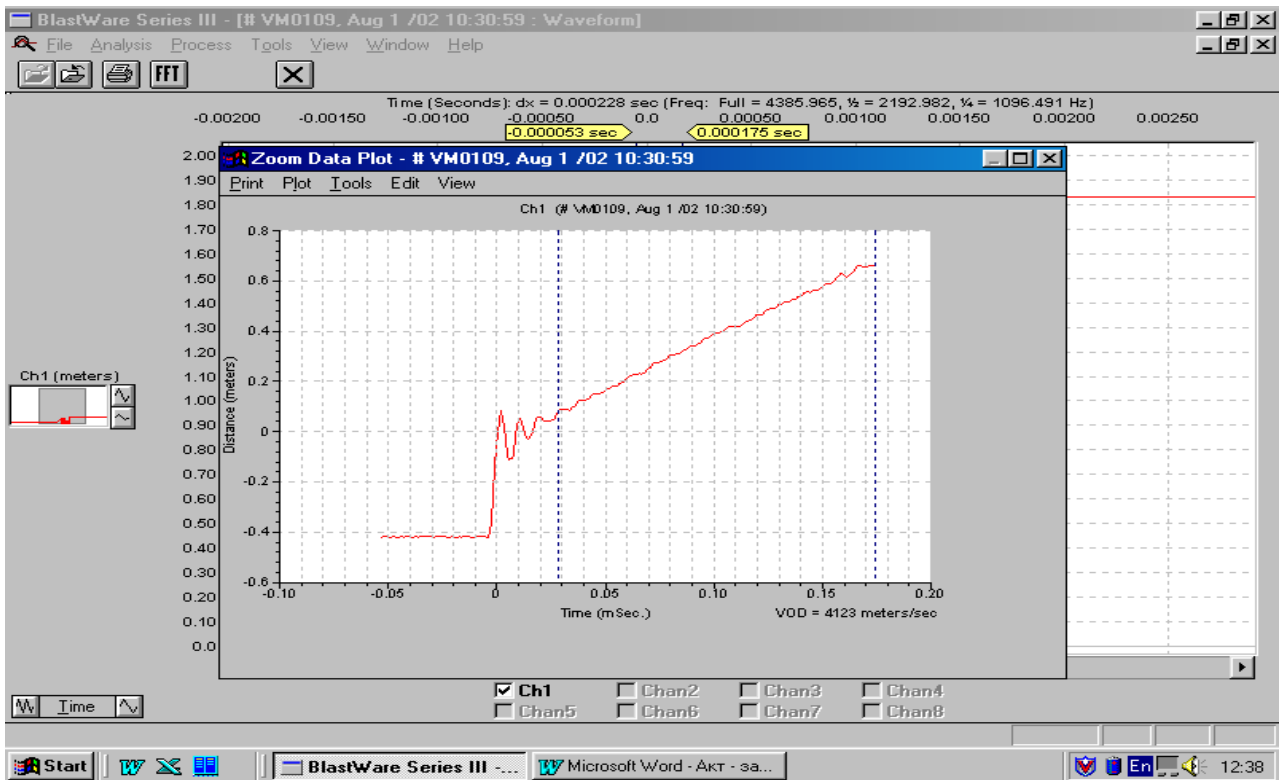


Рисунок 5 – Зависимость пути, пройденного детонационной волной от времени. Диаметр заряда – 240 мм. VOD = 4123 м/с. ПД – шашка Т-1000-Л-П. $\rho_{oo} = 600 \text{ кг/м}^3$

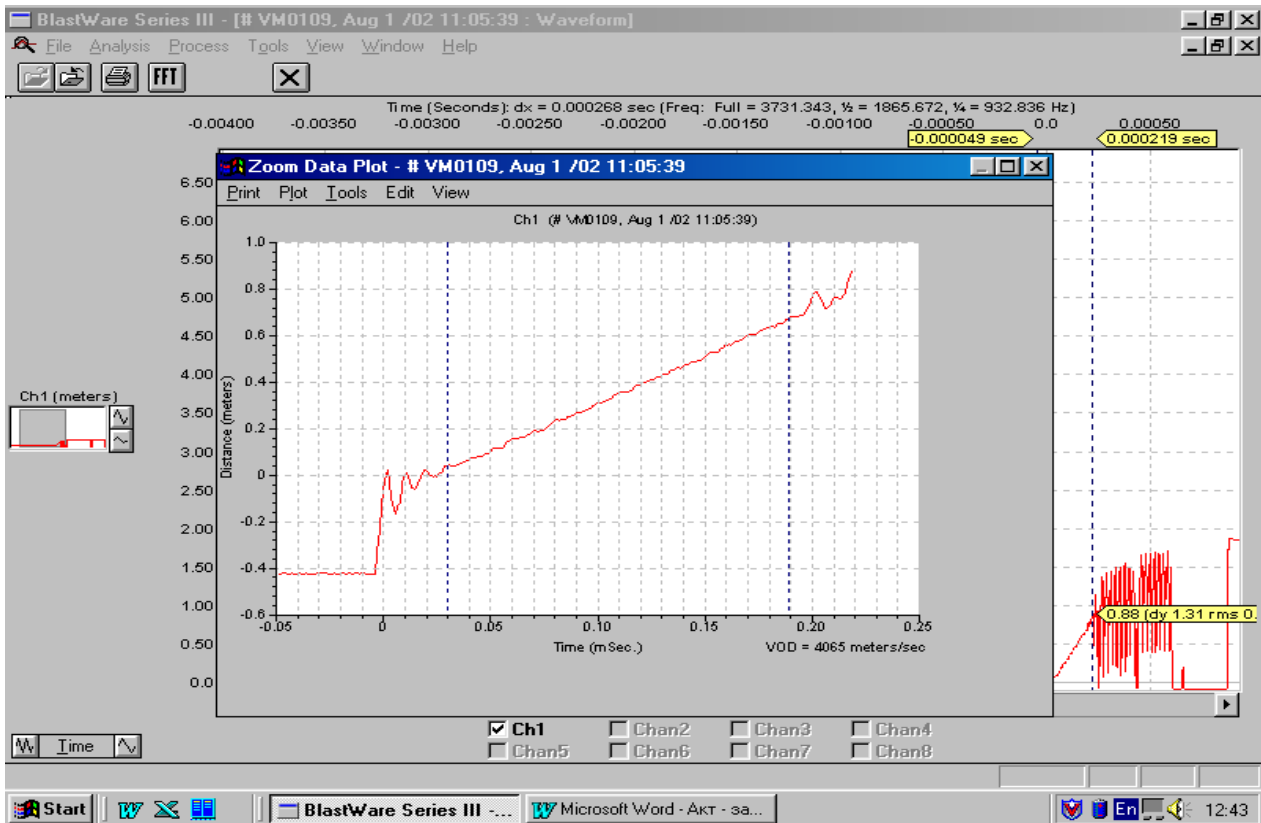


Рисунок 6 – Зависимость пути, пройденного детонационной волной от времени. Диаметр заряда – 130 мм. VOD = 4065 м/с. ПД – шашка Т-1000-Л-П. $\rho_{oo} = 600 \text{ кг/м}^3$

В результате опытов установлено, что при инициировании состава промежуточными детонаторами из тротильовых шашек Т-1000-Л-ПО, Эмульпор полностью детонирует. При этом скорость детонации (VOD) составляет 4123 м/с при взрывании заряда диаметром 240мм (рисунок 5) и 4065 м/с – при диаметре заряда 130мм (рисунок 6).

