

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ НАУЧНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ И
БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ»

На правах рукописи

Маслов Илья Юрьевич

**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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор,
академик РАН Адушкин Виталий Васильевич

г. Наро-Фоминск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДОБЫЧЕ СУЛЬФИДНЫХ РУД И ПРОИЗВОДСТВЕ ЩАДЯЩЕГО ВЗРЫВАНИЯ.....	13
1.1 Анализ научно-технических основ создания и применения аммиачно-селитренных взрывчатых веществ для разрушения сульфидных руд	13
1.1.1 Опасность взрыва сульфидной пыли	14
1.1.2 Опасность экзотермического взаимодействия аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с сульфидными рудами	21
1.2 Анализ научно-технических основ технологии осуществления щадящего взрывания	34
1.3 Постановка проблем и задачи исследования	37
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С СУЛЬФИДНЫМИ РУДАМИ.....	40
2.1 Изучение структуры колчеданных руд Урала	40
2.2 Физико-математическая модель разогрева сульфидсодержащего включения в аммиачно-селитренное взрывчатое вещество	46
2.3 Оценка продолжительности безопасного разогрева колчеданного включения в аммиачно-селитренное взрывчатое вещество	56
2.4 Влияние вида и содержания ингибитора на детонационные характеристики сульфидоустойчивых эмульсионных взрывчатых веществ	67
2.5 Выводы по главе 2.....	82
ГЛАВА 3. ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С СУЛЬФИДНЫМИ РУДАМИ.....	84
3.1 Химическая модель взаимодействия аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с сульфидными рудами	84

3.2 Определение содержания ингибитора в эмульсионных взрывчатых веществах для отбойки сульфидных руд.....	93
3.3 Математическая модель рукава кососимметричной конструкции для заряжания восстающих скважин	103
3.4 Выводы по главе 3.....	111
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОПЛОТНЫХ ЭМУЛЬПОРОВ	113
4.1 Оценка характеристической плотности эмульпоров.....	113
4.2 Учет коэффициента вспенивания гранул полистирола при расчете плотности эмульпоров	120
4.3 Расчет удельной теплоты взрыва эмульпоров	125
4.4 Физико-математическое описание детонации низкоплотных эмульпоров	131
4.5 Влияние химического состава окислительной фазы низкоплотных эмульпоров на их взрывчатые характеристики.....	147
4.6 Обоснование требований к удельной электропроводности эмульпоров	155
4.7 Выводы по главе 4.....	165
ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЯ СУЛЬФИДОУСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И НИЗКОПЛОТНЫХ ЭМУЛЬПОРОВ В ГЕОТЕХНОЛОГИИ.....	167
5.1 Технология заряжания эмульсионных взрывчатых веществ в восстающие скважины с использованием рукавов-оболочек	167
5.2 Технология заряжания обводненных скважин низкоплотными эмульпорами.....	178
5.3 Техничко-экономическое обоснование выбора эмульпоров при открытых горных работах.....	195
5.4 Выводы по главе 5.....	203
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	205
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	209

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	210
ПРИЛОЖЕНИЕ А Оценка химической активности горных пород месторождений, разрабатываемых Учалинским ГОКом, при их взаимодействии с аммиачной селитрой.....	239
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Копии документов о внедрении в производство результатов и рекомендаций диссертационной работы.....	321

ВВЕДЕНИЕ

Добыча твердых полезных ископаемых, являющихся основой тяжелой промышленности, в значительной степени зависит от взрывных технологий. 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 источников 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 щадящего 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, предотвращающих разложение и воспламенение ВВ, технологией заряжения скважинных зарядов, исключая 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 заряжения 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 заряжения 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 состоял 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 заряжения восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек, физико-математическое описание детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола, технология заряжения 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 заряжения восходящих скважин в специальные предохранительные рукава-оболочки для изоляции заряда ЭВВ от контакта с сульфидными рудами;

– разработана технология заряжения 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 заряжения 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 коллоквиуме 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 27 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, при этом пять работ опубликованы в изданиях категории К1 и К2.

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.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДОБЫЧЕ СУЛЬФИДНЫХ РУД И ПРОИЗВОДСТВЕ ЩАДЯЩЕГО ВЗРЫВАНИЯ

1.1 Анализ научно-технических основ создания и применения аммиачно-селитренных взрывчатых веществ для разрушения сульфидных руд

Ведение взрывных работ в сульфидных рудах сопряжено с опасностями, связанными с возможностями воспламенения и взрыва как сульфидной пыли в горных выработках, так и аммиачно-селитренного ВВ (АСВВ) при размещении его во взрывных скважинах вследствие экзотермического взаимодействия АСВВ с сульфидными рудами [11, 12, 76, 198, 218].

Эти опасности обусловлены физико-химическими свойствами как применяемых ВВ, так и разрушаемых сульфидных руд. При этом каждая из указанных опасностей имеет свою физико-химическую природу, что нашло отражение в регламентирующих ведение взрывных работ в сульфидных рудах документах [61, 62, 158, 159, 189, 190]. Целесообразно отметить, что сульфидные руды при контакте с воздухом склонны к окислению и саморазогреву [194, 200, 202, 204, 205, 206, 215].

Решение проблемы безопасного применения АСВВ при разработке сульфидных руд шло в направлении создания безопасных по взрыву сульфидной пыли аммиачно-селитренных ВВ и (или) методов применения АСВВ, допущенных к использованию при подземных горных работах, а также в направлении создания безопасных АСВВ по взаимодействию их с сульфидными рудами и способов их применения.

1.1.1 Опасность взрыва сульфидной пыли

Согласно [33] промышленная пыль включает в себя тонкие дисперсии величиной частиц менее 800 мкм. Данные дисперсии возникают в процессе производственной деятельности, и представляют собой сложную смесь твердых частиц, формирующихся при измельчении, дроблении, распылении и иных механических воздействиях. Состав промышленной пыли весьма различен и определяется характером технологических процессов, применяемым сырьем и конечной продукцией.

Различают органические и неорганические промышленные пыли. Органические промышленные пыли представляют собой древесную пыль и хлопковую. Неорганические промышленные пыли представляют собой частицы металлов, минералов, стекла и иных неорганических веществ. Отдельно можно выделить смешанные пыли, которые содержат как органические, так и неорганические элементы.

Серьезность проблемы воздействия промышленной пыли на человека обусловлена их способностью проникать в дыхательные пути и оседать в легких. Наиболее опасными являются частицы величиной 5 мкм, так как такие частицы способны достигать альвеол легких, где происходит газообмен, и механически повреждать их. Продолжительное воздействие промышленной пыли может привести к развитию разных заболеваний, например вызывать фиброзы (изменения живых тканей). Другой проблемой, является возможная взрывопожароопасность пыли.

По степени взрывопожароопасности, все промышленные пыли делятся на 4 класса, в зависимости от НКПР (нижний концентрационный предел распространения пламени) и температуры воспламенения:

1 класс – наиболее взрывоопасные пыли с НКПР равным 15 г/м³ и ниже (сера – 2,3 г/м³; нафталин – 2,5 г/м³);

2 класс – взрывоопасные пыли с НКПР от 16 до 65 г/м³ (алюминий – 58 г/м³, овес – 30,2 г/м³, крахмал картофельный – 40,3 г/м³);

3 класс – наиболее пожароопасные пыли с температурой воспламенения до 250 °С;

4 класс – пожароопасные пыли с температурой воспламенения более 250 °С.

Известно на практике, что пыль колчеданных руд, которая состоит главным образом из пирита, является способной к горению в кислороде воздуха. В подобном случае, если влажность такой пыли является ниже 5 %, а скопление в воздухе больше 80 г/м³ – то создается взрывоопасная пылевоздушная смесь [62].

Температура воспламеняющейся данной смеси, определяется экспериментально, она же варьируется в зависимости от дисперсионной пыли, которая содержит примеси и от наличия катализаторов горения, но зачастую находится в диапазоне от 450 до 600 °С. Скорость распространения пламени в пылевоздушном облаке может достигать нескольких метров в секунду, давление же взрыва способно превышать 6...8 бар, что представляет большую опасность для работников и оборудования находящихся в шахте. Из экспериментальных исследований в работе [126] бесчисленных составов минимальную температуру воспламенения имела пыль из 75 % пирита и 25 % серы: 360 °С. Поэтому, пылевоздушные смеси колчеданной пыли относятся к 4-му классу по пожаровзрывоопасности пыли.

Главную опасность представляет собой отложение пыли в труднодоступных местах, например – вентиляционные каналы, полости разных конструкций, заброшенные выработки. Для предотвращения взрывов колчеданной пыли необходимо соблюдать определенный комплекс профилактических мероприятий (периодические пылеудаление, увлажнение пыли).

Отметим, что, несмотря на принадлежность к 4-му классу пожаровзрывоопасности, колчеданные пыли являются одним из элементов, которые представляют собой существенную опасность при подземной добыче,

что может быть связано с технологическими характеристиками добычи полезных ископаемых.

Содержащие колчедан горные породы относятся к крепким и весьма крепким и при их бурении образуется много пыли. Нынешние технологические возможности добычи крепких горных пород базируются на использовании буровзрывных способов для их рыхления, поэтому, при добыче таких руд приходится систематически выполнять взрывные работы, которые являются источником высокотемпературного влияния на шахтную среду. Образующиеся при бурении пожароопасные пыли впоследствии подвергаются высокотемпературному воздействию от взрывных работ (высокие температуры имеют продукты взрыва промышленных взрывчатых веществ).

Соответственно [181] ключевыми характеристиками взрыва сульфидной пыли является:

- скопление существенных объемов сернистого газа (концентрация которых в горных породах после взрыва может достигать 1,0...2,5%, что существенно превосходит допустимую норму;

- налет бурого цвета на стенках выработки и приобретение пылью магнитных характеристик (доказывает наличие окиси железа – гематита и магнетита, которые появляются впоследствии окисления пирита, также халькопирита и других сульфидов, кислородом воздуха при наиболее высоких температурах);

- стремительное повышение температуры и давления воздуха в области распространения пламени (определяет загорание легковоспламеняющихся предметов, которые расположены в области взрыва колчеданной пыли).

Рассматривая причины взрывов колчеданной пыли, многие исследователи в работах [27, 62, 126, 181] сделали следующие выводы: основанием всех зафиксированных взрывов колчеданной пыли стали взрывные работы, при реализации которых появлялись газообразные продукты детонации ВВ, которые имели температуру до 3000 °К. При использовании всех видов ВВ, которые применялись на колчеданных

рудниках, наблюдались взрывы пыли. При этом, можно было констатировать, что основным критерием взрывоопасных пылевых аэрозолей в проходческих и очистных забоях являлась пыль, которая была образована в период обуривания и взрывания при отбойке руд. Авторами установлено, что при взрывном разрушении сплошных массивов пиритосодержащих руд, которые отличались максимальной вязкостью, прочностью и значительным содержанием серы, взрывы колчеданной пыли происходят весьма часто.

Основным условием является обучение работников правилам безопасной работы в условиях повышенной взрывоопасности и проведения постоянных тренировок по ликвидации вероятных аварийных ситуаций. Помимо этого, необходимо проводить систематический мониторинг концентрации пыли в воздухе и также ее влажности для того, чтобы вовремя выявлять и устранять опасные условия. Нынешние системы контроля микроклимата в шахтах позволяют в режиме реального времени отслеживать такие параметры и включать системы пылеподавления при превышении допустимых критериев.

Исследование авторов [126] показало, что превалирующим фактором, который предопределяет взрывчатость сульфидной пыли, является наличие в ней серы. Наиболее взрывчатой оказалась пыль минералов пирита и марказита, которые содержат в себе около 50% массовой доли связанной пыли. Все сульфидные руды с содержанием серы более 40%, отнесены к взрывоопасным, а руды с содержанием серы менее 35%, признаны как невзрывоопасные. Взрывчатость сульфидной пыли понижается при повышении влажности, пыль становится совершенно невзрывоопасной при определенной влажности 9...9,5%. Присутствие инертных добавок понижает уровень взрывчатости пыли, а при их содержании в навеске 65...70% массовой доли взрывов в камере не возникает. Установлено, что наиболее взрывоопасная – это сульфидная пыль с величиной частиц менее 100 мкм, а пыль крупностью более 250 мкм почти не взрывчатая. Если в воздухе содержится 8...9% массовой доли пыли и менее, то взрывов сульфидной пыли

не возникает, а наименьшая взрывоопасная концентрация пиритной пыли в воздухе составляет 80...100 г/м³. При наименьшей концентрации пыли отмечается только лишь незначительное искрение. Выявлено, что чувствительность к взрывному импульсу сульфидной пыли является выше каменноугольной, но ниже серной пыли.

Особое внимание исследователей, которые исходили из гипотез о том, что причиной взрывов колчеданной пыли стали взрывные работы, было уделено разработке:

- технологических методов и правил ведения взрывных работ в условиях сульфидсодержащих горных пород [62];
- взрывчатые вещества, которые имели относительную низкую температуру взрывных газов [126];
- методики расчетов безопасных расстояний от поражения ударной воздушной волной (УВВ) людей и оборудования [27, 53].

Анализ причин происшествия в Сибасе в апреле 2017 года, показал следующее: источником возгорания сульфидной пыли (с предшествующим распространением воспламенения пыли по выработке) могут быть не единственно раскаленные продукты детонации при взрыве заряда ВВ. В данном происшествии, таким источником послужила электрическая дуга, которая возникла при нарушении силового кабеля, проложенного в горной выработке [121].

В данном обстоятельстве место появления дуги никак не было связано с выполнением взрывных работ, тем не менее, данный факт ни единственный в нерассмотренных в работах [27, 62, 126, 181] причин, которые могут послужить источником возгорания колчеданной пыли.

Возникающая пыль при взрывах, а также при погрузочных и буровых работах в некоторой степени скапливается на стенах и кровле горных выработок. В соответствии [13, 15, 26, 33, 116, 151, 185, 186, 187] данная пыль под влиянием проходящей воздушной ударной волны, которая распространяется по горной выработке после взрыва заряда ВВ, откидывается

от поверхности выработки где она накопилась и смешивается с воздухом. Затем, взвешенные частицы пыли, которые находятся в воздухе (горючий порошок) воспламеняются в отраженной волне и после сгорают в присутствии достаточного количества окислителя (кислорода - в случае, если температура воздуха в отображенной волне превосходит температуру возгорания пыли).

Важнейшие методы предотвращения взрыва сульфидной пыли обосновываются на использовании особых технологий при ведении взрывных работ [5, 126, 181] и особых видов ВВ [11, 133]. Более того, с ростом объемов применения аммиачно-селитренных ВВ стали наблюдаться возгорания и взрывы таких ВВ при контакте с сульфидосодержащими горными породами, в особенности с пылевыми фракциями таких пород; возникла новая проблема безопасности применения аммиачно-селитренных ВВ при взрывании сульфидных руд.

В качестве предохранительных ВВ по взрыву сульфидной пыли рассматривались порошкообразные ВВ – серный аммонит № 1, а также специально разработанные предохранительные аммониты ВС-1 и ВС-2 [11]. Данные аммониты содержат в своем составе добавки, снижающие температуру продуктов взрыва за счет молекулярной теплоемкости и теплоты термического разложения и одновременно служащие ингибиторами горения сульфидной пыли:

- серный аммонит № 1 – 30% массовой доли хлорида натрия (калия);
- аммониты ВС-1 и ВС-2 – 23...25% массовой доли хлористого аммония.

Чувствительность серного аммонита № 1 и аммонита ВС-1, выпускаемых в патронах диаметром 32...36 мм, повышалась введением в их состав нитроэфиров, 5% и 9% массовых долей, соответственно. Однако опытно-промышленные эксперименты показали, что данные ВВ обладают недостаточной работоспособностью для разрушения прочных сульфидных руд [126].

Отсутствие достаточно эффективного предохранительного ВВ по взрыву сульфидной пыли обусловило развитие технологических способов

предохранения от данных взрывов при ведении взрывных работ: использование особых видов и материалов забойки шпуровых и скважинных зарядов ВВ, осуществление орошения поверхностей выработок, создание различных водяных завес в зоне действия взрыва [5, 61, 62, 126, 181, 182].

Однако необходимо отметить работу [179], в которой показано, что вероятность взрыва сульфидной пыли при производстве взрывных работ в серных и колчеданных рудниках снижается при применении гранулированного ВВ, содержащего в своем составе в качестве ингибитора различные виды карбонатов или карбамид. При этом карбонаты различных металлов характеризуются различной эффективностью – по ингибирующей способности равноценны следующие концентрации карбонатных добавок (%масс.): Li_2CO_3 – 3, Na_2CO_3 – 4, K_2CO_3 – 6, $CaCO_3$ – 8, $CaMg(CO_3)_2$ – 10. На основании данных исследований во избежание взрыва сульфидной пыли при взрывных работах предложен следующий состав ВВ (в процентах массовых долей): тротил – 18,0...19,5; аммиачная селитра – 68,0...72,5; карбонат кальция – 8,0...14,0 [133].

При этом все исследователи, независимо от представлений о методах борьбы со взрывом сульфидной пыли, отмечают, что важнейшими способами снижения отрицательных последствий являются такие технологические приемы, как водные завесы [61, 62] и забойка скважинных (шпуровых) зарядов [126, 181, 182]. Для повышения эффективности их действия, разработаны специальные виды забоек, в которых используются как создание условий быстрого выгорания сульфидной пыли при ее выносе взрывными газами из шпура (скважины), так и условия снижения химической активности сульфидной пыли за счет рассеивания в атмосфере выработки при взрыве заряда веществ, препятствующих развитию горения сульфидной пыли в воздухе [129, 132, 137].

1.1.2 Опасность экзотермического взаимодействия аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с сульфидными рудами

Для АСВВ известны случаи спонтанных (несанкционированных) взрывов, обусловленных самопроизвольным экзотермическим разложением скважинных зарядов при их контакте с пиритосодержащими горными породами и (или) буровым шламом, содержащим пирит [29, 63, 73, 155, 156, 203].

Это связано с химическими реакциями данных ВВ с сульфидами (наибольшую опасность представляет пирит, обладающий наибольшей химической активностью по сравнению с пирротином, халькопиритом, или борнитом [25]). При данных реакциях выделяется большое количество тепла [4, 76, 158], что в условиях ограниченного оттока тепла может привести к несанкционированному взрыву.

Основным регламентирующим документом о порядке безопасного применения АСВВ при ведении взрывных работ в сульфидсодержащих горных породах является «Руководство по предупреждению самопроизвольных загораний и взрывов взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры при производстве взрывных работ в медноколчеданных рудах» [159]. Согласно этому руководству, принятие решения о возможности безопасного применения ВВ основывается на знании условий применения, которые характеризуют следующими параметрами:

- температура рудного массива;
- наличие шахтных вод и их кислотность в заряжаемых скважинах;
- содержание пирита в рудном массиве.

В зависимости от указанных параметров регламентируется допустимое время нахождения АСВВ во взрывных скважинах. Указанное руководство основывается на результатах работы [158] и согласуется с [189, 190]. В основе выводов лежат следующие представления о химических процессах,

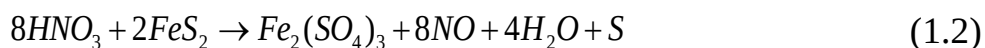
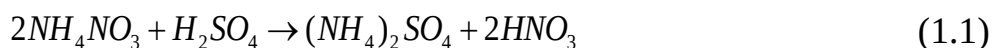
обуславливающих возможность возгорания АСВВ при контакте с сульфидными рудами:

1. Наиболее реакционноспособное вещество в составе АСВВ при их взаимодействии с сульфидными рудами – аммиачная селитра (АС).

2. Наиболее реакционноспособный сульфидный минерал в составе сульфидных руд – пирит.

3. Взаимодействие АС с пиритом описывается следующим комплексом реакций:

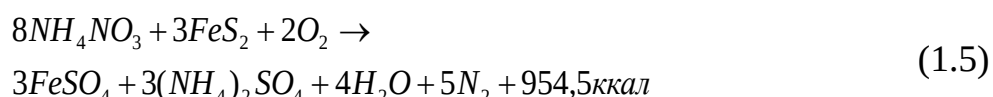
а) в присутствии сернокислотной воды -



Итоговая реакция -



б) при отсутствии воды наблюдаются следующие реакции –



Исходя из представлений об особенностях химического взаимодействия АС с пиритом, предложено добавлять в АСВВ вещества-ингибиторы химических реакций (1.1) - (1.5). Показано, что тетраборнокислый аммоний (5% массовая доля), мочевины (10% массовая доля) или гашеная известь (10% массовая доля) практически исключают возможность самопроизвольных взрывов.

Рекомендации по использованию ингибиторов применяются производителями промышленных ВВ. Например, в качестве сульфидоустойчивых ВВ на основе гранулированной АС предложены граммонит ТММ и граммотол Т-18М, содержащие 2,5 % массовой доли смеси карбамида и карбоната кальция [170]. В ТУ 7276-004-17131060-97 для взрывания в сульфидных рудах представлен гранулит ПС, содержащий 0,5...0,6 % массовой доли карбамида или карбоната кальция. В ТУ 7276-006-07511005-2016 для использования в качестве ВВ для патронов при отбойке сульфидных руд представлено ЭВВ Сферит-ДП, содержащий в своем составе 1 % массовой доли карбамида.

Анализ исследований, посвященных изучению взаимодействия АС с сульфидными рудами, показал, что справедливость первых двух пунктов упомянутых выше представлений о химических процессах, обуславливающих возможность возгорания АСВВ при контакте с сульфидными рудами, не вызывает сомнений, т.к. эти утверждения подтверждены многочисленными исследованиями российских и зарубежных исследователей [66, 67, 68, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 123, 148, 149, 150, 152, 188, 189, 190, 191, 192, 201, 203, 215, 216, 217, 218]. Однако в отношении третьего пункта в настоящее время отсутствует общепринятое мнение. Более того на стр. 666 работы [118] сказано, что «пирит и марказит не реагируют с разбавленными кислотами», что ставит под сомнение возможность осуществления реакции (1.2), так как появляющаяся в ходе эндотермической реакции (1.1) азотная кислота будет присутствовать в рудничных водах только в разбавленном состоянии.

В работе [218] на основании обобщения данных о взаимодействии ЭВВ с пиритом, полученных методами термогравиметрии и микрокалориметрии, предложена следующая термодинамически благоприятная итоговая реакция:



Однако результаты, полученные при помощи методов принудительного разогрева реагентов (порошкообразных АС и пирита), отражают лишь

поведение изучаемых систем при высоких температурах. При этом фиксируемые в данных опытах температуры автокаталитического распада АС весьма высоки (120...200 °С) и не соответствуют температурам реального применения АСВВ. Поэтому методы, основанные на принципах термогравиметрии, не могут моделировать развитие процессов саморазогрева системы, которые представляют главный интерес при обеспечении безопасности взрывных работ с использованием АСВВ. Однако указанные методы позволяют осуществить качественное сравнение химической активности различных сульфидных пород между собой [185, 186, 187].

В работе [76] при рассмотрении взаимодействия эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) с пиритом полагают, что уравнения (1.1) - (1.5) справедливы. Выполнение уравнения (1.2) принимается также в работах [68, 152]. Для снижения опасности возникновения несанкционированного взрыва при взаимодействии ЭВВ с сульфидсодержащими породами в работах [66, 76, 149, 150, 170] предложено при изготовлении ЭВВ добавлять в состав их окислительной фазы вещества, связывающие серную кислоту. В качестве данных веществ рекомендуется использовать карбамид ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), уротропин ($(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$) или дифениламин ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$). При этом указанные вещества добавляются до 3%, поскольку при более высоких концентрациях ухудшаются детонационные способности ЭВВ и снижается их восприимчивость к детонации. Также отмечается, что окислительная фаза ЭВВ, применяемого в сульфидсодержащих горных породах, должна состоять из аммиачной или смеси аммиачной и натриевой селитр с добавлением ингибиторов (карбамида или уротропина). Применение кальциевой селитры недопустимо ввиду снижения стойкости ЭВВ из-за экзотермического взаимодействия этой селитры с сульфидсодержащими породами [76].