В рассматриваемом случае $\zeta = 1,95$; $\rho_{oo} = 600$ кг/м³; $\rho_{эм} = 1328$ кг/м³; $\rho_{mn} = 40$ кг/м³.

Расчеты показывают, что условие низкоплотности Эмульпора выполняется, поскольку $\zeta < 1,9$.

Таким образом, в рассматриваемой серии опытов структура Эмульпор представлял собой «туман» из капелек матричной эмульсии, разделенных друг от друга воздушными включениями и(или) гранулами пенополистирола.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что величина скорости детонации во второй серии опытов рассчитанная по методике, предложенной для случая, когда эмульсионная фаза в Эмульпорах представляет односвязную среду, равна $VOD = 3195$ м/с. При этом удельная теплота взрыва рассчитывалась по уравнению (25). Полученное расчетное значение скорости значительно меньше полученного в ходе экспериментов.

Рассмотрим выдвинутую концепцию, что в низкоплотных ЭВВ (имеется связная гранульно-воздушной система) возбуждение детонации происходит под действием высокоскоростного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления. При этом химическая реакция проходит в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа.

Определим параметры фильтрующегося потока взрывных газов из области высокого давления. Введем обозначения: u_* – скорость потока относительно неподвижного наблюдателя; D_* – скорость детонации; ρ_f , T_f – плотность и температура взрывных газов в головной части потока взрывных газов, истекающих из области высокого давления; ρ_x , T_x – плотность и температура воздуха в головной части ударной воздушной волны, вызванной потоком газов; k , γ – коэффициенты политропы и адиабаты продуктов взрыва, соответственно.

На основании газодинамических соотношений в рамках двухполитропной модели расширения взрывных газов, имеем следующие уравнения для определения параметров потока взрывных газов, фильтрующегося из области высокого давления:

$$\frac{u_*}{D_*} = \frac{3k-1}{k^2-1} + \frac{u}{D} + \frac{2k(k-\gamma)}{(\gamma-1)(k^2-1)} \left(\frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2a3}} \right)^{\frac{k-1}{2}} - \frac{2k}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{(\gamma_a+1)(k+1)\rho_a}{2\rho_o^{23a}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \times$$

$$\times \left(\frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2a3}} \right)^{\frac{k-\gamma}{2\gamma}} \left(\frac{u_*}{D_*} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (19)$$

$$\rho_f = \left(\frac{(\gamma_a+1)(k+1)\rho_a u_*^2}{2\rho_o^{2a3} D_*^2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{k+1}{k} K_+ \alpha \rho_o^{2a3} \right)^{\frac{k}{\gamma}} \frac{1}{K_+ \alpha}, \quad (20)$$

$$T_f = \frac{2k}{k+1} T_B \left(\frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2a3}} \right)^{\frac{k-\gamma}{\gamma}} \left(\frac{(\gamma_a + 1)(k+1) \rho_a u_*^2}{2 \rho_o^{2a3} D_*^2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (21)$$

где $\gamma_a = 1,2$ – показатель адиабаты воздуха в ударной волне; T_B – температура продуктов взрыва.

Истекающий из области высокого давления поток взрывных газов вызывает в воздухе, находящемся между гранулами и в гранулах пенополистирола (пористость 95...98%) ударную волну. Данная ударная волна и следующий за ней поток горячих взрывных газов обтекают капельки «тумана» из матричной эмульсии. Если данные капельки вспыхнут за время меньшее, чем продолжительность процесса разложения ВВ в зоне активной химической реакции (область высокого давления), то распространение взрывного процесса по низкоплотному ЭВВ будет определяться скоростью распространения данного зажигательного процесса.

Время индукции τ зажигания капли эмульсии при обдуве ее ударной воздушной волной и потоком взрывных газов найдется из уравнений (полагаем, что вследствие чрезвычайной кратковременности процесса зажигания, основную роль в его осуществлении играет лучистая энергия):

$$\tau = \tau_g t_a t_a = \frac{c R T_s^2}{E Q z} \exp \left(\frac{E}{R T_s} \right) \tau_g = \frac{1 - 0,2 |\Theta_H| + 0,36 \Theta_H^2}{1 - 0,8 \beta}, \quad (22)$$

где $\Theta_H = \frac{E(T_H - T_s)}{R T_s^2}$ – температурный напор; $\beta = \frac{R T_s}{E}$ – показатель зависимости скорости реакции от температуры. T_H – начальная температура эмульсии; T_s – температура поверхности капли эмульсии при обдуве ее ударной воздушной волной и потоком взрывных газов с учетом торможения ударной волны и потока взрывных газов и тепловой активностью веществ, участвующих в процессе теплопередачи.

Условие возникновения передачи детонации струями взрывных газов, истекающих из области высокого давления, будет

$$\tau < t_{\text{хим.р.}}, \quad (23)$$

где

$$t_{\text{хим.р.}} = \frac{R_{\text{др}}}{v_{\text{гор.}}} \quad (24)$$

$R_{\text{др}}$ – средний радиус капли эмульсии; $v_{\text{гор.}}$ – скорость абляционного горения.

Скорость абляционного горения определяется по формуле [В.В. Андреев, А.П. Ершов, Л.А. Лукьянчиков]:

$$v_{\text{гор.}} = \left(\frac{\rho_f}{\rho_{\text{эм}}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\chi_g u_*^2}{R_{\text{др}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (25)$$

где χ_g – температуропроводность взрывных газов в головной части потока.

Полученные соотношения (19)-(22) позволяют оценить скорость распространения детонационно-подобного процесса, а уравнения (23)-(25) – возможность передачи процесса струями взрывных газов, истекающих из области высокого давления.

В результате расчетов по модели струйной передачи детонации для Эмульпора плотностью 600 кг/м^3 установлено: скорость газового потока, истекающего из области высокого давления составляет 3837 м/с , а скорость ударной воздушной волны, распространяющейся перед потоком – 4221 м/с ; время реакции – $56,2 \text{ мкс}$ и время индукции загорания эмульсии – $51,7 \text{ мкс}$.

Таким образом, представление о возбуждении низкоплотного ЭВВ струями взрывных газов, истекающих из области высокого давления, позволяют получить численные значения для скорости детонации близкие к экспериментально определенным ($4065 \dots 4123 \text{ м/с}$).

Расчеты по предложенной модели показывают, что рассматриваемого случая давление в области протекания реакции составляет $1,69 \text{ ГПа}$. Анализ результатов выполненного расчета показывает, что в отличии от модели Зельдовича-Неймана-Деринга, наблюдается падение давления от плоскости Чепмена-Жуге до детонационного фронта. Данное распределение давления в головной части детонационной волны характерно для неидеальной газовой детонации. Постепенное нарастание давления взрывных газов после прихода детонационной волны снижает бризантное действие взрыва на горные породы, окружающие заряд. Данное обстоятельство и невысокое максимальное давление при взрыве низкоплотного ЭВВ позволяет рекомендовать данные ЭВВ к применению при производстве щадящего взрывания.

Опытно-промышленные испытания. Опытно-промышленная проверка возможности осуществления гладкого взрывания при помощи низкоплотного Эмульпора была осуществлена на карьере АО «Ураласбест» на опытно-промышленном взрыве блока 141/15-центр.

Для осуществления гладкого взрывания были пробурены скважины. Диаметр скважин – 115 мм , расстояние между скважинами – 2 м .

Традиционное взрывание предполагало использование гирляндных зарядов из патронов аммонита №6 ЖВ с линейной плотностью заряда – $1,0 \text{ кг/м}$.

Расчет требуемой плотности заряжания при применении низкоплотного ЭВВ осуществлялся по эмпирической формуле, предложенной в работе Кузнецова В.А. для гладкого взрывания

$$\rho_{ee} = \rho_{st} \left(\frac{D_{st}}{D_{ee}} \right)^2 \left(\frac{E_{st}}{E_{ee}} \right)^{1,25}, \quad (26)$$

где ρ_{st} , D_{st} , E_{st} и ρ_{ee} , D_{ee} , E_{ee} – плотность заряжания, скорость детонации, коэффициент относительной работоспособности для эталонного ВВ (аммонит №6 ЖВ) и эмульсионного ВВ.

При $\rho_{st} = 96 \text{ кг/м}^3$, $D_{st} = 4800 \text{ м/с}$, $E_{st} = 1$, $D_{ee} = 3200 \text{ м/с}$, $E_{ee} = 0,5$ на основании (26), имеем $\rho_{ee} = 513 \text{ кг/м}^3$.

ЭВВ изготавливалось в процессе заряжания скважин на смесительно-зарядной машиной ТСЗМ-11, предназначенной для заряжания скважин смесью «эмульсионное ВВ + ANFO».

В ходе эксперимента было взорвано 98 сухих скважин диаметром 115 мм.

Длина скважин – 16,5 м; длина заряда – 12,5 м. Плотность заряжания – 485 кг/см³. Инициирование мгновенное.

Расчеты показали, что при данной плотности ЭВВ давление в области активного протекания реакции составляет 1050 МПа; скорость газового потока, истекающего из области высокого давления – 2934 м/с.

Качество гладкого взрывания при использовании низкоплотных ЭВВ оказалось сравнимым с качеством гладкого взрывания при традиционном использовании гирляндных зарядов из патронов аммонита 6ЖВ. Выводы, сделанные на основании аналитических исследований, о возможности эффективного применения низкоплотных Эмульпоров ЭВВ при производстве гладкого взрывания на открытых горных работах подтвердились.

Таким образом, экспериментально и теоретически обосновано физико-математическое описание детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола.

Показано, что детонация в низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола, имеет струйный характер и описывается распространяющейся по заряду детонационно-подобной волной горения капель эмульсии в струях раскаленных взрывных газов, истекающих из движущейся со скоростью детонации области высокого давления. Это доказывает **четвертое научное положение**.

Пятая глава посвящена разработке технологии применения сульфидоустойчивых и низкоплотных ЭВВ в геотехнологических процессах, в части производства взрывных работ: создание зарядов ЭВВ с применением самоходных напорно-подающих насосных установок.

1. Технология заряжания ЭВВ восстающих скважин с использованием рукавов-оболочек (патент на изобретение RU 2804470).

Основной проблемой, возникающей при заряжании ЭВВ в восходящие скважины, является удержание заряда, особенно в условиях высокой обводненности горного массива.

В общем случае рукав для патрона взрывчатого вещества (рисунок 7) представляет собой газопроницаемую оболочку с герметичным верхним торцом для размещения внутри нее шланга от зарядного устройства.