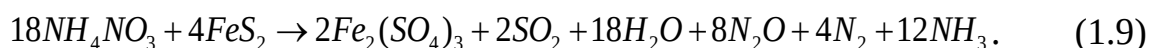
Авторы работ [70, 72] полагают, что главным фактором, определяющим опасность самопроизвольной деструкции аммиачной селитры при контакте с сульфидами, является степень кислотности системы (pH). Чем ниже значение

pH , тем выше термодинамическая вероятность возникновения автокаталитического процесса разложения АС. Исходя из этого, авторы [70, 72] предлагают для обеспечения безопасности при разрушении сульфидсодержащих пород использовать ЭВВ, имеющих нейтральную или слабощелочную реакцию.

Указанный подход реализован в ходе разработки ЭВВ Украинит ПП-2, когда окислительная фаза данного ЭВВ представлена высококонцентрированным бинарным раствором кальциевой и аммиачной селитр. Для сенсibilизации ЭВВ применяется пероксид водорода. При этом Украинит ПП-2 имеет слабощелочную реакцию ($pH = 7,8...8,4$) и характеризуется полным отсутствием разогрева при взаимодействии с сульфидсодержащими породами.

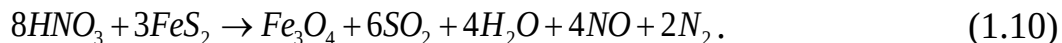
В работах [73, 74, 85, 172, 201] отмечается, что комплекс уравнений (1.1) - (1.5) составлен без учета окислительных электродных потенциалов редокс-систем, обеспечивающих реализацию всех химических реакций. Более вероятным продуктом окисления серы по реакции (1.3) является газ SO_2 , а температурные пределы существования в растворе соли $(NH_4)_2SO_4$ предполагает выделение аммиака с частичным окислением до азота.

С учетом возможных редокс-процессов, реакция (1.4) была представлена в виде следующего термодинамически обоснованного суммарного процесса [172]:



Авторы работ [70, 171] отмечают, что наряду с термодинамическими критериями возможности протекания той или иной реакции, необходимо учитывать и кинетические показатели. Реакция (1.9), как правило, может протекать при температурах не ниже 400 К, что указывает на достаточно высокую энергию активации процесса.

Самопроизвольное повышение температуры в скважине, необходимое для преодоления энергии активации реакций термодеструкции АС возможно при взаимодействии пирита с азотной кислотой [172]:



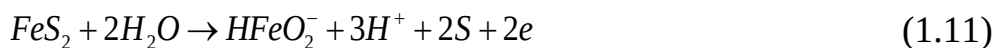
Реакция (1.10) характеризуется следующими термодинамическими параметрами: изменение стандартной свободной энергии Гиббса $\Delta G^0_{298} = -760,6$ кДж; тепловой эффект $Q^0_{p\ 298} = 2275,7$ кДж, что говорит о самопроизвольности процесса, причем выделяющегося тепла достаточно, чтобы обеспечить образование локальных точек разогрева и инициировать самопроизвольную деструкцию входящей в состав ВВ аммиачной селитры, по механизму теплового взрыва. Однако возможность осуществления реакции пирита с разбавленной азотной кислотой по уравнению (1.10) весьма сомнительна, поскольку разбавленная кислота не взаимодействует с пиритом [128], а концентрированная - реагирует с образованием нитрата железа (III) и серной кислоты [167].

Одним из процессов, обеспечивающим появление азотной кислоты в системе, является гидролиз аммиачной селитры [172]. Гидролиз неизбежно сопровождает процесс приготовления пластов и растворов нитрата аммония. Неоднократно показано, что все гетерогенные системы, на основе монорастворов аммиачной селитры имеют кислую среду, причем в таких системах возможно накопление кислоты во времени. Это относится и к эмульсиям. Так, водородный показатель (pH) обратной эмульсии монораствора аммиачной селитры в горючем компоненте уже через 2 часа снижается до $pH = 4...5$.

Кроме того, согласно [25] известно, что пластовые воды, контактирующие с пиритсодержащими породами, имеют кислую реакцию. Измерения показали, что введение 1% пирита в слабоминерализованную воду (0,1% массовой доли $NaCl$) снижает ее водородный показатель pH с 7,2 до 2,0.

При этом стационарный электродный потенциал пирита приобретает значение $E = 0,21$ В (относительно нормального водородного электрода).

Как следует из диаграммы Пурбэ для пирита и пирротина [25] поверхность сульфидных минералов при указанных значениях E и pH частично покрыта серой, образующейся по реакциям [179]:



Однако полной пассивации поверхности пирита серой в кислых растворах не происходит из-за обратимых процессов ее восстановления:



Практически полная пассивация сульфидов железа происходит лишь в нейтральных и слабощелочных средах, когда их поверхность покрыта не только серой, но и оксидами железа (III) [172].

Таким образом, согласно [85, 172] при контакте аммиачной селитры с обводненными сульфидными породами неизбежно образуется азотная кислота, которая является катализатором процессов термодеструкции. Появление локальных очагов разогрева не только обеспечивает преодоление активационных барьеров, но и приводит к образованию по реакции



диоксида азота, который является катализатором экзотермического саморазложения аммиачной селитры.

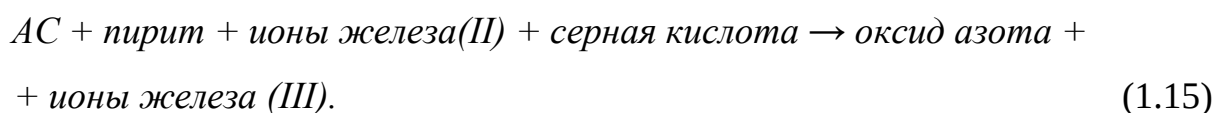
Именно данные представления позволили авторам работ [70, 72, 73, 74, 85, 172, 201] предложить при производстве эмульсионных ВВ использовать в качестве окислительной фазы эмульсии водный раствор из нитратов аммония и кальция совместно с пероксидной газогенерацией. При этом, в окислительную фазу в качестве ингибитора добавляют оксид кальция, что

позволяет добиться для окислительной фазы эмульсии значение $pH = 7 \dots 8$. Последнее снижает интенсивность взаимодействия в системе «АС + сульфиды» вследствие химической пассивации поверхности сульфидных минералов [86, 172].

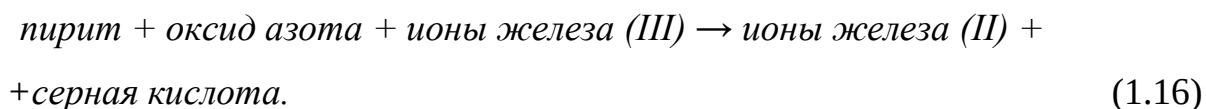
Выводы относительно рекомендуемых к применению при разрушении сульфидсодержащих пород ЭВВ, предложенные в работах [76] и [70, 72], являются противоположными. Данное обстоятельство значительно затрудняет обоснованный выбор ЭВВ для разрушения сульфидсодержащих пород.

При этом необходимо отметить, что исследователи, независимо от представлений о методах снижения вредного взаимодействия эмульсии ЭВВ с сульфидсодержащими породами, отмечают отрицательное влияние гранул ANFO (или АС) на устойчивость гранэммитов по отношению к взаимодействию с сульфидсодержащими породами по сравнению с чисто эмульсионными ВВ [70, 72, 169].

Рассмотренные механизмы взаимодействия АСВВ с сульфидами являются не единственными. В работах [2, 3] предложен следующий механизм химического взаимодействия: реакция между АСВВ и сульфидсодержащей породой происходит согласно циклической схеме:



Далее ионы железа (III), оксид азота и ионы железа реагируют с пиритом. При этом на выходе получают ионы железа (II) и серной кислоты:



В указанном механизме взаимодействия на качественном уровне отражается участие ионов железа в реакции между АСВВ и

сульфидсодержащей породой. Это согласуется с методикой оценки химической стойкости ВВ при взаимодействии с сульфидами, предложенной в работах [189, 190], предлагающей при имитации рудничных вод использовать раствор сульфатов железа (II) и (III) без использования серной кислоты для подкисления.

Отрицательное влияние ионов Fe^{3+} на химическую стойкость АС отмечается в работах [71, 214, 216, 217, 218].

Однако анализ взаимодействия АСВВ с сульфидами на основании уравнений (1.14) и (1.15) весьма затруднителен, поскольку отсутствуют количественные соотношения между реагирующими веществами. Рассмотрение многих практически важных вопросов повышения безопасности и надежности взрывных работ при использовании АСВВ для разрушения сульфидных руд требует более детального рассмотрения участия сульфатов железа во взаимодействии АСВВ и колчеданных руд особенно в начальный период взаимодействия при температурах менее 50...60 °С. Поэтому, дальнейшее развитие модели взаимодействия пирита и аммиачной селитры, учитывающей как наличие в системе сернокислой воды, так и сульфатов железа (II), (III), является, безусловно актуальной задачей.

Для безопасного применения АСВВ в сульфидных рудах важно не только понимание химической природы взаимодействия, но и характера развития процесса взаимодействия между АСВВ и сульфидами.

В работе [1] на основе изучения взаимодействия колчеданных руд Дегтярского месторождения с АСВВ предложено оценку предельной продолжительности контакта АСВВ с сульфидной рудой, превышение которой опасно из-за возможности самопроизвольного взрыва, производить по формулам:

- для мокрых забоев

$$\lg \tau_* = \frac{78,85 T_{н.н.в.}^{0,215} \cdot C^{0,06} - T_{м}}{47,5}; \quad (1.17)$$

- для сухих забоев

$$\lg \tau_* = \frac{11,1}{(178,6 - T_{н.н.в.})^{0,2}} - \frac{T_m}{47,5}, \quad (1.18)$$

где τ_* – время безопасного пребывания ВВ в сульфидной руде, ч; $T_{н.н.в.}$ – температура начала интенсивного взаимодействия ВВ с сульфидной рудой, °С; C – концентрация серной кислоты в рудничной воде, г/л; T_m – температура рудного массива, °С.

Однако в уравнениях (1.17), (1.18) не отражено влияние размеров частиц сульфидной руды, вступающих во взаимодействие с АСВВ, и соотношение масс руды и АСВВ в области взаимодействия. Между тем, данные параметры очень сильно влияют на характер рассматриваемого взаимодействия [67].

В работе [67] предложена аналитическая оценка времени безопасного нахождения АСВВ в контакте с сульфидной горной породой. В основе расчетной модели положено представление, что химическая реакция между АСВВ и сульфидной рудой происходит по всей длине скважинного заряда одновременно с одинаковой интенсивностью. Однако данный сценарий развития процесса взаимодействия ВВ и сульфидной рудой имеет ограниченную область применения, так как будет реализовываться лишь в однородном массиве как по химическим свойствам руд по длине заряда, так и по макро и микро трещиноватости руд, и не предполагает учета наличия рудной мелочи в скважинном заряде на ход развития процесса взаимодействия АСВВ с сульфидной рудой. Между тем, ряд исследователей считают рудную мелочь, смешавшуюся с АСВВ, источником основной опасностью при разогреве системы «АСВВ + сульфидная руда» [68, 85, 148].

В настоящее время ЭВВ и гранэммиты наиболее перспективными ВВ для взрывной подготовки горной массы к выемке и транспортированию [19, 76]. Данные ВВ относятся к классу водонаполненных аммиачно-селитренных ВВ поэтому их применение без использования специальных методов и средств предохранения от взаимодействия с сульфидными рудами сопряжено с

опасностью возникновения их возгорания и взрыва. Для данного класса ВВ известны случаи несанкционированных взрывов, обусловленных самопроизвольным экзотермическим разложением скважинных зарядов при их контакте с пиритосодержащими горными породами и (или) буровым шламом, содержащим пирит [29, 63, 73].

Текущность данных ВВ вносит дополнительное 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 [125]. Однако в данном случае химическое взаимодействие дополнительно ускоряется за счет присутствия на поверхности естественных трещин сульфидных минералов повышенной реакционной способности, появляющихся в процессе выветривания сульфидных руд [179, 193, 218]. Согласно исследованиям [194, 200, 204, 205, 206] степень начального окисления сульфосодержащих пород является важным фактором, влияющим на характер и интенсивность их окисления. Ситуация усугубляется при наличии сернокислотных рудничных вод, содержащими сульфид-ионы и ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} , что существенно облегчает прохождение реакций растворения пирита [117, 167].

Указанные негативные явления, обусловленные растеканием наливных ЭВВ по трещинам, можно избежать, используя патронированное в пластиковые оболочки ЭВВ или применяя рукава-оболочки при формировании скважинных зарядов ЭВВ.

Применение тканевых рукавов при создании нисходящих скважинных зарядов ЭВВ нашло достаточно широкое распространение в практике горных работ [153, 154, 173]. 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 [131]. Значительные объемы сульфидных руд добываются подземным способом, где наибольшее распространение получили восходящие взрывные скважины. Прямая аналогия технологии механизированного заряжания нисходящих взрывных скважин ЭВВ на зарядание восходящих скважин оказалась невозможной в виду значительных сложностей удержания заряда в скважине.

В связи с расширением области применения ЭВВ на подземные горные работы решение задачи разработки технологий заряжания данными взрывчатыми веществами восходящих скважин приобретает огромное значение. При этом в сульфидных рудах в силу вышесказанных особенностей применения ЭВВ необходимы формирования скважинных зарядов с использованием рукавов-оболочек. Для решения данной задачи предложено использовать рукав специальной конструкции [129]. Однако изготовление указанного рукава сложно в техническом исполнении, а также отсутствует методика расчета параметров данного рукава, что осложняется его применение на практике.

Анализируя вышеприведенные сведения, приходим к следующим выводам, что в настоящее время:

- существует общепринятый взгляд на возгорание сульфидной пыли, на основании которого разработаны методы определения степени взрывоопасности пыли и способы предотвращения данного явления [5, 27, 33, 62, 116, 126, 151, 180, 181]. В то же время вопросы экзотермического взаимодействия АСВВ с сульфидными рудами.

- отсутствует общепринятый взгляд на природу экзотермического взаимодействия АСВВ с сульфидными рудами во время нахождения АСВВ в зарядной полости.

Действительно, рассмотрение многих практически важных вопросов повышения безопасности и надежности взрывных работ при использовании АСВВ для разрушения сульфидных руд требует более детального рассмотрения участия сульфатов железа во взаимодействии АСВВ и колчеданных руд. Поэтому дальнейшее развитие модели взаимодействия пирита и аммиачной селитры, учитывающей как наличие в системе сернокислой воды, так и сульфатов железа (II), (III), является, безусловно, актуальной задачей.

Проанализировав результаты исследований авторов [66, 68, 69, 76, 123, 134, 148, 149, 150, 158, 159, 188], которые посвящены вопросам применения ингибиторов, можно сделать следующий вывод. Главные усилия исследований были направлены исключительно на экспериментальное исследование влияния вида и концентрации ингибиторов на химическую стойкость АСВВ, а вопросы аналитического решения необходимой концентрации ингибиторов в составе ЭВВ, применяемом для разрушения сульфидосодержащих пород, не изучались. Однако полученные данные аналитических выражений крайне актуальны, поскольку они позволяют повысить безопасность взрывных работ на этапе их проектирования.

Сложности в оценке опасности развития экзотермических процессов взаимодействия АСВВ с сульфидами составляет также отсутствие физико-математической модели очага разогрева из сульфидных включений рудной мелочи в заряд АСВВ, на основании которой можно было бы оценить время критического разогрева. Знание последнего имеет большое значение для решений вопросов обеспечения безопасности взрывных работ. Поэтому создание физико-математической модели очага разогрева сульфидного включения в АСВВ безусловно является важной и актуальной задачей.

Как уже отмечалось выше, при добыче сульфидных руд актуальной является также задача разработки эффективной технологии механического

заряжения ЭВВ восходящих скважин путем формирования скважинных зарядов с использованием рукавов-оболочек.

1.2 Анализ научно-технических основ технологии осуществления щадящего взрывания

Под щадящим взрыванием при промышленной добыче полезных ископаемых понимаем проведение взрывных работ с возможно минимальным воздействием импульса взрыва как на отбиваемые породы, так и на горный массив, от которого отделяются указанные породы.

Данный вид взрывания нашел применение при:

- добыче блочного камня из скальных пород [59];
- создании отрезной щели для обеспечения долгосрочной устойчивости бортов карьеров [81, 87];
- сохранении в неповрежденном состоянии ценных хрупких минералов в разрушаемом взрывом массиве [9, 65, 82, 114, 119, 120].

В настоящее время наиболее прогрессивным методом добычи блочного скального камня является взрывной способ с помощью специально для этого разработанных зарядов малого диаметра с низкой скоростью детонации – Гурилом-А, Форситом, Граниленом [59, 147, 160]. Данные заряды выпускаются в виде патронов или гибких шлангов, которые снаряжаются порошкообразными ВВ на основе смесей [60]:

- нитроглицерина, динитродигликоля с кремнеземом;
- керогена, октогена или тротила с инертным наполнителем;
- перхората калия с углеводородным горючим и катализатором.

Плотность патронов (гибких шлангов) больше 1 г/см^3 , что позволяет их применять даже в обводненных скважинах. Однако вследствие существенного превышения диаметра шпуров над диаметром указанных зарядов объемная плотность заряжения существенно меньше и составляет 1 г/см^3 .

Анализ многочисленных работ, посвященных созданию отрезных щелей для обеспечения долгосрочной устойчивости бортов карьеров, показал, что для их производства также применяются скважинные заряды с пониженной плотностью заряжания, которые формируются методами создания гирляндных или шланговых зарядов [81, 127, 145, 160].

Исследования [9, 65, 81, 93, 94, 95, 108, 135, 136] показали, что при открытой добыче ценных полезных ископаемых использование при ведении взрывных работ низкоплотных ВВ, полученных смешением порошкообразных или гранулированных ВВ с гранулами вспененного полистирола, позволяет повысить эффективность добычи.

Распространение детонации в низкоплотных ВВ осуществляется посредством раскаленных газовых струй, истекающих из области химической реакции, а не ударной волной, распространяющейся по заряду ВВ [6, 7, 14, 57, 118, 119]. Данное обстоятельство позволило снизить давление во фронте детонационной волны и увеличить продолжительность взрывного импульса, что благоприятно отражается на результатах промышленного применения низкоплотных ВВ, полученных смешением порошкообразных или гранулированных ВВ с гранулами вспененного полистирола.

Положительный опыт применения низкоплотных ЭВВ, сформированных на основе сенсibilизации ЭВВ гранулами вспененного полистирола, при отбойке угольно-породных массивов представлен в работе [108]. Последнее имеет важное значение. Как уже отмечалось выше, в настоящее время ЭВВ являются наиболее перспективными ВВ для добычи полезных ископаемых в России [37, 76].

В исследованиях [108] представлено, что низкоплотные ЭВВ, сенсibilизированные гранулами пенополистирола, допускают механизированную зарядку в нисходящие скважины. Несмотря на то, что плотность низкая и составляет менее $0,5 \text{ г/см}^3$, они сохраняют способность к детонационному разложению. Низкоплотные ЭВВ, которые

сенсibilизированы гранулами пенополистирола, образуют скважинный заряд почти не подверженный усадке под воздействием гидростатического давления (в пределах до 5...6 бар, что достаточно ценно для практического применения). Из-за низких плотностей ЭВВ следует ожидать слабый уровень давления взрывных газов в скважине, что благоприятно может быть при падающем взрывании и отбойке пород, которые содержат хрупкие минералы.

Тем не мене, для целесообразного использования низкоплотных ЭВВ нужна методика расчета детонационных характеристик данных ВВ. До этого выполненные исследования [108] показали следующее, что детонация ЭВВ, сенсibilизированными гранулами пенополистирола, реализуется ударно-волновым способом по воздействию давления во фронте детонационной волны, также при плотности ЭВВ более 0,73 г/см³. Методика расчета детонационных параметров ЭВВ меньшей плотности отсутствует, что осложняет применение данных ВВ.

Однако трудности применения низкоплотных ЭВВ связаны также с отсутствием надежных технологий формирования скважинных зарядов из этих ВВ при разработке обводненных пород. Анализ способов формирования зарядов из низкоплотных ЭВВ показал, что при их реализации или в рукав засыпается буровой шлам в количестве достаточном для препятствия всплытию легкого заряда [146], или во избежание всплытия заряда нижний конец рукава закрепляется у дна посредством парашюта-фиксатора, выполненного из полиэтилена и имеющего форму полого усеченного конуса с зубчатой оторочкой большего основания, диаметр которого более 1,1 диаметра скважины, а угол конусности не превышает 75° [127].

Однако в способе [146] теряется существенная часть взрывной скважины, а для реализации способа [127] необходима отсутствующая при изложении способа методика расчета параметров парашюта-фиксатора. Таким образом, для эффективного применения низкоплотных ЭВВ при выполнении

промышленных взрывов актуальна разработка технологии заряжания нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ.

1.3 Постановка проблем и задачи исследования

Среди промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), применяемых в России, наибольшая доля приходится на эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), потребление которых составляет более половины всего потребляемого объема ПВВ и постоянно растет год от года. Это обусловлено высокими потребительскими свойствами ЭВВ, которые состоят из невзрывчатых компонентов безопасных при перевозке и хранении, допускают высокую степень механизации процессов обращения с ними возможностью их перекачивания различными типами насосов по трубопроводам, позволяют регулирование детонационных характеристик в достаточно широком диапазоне; имеют относительную водоустойчивость в сравнении с порошкообразными и гранулированными аммиачно-селитренными ВВ.

Однако проведенный анализ обширного научно-технического материала показал, что несмотря на значительные успехи в понимании физико-химической природы ЭВВ и технологические достижения в их применении, при расширении областей их использования возникает целый ряд трудностей, связанных с недостаточно разработанными:

- химической и физико-математической моделями начального этапа взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами;
- физико-математической моделью детонации низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Данные обстоятельства осложняют применение ЭВВ при разработке сульфидных руд цветных металлов и добыче ценных хрупких минералов, имеющих стратегическое значение для страны. В первом случае, это связано с противоречивыми взглядами на характер опасного экзотермического

взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами, что вызывает проблемные сложности при обосновании выбора рецептур ЭВВ, технологий их производства и применения в сульфидных рудах. Во втором случае – с отсутствием физико-математического описания детонационных процессов, происходящих в низкоплотных ЭВВ, что затрудняет разработку как технологий производства безопасных, эффективных и экономически доступных низкоплотных ЭВВ, так и технологий их применения. При этом необходимо отметить, что эффективные и экономически доступные низкоплотные ЭВВ несомненно полезны также при осуществлении взрывных работ по заоткоске бортов карьеров или разрушению трещиноватых ослабленных массивов, когда от применяемых взрывчатых веществ (ВВ) не требуются бризантные свойства.

Расширение областей применения ЭВВ при ведении взрывных работ в различных горно-геологических условиях имеет огромное государственное значение в решении проблемы обеспечения на горных предприятиях страны необходимого объема добычи полезных ископаемых. В этой связи, акцентируя свое внимание на нерешенный круг вопросов, связанных с технологическими и физико-техническими трудностями применения ЭВВ при взрывании сульфидных руд и создании эффективной технологии применения низкоплотных ЭВВ для щадящей отбойки горных пород, **целью работы** стала разработка физико-технических и технологических основ эффективного и безопасного применения сульфидоустойчивых и низкоплотных ЭВВ при производстве взрывных работ, а также эффективных технологий производства щадящего взрывания на карьерах с использованием низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Для решения указанных научно-технических проблем необходимо исследовать системы «ЭВВ + сульфидная руда», «ЭВВ + гранулы вспененного полистирола» и технологии зарядания скважинных зарядов с использованием рукавов-оболочек.

В связи с этим возникают следующие **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 заряжания восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда;
- разработка технологии заряжания нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда в обводненных скважинах.

ГЛАВА 2

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С СУЛЬФИДНЫМИ РУДАМИ

2.1 Изучение структуры колчеданных руд Урала

В основе настоящего главы лежат результаты статей [44, 103], подготовленных при непосредственном участии автора.