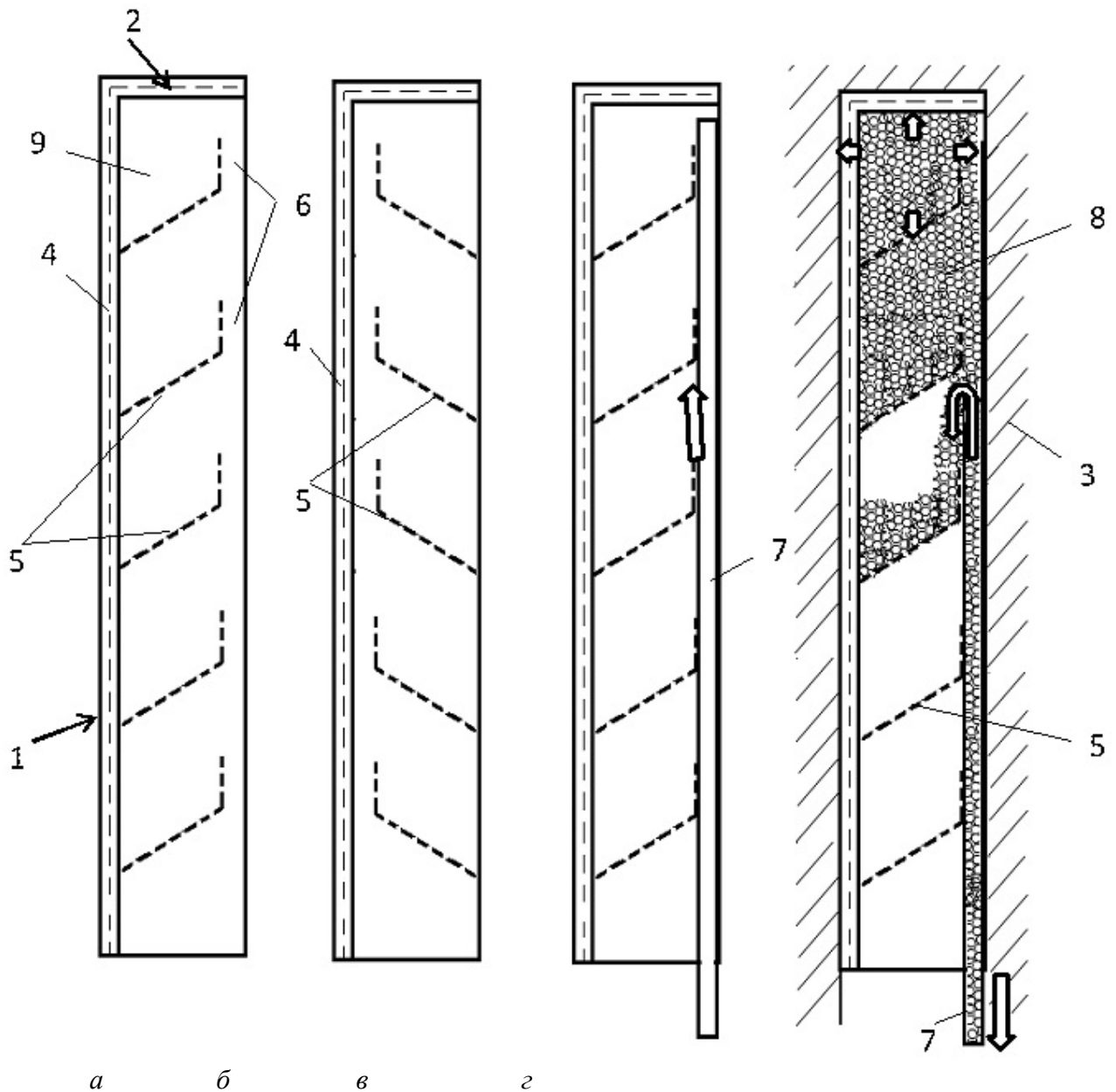


Рисунок 7 – Схемы расположения рукава для патрона ВВ в скважинах: а, б – варианты исполнения рукава патрона ВВ в восходящей скважине; в – размещение шланга от зарядного устройства в рукаве; г – размещение рукава со шлангом в восходящей скважине и заполнении рукава для получения патрона ВВ

Оболочка выполнена из тканого или нетканого полотна с гидрофобной пропиткой путем сшивания боковых срезов полотна по его длине с диаметром больше диаметра заряжаемой скважины. Дополнительно выполнены поперечные прошивания под углом к продольной оси оболочки через равные промежутки.

На рисунке 9 показана конструкция разложенного на плоскости кососимметричного рукава для заряжания восходящих скважин ЭВВ.

Аналитические исследования позволили разработать математическую модель рукава кососимметричной конструкции для заряжания восстающих скважин. Рукава, выполненные на основании предложенной методики, позволяют обеспечить оптимальную плотность заряжания скважинного заряда при выполнении условия удержания заряда в скважине.

Введем обозначения геометрических параметров a , b , c , D , d и β – которые понятны из рисунке 8.

Величина D может быть найдена из уравнения

$$D \approx \pi R \left(1 + \frac{r}{2R} \right), \quad (27)$$

где r – внешний радиус зарядного шланга.

Величина d может быть определена по формуле $d \approx (5...6)r$.

Величина b определяется из уравнения

$$b = a \left(1 + \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right). \quad (28)$$

Расчеты позволили получить условие эффективного применения рукава с точки зрения использования энергии взрыва заряда ЭВВ на дробление отбиваемых пород

$$\frac{\frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta}{3 \left(1 + \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right)} = \frac{1}{1 + 0,5 f_{\text{крен}}}. \quad (29)$$

Важнейшей задачей рукава в нашем случае является создание условий удержания заряда в восходящей скважине. Аналитические исследования показали, что восходящий заряд не выпадает из скважины, если коэффициент трения в паре «материал рукава-горная порода» удовлетворяет условиям:

при $c > D \operatorname{ctg} \beta$

$$k_{mp} \geq \frac{R}{a} \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right) + f_{mp} \frac{r}{R} \left(1 - \left(\frac{c}{a} - \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right)^2 \right), \quad (30)$$

$$\text{при } c \leq D \operatorname{ctg} \beta \quad (31)$$

$$k_{mp} \geq \frac{R}{a} \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right) + f_{mp} \frac{r}{R}. \quad (32)$$

Анализ зависимостей (28)-(32) показывает, что при использовании рукавов рассматриваемой конструкции, размещаемых в 100-миллиметровых скважинах, для отбойки скальных в широком диапазоне крепости пород, их геометрические

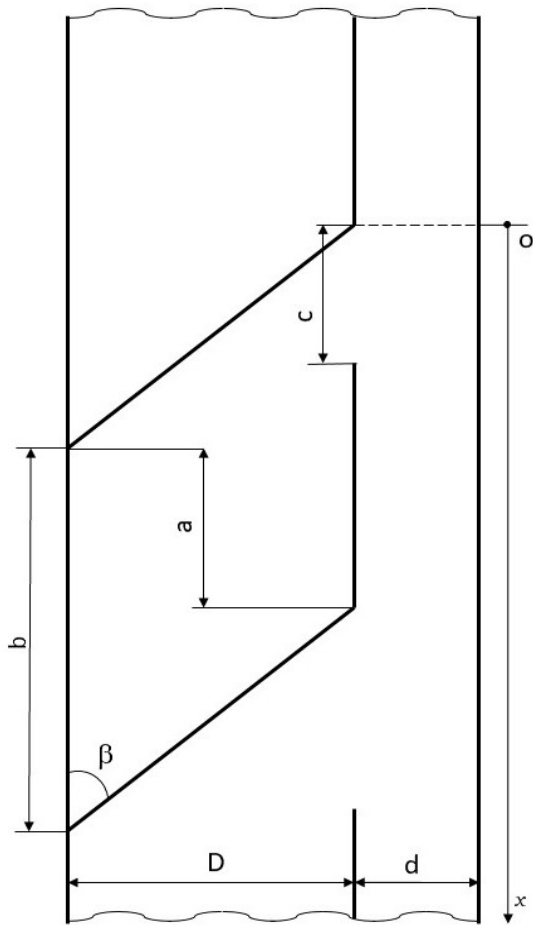


Рисунок 8 – Схема кососимметричного рукава для заряжания восстающих скважин

параметры должны лежать в диапазоне: $0,6\text{ м} \leq a \leq 1,0\text{ м}$, $1,1\text{ м} \leq b \leq 1,5\text{ м}$, $0,4\text{ м} \leq c \leq 0,6\text{ м}$, $D \cong 0,19\text{ м}$, $d \cong 0,1\text{ м}$ и $20^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$.