Известно, что аммиачно-селитренные ВВ (АСВВ) способны к взаимодействию с сульфидсодержащими горными породами, которое при определенных условиях может приводить к возгоранию или взрывному разложению этих ВВ [63, 76, 85, 158, 191, 192, 201]. Стремление повысить безопасность взрывных работ при добыче сульфидсодержащих руд без резкого увеличения стоимости используемых ВВ и затрат на выполнение зарядных работ привело к разработке как определенных правил применения АСВВ [158, 159], так и к снижению реакционной способности АСВВ путем введения в их состав ингибиторов, замедляющих скорость взаимодействия аммиачной селитры с пиритом [66, 68, 148, 149, 150, 158].

Согласно руководству [159], являющемуся основным регламентирующим документом о порядке безопасного применения АСВВ при ведении взрывных работ в сульфидсодержащих горных породах, принятие решения о возможности применения данных ВВ основывается на сведениях о температуре рудного массива и содержании в нем пирита (наиболее реакционно опасного сульфида), а также наличия шахтных вод и их кислотности в заряжаемых скважинах. Однако химические реакции колчеданных руд с аммиачной селитрой являются топохимическими, т.к. проходят на поверхности руд (на границе раздела фаз), которая имеет сложную геометрическую структуру и неоднородна по минералогическому составу [193, 200, 207, 208, 209]. При этом скорость реакции пропорциональна

доступной для прохождения реакции площади поверхности активных минералов [39, 58, 125, 200].

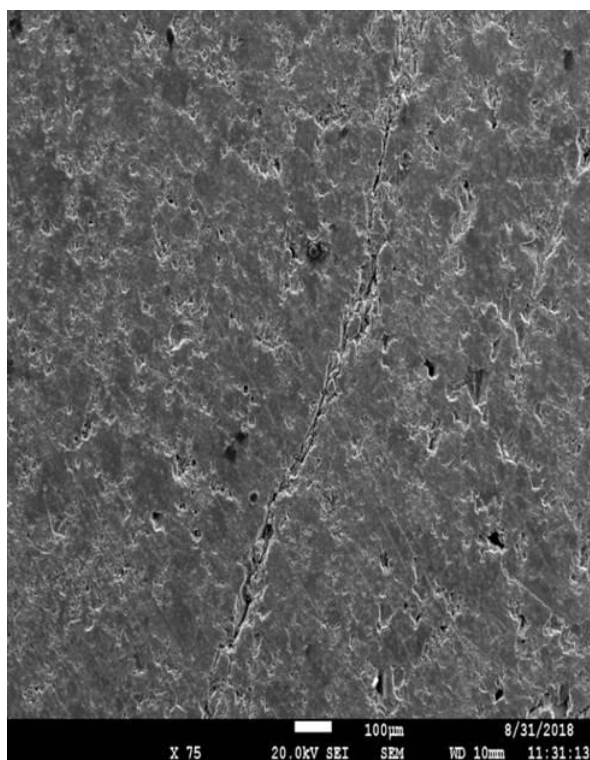
Следовательно, чем больше будет удельная поверхность колчеданной (пиритной) руды, тем более энергично будет проходить взаимодействие аммиачной селитры с пиритом, тем выше вероятность разогрева АСВВ до критической температуры. Однако анализ научно-технической литературы показал, что изучение внутренней структуры колчеданных руд при рассмотрении их взаимодействия с аммиачной селитрой не проводилось. Поэтому изучение внутренней структуры этих руд (сульфидсодержащих пород) представляется весьма актуальным для решения вопросов дальнейшего повышения безопасности взрывных работ с использованием АСВВ для их отбойки.

Рассмотрим результаты микроскопических исследований внутренней структуры образцов серного колчедана, которое осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO (рисунок 2.1). Анализ микроскопических исследований показал, что колчеданные руды содержат огромное количество микродефектов (трещин, раковин, каналов и каверн).

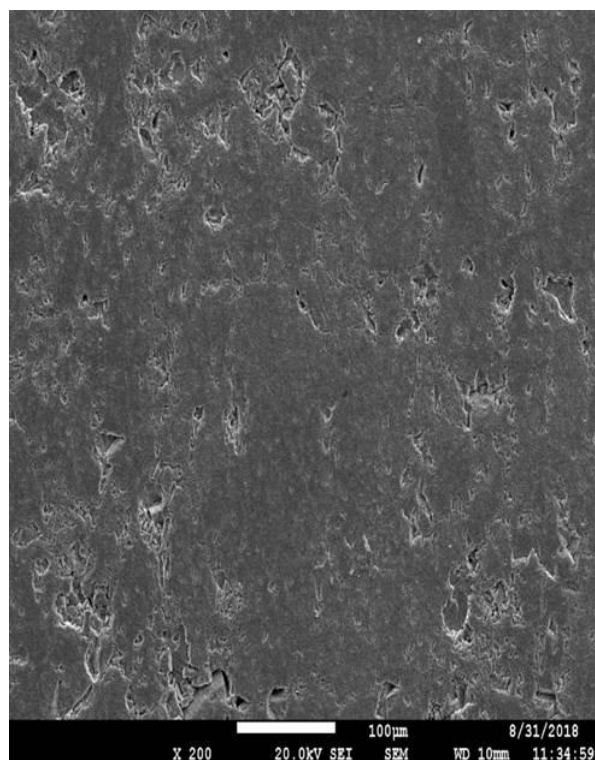
Для выяснения связи данных дефектов с внешней средой и определения величины открытой удельной поверхности колчеданных руд были выполнены измерения пористости образцов горных пород с различных месторождений. Образцы руды перед измерением дробились до мелких фракций. Затем просеиванием получали фракцию $1,0 \pm 0,1$ мм.

Измерения выполнялись на ртутном порозиметре Pascal 440. Типичная кривая вдавливания ртути в образец представлена на рисунке 2.2, где приведена зависимость для образца колчеданной руды из Сибайского месторождения.

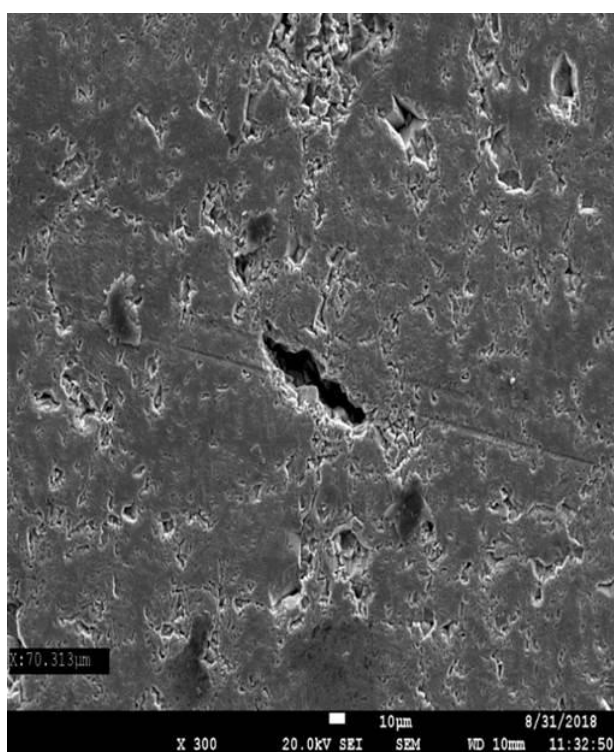
Результаты исследования образцов на пористость и определение удельной поверхности, представлены в таблице 2.1.



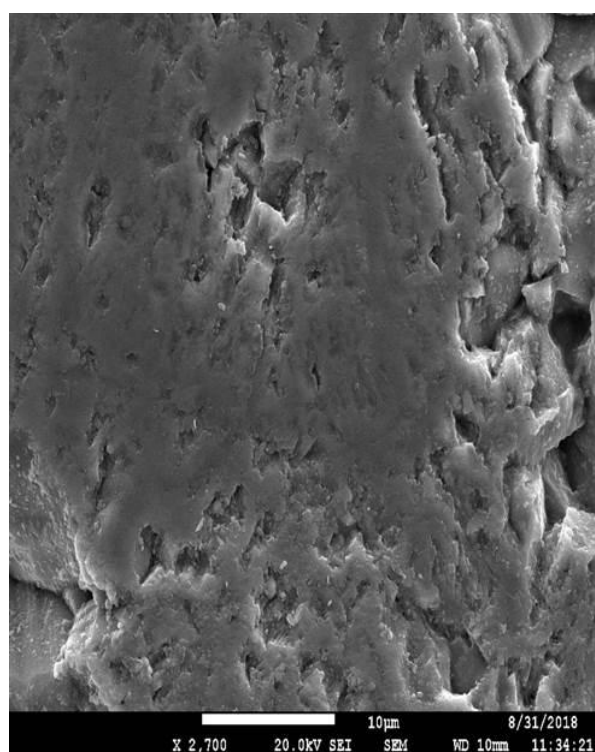
a



б



в



г

Рисунок 2.1 – Фотографии поверхности образцов колчеданной руды при кратности увеличения: *a* – 75; *б* – 200; *в* – 300; *г* – 2700

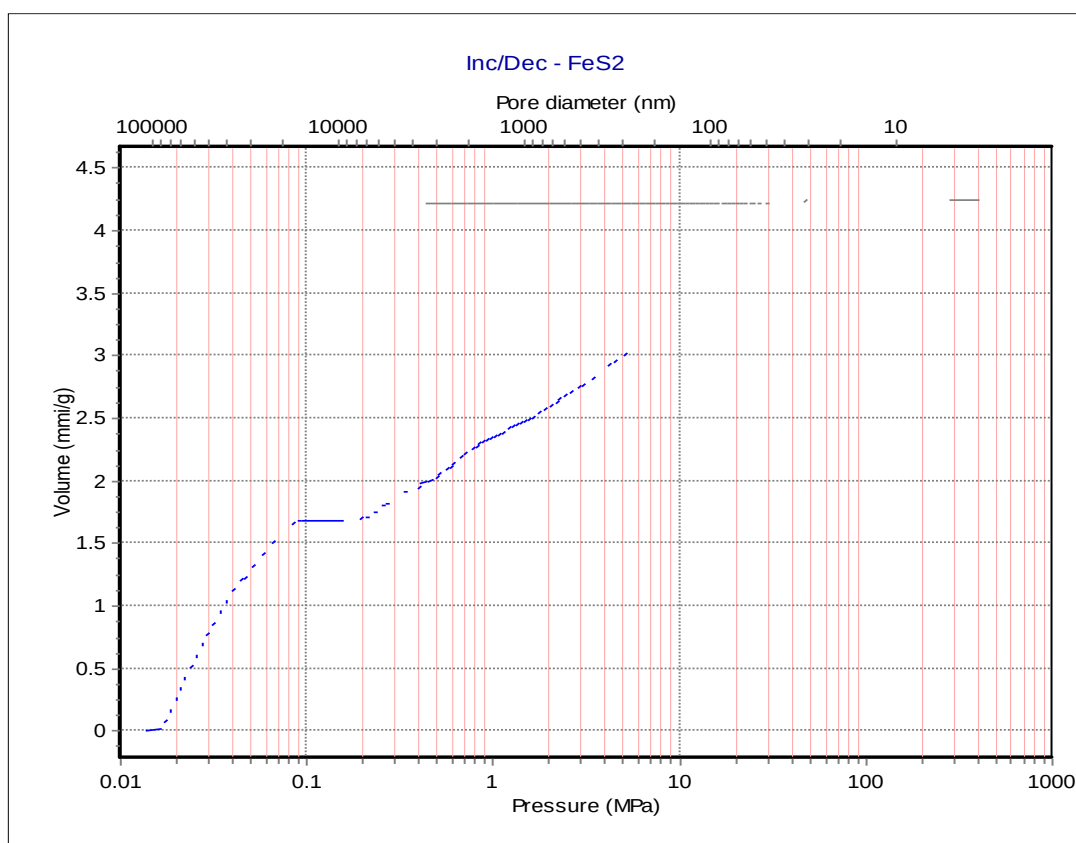


Рисунок 2.2 – Кривая вдавливания ртути для образца сернистого колчедана (ртутный порозиметр Pascal 440)

Анализ данных, приведенных в таблице 2.1, показывает, что дефектность микроструктуры колчеданных руд такова, что удельная поверхность образца может более, чем в 300 раз превосходить удельную поверхность бездефектного образца тех же размеров.

Однако микроскопические размеры поперечных сечений дефектов и извилистость их каналов приводят к возникновению диффузного торможения реакций [125]. Данный эффект снижает скорость химического взаимодействия колчеданных руд с аммиачной селитрой пропорционально уменьшению отношения коэффициента диффузии в стесненных условиях к коэффициенту обыкновенной диффузии. Согласно [210] данное отношение равно

$$\Theta = \frac{\alpha_{II} \rho_n}{\zeta}, \quad (2.1)$$

где ρ_{Π} – плотность породы, кг/м³; α_{Π} – удельный объем пор, м³/кг; ζ – коэффициент извилистости каналов дефектов ($\zeta = 1,1 \dots 1,5$).

Таблица 2.1 – Результаты измерений пористости и удельной поверхности образцов пород некоторых колчеданных месторождений

Горная порода	Месторождение	Пористость, %	Удельный объем пор, мм ³ /г	Удельная поверхность, м ² /г	Относительное увеличение удельной поверхности (*)
Серный колчедан	Сибайское	2,1	4,24	0,055	46
Медно-цинковый колчедан	Молодежное	1,7	3,39	0,155	129
Медно-цинковая руда	Озерное	2,2	4,44	0,129	108
Кварц-серицит-пиритов. Метасоматит	Узельгинское	4,1	8,14	0,380	316
Медно-вкрапленная руда	«»	1,5	3,04	0,051	43
Медно-цинковый колчедан	«»	0,7	1,44	0,005	4,2

(*) – отношение фактической удельной поверхности к удельной поверхности бездефектного образца кубической формы с размером стороны 1 мм, составляющей в нашем случае 0,0012 м²/г

На основании (2.1) и данных таблицы 2.1 рассчитано значение ϖ коэффициента увеличения площади эффективного взаимодействия частиц

руды с аммиачной селитрой по сравнению с площадью внешней поверхности бездефектной частицы. Результаты расчета представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значение величины коэффициента увеличения площади эффективного взаимодействия частиц руды с аммиачной селитрой по сравнению с площадью внешней поверхности бездефектной частицы

Горная порода	Месторождение	Удельный объем пор, мм ³ /г	Отношение коэффициента диффузии в стесненных условиях к коэффициенту обыкновенной диффузии	Относительное увеличение эффективной удельной поверхности частицы руды
Серный колчедан	Сибайское	4,24	0,018	1,8
Медно-цинковый колчедан	Молодежное	3,39	0,014	2,8
Медно-цинковая руда	Озерное	4,44	0,019	2,0
Кварц-серицит-пиритов. Метасоматит	Узельгинское	8,14	0,034	10,7
Медно-вкрапленная руда	«»	3,04	0,0125	1,5
Медно-цинковый колчедан	«»	1,44	0,006	1,03

2.2 Физико-математическая модель разогрева сульфидсодержащего включения в аммиачно-селитренное взрывчатое вещество

При составлении руководств [158, 159] использованы результаты исследований по взаимодействию сульфидсодержащих горных пород с ВВ на основе аммиачной селитры. Отмечается влияние температуры рудного массива, также наличие и кислотность шахтных вод в заряжаемых скважинах, которые содержат пирит в рудном массиве. Тем не менее, в данных руководствах, не отображается влияние объема и дисперсионности разных включений в ВВ на характер формирования процесса разогрева ВВ. Основное внимание уделяется факторам, которые влияют на процесс экзотермического разогрева промышленных ВВ в условиях рудника. Для наиболее полного понимания процессов самовозгорания ВВ необходимо учитывать такие факторы, как:

- объем рудных включений (понимаем, наибольший объем рудных включений, обозначающий наибольшую площадь контакта между рудой и ВВ, что потенциально повышает скорость окислительно-восстановительных реакций и как следствие, скорость разогрева). Необходимо определение пороговых критериев объема включений, при которых начинается значительное влияние на процесс самовозгорания;
- дисперсионность рудных включений (понимаем, что наиболее высокая дисперсионность может привести к повышению удельных поверхностей рудных включения и как следствие, к наиболее интенсивным реакциям с ВВ);
- состав рудных включений (понимаем, что разные минералы, которые входят в состав рудных включений, могут обладать различной каталитической активностью в отношении окисления компонентов ВВ). При этом, анализ минералогического состава рудных включений необходим для прогнозирования их воздействия на процесс самовозгорания;
- наличие органических веществ (понимаем, что наличие органических веществ в рудном массиве или составе ВВ оказывает как отрицательного, так

и положительное воздействие на процесс самовозгорания). С одной стороны, органические вещества служат дополнительным источником тепла при окислении, с другой стороны, такие вещества могут ингибировать окислительно-восстановительные реакции рудных минералов;

– влажность ВВ – однозначно, влияет на скорость диффузии кислорода к рудным включениям, что воздействует на скорость окислительной реакции, при этом важным является определить диапазон влажности, при котором риск самовозгорания понижен.

Отмечается, что учет вышерассмотренных факторов в исследованиях позволяет наиболее точно прогнозировать риск самовозгорания ВВ в определенных горно-геологических условиях и разрабатывать результативные меры по его предотвращению.

Последующие исследования направлены на количественную оценку воздействия на данные факторы и на разработку математических моделей, которые описывают процессы разогрева ВВ в зависимости от условий их эксплуатации.

Следуя работе [47] принимаем, что в некоторой области V_* аммиачно-селитренного ВВ вносится сульфидсодержащая горная порода.

Полагается следующее:

- область обладает шарообразной формой радиуса R_0 ;
- сульфидсодержащая порода представляется дискретным (раздробленным) материалом, частицы которого обладают характерный начальным размером δ_0 ;
- частицы сульфидсодержащей породы монотонно, размеренно распределяются по объему V_* и имеют величину существенно меньшую, чем величина объема V_* , т.е. выполняется условие $\delta_0 \ll R_0$;
- сульфидсодержащая горная порода включает в своем составе минерал (минералы), которые способны вступать в экзотермическую реакцию с

аммиачной селитрой, при этом реакция может проходить на границе раздела фаз.

Далее нужно оценить:

- модификацию температуры в зоне V_* ;
- установить условия, при которых разогрев вещества в области V_* может достигать критических значения, которые вызывают аварийную ситуацию при выполнении взрывных работ.

Принимаются следующие обозначения:

r – расстояние от центра области V_* до анализируемой точки внутри данной области (текущий радиус), м.

$\rho_{\text{ВВ}}$ – значение плотности заряжения ВВ, кг/м³;

$\mathcal{G}$ – критерий массовой доли химически активного минерала (минералов) по отношению к аммиачной селитре в составе сульфидсодержащей породы;

ψ – показатель (коэффициент) массовой доли аммиачной селитры в составе ВВ;

$M_n, M_{\text{ВВ}}$ – показатель (коэффициент) массы включений сульфосодержащей породы и ВВ в объеме V_* , соответственно;

ζ – критерий отношения массы химически активного минерала (минералов) в сульфидсодержащей горной породе в объеме V_* к массе аммиачной селитры в объеме ВВ V_* ($\zeta = \frac{\mathcal{G}M_n}{\psi M_{\text{ВВ}}}$);

k_n, c_n – показатели теплопроводности и удельной теплоемкости сульфидсодержащей породы;

$k_{\text{ВВ}}, c_{\text{ВВ}}$ – показатели теплопроводности и удельной теплоемкости ВВ;

q – показатель теплоты реакции, которая выделяется при взаимодействии единицы массы активного минерала с аммиачной селитрой, Дж/кг;

$\rho_{см}$, $k_{см}$, $c_{см}$, χ – показатели плотности, коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности 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 – показатель универсальной газовой постоянной;

E_a – показатель энергии активации реакции активного минерала с аммиачной селитрой;

$v(t)$ – показатель скорости реакции вглубь активного минерала в период времени t ($t = 0$ – время попадания сульфидсодержащей породы в ВВ);

v_* – показатель скорости реакции при температуре T_* ;

T – показатель текущей температуры в очаге разогрева;

T_0 , T_c , $T_{хар}$ – изначальная температура ВВ, температура массива, окружающего заряд ВВ, и присущая температура, при которой возникает активное разложение аммиачной селитры, которая взаимодействует с предоставленной сульфидсодержащей породой, с выделением газообразных продуктов.

Перед этим установим плотность, показатель теплопроводности, показатель удельной теплоемкости и критерий температуропроводности смеси аммиачно-селитренного ВВ с сульфидсодержащей породой, далее имеем:

$$\rho_{см} = \frac{M_n + M_{BB}}{\frac{M_n}{\rho_n} + \frac{M_{BB}}{\rho_{BB}}} = \frac{1 + \sigma}{\frac{1}{\rho_{BB}} + \frac{\sigma}{\rho_n}}, \quad (2.1)$$

где σ - отношение массы сульфидсодержащей горной породы в смеси с массой ВВ, в объеме V_* .

$$\sigma = \frac{\zeta \psi}{g} \quad (2.2)$$

$$c_{см} = c_n \frac{M_n}{M_n + M_{BB}} + c_{BB} \frac{M_{BB}}{M_n + M_{BB}} = \frac{c_{BB} + \sigma c_n}{1 + \sigma}. \quad (2.3)$$

Показатель $k_{см}$ рассчитывается по уравнению Рибо [183]:

$$k_{см} = k_{BB} p^{1/3} + k_p (1-p)^{2/3}, \quad (2.4)$$

Где p - объемная доля ВВ в V_* ($p \approx \sigma(\sigma + \rho_{BB}/\rho_p)^{-1}$).

Показатель температуропроводности смеси рассчитывается по уравнению:

$$\chi_{см} = k_{см} (\rho_{см} c_{см})^{-1}. \quad (2.5)$$

Далее оценивается показатель плотности, показатель удельной теплоемкости, коэффициент теплопроводности и показатель температуропроводности смеси АСВВ с колчеданной рудой для собственных значений характерных параметров анализируемой задачи.

При $\rho_p = 5000$ кг/м³, $k_p = 4$ Дж/(с·м·град), $c_p = 500$ Дж/кг (активный минерал – пирит); $\rho_{BB} = 1000$ кг/м³, $k_{BB} = 0,4$ Дж/(с·м·град), $c_{BB} = 1800$ Дж/кг [46]; $\vartheta = 0,98$; $\psi = 0,8$; на основании (2.5) имеем:

а) при $\sigma = 0,2$

$$\rho_{см} = 3000 \text{ кг/м}^3, \quad k_{см} = 2,8 \text{ Дж/(с·м·град)}, \quad c_{см} = 720 \text{ Дж/кг},$$

$$\chi_{см} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \xi = 0,16$$

б) при $\sigma = 1$

$$\rho_{см} = 1660 \text{ кг/м}^3, \quad k_{см} = 1,6 \text{ Дж/(с·м·град)}, \quad c_{см} = 1150 \text{ Дж/кг},$$

$$\chi_{см} = 8,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \xi = 0,82.$$

Представим следующее Q - показатель количества тепла, которое выделяется при взаимодействии включений сульфидсодержащей породы в аммиачно-селитренное ВВ, в единицу времени в единице объема. В таком варианте, условие баланса тепла (уравнение теплопроводности) рассчитывается следующим образом [10, 96]

$$\rho_{см} c_{см} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{см} \Delta T + Q, \quad (2.6)$$

где Δ - лапласиан.

Вводим критерий сферической систем координат с центром в области V_* . При равномерном распределении сульфидсодержащих включений в данной области и их наименьших размерах по сопоставлению с величиной V_* поле температур в данной области не будет зависеть от меридиальной и азимутальной координат, в данном случае получаем следующее:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q}{\rho_{cm} c_{cm}}. \quad (2.7)$$

Полагается, что область V_* может иметь контакт с массивом горных пород, что устанавливает необходимость решения (2.7) при выполнении условий первого рода:

- изначальное условие - $T(r, 0) = T_c$ (в данном варианте нужно отметить, что реакция взаимодействия сульфидсодержащих пород с аммиачной селитрой будет иметь максимальный период индукции, поэтому в начале процесса будет выполняться следующее условие число Фурье $Fo \geq 0,4$. Соответственно [96] в данном варианте к моменту начала активной фазы реакции может произойти выравнивание температуры ВВ и внешней среды);

- граничное условие $T(R_o, t) = T_c$,

$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$ (условие симметричности).