В этом случае достигается благоприятная для прохождения детонации пористость ЭВВ после газификации (10...20%), а благодаря оптимальному заполнению скважин ЭВВ достигается более равномерное дробление пород даже при уменьшенном на 10...15% расходе ЭВВ (по сравнению с колонковым зарядом).

Эффективность применения технологии заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек кососимметричной конструкции подтверждена успешным заряжением ЭВВ восстающих скважин при подземной добыче на рудниках, где выполняет работы ООО «УралВзрывТехнология».

Вышеприведенные результаты представляют собой практически значимую технологию заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек кососимметричной конструкции, что обосновывает **пятое научное положение**.

2. Технология заряжания обводненных скважин низкоплотными Эмульнорами

Заряжание обводненных скважин на карьерах низкоплотными ВВ, имеющими плотность ниже плотности карьерных вод, сопряжено со сложностями, обусловленными наличием выталкивающей силы, действующей со стороны скважинной воды на заряд.

Первый способ (патент на изобретение RU2818120).

Предлагаемая технология направлена на создание рукава для обводненных нисходящих скважин, обладающего возможностью гарантированной укладки на дно скважины даже в условиях наличия в ней воды для исключения всплытия рукава при его заполнении низкоплотным ВВ.

Это достигается посредством того, что нижний герметизированный конец трубчатой формы оболочки выполнен из водонепроницаемого тканевого материала, отличного от основного материала оболочки, а полость в зоне этого конца заполнена тяжелой жидкостью с удельной плотностью выше удельной плотности грунтовой воды (рисунок 9).

В зоне герметизированного конца часть стенки оболочки со стороны размещения тяжелой жидкости выполнена из нерастяжимого материала и имеет форму полого цилиндра, нижний торец которого закрыт слоем ткани, выполненной из водонепроницаемого стрейчевого материала (2), а тяжелая жидкость размещена в полости полого цилиндра на этом слое ткани.

При опускании тяжелая жидкость (3), как груз, точно позиционирует рукав на дне, принимая форму поверхности этого дна. Форма самого рукава над концевой его частью может находиться в любом состоянии (сплющена или скручена). При погружении рукава изначально в него вводится зарядный шланг (6). Часть оболочки (7) выполнена из нерастяжимого материала. В нижнюю часть заряда устанавливается промежуточный детонатор (8).

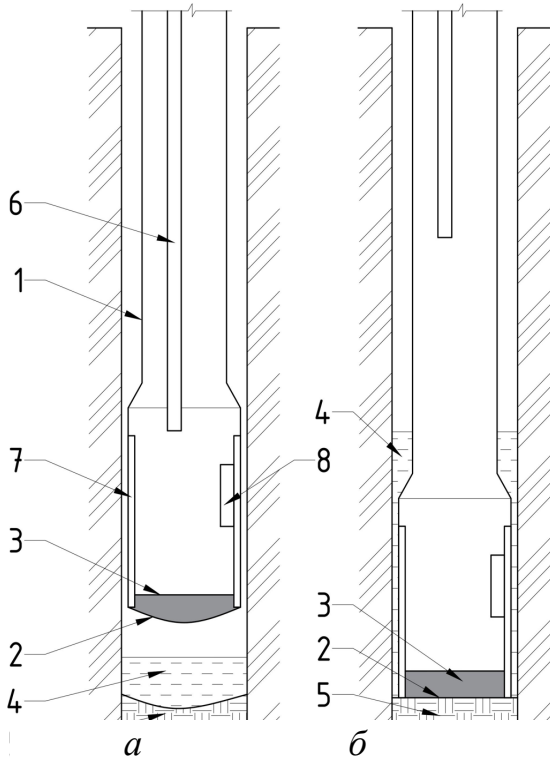


Рисунок 9 – Схема заряжения обводненных нисходящих скважин низкоплотным взрывчатом составом рукава: *а* – процесс введения рукава в скважину; *б* – положение рукава в обводненной скважине при заполнении его взрывчатым составом

Настоящая технология промышленно применима и позволяет заряжать обводненные нисходящие скважины низкоплотной взрывчатой смесью без дополнительных операций по осушке скважин, что существенно сокращает время на подготовку скважин к взрыванию.

Второй способ (Патент на изобретение RU2824083).

Данный способ заключается в применении для заряжения обводненных нисходящих скважин низкоплотным взрывчатым составом рукава, снабженного клиновым устройством, исключающим всплытия рукава при его заполнении низкоплотным ВВ (рисунок 10).

Это достигается тем, что к нижнему концу рукава, представляющем собой герметизированную с нижнего конца оболочку из водонепроницаемой ткани, привязан груз с удельной плотностью, превышающей удельную плотность заполняющей скважину грунтовой воды, а другой конец оболочки использован для ввода в ее полость

шланга подачи взрывчатого состава. При этом груз представляет собой особую самозаклиновывающуюся систему, приводимую в действие шнуром, завязанным узлом-самосбросом.

На основании аналитических исследований получено следующее условие расклинивания предлагаемой системы

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{k_2^{mp} - k_1^{mp}}{1 + k_1^{mp} k_2^{mp}}, \quad (33)$$

где k_1^{mp} – коэффициент трения между центральной частью и боковыми клиньями («башмаками»); k_2^{mp} – коэффициент трения между «башмаками» и горной породой; α – угол наклона граней «башмаков» к вертикали.

Анализ условия (33) показывает, что для эффективной работы клиновой необходимо увеличивать разницу $k_2^{mp} - k_1^{mp}$.

Это достигается применением антифрикционного покрытия контактирующих между собой плоскостей центральной части системы и «башмаками».