Анализ полученных расчетов позволяет сделать вывод о том, что в данном варианте объемная мощность топокхимических реакций будет равна:

$$Q = \frac{6q\rho_n v(t)}{1 + \frac{\rho_n}{\sigma\rho_{BB}}} \cdot \frac{\varpi}{\delta_o} \cdot \left(1 - \frac{2 \int_0^t v(\tau) d\tau}{\delta_o} \right)^2. \quad (2.8)$$

Согласно [58, 165] для скорости химической реакции записывается:

$$v(t) = v_* \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T(t)}\right)\right). \quad (2.9)$$

Введем обозначения: $\varepsilon = \frac{2v_*}{\delta_o}$ (показатель величины обратной времени разложения частицы сульфидсодержащей породы при устойчивой скорости реакции v_*); $\lambda = \frac{6\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{q\varpi}{c_{cm}}$ (уровень пропорциональный повышению температуры смеси при отсутствии оттока тепла из области V_* и фазовых переходов веществ в данной области).

Из формул (2.7)-(2.9) следует окончательный вид дифференциально-интегрального уравнения для расчета зависимости температуры $T(r, t)$ в области V_* ($0 \leq r \leq R_o$) при $t \geq 0$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \varepsilon \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T}\right)\right) \cdot \left(1 - \varepsilon \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T}\right)\right) d\tau \right)^2. \quad (2.10)$$

Начальные и граничные условия:

$$T(r, 0) = T_c; \quad T(R_o, t) = T_c; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (2.11)$$

Точное решение данного уравнения (2.10) можно найти численными способами. Тем не менее, ряд основных результатов получается на базе анализа общего вида решения данного уравнения. При этом будем рассматривать модификацию температур в наиболее разогреваемой точке области V_* - в точке, которая соответствует центру данной области (начало координат - $r = 0$).

Решение будет определяться в области следующих значений T : $T_c < T < T_{krit}$, где T_{krit} - показатель температуры, при которой начинается активное разложение аммиачной селитры с выделением окислов азота

(показатель T_{krit} будет зависеть от минералогического состава сульфидсодержащей породы, кислотности шахтных вод и наличия в составе ВВ элементов, которые оказывают каталитическое или ингибиторное влияние на аммиачную селитру).

При условии (2.11) общий вид уравнения (2.10) представлен на рисунке 2.3.

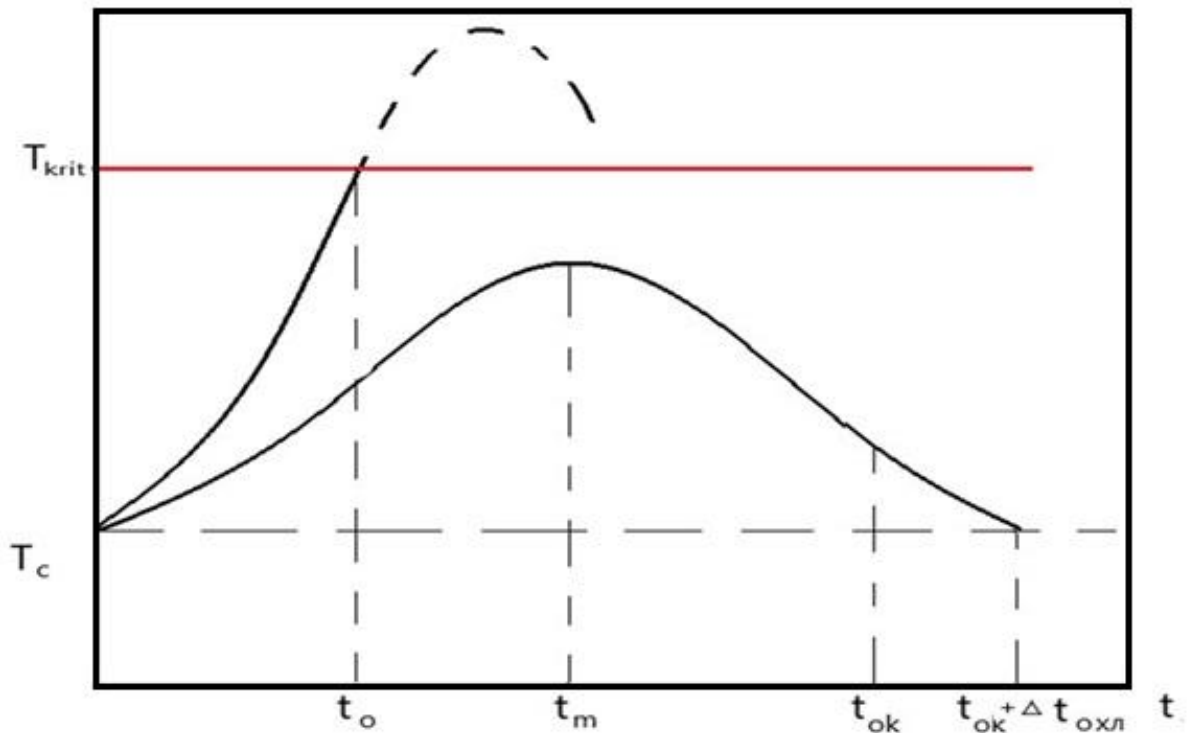


Рисунок 2.3 - Общие закономерности изменения температуры в центре очага разогрева

В данном варианте на временном промежутке $0 \leq t < t_m$ количество выделяемого в процессе реакции тепла может превышать его потери по причине теплоотдачи, в период времени $t = t_m$ количество выделяемого в процессе реакции тепла равно его потери по причине теплоотдачи, при этом вероятны два варианта развития данного процесса:

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 $t = t_{ок}$, где $t_{ок}$ - 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 V_* при отсутствии выделения в ней тепла) происходит охлаждение области V_* , как обычного нагретого шара, до температуры T_c .

Отмечается, что температура в точке $r = 0$ в период времени $t = t_m$ является больше T_{krit} . В данном варианте в некоторый период времени $t = t_o$ температура в центре области V_* достигает критической точки, аммиачная селитра начинает активно разлагаться, после чего появляется опасность поражения людей выделяющимися в ходе химической реакции ядовитыми газами и вероятность самопроизвольного взрыва такого заряда ВВ.

Максимальный интерес представляет условие, при котором температура в центре очага разогрева (центр области V_*) начнет превышать критическую температуру. При этом оценочные результаты эксперимента можно получить, только воспользовавшись медленностью процесса разогрева данного вещества в области V_* , применяя решение для случая неизбежной мощности рассеянных источников тепла [91]. В данном варианте повышение температуры за период времени Δt в период времени t в точке $r = 0$ без учета ее понижения вследствие оттока тепла будет равно:

$$\Delta T_{нагрев} \approx \frac{2Q(t)}{\rho_{см} c_{cv}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \chi t}{R_o^2}\right) \Delta \tau. \quad (2.12)$$

Понижение температуры за период времени Δt в период времени t в точке $r = 0$ за счет оттока тепла будет рассчитываться по формуле:

$$\Delta T_{\text{охлажд}} \approx -\frac{2\pi^2 \chi}{R_o^2} (T - T_c) \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \chi t}{R_o^2}\right) \Delta \tau. \quad (2.13)$$

Из формул (2.12), (2.13) устанавливаем, что изменения температуры за период времени $\Delta \tau$ в период времени t в точке $r = 0$ будет равно нулю (отвечает периоду времени $t = t_m$) в варианте $\Delta T_{\text{нагрев}} - \Delta T_{\text{охлажд}} = 0$. Что выполняется при условии

$$\frac{Q(t)}{\rho_{\text{см}} c_{\text{cv}}} - \frac{\pi^2 \chi}{R_o^2} (T - T_c) = 0. \quad (2.14)$$

Полагая в (2.14) $T = T_{\text{крит}}$, на основании (2.5), (2.8), (2.9) и (2.14) получаем условие достижения в центре очага разогрева критической температуры

$$\frac{6q\rho_n \varpi}{1 + \frac{\rho_n}{\sigma \rho_{\text{ВВ}}}} \cdot \frac{v_*}{\delta_o} \left(\frac{\delta_m}{\delta_o} \right)^2 \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T_{\text{крит}}} \right) \right) > \frac{\pi^2 k_{\text{см}}}{R_o^2} (T_{\text{крит}} - T_c), \quad (2.15)$$

где δ_m - размер сульфидного включения в момент времени $t = t_m$.

При $T_c = 323K$, $T_{\text{крит}} = 393K$; $E_a = 45,7 KДж / \text{моль}$ [64] (полагаем, что реакция проходит в диффузионном режиме); $\frac{\delta_m}{\delta_o} = 0,8$; $T_* = 300K$; $v_* = 10^{-11} \text{м/с}$ [167]; $q \approx 6 \text{ МДж/кг}$ [72, 76]; $\varpi = 10$; $\rho_{\text{п}} = 5000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{ВВ}} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 0,2$; $k_{\text{см}} = 0,41 \text{ Дж/(с}\cdot\text{м}\cdot\text{град)}$ на основании (2.15) получаем следующее ограничение на размеры очага разогрева в зависимости от размера сульфидсодержащих включений

$$R_o > 2,9\sqrt{\delta_o}. \quad (2.16)$$

При $\delta_o = 0,074 \text{ мм}$ (истирание материала в лабораторных условиях в ступке) $R_o > 25 \text{ мм}$. При $\delta_o = 1 \text{ мм}$ (в производственных условиях) – $R_o > 90 \text{ мм}$.

Отметим, что радиусы взрывных скважин при подземных горных работах составляют 40...50 мм. В таком случае вероятность формирования

опасных очагов разогрева в области высокой трещиноватости и также нарушенности горных пород, пресекаемых скважиной, довольно высока. При этом начинает повышаться опасность для механизированных методов зарядки. Чтобы ликвидировать вероятность образования таких потенциальных опасных очагов разогрева необходимо ВВ в скважинных зарядах помещать в защитные оболочки, например, при применении эмульсионных ВВ подобными оболочками могут быть «рукава» их прочных полиамидных тканей.

2.3 Оценка продолжительности безопасного разогрева колчеданного включения в аммиачно-селитренное взрывчатое вещество

При написании данного параграфа следовали работе, подготовленной при непосредственном участии автора [20].

Исследования в сфере применения аммиачно-селитренных ВВ (АСВВ) при добыче сульфидных руд являются одним из основных вопросов [66, 67, 68, 69, 76, 85, 148, 149, 150, 162]. Тем не менее, имеется ряд недостаточно исследованных вопросов в данной области. Одним из таких вопросов является аналитическая оценка периода времени безопасного нахождения АСВВ в контакте с сульфидной горной породой. Существует решение, предложенное в исследованиях [69], которое предполагает, что химическая реакция происходит по всей длине заряда в одно и тоже время и с той же скоростью. Данное предложение существенно упрощает математическое моделирование подобного процесса, которое позволяет исследовать систему как квазигомогенную.

В данном варианте, концентрация реагирующих веществ считается равномерно распределенной в объеме условного «реактора», что устраняет необходимость учета диффузионных ограничений и градиентов концентраций. Подобный подход сосредотачивается на кинетическом описании реакции, устанавливая ее скорость зависимость от температурного режима и иных характеристик. Тем не менее, стоит отметить, что подобное упрощение

справедливо только при конкретных условиях. Например, необходимо обеспечить хорошее перемешивание реагентов и также относительно невысокую скорость реакции. В случае, если скорость реакции будет весьма высокой или перемешивание будет недостаточно эффективным, то диффузионные ограничения могут быть несущественными и предположения о квазигомогенности не будет верным. В подобных случаях, учитывая диффузионные процессы разрабатывается наиболее сложная математическая модель.

Между тем, ряд исследователей считает именно рудную мелочь, смешавшуюся с АСВВ, источником основной опасности при разогреве системы «АСВВ + сульфидная руда» [44, 47, 85, 103, 148-150, 162]. В настоящем параграфе рассматривается вопрос аналитической оценки времени разогрева системы «АСВВ + сульфидная руда» до безопасной температуры при очаговом сценарии развития процесса.

Тем не менее, в некоторых вариантах, упрощенная модель, предложенная [69], может быть довольно точной и полезной для предварительной оценки характеристик процесса и оптимизации режимов.

Принимаем следующие обозначения:

ρ_* , k_* , c_* , χ_* - плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и температуропроводность среды, окружающей очаг разогрева, соответственно;

γ_s - удельная поверхность колчеданной руды в очаге разогрева
 $\gamma_s = 6\varpi / \delta_o$;

k_s - коэффициент активности поверхности руды, равный отношению площади поверхности колчеданной руды, участвующей в реакции с АС, к общей площади поверхности;

σ - отношение массы ВВ к массе колчеданной руды в очаге разогрева;

q - теплота реакции, выделяющаяся при взаимодействии единицы массы пирита с АС, Дж/кг;

μ_n - молекулярная масса пирита;

v_0 - скорость реакции первичного разложения пирита при температуре $T_* = 293^\circ \text{K}$ (соответствует нормальным условиям);

d - диаметр взрывной скважины, м;

L - расстояние вдоль скважины от очага разогрева до границы заряда, граничащей с атмосферой воздуха, м;

k - коэффициент газопроницаемости АСВВ в скважине, м^2 ;

ρ_g, η_g, μ_g - плотность, динамическая вязкость и молекулярная масса газов, образующихся в результате химических реакций между пиритом, и АС в очаге разогрева, соответственно;

Далее необходимо установить период времени, в течении которого разогрев элементов в области v_* может достигнуть критического значения, при котором возникает авария при выполнении взрывных работ. Оценка повышения температуры в очаге разогрева рассчитывается из уравнения теплового баланса.

$$Q_p = Q_{oc} + Q_{окр}, \quad (2.17)$$

где $Q_p, Q_{oc}, Q_{окр}$ - теплоты, выделяемые в результате взаимодействия пирита и АС, расходуемые на нагревание вещества в очаге разогрева, и окружающей очаг разогрева среды, соответственно.

Теплота, выделяемая в результате экзотермических реакций в очаге разогрева равна

$$Q_p = k_s \rho_p \gamma_s M_p q \bar{v} t, \quad (2.18)$$

где $\bar{v}$ - средняя линейная скорость разложения пирита на промежутке времени $[0; t]$.

Оценочные расчеты показали, что параметр k_s равен

$$k_s \approx \left(1 + \frac{\rho_p}{\rho_*} \cdot \frac{1 - \vartheta}{\vartheta} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (2.19)$$

Скорость реакции равна [58, 167]

$$v(t) = v_o \exp \left(- \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(t)} - \frac{1}{T_*} \right) \right). \quad (2.20)$$

Средняя скорость реакции определяется из уравнения

$$\bar{v} \approx \frac{v_o}{2} \exp \left(- \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_*} \right) \right) \left(1 + \exp \left(- \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \right). \quad (2.21)$$

Теплота, расходуемая на нагревание вещества в очаге разогрева, равна

$$Q_{оч} = M_p (c_p + \sigma \cdot c_{BB}) \Delta T, \quad (2.22)$$

где $\Delta T = T_{хар} - T_c$.

Теплота, расходуемая на нагревание окружающей среды, равна

$$Q_{окр} \approx M_p \rho_* c_* \left(\frac{1}{\rho_p} + \frac{\sigma}{\rho_{BB}} \right) \left(\left(1 + \frac{\sqrt{\chi_* t}}{R_o} \right)^3 - 1 \right) \Delta T. \quad (2.23)$$

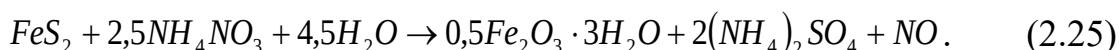
На основании (2.17), (2.18), (2.22), (2.23) определяем величину возрастания температуры в очаге разогрева

$$\Delta T \approx \frac{k_s \vartheta \gamma_s \rho_p q t}{c_p + \sigma \cdot c_{BB} + \rho_* c_* \left(\frac{1}{\rho_p} + \frac{\sigma}{\rho_{BB}} \right) \left(\left(1 + \frac{\sqrt{\chi_* t}}{R_o} \right)^3 - 1 \right)}. \quad (2.24)$$

При определении величины q исходим из следующей схемы взаимодействия колчеданных руд с АС [100]: реакция между АС и пиритом

возможна лишь при наличии воды; серная кислота, содержащаяся в рудничных водах, при взаимодействии с АС пополняет систему азотной кислотой; азотная кислота и ионы трехвалентного железа, содержащиеся в рудничной воде, взаимодействуя с пиритом, пополняют систему нитратами и сульфатами железа, а также серной кислотой; нитраты и сульфаты железа подвергаются гидролизу, степень которого быстро возрастает с увеличением температуры этих веществ, и пополняет систему азотной и серной кислотой, соответственно.

Таким образом, как серная и азотная кислоты, так и нитраты с сульфатами железа являются лишь инициаторами реакции взаимодействия АС и пирита в присутствии воды, а результирующую реакцию можно записать в виде



Значение энтальпии ΔH и энергии Гиббса ΔG для реакции (2.25):

$$\begin{aligned} \Delta H &= -721,5 \text{ КДж} \\ \Delta G &= -725 \text{ КДж} \end{aligned}$$

На скорость реакции (2.25) влияет давление газов в системе, что связано с перестройкой кристаллической решетки АС, при которой увеличивается реакционная способность АС [213]. Согласно [84] при повышенном давлении величина температуры, при которой начинается автокаталитическое экзотермическое разложение АС, снижается. Особенно сильное снижение критической температуры наблюдается в случае, если АС содержит органические вещества - при внешнем давлении 1,8...2,1 МПа критическая температура снижается до 407° К, а при давлении 14...18 МПа - до 387° К [84, 163].

Экстраполируя данные работ [84, 163], получаем зависимость характеристической температуры автокаталитического распада АС от давления в зоне реакции

$$T_{\text{хар}} \approx 234,87P^{-0,0433}. \quad (2.26)$$

Установившееся в очаге разогрева давление газов определяется из условия: масса газов, образующаяся в результате реакции в момент времени t , равна массе газов, диффундирующих из области реакции в этот же момент времени.

С учетом (2.26) масса газа, образовавшегося в очаге разогрева в момент времени t за время dt , равна

$$dm_{\varepsilon} = \frac{\mu_{\varepsilon}}{\mu_n} k_s \rho_p \gamma_s \mathcal{G} M_p v_o \exp \left(- \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_*} \right) \right). \quad (2.27)$$

На основании закона Дарси определяем массу газа диффундирующего из очага разогрева в момент времени t за время dt

$$dm = \rho_{\varepsilon} \frac{K \Delta P_{\varepsilon}}{\eta_{\varepsilon} K} F dt, \quad (2.28)$$

где ΔP - величина возрастания давления газов в очаге разогрева; F - площадь поверхности, через которую происходит истечение газа (обычно можно принять, что $F = \frac{\pi}{4} d^2$).

$$\text{В установившемся режиме } dm_{\varepsilon} = dm. \quad (2.29)$$

При $\Delta P \gg P_a$ (P_a - атмосферное давление) на основании закона Менделеева-Клайперона имеем

$$\rho_{\varepsilon} \approx \frac{\Delta P \mu_{\varepsilon}}{RT}. \quad (2.30)$$

На основании (2.25)-(2.30) получаем

$$\Delta P \approx 4 \frac{\rho_p R_o^{1.5}}{d} \cdot \exp \left(\frac{E_a}{2R} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T_{хпр}} \right) \right) \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma \cdot k_s \gamma_s \mathcal{G} v_o L \eta_{\varepsilon} R T_{хпр}}{\mu_n K \left(1 + \sigma \frac{\rho_p}{\rho_{BB}} \right)}}. \quad (2.31)$$

На рисунке 2.4 представлены зависимости установившегося давления газов в очаге разогрева в зависимости от расстояния (вдоль скважины) от очага

разогрева до поверхности заряда, граничащей с атмосферой воздуха, и различных значениях параметров, характеризующих рассматриваемый процесс.

При построении указанных зависимостей принимали: $E_a = 45,7 \text{ КДж / моль}$ [67]; $T = 400^\circ \text{ К}$; $T_* = 293^\circ \text{ К}$; $v_o = 10^{-11} \text{ м / с}$ [166]; $\rho_p = 5000 \text{ кг / м}^3$; $\rho_{\text{ВВ}} = 1000 \text{ кг / м}^3$; $x = 1$; $\vartheta = 1$; $\gamma_s = 50 \text{ м}^2 / \text{кг}$.

Анализ графиков, представленных на рисунке 2.4, показывает, что с увеличением размеров области разогрева давление газов в указанной области возрастает. При достаточно больших размерах очага разогрева в нем будет наблюдаться давление 1,8...2,2 МПа и выше, снизит значение критической температуры до 400...410° К.

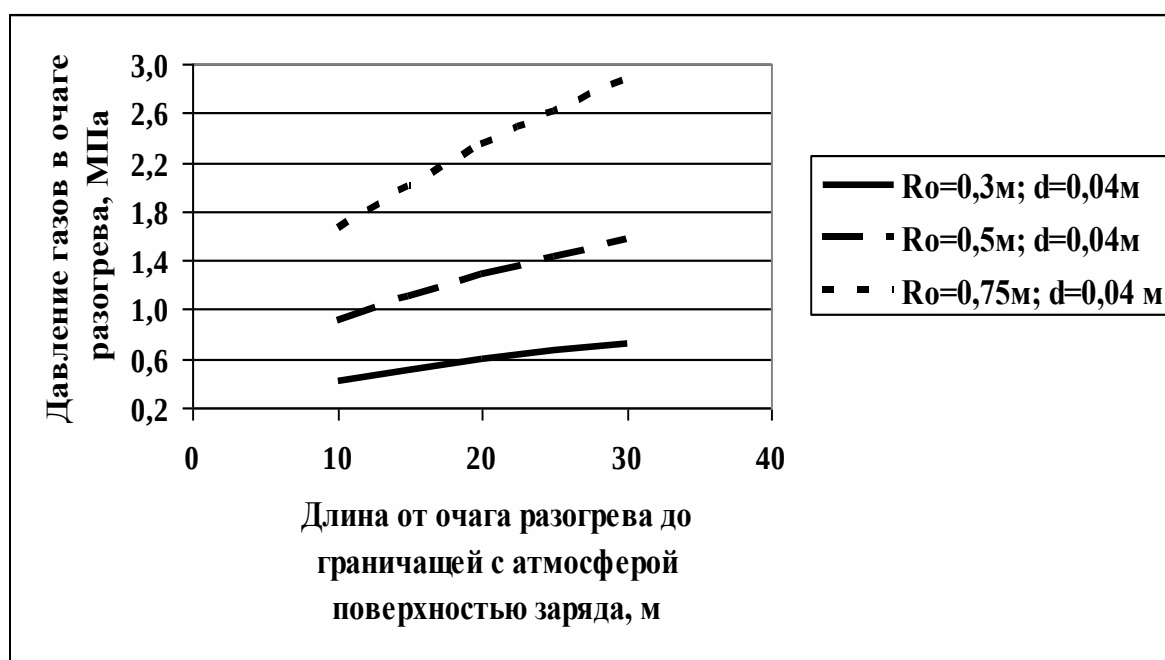


Рисунок 2.4 – Зависимости установившегося давления газов в очаге разогрева от расстояния (вдоль скважины) от очага разогрева до поверхности заряда, граничащей с атмосферой воздуха, при различных размерах очага разогрева.

Из зависимостей, представленных на рисунке 2.4, следует, что увеличение величины отношения массы ВВ к массе колчеданной руды в очаге

разогрева (до определенной величины) также способствует возрастанию давления газов в очаге разогрева.

Анализ графиков, представленных на рисунке 2.5 и рисунке 2.6, показывает, что в случае ухудшения отвода газов из области очага разогрева давление в этих газах может достигнуть 15...20 МПа и выше. Это приведет к снижению критической температуры до 380...390° К.

Таким образом, при оценочных расчетах значение критической температуры в очаге разогрева можно принять равной 380...400° К. При данной температуре, как показали проведенные обширные опытно-лабораторные исследования [185, 186, 187], происходит автокаталитическое экзотермическое взаимодействие аммиачной селитры с сульфидными рудами. В качестве доказательства в Приложении А приведены результаты исследований с породами Учалинского колчеданного месторождения.

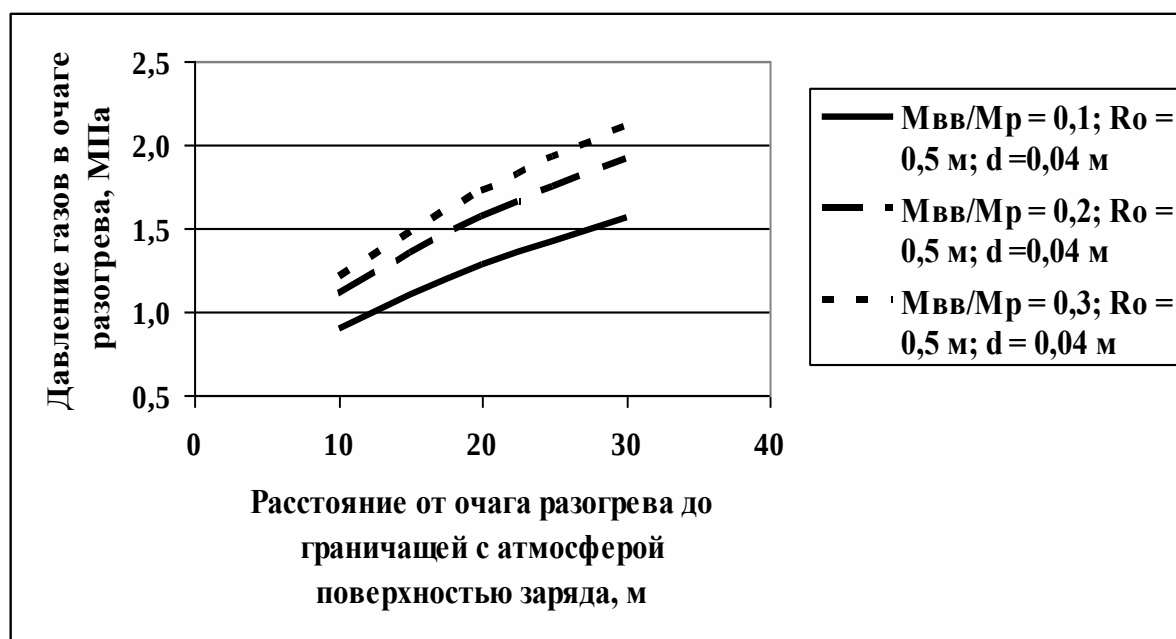


Рисунок 2.5 – Зависимости установившегося давления газов в очаге разогрева от расстояния (вдоль скважины) от очага разогрева до поверхности заряда, граничащей с атмосферой воздуха, при различных соотношениях массы ВВ и массы пирита в очаге разогрева

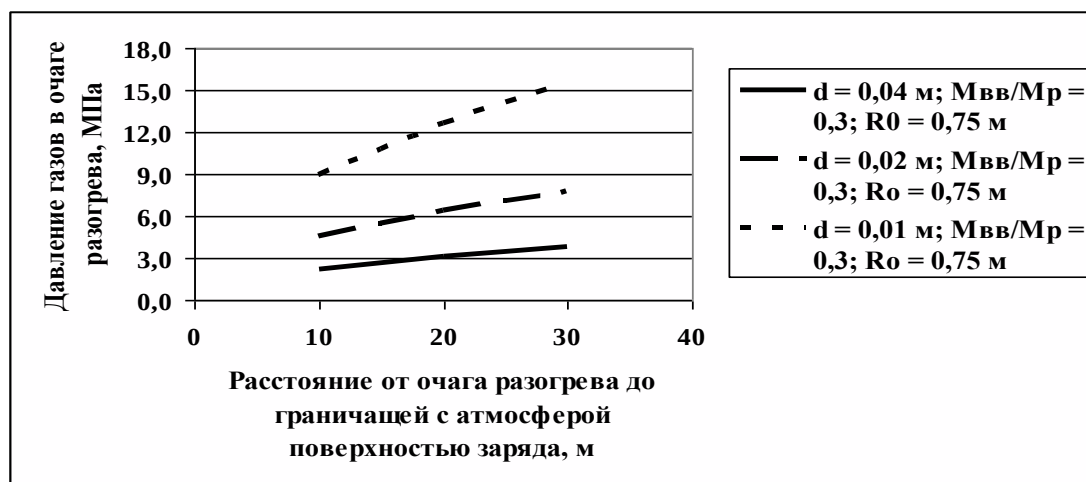


Рисунок 2.6 – Зависимости установившегося давления газов в очаге разогрева от расстояния (вдоль скважины) от очага разогрева до поверхности заряда, граничащей с атмосферой воздуха, при различных диаметрах газотводного канала

В таблице 2.3 приведены расчетные данные по наибольшей температуре в очаге разогрева, времени достижения этой температуры, наибольшего давления газов в очаге разогрева при различных размерах очага разогрева и различной трещинной пористости колчеданного массива в рассматриваемой области.

Таблица 2.3 – Расчетные данные по наибольшей температуре в очаге разогрева, времени достижения этой температуры, наибольшего давления газов в очаге разогрева при различных размерах очага разогрева и трещинной пористости колчеданного массива 30%

Наибольшая температура, К	Радиус очага разогрева, м	Время достижения наибольшей температуры, час	Наибольшее давление газов в очаге разогрева, МПа
365	0,2	2,7	0,30
381	0,3	2,2	0,56
393	0,5	2,0	1,22

Примечание: температура среды - 50°C ; $L = 20$ м; $d = 0,04$ м

Анализ таблицы 2.3 показывает, что при повышении температуры массива до 60°C , при радиусе очага разогрева 0,5 м и более - возможна детонация скважинного заряда примерно через 1,5...2 часа после заряжания ВВ.

Таблица 2.4 – Расчетные данные по наибольшей температуре в очаге разогрева, времени достижения этой температуры, наибольшего давления газов в очаге разогрева при различных размерах очага разогрева и трещинной пористости колчеданного массива 50%

Наибольшая температура, К	Радиус очага разогрева, м	Время достижения наибольшей температуры, час	Наибольшее давление газов в очаге разогрева, МПа
380	0,2	2,2	0,30
395	0,3	1,9	0,56
408	0,5	1,7	1,22

Примечание: температура среды – 60°C ; $L = 20$ м; $d = 0,04$ м

Из таблицы 2.4 видно, что при увеличении трещинной пористости очага разогрева до 50% (соответственно возрастании отношения массы ВВ к массе пирита в очаге разогрева до 0,2), детонация скважинного заряда возможна через 3...4 часа после заряжания при размерах очага разогрева 0,3 м и более при температуре массива 50°C .

В таблице 2.5 приведены расчетные данные по наибольшей температуре в очаге разогрева, времени достижения этой температуры, наибольшего давления газов в очаге разогрева при трещинной пористости колчеданного массива 20% в зависимости от температуры массива.

Анализ таблицы 2.6 показывает, что при снижении величины отношения массы ВВ к массе пирита в очаге разогрева менее 0,05 (трещинная пористость – 20%) температура разогрева не достигает критических значений даже при

значительном увеличении температуры массива и существенных размерах очага разогрева.

Таблица 2.5 – Расчетные данные по наибольшей температуре в очаге разогрева, времени достижения этой температуры, наибольшего давления газов в очаге разогрева при различных размерах очага разогрева и трещинной пористости колчеданного массива 20%

Наибольшая температура, °С	Радиус очага разогрева, м	Время достижения наибольшей температуры, час	Наибольшее давление газов в очаге разогрева, МПа
374	0,2	4,8	0,38
404	0,3	3,7	0,69
436	0,5	2,9	1,49

Примечание: температура среды – 50°С; $L = 20$ м; $d = 0,04$ м

Таблица 2.6 – Расчетные данные по наибольшей температуре в очаге разогрева, времени достижения этой температуры, наибольшего давления газов в очаге разогрева при трещинной пористости колчеданного массива 20%

Наибольшая температура, °С	Температура массива, °С	Время достижения наибольшей температуры, час	Наибольшее давление газов в очаге разогрева, МПа
367	50	1,3	0,94
374	60	1,1	0,94
388	70	1,0	0,94

Примечание: $R_o=0,5$ м; $L = 20$ м; $d = 0,04$ м

Повышение безопасности при взрывных работах достигается комплексом мероприятий, которые включают в себя выбор оптимального типа ВВ и средств инициирования, детальный анализ геологических условий, схемы расположения зарядов, меры по предотвращению случайных

(спонтанных) детонаций, также выбора аммиачно-селитренных ВВ - как наиболее безопасной альтернативы другим типам промышленной взрывчатки. Тем не менее, при разрушении колчеданных руд, которые характеризуются высоким содержанием серы и повышенной склонностью к самовозгоранию, нужно учитывать вероятность образования взрывоопасных смесей, что требует использования дополнительных мер предосторожности.

Применение защитных оболочек (рукавов) вокруг зарядов ВВ (изолирующих ВВ от контакта с рудной стенкой скважины) становится одной из подобных мер, данные оболочки изготавливаются из прочных, негорючих материалов, таких как полиэтилен высокой плотности или специальной синтетической ткани (например, из капроновых или полиамидных волокон). Главной функцией защитной оболочки является предотвращение прямого контакта ВВ с окружающей агрессивной средой, что понижает риск загрязнения ВВ частицами окружающей агрессивной среды (рудной мелочи, оставшейся в шпуре (скважине) от процесса бурения – как следствие, случайного (спонтанного) инициирования; помимо этого, оболочка обеспечивает наиболее равномерное распределение детонационной волны (за счет сохранения формы и сплошности заряда ВВ), что способствует наиболее эффективному разрушению горной породы и снижает вероятность формирования крупных кусков.

Таким образом, использование защитных оболочек (рукавов) существенно повышает безопасность взрывных работ при применении аммиачно-селитренных ВВ для разрушения колчеданных руд.

2.4 Влияние вида и содержания ингибитора на детонационные характеристики сульфидоустойчивых эмульсионных взрывчатых веществ

На практике зафиксировано множество случаев, когда ЭВВ, благодаря наличию в собственном составе аммиачной селитры могут вступать в

экзотермическое взаимодействие с сульфидсодержащими горными породами [49, 76, 85, 203, 218].

Для снижения скорости данного взаимодействия в ВВ добавляются ингибиторы, которые способствуют понижению скорости такого взаимодействия, что повышает уровень безопасности взрывных работ [2, 3, 66, 69, 72, 101, 134, 148. 149, 150].

Посвященные вопросам использования ингибиторов исследования показали, что главное внимание должно уделяться обоснованию выбора и концентрации ингибитора с точки зрения повышенной химической стойкости ВВ, тем не менее, ингибиторы не являются взрывчатыми веществами, поэтому их введение может ухудшать взрывчатые свойства ВВ, при этом, при взаимодействии ингибиторов с агрессивной средой появляются новые вещества, которые могут пассивировать ВВ в наибольшей степени, чем сам ингибитор. В данном параграфе, основанном на работе [98], представлена количественная оценка понижения взрывчатых свойств ВВ от вида и характеристик ингибиторов, и также продуктов их реакции с агрессивными веществами среды.

Отметим, что прикладные исследования в основном фокусируются на разработках и оптимизации определенных характеристик ингибиторов для разных видов ВВ, здесь исследуется совместимость ингибитора с ВВ, его воздействие на чувствительность к удару и трению, также долгосрочная устойчивость элементов. Основным аспектом является технологичность процесса введения ингибитора, его равномерное распределение в объеме ВВ.

Другим направлением являются исследования, связанные с изучением механизма ингибирования, понимание того, как собственно ингибитор предотвращает или замедляет разложение ВВ на молекулярном уровне, что позволяет разрабатывать наиболее эффективные ингибиторы, функционирующие при наименьших концентрациях и оказывающие наименьшее негативное воздействие на взрывчатые характеристики ВВ.

Теоретические исследования направлены на моделирование процессов разложения ВВ и воздействия на них ингибиторов, данные модели позволяют прогнозировать устойчивость разных составов и оптимизировать выбор ингибиторов и его концентрации без необходимости проведения дорогостоящих экспериментов.

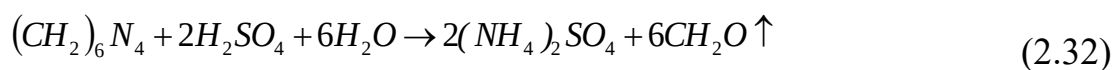
Обзор современных представлений о механизме действия ингибитора показал, что несмотря на различные позиции исследователей в описании взаимодействия сульфидов с аммиачной селитрой в присутствии сернокислых шахтных вод, все сходится в одном: ингибиторы нейтрализуют серную и (или) азотную кислоту, благодаря наличию которых и возможна реакция в системе «Аммиачная селитра – Сернокислотная вода - Сульфид».

В соответствии с этим, в качестве ингибиторов применяются вещества, которые способны нейтрализовать действие указанных кислот и доступны в значительных количествах, поскольку ежегодные потребности в сульфидоустойчивых ВВ только в России составляют десятки тысяч тонн.

Наиболее распространенными являются следующие ингибиторы: уротропин, карбамид, карбонат кальция, дифениламин.

Уравнения (2.32)-(2.35) описывают химическое взаимодействие упомянутых ингибиторов с водным раствором серной кислоты.

Уротропин



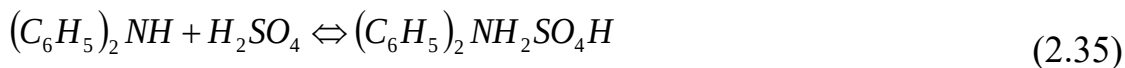
Карбамид



Карбонат кальция



Дифениламин



Здесь $NSO_4C(NH_2)_2CO$ – сульфат карбамида; $(C_6H_5)_2NH_2SO_4H$ – гидросульфат дифениламина.

Уравнения (2.36)-(2.39) описывают реакции взаимодействия ингибиторов с водным раствором азотной кислоты.

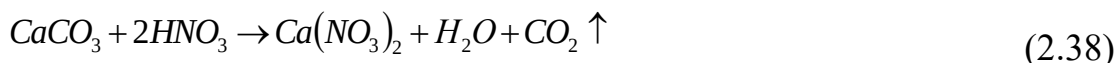
Уротропин



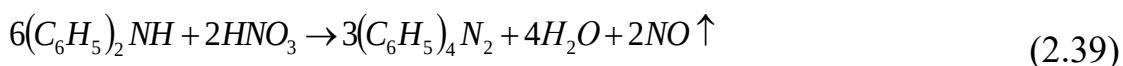
Карбамид



Карбонат кальция



Дифениламин



$(CH_2)_6N_4 \cdot 2HNO_3$ – динитрат уротропина; $(NH_2)_2CO(NHNO_3)$ – нитрат карбамида; $(C_6H_5)_4N_2$ – тетрафенилгидразин.

На рисунке 2.7 представлены расчетные зависимости удельной теплоты взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора (вода пар). Расчет осуществлялся по методике, представленной в работе [37]. Полагалось, что реакция детонационного разложения удовлетворяет принципу Бринкли-Вильсона [12].

Зависимости построены в предположении, что ингибиторы не вступили в реакцию с кислотами, содержащимися во внешней агрессивной среде. Несмотря на это необходимо отметить, что с увеличением содержания ингибитора в ЭВВ происходит существенное снижение удельной теплоты взрыва особенно для уротропина и дифениламина.

На рисунке 2.8. представлены расчетные зависимости удельной теплоты взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора (вода пар). Полагалось, что

реакция детонационного разложения удовлетворяет принципу Бринкли-Вильсона.

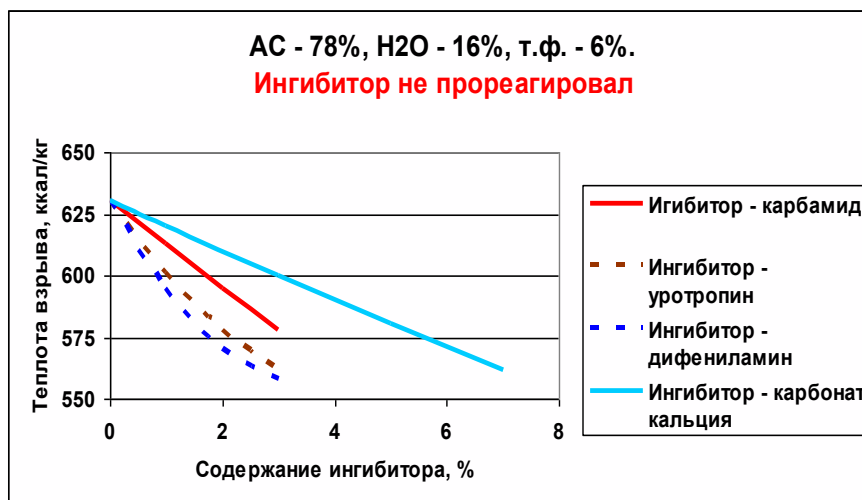


Рисунок 2.7 – Зависимость удельной теплоты взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора (вода пар). Т.Ф. – топливная фаза

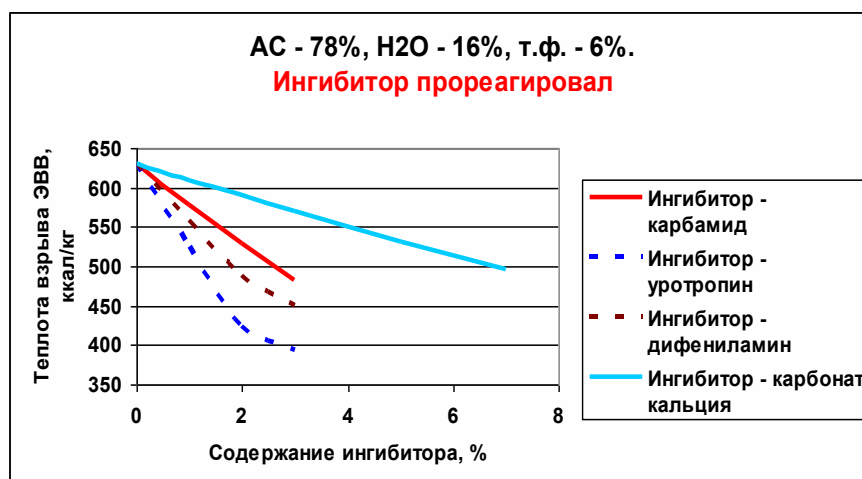


Рисунок 2.8 – Зависимость удельной теплоты взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора (вода - пар)

Зависимости построены в предположении, что ингибиторы вступили в реакцию с кислотами, содержащимися во внешней агрессивной среде, и полностью прореагировали.

Сравнительный анализ этих зависимостей и зависимостей, когда ингибитор не вступил в реакцию, которые приведены на рисунке 2.9,

показывает существенное снижение удельной теплоты взрыва при распаде ингибиторов особенно для уротропина (почти на 40%).

На рисунке 2.9 представлены расчетные зависимости температуры взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора (вода пар). Полагалось, что реакция детонационного разложения удовлетворяет принципу Бринкли-Вильсона. Теплоемкость продуктов взрыва рассчитывалась по формулам Эйнштейна [12].

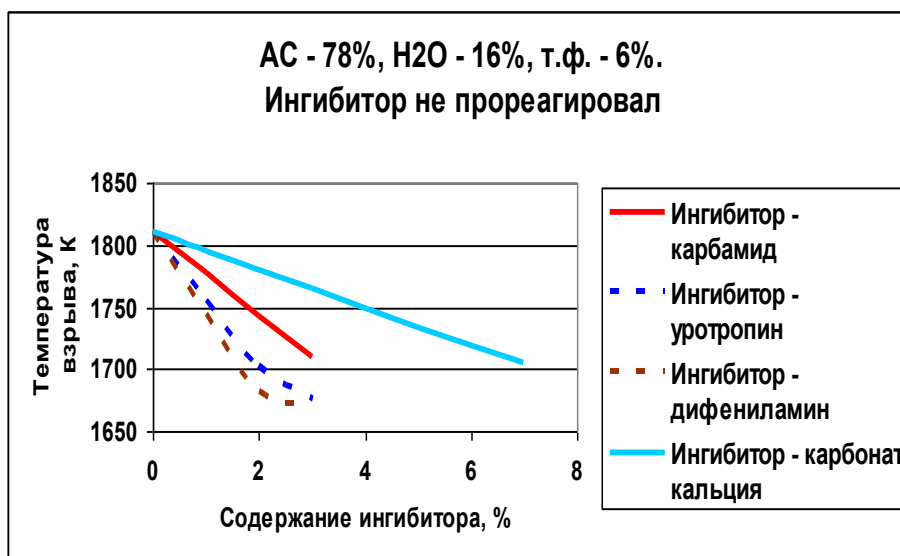


Рисунок 2.9 – Зависимость температуры взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора

Зависимости построены в предположении, что ингибиторы не вступили в реакцию с кислотами, содержащимися во внешней агрессивной среде. Несмотря на это необходимо отметить, что с увеличением содержания ингибитора в ЭВВ происходит существенное снижение температуры взрыва особенно для уротропина и дифениламина.

На рисунке 2.10 представлены расчетные зависимости температуры взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора (вода пар). Полагалось, что реакция детонационного разложения удовлетворяет принципу Бринкли-Вильсона. Теплоемкость продуктов взрыва рассчитывалась по формулам Эйнштейна.

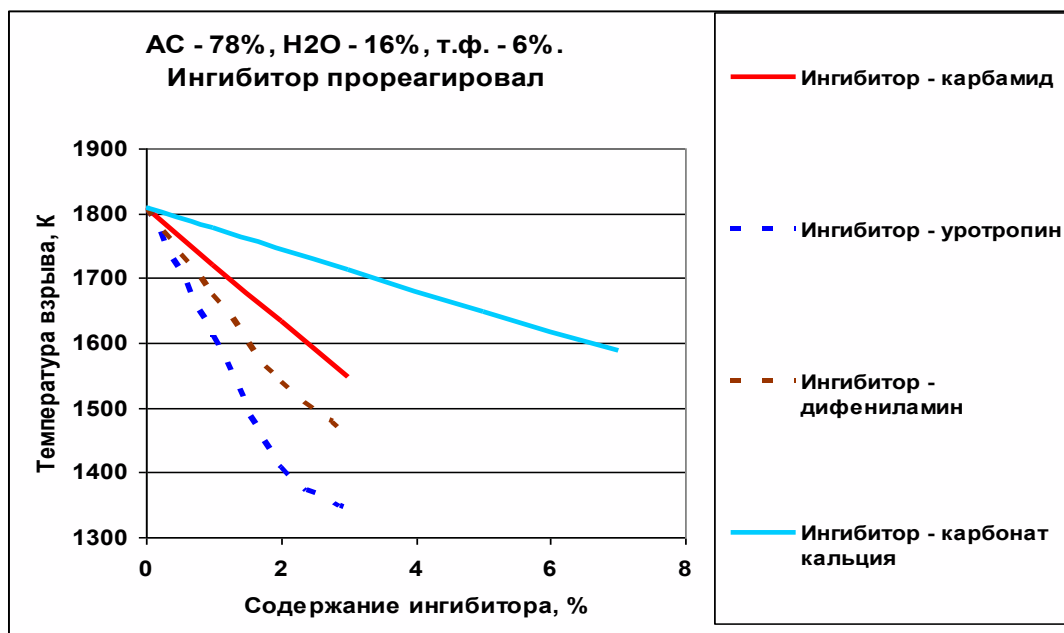


Рисунок 2.10 – Зависимость температуры взрыва ЭВВ от вида и содержания ингибитора

Приведенные выше зависимости построены в предположении, что ингибиторы вступили в реакцию с кислотами, содержащимися во внешней агрессивной среде, и полностью прореагировали. Сравнительный анализ этих зависимостей и зависимостей, когда ингибитор не вступил в реакцию, которые приведены на рисунке 2.9, показывает существенное снижение температуры взрыва при распаде ингибиторов особенно для уротропина (почти на 20%).