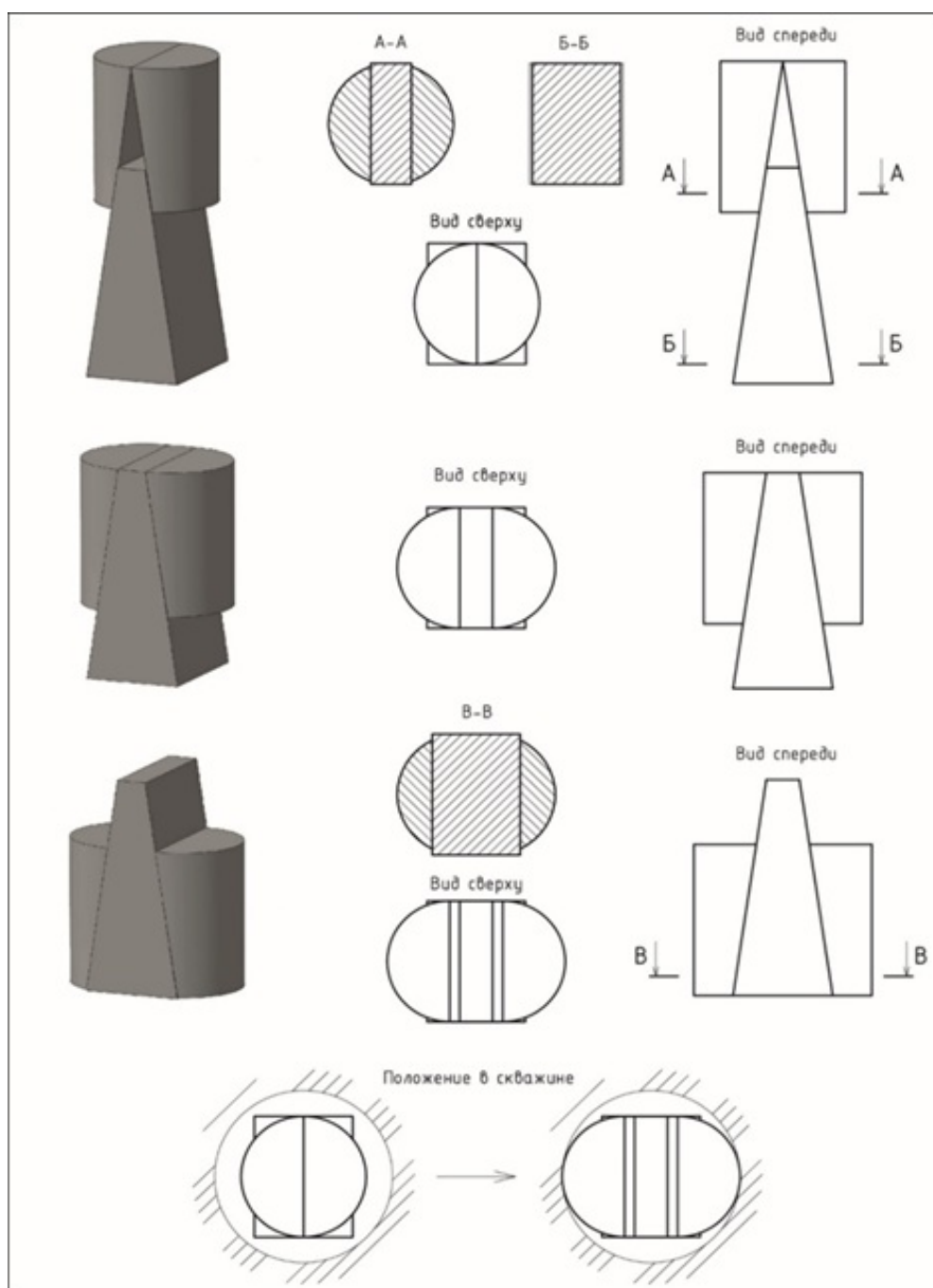


Рисунок 10 - Принципиальная схема работы клиновой системы для удержания заряда низкоплотного ЭВВ, размещенного в оболочку из водонепроницаемого гибкого материала

Разработанный способ применения рукавов позволяет заряжать скважины как заполненные водой, так и частично опорожненные откачкой или опорожненные, но с водой в донной части, что подтверждается промышленными экспериментами на карьерах, где выполняет работы ООО «УралВзрывТехнология».

Вышеприведенные результаты представляют собой практически значимые технологии по заряданию обводненных нисходящих скважин низкоплотными Эмульпорами с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда, что подтверждает **шестое научное положение**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований разработаны физико-технические и технологические основы эффективного и безопасного применения ЭВВ при добыче сульфидных руд и выполнении щадящего взрывания на карьерах, что является решением актуальных научно-технических проблем обеспечения эффективности и безопасности взрывных работ при добыче сульфидных руд и получения эффективных технологий выполнения щадящего взрывания при взрывном разрушении горных пород.

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

1. Разработана физико-математическая модель очага разогрева сульфидного включения в заряде ЭВВ.

Получена математическая модель описания разогрева сульфидного включения в ЭВВ, основанная на исследовании нестационарного термохимического процесса экзотермической химической реакции разложения аммиачной селитры при ее взаимодействии с сульфидсодержащей горной породой на контакте заряда ЭВВ, приводящего к разогреву ВВ и повышению температуры в очаге разогрева. Модель учитывает начальные и граничные условия и определяет адиабатические условия перехода реакции в «тепловой взрыв» ВВ, что позволяет повысить безопасность работ.

Показано, что минимальные размеры очага разогрева, при которых возможно возгорание, зависят от размера сульфидсодержащих включений, входящих в очаг: с уменьшением размера включений – уменьшаются размеры очага.

Опасные очаги разогрева при подземных горных работах могут образовываться преимущественно в зонах высокой трещиноватости и нарушенности горных пород, пересекаемых скважиной. Для ликвидации возможности формирования данных потенциально опасных очагов разогрева целесообразно ВВ в скважинных зарядах помещать в защитные оболочки. В случае применения гранулированных или эмульсионных ВВ такими оболочками могут служить «рукава» из прочных полиамидных тканей.

Предложена методика оценки допустимого времени нахождения АСВВ во взрывных скважинах в сульфидном массиве при формировании локальных очагов разогрева.

2. Впервые разработана химическая модель взаимодействия аммиачно-селитренных ВВ с колчеданными горными породами в присутствии шахтных вод, основанная на решающем значении ионов Fe^{3+} в химическом растворении пирита. Модель позволяет описывать развитие начальной низкотемпературной фазы данного процесса и его переход в высокотемпературную фазу.

Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что одним из важнейших факторов агрессивности колчеданных руд по отношению к аммиачной селитре является наличие в реакционной смеси пирита и аммиачной селитры сульфатов железа (II) и железа (III).

Показано, что необходимая массовая доля ингибитора в ЭВВ, при которой обеспечивается безопасность применения ЭВВ в сульфидных рудах, определяется массовыми долями активных агентов (веществ) в составе шахтных вод и химическими свойствами ингибитора.