Для оценки возможности применения методики расчета детонационных параметров несulfидоустойчивых (обычных) ЭВВ к sulfидоустойчивым были выполнены полигонные испытания с замером скорости детонации в 160–миллиметровых зарядах ЭВВ. Длина заряда – 1 м. Оболочка – картон.

Характеристика ЭВВ: состав – CaC – 15%, AC – 62%, H₂O – 16%, топливная фаза – 7%. Размер частиц эмульсии – 3 мкм. Размер сенсibiliзирующих газовых пор - 70 мкм. Плотность ЭВВ – 1,15...1,16 (определялась по методике [16]). Инициатор – эмульсионный промежуточный детонатор массой – 1000 г.

Результаты опытов и расчетные зависимости приведены на графике, представленном на рисунке 2.11.

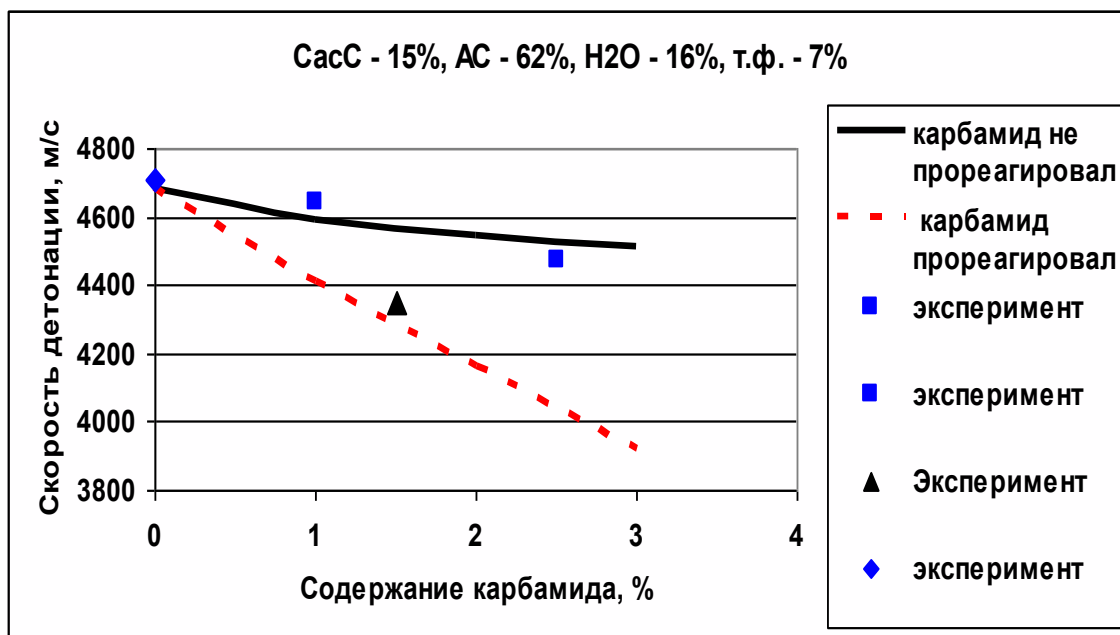


Рисунок 2.11 – Влияние содержания карбамида на скорость детонации ЭВВ при различных степенях разложения

Согласие расчетных, выполненных на основании [37], и экспериментальных данных позволило более детально изучить поставленный в работе вопрос на основе математического моделирования детонации нисходящего 10-метрового заряда сульфидоустойчивого ЭВВ при нижнем инициировании.

Данные результаты представлены на нижеследующих рисунках. На рисунке 2.12 приведены зависимости средней скорости детонации по длине заряда от вида и начального содержания ингибитора. Полагается, что ингибитор полностью прореагировал.

Состав базовой эмульсии: АС – 78%, Н₂О – 16%, топливная фаза – 6%. Размер частиц эмульсии – 3 мкм. Размер сенсibiliзирующих газовых пор – 70 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении – 1,07 г/см³.

Наблюдается сильная зависимость скорости детонации от содержания ингибитора - для уротропина и карбамида. Наименее подвержен влиянию

содержания ингибитора на скорость детонации состав с карбонатом кальция. Однако, в соответствии с уравнениями взаимодействия ингибиторов с серной кислотой (2.37)-(2.40), для достижения одинаковой «буферной» емкости при использовании карбоната кальция, его требуется в 3,3 раза больше по массе, чем карбамида.

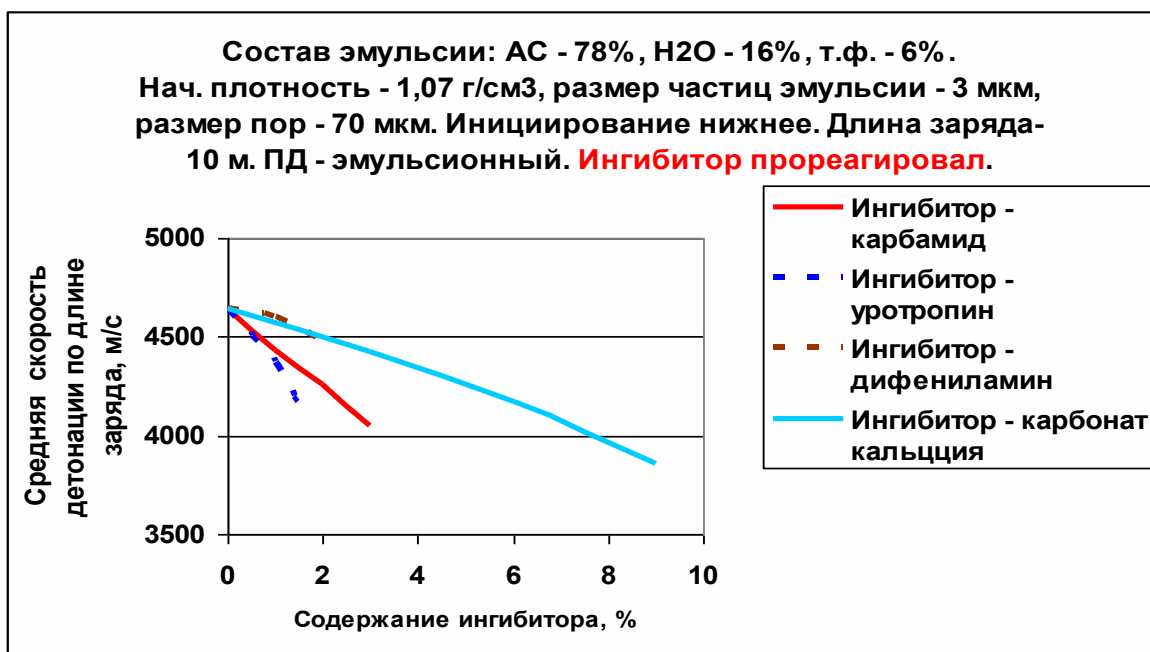


Рисунок 2.12 – Зависимость средней скорости детонации по длине заряда от вида и содержания ингибитора

На рисунке 2.13 приведены зависимости критического диаметра заряда ЭВВ от вида и начального содержания ингибитора. Полагается, что ингибитор полностью прореагировал. Состав базовой эмульсии: АС – 78%, H₂O – 16%, топливная фаза – 6%. Размер частиц эмульсии – 3 мкм. Размер пор – 70 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении – 1,07 г/см³.

Наблюдается сильное увеличение критического диаметра заряда от содержания ингибитора для уротропина и дифениламина. Наименее подвержен влиянию содержания ингибитора на величину критического диаметра состав с карбонатом кальция.

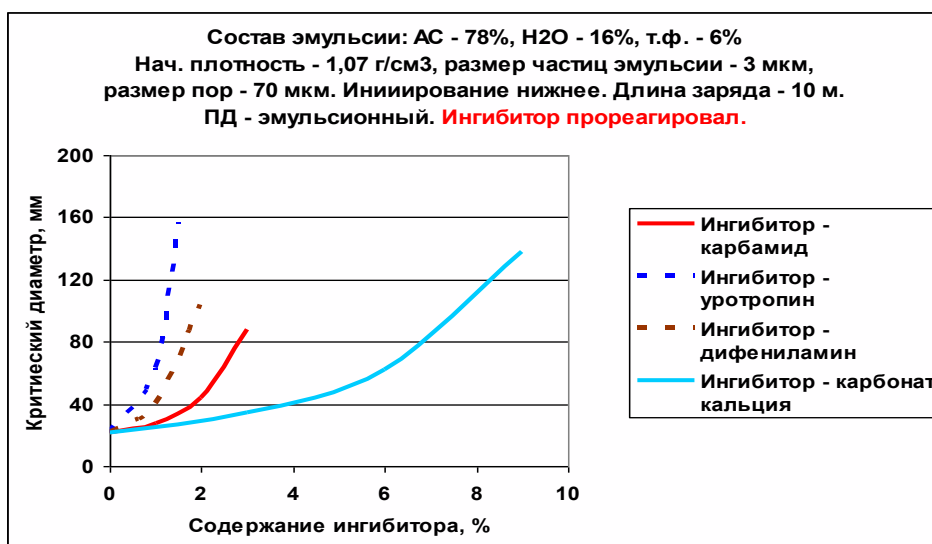


Рисунок 2.13 – Зависимость критического диаметра заряда от вида и содержания ингибитора

На рисунке 2.14 приведены зависимости термодинамического коэффициента относительной работоспособности ЭВВ от вида и начального содержания ингибитора.

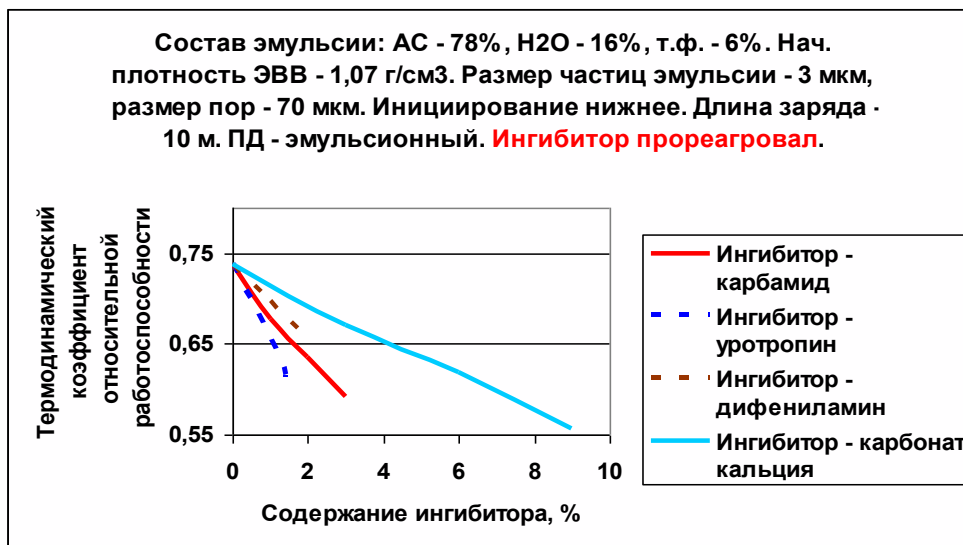


Рисунок 2.14 – Зависимость коэффициента относительной работоспособности от вида и содержания ингибитора

Наблюдается сильное снижение коэффициента относительной работоспособности ЭВВ от содержания ингибитора для уротропина и

карбамида. Наименее подвержен влиянию содержания ингибитора на величину коэффициента относительной работоспособности состав с карбонатом кальция.

На рисунке 2.15 приведены зависимости скорости детонации от вида и начального содержания карбамида для ЭВВ, имеющих различные окислительные фазы – на монорастворе аммиачной селитры и на бинарном растворе аммиачной и кальциевой селитр. Полагалось, что карбамид полностью прореагировал. Состав базовых эмульсий указан на рисунке. Размер частиц эмульсии – 3 мкм. Размер пор – 70 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении: для ЭВВ с окислительной фазой на монораствора аммиачной селитры – 1,07 г/см³, а на основе бинарного раствора – 1,15 г/см³. Инициатор – эмульсионный промежуточный детонатор (патрон) массой 800 г.

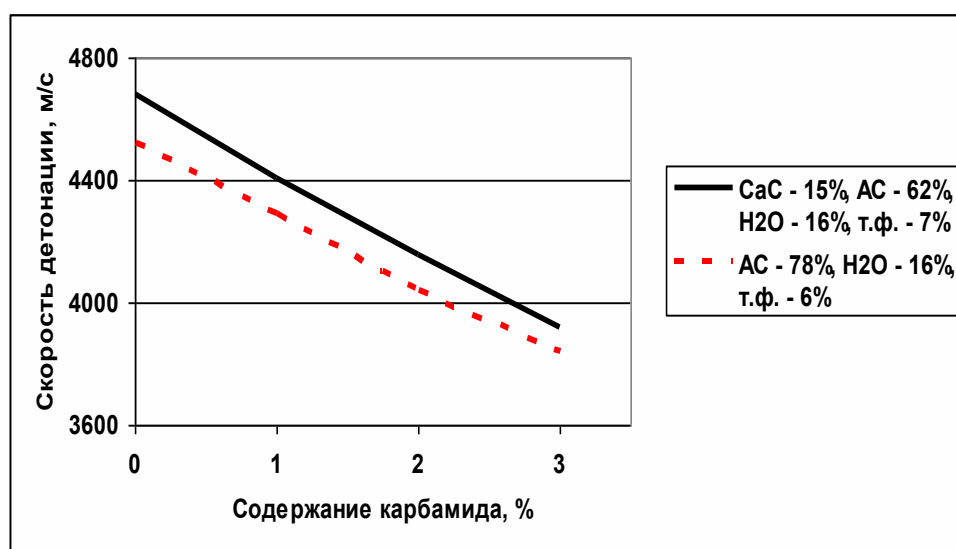


Рисунок 2.15 – Зависимость скорости детонации ЭВВ от компонентного состава эмульсии и начального содержания карбамида

Необходимо отметить, что скорость детонации для ЭВВ с окислительной фазой на монораствора аммиачной селитры ниже, чем скорость детонации для ЭВВ на основе бинарного раствора. При этом для обоих ЭВВ наблюдается снижение скорости детонации почти на 20% при изменении содержания карбамида от 0 до 3%.

На рисунке 2.16 приведены зависимости коэффициента относительной работоспособности ЭВВ от содержания карбамида для ЭВВ, имеющих различные окислительные фазы – на монорастворе аммиачной селитры и на бинарном растворе аммиачной и кальциевой селитр. Полагается, что карбамид полностью прореагировал.

Состав базовых эмульсий указан на рисунке. Размер частиц эмульсии - 3 мкм. Размер пор – 70 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении: для ЭВВ с окислительной фазой на монораствора аммиачной селитры - 1,07 г/см³, а на основе бинарного раствора – 1,15 г/см³. Инициатор – эмульсионный промежуточный детонатор (патрон) массой 800 г.

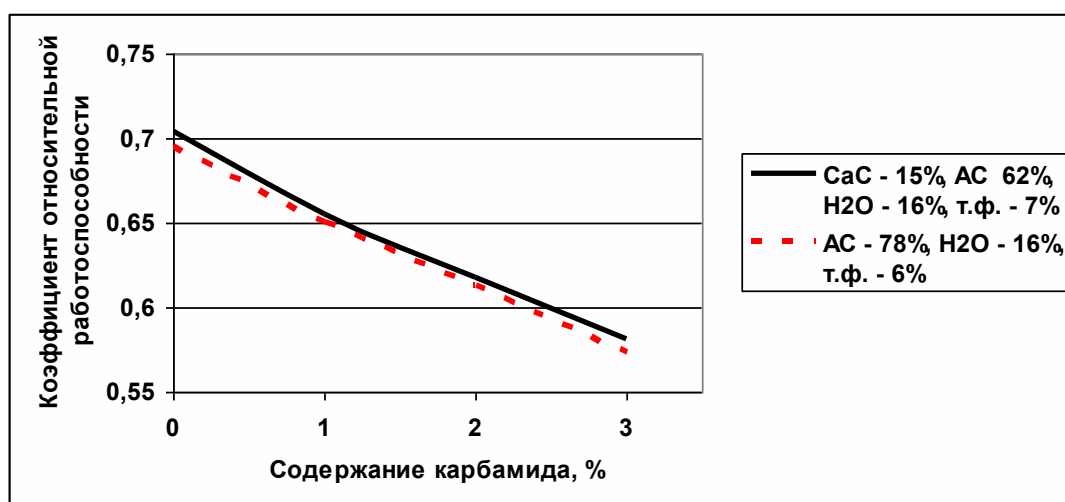


Рисунок 2.16 – Зависимость коэффициента относительной работоспособности ЭВВ от компонентного состава эмульсии и начального содержания карбамида

Необходимо отметить, что коэффициент относительной работоспособности ЭВВ для ЭВВ с окислительной фазой на монораствора аммиачной селитры практически совпадает с коэффициентом относительной работоспособности ЭВВ для ЭВВ на основе бинарного раствора. При этом для обоих ЭВВ наблюдается снижение коэффициента относительной

работоспособности ЭВВ почти на 20% при изменении содержания карбамида от 0 до 3% масс.

На рисунке 2.17 приведены зависимости критического диаметра ЭВВ от содержания карбамида для ЭВВ, имеющих различные окислительные фазы – на монорастворе аммиачной селитры и на бинарном растворе аммиачной и кальциевой селитр. Полагается, что карбамид полностью прореагировал.

Состав базовых эмульсий указан на рисунке. Размер частиц эмульсии – 3 мкм. Размер пор – 70 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении: для ЭВВ с окислительной фазой на монораствора аммиачной селитры – 1,07 г/см³, а на основе бинарного раствора – 1,15 г/см³. Инициатор – эмульсионный промежуточный детонатор (патрон) массой 800 г.

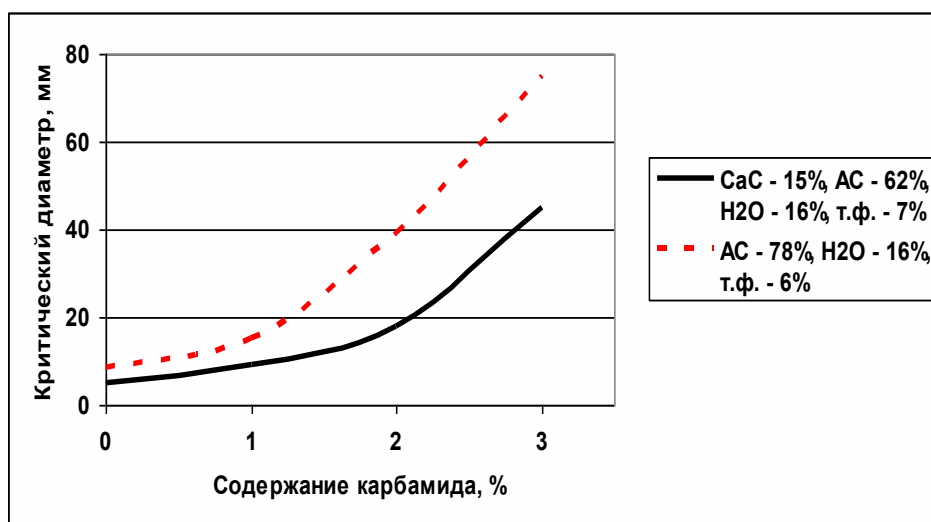


Рисунок 2.17 – Зависимость критического диаметра ЭВВ от компонентного состава эмульсии и начального содержания карбамида (карбамид прореагировал)

Необходимо отметить, что критический диаметр ЭВВ с окислительной фазой на монорастворе аммиачной селитры существенно больше критического диаметра ЭВВ на основе бинарного раствора (на 70%). При этом для обоих ЭВВ наблюдается увеличение критического диаметра заряда ЭВВ при изменении содержания карбамида от 0 до 3% масс.

На рисунке 2.18 на примере ингибитора-карбамида представлено влияние разложения ингибитора на снижение некоторых важных характеристик взрывчатого разложения ЭВВ. Обозначения на рисунке 2.18: Q – теплота взрыва; D – скорость детонации.

Оценка осуществлена для следующего ЭВВ: состав CaC – 15%, AC – 62%, H_2O – 16%, топливная фаза – 7%; размер частиц эмульсии – 3 мкм; размер пор – 70 мкм; плотность ЭВВ – 1,15...1,16 г/см³.

Анализ зависимостей показывает, что при изменении содержания карбамида от 0 до 3% происходит уменьшение теплоты взрыва на 17%, а скорости детонации и относительного коэффициента работоспособности ЭВВ на 12%.

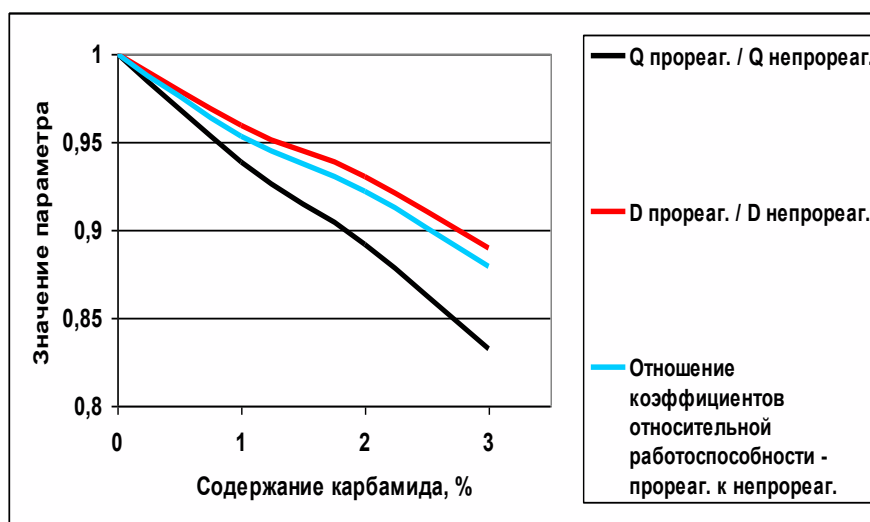


Рисунок 2.18 – Снижение взрывчатых характеристик ЭВВ при разложении ингибитора

На рисунке 2.19 на примере ингибитора - карбамида представлено влияние разложения ингибитора на увеличение критического диаметра заряда ЭВВ $d_{крит}$ (приведена зависимость отношения величины критического диаметра ЭВВ, в котором карбамид полностью прореагировал с серной кислотой, к величине критического диаметра ЭВВ, в котором карбамид не прореагировал с серной кислотой).

Оценка осуществлена для следующего ЭВВ. Состав: CaC – 15, AC – 6%, H_2O – 16%, топливная фаза – 7%. Размер частиц эмульсии – 3 мкм, размер пор – 70 мкм. Плотность ЭВВ – 1,15...1,16 г/см³.

Анализ зависимости показывает существенность влияния величины критического диаметра заряда от начального содержания карбамида. При модификации содержания карбамида до 3% происходит резкий рост критического диаметра заряда ЭВВ, что абсолютно надо учитывать, как при проектировании сульфидоустойчивого ЭВВ, так и при его использовании. Повышение содержания карбамида свыше 3% приводит к менее выраженному, но все же заметному повышению критического диаметра заряда. Данный эффект связан с изменением фазового состояния композиции и ее термодинамических характеристик.

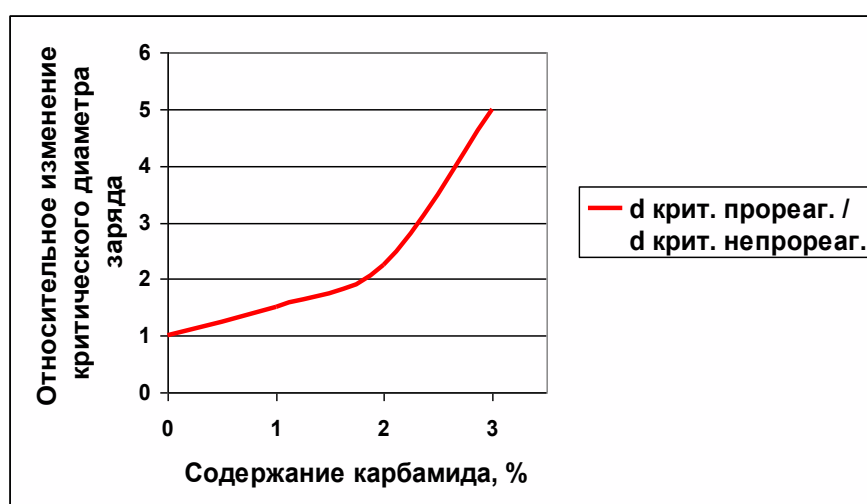


Рисунок 2.19 – Возрастание критического диаметра заряда ЭВВ при разложении ингибитора

При высоких концентрациях карбамида (более 5%) отмечается тенденция к сегрегации компонентов, что отрицательно сказывается на однородности заряда, и как следствие, на устойчивости детонационных свойств. Установлено, что температура окружающей среды оказывает значительное влияние на зависимость критического диаметра от содержания карбамида, при понижении температуры кривая зависимости становится

наиболее крутой, что указывает на наиболее высокую чувствительность ЭВВ к изменениям характеристик карбамида в условиях низких температур. Результаты количественного анализа подтвердили экспериментальные данные и позволили выявить основные факторы, которые определяют зависимость критического диаметра заряда от карбамида такие как изменение скорости, плотности и энергии активации карбамида.

2.5 Выводы по главе 2

Разработана математическая модель 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 с начальными и граничными условиями, определяющими адиабатические условия «теплового взрыва» ВВ, что позволило определить безопасность применения ЭВВ, что соответствует выполнению **первого научного положения**.

Выявлено влияние размера сульфидсодержащих породных включений на размер очага разогрева, при котором возникает опасность поражения людей ядовитыми газами или возможность самопроизвольного взрыва заряда ВВ.

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.

Очаг опасного нагрева при проведении подземных горных работ образуется только в местах сильной трещиноватости и нарушения целостности горных пород, где скважины пересекаются с трещинами внутри массива. В то же время при механизированном способе загрузки повышается риск образования очага перемешивания ВВ с рудной мелочью. Чтобы исключить возможность образования этих потенциально опасных очагов разогрева, рекомендуется закладывать ВВ в защитные оболочки (рукава). В случае с

гранулированными или эмульсионными взрывчатыми веществами эта оболочка может выступать в качестве «оболочки», изготовленной из прочной полиамидной ткани (рукав).

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

Полученные результаты позволяют обоснованно сформировать направление дальнейших исследований, как для обеспечения безопасности взрывных работ, так и для разработки безопасных технологий взрывания колчеданных руд при помощи аммиачно-селитренных ВВ.

При разработке составов сульфидоустойчивых ЭВВ необходимо учитывать, что при размещении ЭВВ в сульфидосодержащих породах взрывчатые вещества наполняются продуктами реакции ингибиторов, содержащихся в ЭВВ, с агрессивной средой, которые снижают детонационные характеристики ЭВВ в большей степени, чем сам ингибитор.

В ряду ингибиторов –

Карбамид > Карбонат кальция > Дифениламин > Уротропин – каждый последующий член ряда снижает работоспособность ЭВВ большим образом, чем предыдущий (при сохранении аналогичной химической стойкости).

Уротропин значительно снижает восприимчивость к возбуждающим детонацию импульсам, а дифениламин обладает небольшой «буферной емкостью» связывания кислот – что, в целом, ограничивает их применение в качестве ингибиторов в составе ЭВВ.

Устойчивые к сульфидам ЭВВ, на основе бинарных аммиачной и кальциевых селитр, имеют значительно меньший критический диаметр, чем ЭВВ с окисленными фазами на основе монораствора аммиачной селитры, что позволяет рекомендовать эти композиции для применения в шпурах и скважинах малого диаметра.

ГЛАВА 3

ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С СУЛЬФИДНЫМИ РУДАМИ

3.1 Химическая модель взаимодействия аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с сульфидными рудами

Настоящий параграф написан на основании работ [100, 101].

Как уже отмечалось выше основным регламентирующим документом о порядке безопасного применения аммиачно-селитренных ВВ (АСВВ) при ведении взрывных работ в сульфидсодержащих горных породах является «Руководство по предупреждению самопроизвольных загораний и взрывов взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры при производстве взрывных работ в медноколчеданных рудах» [158, 159].

Согласно «Руководству по предупреждению самопроизвольных загораний и взрывов взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры при производстве взрывных работ в медноколчеданных рудах» принятие решения о возможности безопасного применения ВВ основывается на знании условий применения, которые характеризуют следующими параметрами:

1. Температура рудного массива;
2. Наличие шахтных вод и их кислотность в заряжаемых скважинах;
3. Содержание пирита в рудном массиве.

В таблице 3.1 приведены сведения о допустимом времени нахождения АСВВ во взрывных скважинах в зависимости температуры колчеданного массива, кислотности шахтных вод и содержания пирита в рудах [159].

В ограничениях на время нахождения АСВВ в скважине, представленных в таблице 3.1, не учитываются как дисперсность твердых компонентов реакции, так и возможность снижения химической активности АСВВ путем введения в их состав ингибиторов.

Данное обстоятельство послужило основанием для разработки экспериментальной методики оценки химической совместимости АСВВ и

сульфидсодержащих пород [2, 3]. Независимо от указанных исследований австралийскими учеными предложена своя методика оценки химической совместимости АСВВ и сульфидсодержащих пород [189, 190].

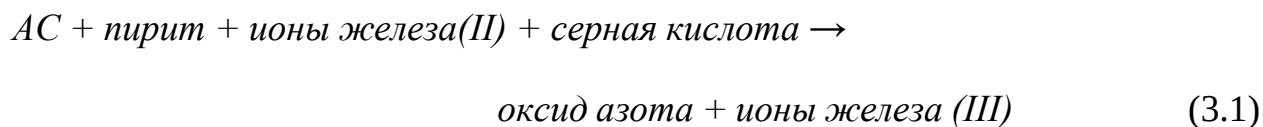
Таблица 3.1 – Допустимое время нахождения АСВВ в скважине в зависимости температуры колчеданного массива, кислотности шахтных вод и содержания пирита в рудах [159]

Допустимое время нахождения АСВВ в скважине, час						
Степень агрессивности	Температура руды, град С					
	до 25	более 25	более 30	более 35	более 40	40...50
Низкая (30...70% пирита)	Не более 24 часов	24/14	12/7	7/4	2/1	Не более 1 часа
Средняя (70...80% пирита)		20/12	10/6	6/4	2/1	
Высокая (более 80% пирита)		16/10	8/5	5/3	2/1	

Примечание: числитель – сухие и мокрые с $pH > 2$ скважины; знаменатель – мокрые с $pH < 2$.

В основе методик [2, 189] лежат следующие представления:

- реакция между АСВВ и сульфидсодержащей породой происходит согласно циклической схеме:



Далее ионы железа (III), и оксид азота, и ионы железа реагируют с пиритом.

При этом на выходе получаются ионы железа (II) и серной кислоты:

Пирит + оксид азота + ионы железа (III) →

ионы железа (II) + серная кислота. (3.2)

- скорость химических реакций зависит от удельной поверхности твердых реагентов, поэтому для повышения чувствительности методов лабораторного исследования рассматриваемого химического процесса используются мелкие фракции реагентов;

- скорость реакций значительно увеличивается при наличии воды, обеспечивающей быстрый диффузионный перенос реагентов.

Основные особенности данных методик представлены в таблице 3.2.

Как известно, из-за выветривания колчеданных руд сульфидные минералы претерпевают поверхностные изменения, что способствует повышению их реакционной способности [179, 193]. Помимо этого, рудничная вода становится сернокислой и кислородной, в основном содержащей сульфид-ионы и ионы металлов, преимущественно Fe^{2+} и Fe^{3+} , и присутствие сульфат-ионов также способствует смачиваемости поверхности пирита, что значительно способствует прохождению реакции [117].

Согласно исследованиям [200, 204, 205, 206], начальная степень окисления сульфированных пород является важным фактором, влияющим на их самоокислительные свойства и прочность.

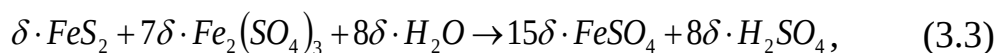
Тем не менее, анализ этих процессов на основе уравнений (3.1) и (3.2) очень сложен. Рассматривая множество практических и важных вопросов по повышению безопасности и надежности взрывных работ при применении АСВВ для разрушения сульфидных руд, поэтому необходимо более подробно рассмотреть участие сульфата железа во взаимодействии АСВВ и колчеданных руд.

Таблица 3.2 - Методики оценки химической совместимости ВВ и горных пород

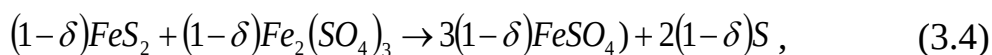
Характерные показатели	Разработчики методик	
	[2]	[189]
Состав пробы	ВВ – 40 г; порода – 7,5 г; имитатор РВ – 2,5 г	ВВ – 18 г; порода – 18 г; имитатор РВ – 4 г
Размер частиц твердых компонентов пробы	Менее 74 мкм	Менее 250 мкм
Состав имитатора рудничной воды (РВ)	Дистилл. вода – 1000 г Серная кислота – 5,3 г Сульфат меди – 8,8 г Сульфат железа – 50,2 г (pH < 2)	Дистилл. вода – 35 г Гептагидрат сульфата железа (II) – 3 г Нонагидрат сульфата железа (III) – 5 г
Масса пробы, г	50	40
Значение поддерживаемой в ходе опытов температуры, °С	50	55
Продолжительность опыта	7 часов	4-х кратное время планируемого пребывания ВВ в контакте с породой
Признак химической несовместимости ВВ и породы	Выделение оксидов азота по йодокрахмальной пробе или скачкообразное увеличение температуры на потенциометре	Увеличение температуры на 2 °С или выделение оксида азота

Анализ концепции взаимодействия аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с сульфидсодержащими горными породами показывает, что реакция взаимодействия аммиачной селитры и пирита представляет собой основную опасность [2, 3, 72, 76, 158, 159, 189, 190, 191]. Следующая модель может быть вполне корректной для количественного описания взаимодействия нитрата аммония и пирита.

1. Реакции химического растворения пирита в водном растворе сульфата железа (III) (ионами Fe^{3+}):



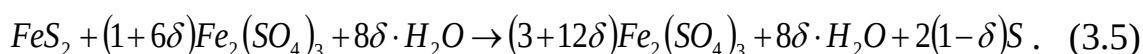
$$(\Delta H = +97\delta \text{ КДж}; \Delta G = -32\delta \text{ КДж})$$



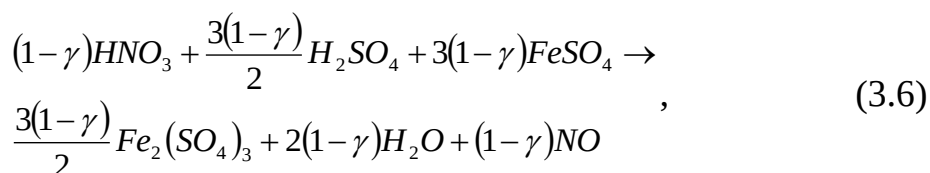
$$(\Delta H = -29(1-\delta) \text{ КДж}; \Delta G = -50(1-\delta) \text{ КДж})$$

где δ - доля пирита, выделяющего при взаимодействии с сульфатом железа (III) серную кислоту.

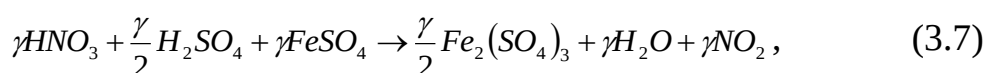
Суммарная реакция химического растворения пирита в водном растворе сульфата железа (III):



2. Реакции окисления сульфата железа (II) в разбавленном водном растворе смеси азотной и серной кислот:



$$(\Delta H = -173,5(1-\gamma) \text{ КДж}; \Delta G = -181,5(1-\gamma) \text{ КДж}).$$

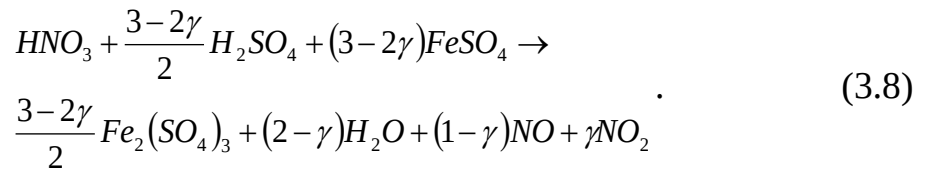


$$(\Delta H = -34,5\gamma \text{ КДж}; \Delta G = -63,5\gamma \text{ КДж})$$

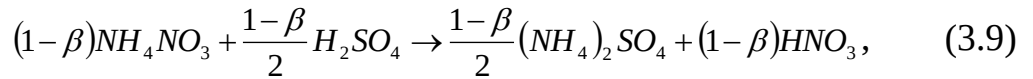
где γ - доля азотной кислоты, окисляющей сульфата железа (II) с выделением двуокси азота.

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

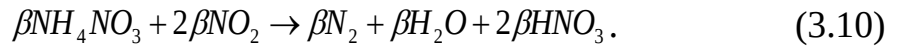
Суммарная реакция окисления сульфата железа (II):



3. Выделение азотной кислоты в области взаимодействия «пирит + аммиачная селитра» происходит в ходе реакций (разложение NH_4NO_3 может происходить одновременно по нескольким реакциям, причем одна из них может доминировать над другими):



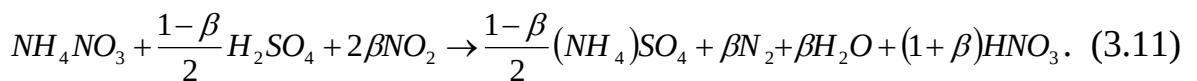
$$(\Delta H = 8,5(1-\beta) \text{ КДж}; \Delta G = -2,5(1-\beta) \text{ КДж}).$$



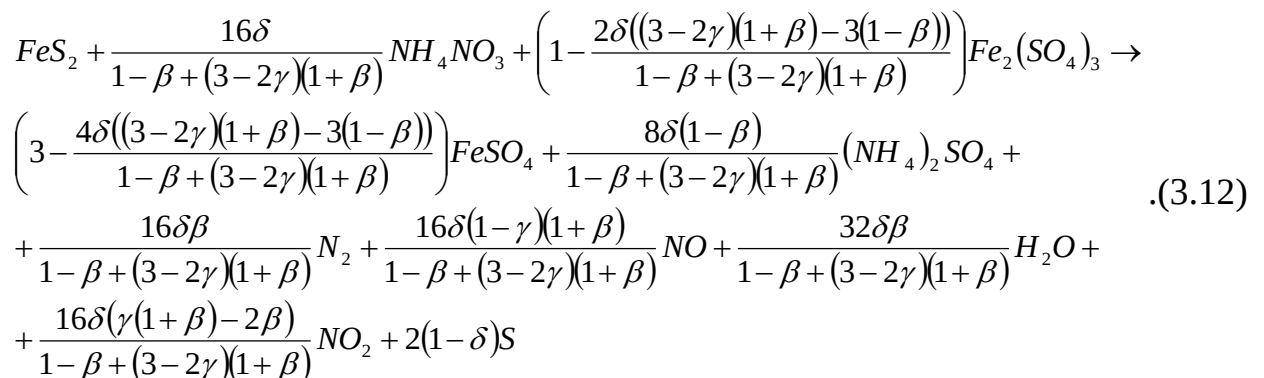
$$(\Delta H = -334\beta \text{ КДж}; \Delta G = -317\beta \text{ КДж})$$

где β - доля аммиачной селитры, распадающейся вследствие взаимодействия с двуокисью азота, выделяющейся в ходе реакции (3.7).

Суммарная реакция выделения азотной кислоты запишется в виде:



На основании (3.5), (3.8) и (3.11) получаем итоговое уравнение, описывающее взаимодействие пирита с аммиачной селитрой:



Полагаем, что

$$\gamma \geq \frac{2\beta}{1+\beta}. \quad (3.13)$$

Это соответствует условию, что в начальный момент времени аммиачная селитра не содержит нитрозных газов.

При излишках аммиачной селитры выделяющаяся двуокись азота вступает в реакцию с аммиачной селитрой, поэтому

$$\gamma = \frac{2\beta}{1+\beta}. \quad (3.14)$$

Подставляя (3.14) в (3.12), получаем следующее уравнение, описывающее взаимодействие пирита с аммиачной селитрой (при излишках селитры) в присутствии сернокислой воды и сульфатов железа (последнее соответствует реальным условиям):

$$\begin{aligned} FeS_2 + \frac{8\delta(2-\gamma)}{4-3\gamma} NH_4NO_3 + \left(1 - \frac{2\delta\gamma}{4-3\gamma}\right) Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow \left(3 - \frac{4\delta\gamma}{4-3\gamma}\right) FeSO_4 + \\ + \frac{8\delta(1-\gamma)}{4-3\gamma} (NH_4)_2SO_4 + \frac{8\delta\gamma}{4-3\gamma} N_2 + \frac{16\delta(1-\gamma)}{4-3\gamma} NO + \frac{16\delta\gamma}{4-3\gamma} H_2O + 2(1-\delta)S. \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\Delta H = -29 - \frac{962\delta\gamma}{4-3\gamma} - \frac{2136\delta}{4-3\gamma} \text{ (КДж)},$$

Далее проанализируем полученное уравнение, принимая во внимание, что значение показателя γ зависит от температуры, а показатель δ зависит от содержания воды в зоне взаимодействия пирита и нитрата аммония. Содержание воды в нем низкое $\delta \ll 1$, но при достаточном количестве воды $\delta \rightarrow 1$ (согласно изотопным исследованиям, вода является источником атомов кислорода для образования сульфат-ионов [211,212]).

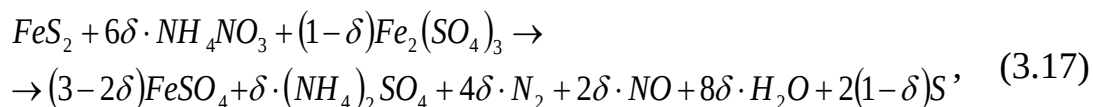
При малых температурах имеем ($\gamma \approx 0$). Тогда из (15) получаем

$$\begin{aligned} FeS_2 + 4\delta \cdot NH_4NO_3 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 3FeSO_4 + 2\delta(NH_4)_2SO_4 + 2\delta \cdot N_2 + \\ + 4\delta \cdot NO + 4\delta \cdot H_2O + 2(1-\delta)S. \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\Delta H = -29 - 534\delta \text{ (КДж)}.$$

При небольшом количестве воды ($\delta \rightarrow 0$) выделяемое тепло составляет 0,24 МДж/кг пирита (примерно 2% тепла, выделяемого при сжигании 1 кг дров). Этого тепла недостаточно для нагрева взаимодействующей массы пирита и нитрата аммония. При достаточном количестве влаги ($\delta \rightarrow 0$) тепловыделение пирита составляет 4,7 МДж/кг, что при определенных условиях может привести к нагреву массы при взаимодействии пирита и нитрата аммония.

При высоких температурах ($\gamma \rightarrow 0,8$). Из (3.15) имеем



$$\Delta H = -29 - 1816\delta \text{ (КДж)}.$$

В случае небольшого количества влаги ($\delta \rightarrow 0$) тепловая отдача в процессе реакции (3.17) такое же, как и при низкой температуре, которая составляет 0,24 МДж/кг пирита, что совсем недостаточно для постепенного нагревания массы взаимодействия пирита и аммиачной селитры. При достаточном количестве влаги ($\delta \rightarrow 0$) тепловыделение составит 15,4 МДж/кг пирита, что сопоставимо с тепловыделением при сжигании 1 кг бурого угля. Это очень опасно, поскольку при определенных условиях может привести к критическому нагреву массы взаимодействия пирита и аммиачной селитры в составе ВВ.

Анализ предложенной модели взаимодействия пирита и аммиачной селитры показывает, что его прочность в значительной степени зависит от присутствия в системе сернокислой воды и сульфатов железа (II) и (III).

Были проведены лабораторные эксперименты для проверки влияния присутствия сульфатов железа (II) и железа (III) в реакционной смеси пирита и нитрата аммония. Процедура испытания включает в себя определение временного интервала от начала эксперимента до фиксированного времени выделения оксидов азота по йодокрахмальной пробе.

В эксперименте в качестве руды использовалась серный колчедан АО «Святогор» (Красноуральск). Состав: основным минералом являлся пирит, а нерудными минералами являлись кварц, хлорит и эпидот. Текстура - массивная, а структура является скрытно-кристаллической. Содержание элементов: медь - 0,10%, цинк - 0,10%, сера - 45,8%. Типичный размер микрокристаллов руды составляет 50 мкм. Руда предварительно измельчается до размера 100 мкм или 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 колбу с двумя горлышками, которые плотно закрывали резиновыми пробками. В пробке бокового горлышка колбы имелось отверстие для крючка с йодкрахмальной пробой (расположенной над тестируемой смесью). Вставлялась трубка с незакрепленной ватной пробкой и трубка с краном для подачи воды для тушения пожара в пробку в центральном горлышке колбы. Помещалась колба с тестируемой смесью на водяную баню при температуре 55°С и держалась в ней до тех пор, пока на образце йодоброкрахмала не появлялись полосы. Время начала реакции между рудой и нитратом аммония (в зависимости от образца крахмала) приведено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Время начала реакции между рудой и аммиачной селитрой (по йодокрахмальной пробе)

Номер смеси	А	Б	В
Время, час	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

Эксперименты показали, что активность реакции в смесях, обозначенных как А, В и С различна: $A > B > C$.

Таким образом, одним из наиболее существенных факторов агрессивности колчеданных руд по отношению к аммиачной селитре является присутствие сульфатов железа (II) и железа (III) в реакционной смеси пирита и аммиачной селитры.

3.2 Определение содержания ингибитора в эмульсионных взрывчатых веществах для отбойки сульфидных руд

В основе настоящего параграфа лежат исследования, изложенные в работе [104, 105].

Различные ценные минералы представлены сульфидсодержащими породами, и для извлечения этих пород требуется взрывное дробление. При использовании эмульгированных взрывчатых веществ (ЭВВ) при разработке этих руд необходимо учитывать присутствие в этих взрывчатых веществах аммиачной селитры (АС), которая может взаимодействовать с сульфидами металлов, содержащихся в этих породах [63,158].

В целях повышения безопасности взрывных работ при добыче сульфидсодержащих пород с применением аммиачно-селитренных взрывчатых веществ (АСВВ) ограничивается время контакта АСВВ с

сульфидсодержащими породами [159], понижается содержание свободной воды [140] и/или в АСВВ добавляются ингибиторы, понижающие скорость взаимодействия аммиачной селитры с сульфидами металлов.

Обзор исследований [2, 49, 66, 69, 72, 76, 85, 148, 149, 150, 152, 162, 218], с использованием ингибиторов показали, что основные усилия исследователей были сосредоточены на экспериментальном изучении влияния типов и концентраций ингибиторов на химическую стойкость АСВВ. В то же время анализ и определение необходимой концентрации ингибиторов в ЭВВ, используемых для разрушения сульфидсодержащих пород, не рассматривался. Однако нет никаких сомнений в том, что получение этих аналитических выражений очень важно, поскольку это позволяет повысить безопасность взрывных работ, которые уже находятся на стадии проектирования.

Соответственно [77, 161, 164], пирит является одним из наиболее легко окисляемых сульфидов. В то же время пирит является одним из наиболее распространенных сульфидов в земной коре. Его крупные залежи сосредоточены в гидротермальных месторождениях, особенно в кальцифицированных сульфатных отложениях, осадочных и метаморфических породах. Поэтому важно изучить взаимодействие между ЭВВ и пиритом как с практической, так и с методологической точки зрения.

Рассмотрим систему «ЭВВ + пирит + шахтная вода». Разумеется, что пирит окисляется кислородом и ионами в атмосфере с образованием свободной серной кислоты в присутствии воды. В то же время скорость ионного окисления пирита в десять раз выше, чем при окислении под действием кислорода. [71, 167, 216, 217]. Такая ситуация обычно приводит к быстрому истощению ионов в системе и дальнейшему медленному окислению пирита кислородом воздуха. Однако присутствие нитрата аммония (АС) в системе приводит к довольно быстрому пополнению запасов ионов в системе, что ускоряет растворение пирита и выделение серной кислоты.