Определена и подтверждена зависимость массовой доли ингибитора в составе ЭВВ от массовой доли активных агентов (катализаторов разложения аммиачной селитры), содержащихся в составе шахтных вод, что позволяет определить минимально необходимое содержание ингибитора при которой обеспечивается безопасность применения ЭВВ при взрывных работах в сульфидных рудах.

Выяснено, что существуют геохимические ограничения на возможность применения ЭВВ без специальных изолирующих заряд оболочек, обусловленное степенью минерализации шахтных вод.

3. Впервые получено экспериментально подтвержденное физико-математическое описание детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола.

Показано, что детонация в низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола, имеет струйный характер и описывается распространяющейся по заряду детонационно-подобной волной горения капель эмульсии в струях раскаленных взрывных газов, истекающих из движущейся со скоростью детонации области высокого давления.

Разработана методика определения основных параметров детонации в низкоплотных ЭВВ, основанная на модели детонационно-подобной волны горения капель эмульсии в струях взрывных газов. Разработана методика расчета удельной теплоты взрыва эмульпора, учитывающая теплоту ударного разложения пенополистирола. Разработана методика оценки образования в ЭВВ, сенсibilизированном гранулами пенополистирола, связанной «гранульно-воздушной» системы.

Получено выражение для определения плотности ЭВВ, с учетом массовой доли изопентана в суспензионном полистироле, коэффициента вспенивания, отношения насыпного объема гранул пенополистирола к объему матричной эмульсии при изготовлении ЭВВ и технологии смешивания эмульсии с гранулами пенополистирола.

Показано, что при взрыве низкоплотного ЭВВ наблюдается благоприятное для проведения щадящего взрывания постепенное возрастание давления в продуктах разложения ВВ.

Показано, что при использовании гранул пенополистирола для сенсibilизации ЭВВ необходимо осуществлять контроль за электропроводностью эмульсии и крупностью ее глобул.

Получен критерий, позволяющий по электропроводности эмульсии и крупности ее глобул оценить опасность разрушения эмульсии под действием диэлектрофоретических сил, что повышает уровень безопасности взрывных работ с применением ЭВВ, сенсibilизированных гранулами вспененного полистирола.

4. Разработана технология заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек кососимметричной конструкции.

Получены экспериментально подтвержденные условия надежной механической фиксации заряда ЭВВ в восстающих скважинах при применении разработанных рукавов-оболочек кососимметричной конструкции.

5. Разработана технология заряжания нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда в обводненных скважинах.

Предлагаемые технологии позволяют заряжать обводненные нисходящие скважины низкоплотной взрывчатой смесью без дополнительных (обязательных) операций по осушке скважин, что существенно сокращает время на подготовку скважин к взрыванию. Показано, что наилучшие технико-экономические показатели имеют эмульпоры с окислительной фазой из аммиачной селитры.

Опытно-промышленная проверка показала эффективность применения низкоплотных ЭВВ при гладком взрывании на карьере ОАО «Асбест».

Научные положения, рекомендации и методики, представленные в диссертации, использовались

- при ведении взрывных работ на горнодобывающих предприятиях, разрабатывающих сульфидные руды, ООО «УралВзрывТехнология» с использованием разработанных технологий заряжания ЭВВ взрывных скважин в предохранительные рукава-оболочки;

- при производстве опытно-промышленных взрывов по заоткоске бортов карьера ОАО «Ураласбест» с использованием малоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Список опубликованных по теме диссертации работ в рецензируемых научных журналах, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»:

1. Оценка химической совместимости промышленных ВВ с разрабатываемыми породами / В. В. Пупков, И. Ю. Маслов, Л. В. Бачурин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №4. – С. 37-40.

2. Результаты дополнительных исследований обстоятельств инцидента, происшедшего 27.08.03 в карьере ОАО "Лебединский ГОК" при применении эмульсионных ВВ / В. В. Пупков, И. Ю. Маслов, Л. В. Бачурин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – №6. – С. 14-15.

3. Горинов, С.А. Влияние химического состава окислительной фазы эмульсии ЭВВ на взрывчатые характеристики при их сенсibilизации пластиковыми полимикросферами / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №9. – С. 366-370.

4. Кутузов, Б. Н. Обоснование технологических параметров эмульпоров / Б. Н. Кутузов, И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №4. – С. 326-332.

5. Маслов, И. Ю. Техничко-экономическое обоснование выбора ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола при открытых работах / И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельная статья (специальный выпуск). – 2013. – №12. – С. 3-9.
6. Маслов, И. Ю. Оценка характеристической плотности ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола/ И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельная статья (специальный выпуск). – 2014. – №6. – С. 3-11.
7. Маслов, И. Ю. Учет коэффициента вспенивания гранул пенополистирола при расчете плотности ЭВВ, сенсibilизированного этими гранулами/ И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №S10-2. – С. 3-16.
8. Горинов, С. А. Физико-техническое обоснование возможности применения низкоплотного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного гранулами пенополистирола, при контурном взрывании на карьерах / С. А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №S10-2. – С. 17-49.
9. Горинов, С.А. Особенности детонации низкоплотного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного легкими малопрочными гранулами / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S2-2. – С. 18-48.
10. Горинов, С. А. Обоснование требований к удельной электропроводности эмульсии при производстве ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Взрывное дело. – 2016. – № 115-72. – С. 126-142.
11. Эмульсионные взрывчатые вещества для добычи сульфидсодержащих горных пород / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов, М. Н. Оверченко, И. А. Пустовалов // Взрывное дело. – 2017. – №117-74. – С. 110-125.
12. Горинов, С. А. Физико-математическая модель разогрева сульфидсодержащего включения в аммиачно-селитренное ВВ / С. А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №S33. – С. 3-12.
13. Маслов, И. Ю. Изучение внутренней структуры колчеданных руд для оценки безопасности использования ВВ на основе аммиачной селитры / И. Ю. Маслов// Взрывное дело. – 2019. – №122/79. – С. 136-142.
14. Маслов, И. Ю. Вопросы экспериментального обоснования безопасного применения аммиачно-селитренных ВВ в сульфидсодержащих горных породах / И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Взрывное дело. – 2020. – №126-83. – С. 68-84.
15. Маслов, И. Ю. Влияние вида и содержания ингибитора на детонационные характеристики сульфидоустойчивых ЭВВ / И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Взрывное дело. – 2020. – №129-86. – С. 188-205.
16. Викторов, С. Д. Оценка продолжительности безопасного разогрева колчеданного включения в аммиачно-селитренное ВВ / С. Д. Викторов, И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Взрывное дело. – 2021. – №133-90. – С. 30-47.

17. Маслов, И. Ю. Определение содержания ингибитора в эмульсионных взрывчатых веществах для отбойки колчеданных руд / И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Взрывное дело. – 2023. – №139-96. – С. 51-66.

18. Маслов, И. Ю. К вопросу о содержании ингибитора в эмульсионных взрывчатых веществах для применения в сульфидных рудах / И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Взрывное дело. – 2023. – №141-98. – С. 68-85.

19. Маслов, И. Ю. Расчет параметров асимметричных рукавов для заряжания эмульсионными взрывчатыми веществами восстающих скважин / И. Ю. Маслов, С. А. Горинов // Взрывное дело. – 2024. – №142-99. – С. 75-88.

20. Брагин, П. А. Графоаналитический метод определения количественного состава эмульсии по фазам / П. А. Брагин, А. Ю. Бредихин, К. Р. Конюхов, И. Ю. Маслов // Взрывное дело. – 2025. – №147/104. – С. 91-98.

21. Маслов, И. Ю. К вопросу о расчете удельной теплоты взрыва эмульсионных взрывчатых веществ и гранэмитов / И. Ю. Маслов, С. А. Горинов, С. А. Козырев // Взрывное дело. – 2025. – №147-104. – С. 73-90.

22. Маслов, И. Ю. Оценка теплоты взрыва смесей эмульсии с гранулами вспененного полистирола / И. Ю. Маслов // Горная промышленность. – 2025. – №4. – С. 33-35.

23. Маслов, И. Ю. Расчет удельной теплоты взрыва эмульпоров / И. Ю. Маслов // Взрывное дело. – 2025. – №148-105. – С. 56-66.

Патенты на изобретения и полезные модели

24. Патент №2305673 С1 Российская Федерация, МПК С06В21/00, С06В47/14, F42D1/10. Способ ведения взрывных работ в обводненной скважине зарядом эмульсионного взрывчатого вещества: № 2006119021/02: заявл. 01.06.2006: опубл. 10.09.2007 / В.В. Пупков, И.Ю. Маслов.

25. Патент на изобретение 015055 В1 (ЕАРО), МПК С06В31/28, С06В47/14. Эмульсионное взрывчатое вещество (варианты): № 201000904: заявл. 29.06.2010: опубл. 29.04.2011 / Б.Н. Кутузов, В.П. Куприн, И.Ю. Маслов, Н.В. Савченко, С.А. Горинов.

26. Патент на полезную модель №154388 U1 Российская Федерация, МПК F42D1/10. Рукав для патрона взрывчатого вещества: №2015116741/03: заявл. 05.05.2015: опубл. 20.08.2015 / П.А. Брагин, И. Ю. Маслов, Е.Г. Сироткин.

27. Патент на полезную модель №154389 U1 Российская Федерация, МПК F42D1/10. рукав для патрона взрывчатого вещества: №2015116742/03: заявл. 05.05.2015: опубл. 20.08.2015 / П.А. Брагин, И.Ю. Маслов, Е.Г. Сироткин.

28. Патент №2753071 С1 Российская Федерация, МПК С06В31/28, В01F17/00. Эмульсионное взрывчатое вещество (варианты): №2020140483: заявл. 09.12.2020: опубл. 11.08.2021 / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов.

29. Патент №2804470 С1 Российская Федерация, МПК F42D1/08, F42D1/10, F42В3/087. Рукав асимметричной конструкции для заряжания восстающих скважин эмульсионным взрывчатым веществом: №2023107038: заявл. 24.03.2023: опубл. 02.10.2023 / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов.

30. Патент №818120 С1 Российская Федерация, МПК F42D1/08, F42B3/087. Рукав для заряжания обводненных скважин низкоплотным взрывчатым составом: №2023132949: заявл. 13.12.2023: опубл. 24.04.2024 / С.А. Горинов, И. Ю. Маслов.

31. Патент №2824083 С1 Российская Федерация, МПК F42D1/08, F42B3/087, E21C41/26. Рукав для заряжания обводненных скважин низкоплотным взрывчатым составом: №2024104329: заявл. 21.02.2024: опубл. 01.08.2024 / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов.

В прочих изданиях:

32. Горинов, С. А. К вопросу о выборе эмульсионных взрывчатых веществ при добыче сульфидсодержащих горных пород / С.А. Горинов, И. Ю. Маслов, В. Г. Шеменев // Технология и безопасность взрывных работ: Материалы научно-производственного семинара по взрывным работам, 2016, Екатеринбург, 18–19 октября 2016 года / Отв. ред. Г.П. Берсенев. – Екатеринбург: Издательство АМБ, 2017. – С. 70-75.

33. Горинов, С. А. Учет структуры колчеданных руд при оценке безопасного ведения взрывных работ / С. А. Горинов, И.Ю. Маслов // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно-производственных семинаров по взрывным работам, 2018». – Екатеринбург: Альфа Принт, 2019. – С. 73-78.

34. Маслов, И. Ю. Вопросы повышения безопасности применения аммиачно-селитренных ВВ в колчеданных рудах / И. Ю. Маслов, Горинов С. А. // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно-производственных семинаров по взрывным работам, 2019. – Екатеринбург: Альфа Принт, 2020. – С. 127-133.

35. Горинов, С. А. Детонация низкоплотного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного пористыми гранулами из легкого малопрочного материала / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву : Тезисы докладов, Москва, 29 ноября – 04 2020 года. Том 2. – Черногловка: Институт проблем химической физики РАН, 2020. – С. 58-59.

36. Gorinov, S. A. Detonation characteristics of low-density emulsion explosives sensitized with polystyrene foam beads, and their applicability in perimeter blasting at quarries / S. A. Gorinov, Maslov I. Y. // Materials of the XI International scientific and practical conference “Cutting-edge science”, April 30 – May 7, 2015. – V. 29. – Technical sciences. – Sheffield: Science and education LTD, 2015. – P. 96.

37. Gorinov, S. A. Detonation of a low-density emulsion explosive / S. A. Gorinov, I. Yu. Maslov // Progress in detonation research, St. Petersburg, 19–22 октября 2020 года / Edited by S. M. Frolov. – Moscow: ООО "ТОРУС ПРЕСС", 2020. – P. 81-82.

Подписано в печать 17.09.2026.
Формат 60х84х1/16. Усл. печ. л. 2,0
Печать лазерная. Заказ № 437. Тираж 120 экз.
Отпечатано ИП Сорокина Н.В.
ОГРНИП 323930100237372, г. Донецк,
ул. Университетская, 34.
Тел. +7 (949) 418-15-70, E-mail: Print-dc@mail.ru