Когда серная кислота вступает в реакцию с АС, содержащимся в ЭВВ, выделяется азотная кислота. В среде серной кислоты нитрат-ионы окисляются $FeSO_4$ в $Fe(SO_4)_3$ и система пополняется ионами Fe^{3+} [118]. В параграфе 3.1 представлена химическая модель экзотермического взаимодействия в системе «АС + пирит + шахтная вода».

В дальнейшем под активными веществами системы будут пониматься вещества, способствующие появлению в системе азотной кислоты: серная кислота, сульфат железа и меди. Для предотвращения взрыва ЭВВ в сульфидных породах рекомендуется использовать ЭВВ, характеризующийся особым химическим составом эмульсии:

– ЭВВ первого типа вводится в композицию ЭВВ, когда значение pH фазы окисления эмульсии ниже 5,0, для нейтрализации азотной кислоты и продуктов ее разложения. Эти продукты образуются в результате химической реакции системы «АС+ сульфиды» и катализируют экзотермический процесс разложения АС. При этом серная кислота способствует накоплению азотной кислоты в системе «АС + сульфиды». Карбамил, уротропин и дифениламин – обычно используются в качестве ингибиторов ЭВВ [49,148,149].

– ЭВВ второго вида – оксид кальция добавляется в ЭВВ из водного раствора смеси нитрата аммония и кальциевой селитры вместе с окисленной фазой эмульсии, что позволяет достичь значения pH окисленной фазы эмульсии 6,5...7,0 [85].

Этот второй тип ЭВВ предназначен для производства газообразного пероксида, который фактически не используется производителями ЭВВ в Российской Федерации. Поэтому данная работа ограничена рассмотрением первого типа ЭВВ, который производится с использованием нитритного газа и наиболее распространен в Российской Федерации.

Анализ эффективности ингибиторов, проведенный в работе [98], показывает, что:

– карбамид обладает наибольшей эффективностью при нейтрализации серной кислоты;

– доломит и мел не так эффективны в нейтрализации серной кислоты, как карбамид и уротропин;

– уротропин немного уступает карбамиду по эффективности нейтрализации серной кислоты, но является очень эффективным поглотителем азотной кислоты, дополненным системой блокировки ионов Fe^{3+} , которая является активным растворителем пирита.

Тем не менее, необходимо отметить серьезный недостаток при применении карбамида и при нейтрализации кислоты выделяется тепло. При использовании уротропина система не нагревается.

Далее мы будем следовать работам [104, 105]. Предполагается, что в определенные участки ЭВВ был внесен порошок пирита, пропитанный шахтной водой. Эта область может быть представлена в виде группы ячеек, состоящих из частиц пирита в форме кубов, покрытых снаружи слоем шахтной воды, а затем покрытых слоем ЭВВ (рисунок 3.1).

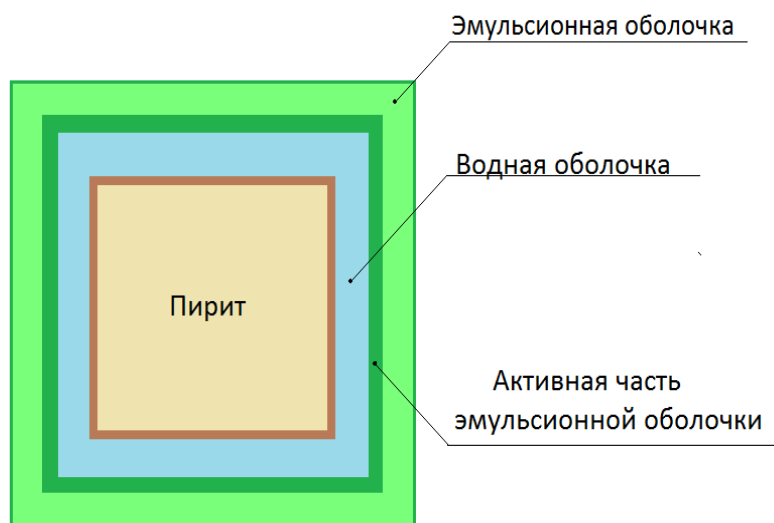


Рисунок 3.1 – Разрез ячейки

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; $\beta_{\text{э}} = m_{\text{э}} / m_n$ – отношение массы слоя эмульсии $m_{\text{э}}$ к массе частицы пирита m_n ; $\rho_{\text{э}}$ – плотность ЭВВ, кг/м³.

Предварительно определим размеры слоев шахтной воды и эмульсии вокруг частиц пирита.

Имеем

$$\beta_{\text{э}} = \frac{\rho_{\text{э}}((\Delta + 2\delta_{\text{э}})^3 - \Delta^3)}{\rho_n \Delta^3} = \frac{\rho_{\text{э}}}{\rho_n} \left(\left(1 + \frac{2\delta_{\text{э}}}{\Delta} \right)^3 - 1 \right). \quad (3.18)$$

Следовательно,

$$2\delta_{\text{э}} / \Delta = \sqrt[3]{1 + \beta_{\text{э}} \rho_n / \rho_{\text{э}}} - 1. \quad (3.19)$$

Аналогично для эмульсионной оболочки,

$$\beta_{\text{э}} = \frac{\rho_{\text{э}}((\Delta + 2\delta_{\text{э}} + 2\delta_{\text{э}})^3 - (\Delta + 2\delta_{\text{э}})^3)}{\rho_n \Delta^3} = \frac{\rho_{\text{э}}}{\rho_n} \frac{(\Delta + 2\delta_{\text{э}})^3}{\Delta^3} \left(\left(1 + \frac{2\delta_{\text{э}}}{\Delta + 2\delta_{\text{э}}} \right)^3 - 1 \right). \quad (3.20)$$

На основании (3.19), (3.20), получаем

$$\beta_{\text{э}} = \frac{\rho_{\text{э}}}{\rho_n} \left(1 + \beta_{\text{э}} \frac{\rho_n}{\rho_{\text{э}}} \right) \left(\left(1 + \frac{2\delta_{\text{э}}}{\Delta + 2\delta_{\text{э}}} \right)^3 - 1 \right). \quad (3.21)$$

Таким образом,

$$2\delta_{\text{э}} / \Delta = \sqrt[3]{1 + \beta_{\text{э}} \rho_n / \rho_{\text{э}} + \beta_{\text{э}} \rho_n / \rho_{\text{э}}} - \sqrt[3]{1 + \beta_{\text{э}} \rho_n / \rho_{\text{э}}}. \quad (3.22)$$

В таблице 3.2 представлены параметры испытательных проб и составов-имитаторов рудничных вод для распространенных методик определения химической стойкости аммиачно-селитренных ВВ при контакте с сульфидными рудами.

На основании (3.19), (3.22) и сведений, приведенных в таблице 3.2, рассчитаны приведенные в таблице 3.4 толщины водной и эмульсионной оболочек вокруг частиц пирита. При расчетах полагали, что $\rho_{\text{э}} = 1,33$ г/см³, $\rho_{\text{э}} = 1,0$ г/см³ и $\rho_n = 5,0$ г/см³.

Таблица 3.4 – Толщина водной и эмульсионной оболочек вокруг частиц пирита

Характерные показатели	Разработчики методик	
	ГосНИИ «Кристалл» (Россия)	AEISC(Австралия)
β_{θ}	0,333	0,222
β_{γ}	5,333	1,0
Δ , мкм	74	250
δ_{θ} , мкм	14,3	35,4
δ_{γ} , мкм	53,5	65,1

Соответственно исследованиям [78], показатель диффузии в концентрированной обратной эмульсии очень мал, порядка $10^{-15} \dots 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$. Это на несколько порядков меньше значения коэффициентов диффузии серной и азотной кислот, а также сульфата железа в водной оболочке ячейки. Следовательно, динамика взаимодействия между ингибиторами и активными веществами будет определяться скоростью диффузии этих веществ в оболочке эмульсии [178].

Толщина внутреннего слоя эмульсионной оболочки элемента, вступающего в реакцию с активным веществом водной оболочки элемента, равна $\delta^* = \sqrt{6Dt^*}$, где D – коэффициент диффузии молекул активного вещества и ингибитора в эмульсии; t^* – время с начала реакции (порошок пирита попадает в эмульсию в момент начала реакции). При данных показателях коэффициента диффузии толщина рассматриваемого внутреннего слоя будет соответствовать характерному временному значению $t^* = 900 \text{ с}$ составит $\delta^* \approx 10 \dots 40 \text{ мкм}$.

Рассчитанное значение δ^* эквивалентно толщине водяной оболочки δ_{θ} (таблица 3.4).

Вследствие этого, при расчете предполагаемого количества мы предполагаем, что объем ингибитора, содержащегося во внутреннем слое эмульсионной оболочки ячейки, равен объему слоя воды и со временем вступит в реакцию с активным веществом.

Эффективная масса ингибиторов, входящих в состав эмульсии ячейки, рассчитывается следующим образом:

$$m_{ингиб}^* = c_{ингиб} \rho_{эм} V_{эм}^*, \quad (3.23)$$

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

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

$$m_{(i)агент} = c_{(i)агент} \rho_{в} V_{в}, \quad (3.24)$$

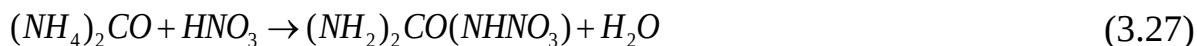
где $c_{(i)агент}$ – массовая доля активного i -агента в шахтной воде; $V_{в}$ – объем воды в ячейке.

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

$$\frac{m_{ингиб}^*}{\mu_{ингиб}} \geq \sum_i \frac{m_{(i)агент}}{\mu_{(i)агент}} A_i, \quad (3.25)$$

где $\mu_{ингиб}$, $\mu_{(i)агент}$ – 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.

Распространенные ингибиторы – уротропин и карбамид, – связывают азотную кислоту следующим образом [105]:



$(CH_2)_6N_4 \cdot 2HNO_3$ – динитрат уротропина; $(NH_2)_2CO(NHNO_3)$ – нитрат карбамида.

Согласно (3.26), (3.27), один моль уротропина связывает два моля азотной кислоты, а один моль карбамида – один моль азотной кислоты.

Важной особенностью реакции (3.26) является ее исключительная скоротечность [122].

Значения A_i для оценочных расчетов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значения коэффициента A_i для различных агентов и ингибиторов

Агент	Уравнение реакции	Значения A	
		карбамид	уротропин
H_2SO_4	$2NH_4NO_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + 2HNO_3$	2	1
$Fe_2(SO_4)_3$	$6NH_4NO_3 + Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \rightarrow$ $3(NH_4)_2SO_4 + 2Fe(OH)(NO_3)_2 + 2HNO_3$	2	1
$FeSO_4$	$2NH_4NO_3 + FeSO_4 + H_2O \rightarrow$ $(NH_4)_2SO_4 + Fe(OH)NO_3 + HNO_3$	1	0,5
$CuSO_4$	$2NH_4NO_3 + CuSO_4 + H_2O \rightarrow$ $(NH_4)_2SO_4 + Cu(OH)NO_3 + HNO_3$	1	0,5

На основании (3.23)-(3.25), получаем

$$c_{ингиб} \geq \mu_{ингиб} \frac{\rho_6}{\rho_3} \sum_i \frac{c_{(i)агент}}{\mu_{(i)агент}} A_i. \quad (3.28)$$

Для того чтобы проверить правильность полученной зависимости (3.28), мы рассмотрели экспериментальные методы оценки химической совместимости ПВВ и сульфидсодержащих пород [2]. В таблице 3.6 приведены результаты расчета критической массовой доли карбамида в фазе окисления ЭВВ аммиачной селитры.

Таблица 3.6 – Критические значения массовой доли карбамида в ЭВВ с окислительной фазой из монораствора аммиачной селитры для испытаний с пиритом по различным методикам

Параметр	[76]	[189]	A_i
$C_{H_2SO_4}$	0,00533	-	2
C_{FeSO_4}	0,0502	0,0408	1
$C_{Fe_2(SO_4)_3}$	-	0,08276	2
C_{CuSO_4}	0.0088	-	1
$\frac{\rho_6}{\rho_3}$	0,752	0,752	
$\mu_{ингиб} \frac{\rho_6}{\rho_3} \sum_i \frac{C_i}{\mu_i} A_i$	0,0297	0,0409	
$C_{карбамид}$	0,022	0,031	

Расчет проводился при $\rho_3 = 1,33 \text{ г/см}^3$, что соответствует лабораторному эксперименту, проведенному с несенсибилизированной эмульсией. При практическом применении ЭВВ необходимо учитывать снижение плотности ЭВВ в процессе их сенсибилизации. В случае плотности ЭВВ – $1,0 \text{ г/см}^3$, основываясь на данных в (3.28) и в таблице 3.6, мы определяем, что критическое значение массовой доли карбамида в ЭВВ будет равно:

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

Экспериментальное исследование химической стойкости взаимодействия ЭВВ и пирита, описанное в [76], показывает, что массовая доля карбамида должна составлять 2...3 %. ЭВВ «Фортис Эклипс», который предназначен для сульфидных руд, его химическая стойкость была проверена методом AEISC, который содержит до 4 % карбамида [169].

В результате, предложенный теоретический метод определения содержания необходимых ингибиторов в ЭВВ, используемых для разрушения сульфидсодержащих пород, позволяет получить результаты, которые очень близки к экспериментальным данным различных исследователей. Эта ситуация позволяет нам рекомендовать зависимость массовой доли ингибиторов, необходимой для ЭВВ (3.28), для обеспечения безопасности использования этих ЭВВ при разрушении сульфидных руд. В случае использования ЭВВ с окислительной фазой, основанной на монорастворе аммиачной селитры, а карбамид является ингибитором, мы имеем следующую техническую формулу для определения массовой доли карбамида в эмульсии:

$$c_{\text{карбамид}} \geq 1,224c_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 0,395c_{\text{FeSO}_4} + 0,300c_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} + 0,376c_{\text{CuSO}_4}. \quad (3.29)$$

Согласно экспериментальным [76] и теоретическим [104] исследованиям количество ингибитора в ЭВВ не должно превышать 2...3% масс., поскольку в противном случае ухудшаются чувствительность и работоспособность ЭВВ.

Таким образом, при

$$0,04 < \mu_{\text{ингиб}} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{э}}} \sum_i \frac{c_{(i)\text{агент}}}{\mu_{(i)\text{агент}}} A_i \quad (3.30)$$

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: $c_{\text{FeSO}_4} = 0,12$; $c_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = 0,05$ [77].

Тогда, при плотности ЭВВ равной $1,0 \text{ г/см}^3$ и использовании карбамида в качестве ингибитора, имеем

$$\mu_{\text{ингиб}} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{э}}} \sum_i \frac{c_{(i)\text{агент}}}{\mu_{(i)\text{агент}}} A_i = 60 \cdot \frac{1,0}{1,0} \cdot \sum \left(\frac{0,12}{152} \cdot 1 + \frac{0,05}{400} \cdot 2 \right) = 0,062 > 0,04.$$

В этом случае необходимо предотвращать непосредственный контакт ЭВВ с сульфидными рудами, например, использовать специальные рукава-оболочки при формировании скважинных зарядов ЭВВ [139, 142].

Соотношения (3.28)-(3.30) позволяют также осуществлять научно обоснованное прогнозирование возникновения опасных ситуаций, обусловленных экзотермическим взаимодействием ЭВВ с сульфидными рудами, что безусловно исключительно важно для обеспечения безопасности труда.

3.3 Математическая модель рукава кососимметричной конструкции для заряжения восстающих скважин

Настоящий параграф основывается на результатах работ [110, 139].

Применение тканевых рукавов при создании нисходящих скважинных зарядов ЭВВ нашло достаточно широкое распространение в практике горных работ [131, 154, 173]. 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 [131]. При этом характерной особенностью указанных рукавов является то обстоятельство, что они имеют диаметр меньше, чем диаметр заряжаемой скважины. Данное обстоятельство препятствует применению данной технологии для создания заряда ЭВВ в восходящих скважинах.

В связи с расширением области применения ЭВВ на подземные горные работы решение задачи разработки технологий заряжения данными

взрывчатыми веществами восходящих скважин приобретает огромное значение. Для решения данной задачи различными авторами предлагается использовать рукава специальных конструкций [109, 129, 142, 143]. Однако в предложенных конструктивных решениях отсутствуют методики расчета параметров данных рукавов, что осложняется их применение на практике.

На рисунке 3.2 представлена конструкция разложенного на плоскости кососимметричного рукава для заряжания восстающих скважин ЭВВ [141].

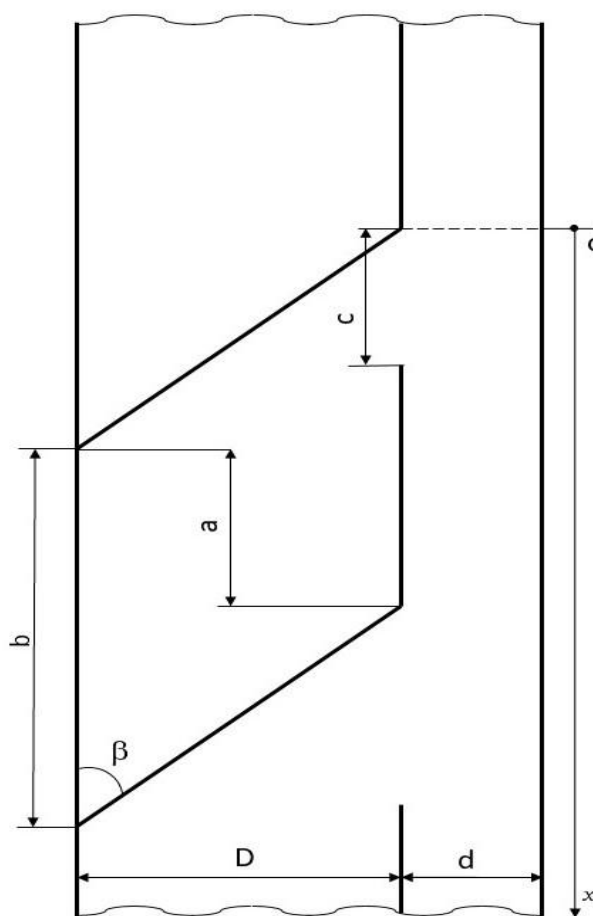


Рисунок 3.2 – Разложенный на плоской поверхности кососимметричный рукав для заряжания восстающих скважин

Определим величину коэффициента заполнения скважины N при использовании приведенного рукава.

Обозначения геометрических параметров a , b , c , D , d и β понятны из рисунка 3.2.

Часть рукава между плоскостями 1 и 2, показанными на рисунке 3.3, в дальнейшем будем называть «ячейкой». Величина D назначается из условия «охвата» тканью рукава зарядного шланга для сокращения объемов вытекания ЭВВ из «ячейки» при ее заполнении и может быть найдена из уравнения

$$D \approx \pi R \left(1 + \frac{r}{2R} \right), \quad (3.32)$$

где r - внешний радиус зарядного шланга.

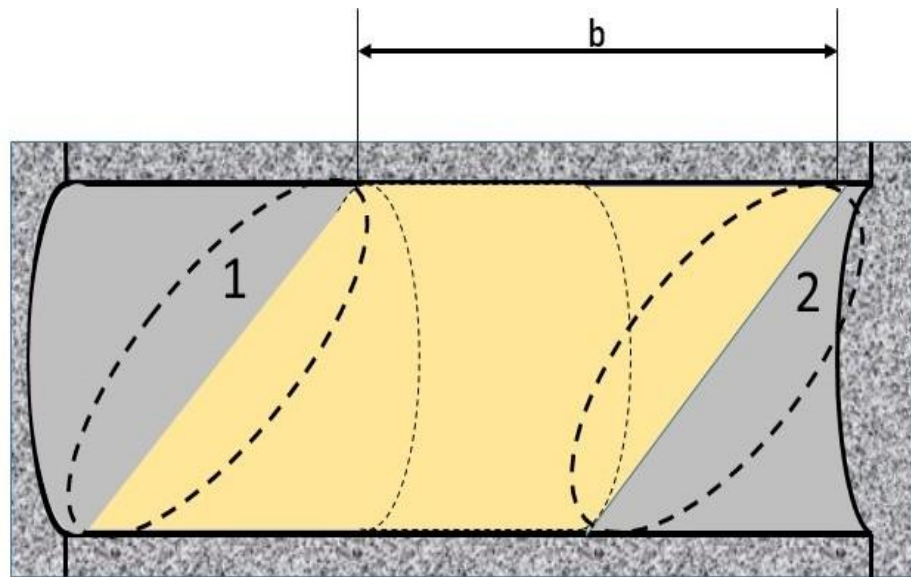


Рисунок 3.3 – «Ячейка» асимметричного рукава для зарядания восстающих скважин

Величина d назначается из условий как свободного прохождения зарядного шланга, так и снижения трудностей при размещении рукава в скважине, и может быть определена по формуле $d \approx (5...6)r$.

Объем скважинного пространства, ограниченного плоскостями 1 и 2 (рисунок 3.3) равен

$$V_o = \pi R^2 b = \pi R^2 a z, \quad (3.33)$$

где R – радиус скважины;

$$z = \frac{b}{a} = 1 + \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta. \quad (3.34)$$

Объем ЭВВ, заключенного в рукаве между плоскостями 1 и 2, равен

$$V = \pi R^2 a + 2 \cdot \frac{\pi}{3} R^2 (b - a) = \frac{\pi R^2 a}{3} (2z + 1). \quad (3.35)$$

Коэффициент заполнения скважины ЭВВ равен

$$N = \frac{V}{V_o} = \frac{2z + 1}{3z} = 1 - \frac{\frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta}{3 \left(1 + \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right)}. \quad (3.36)$$

На рисунке 3.4 представлены, построенные на основании (3.36) зависимости коэффициента заполнения ЭВВ скважинного пространства от величины a при различных значениях угла β при $R = 0,05\text{ м}$ и $r = 0,02\text{ м}$.

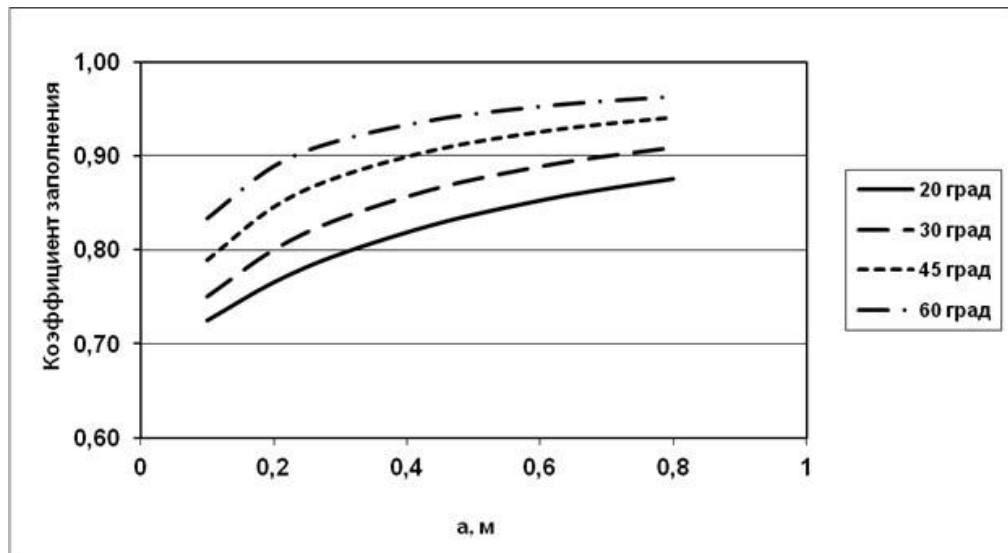


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента заполнения ЭВВ скважинного пространства от величины a при различных значениях угла β

Значение b найдется из уравнения

$$b = a \left(1 + \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right). \quad (3.37)$$

На рисунке 3.5 представлены зависимости величины b от величины a при различных значениях угла β .

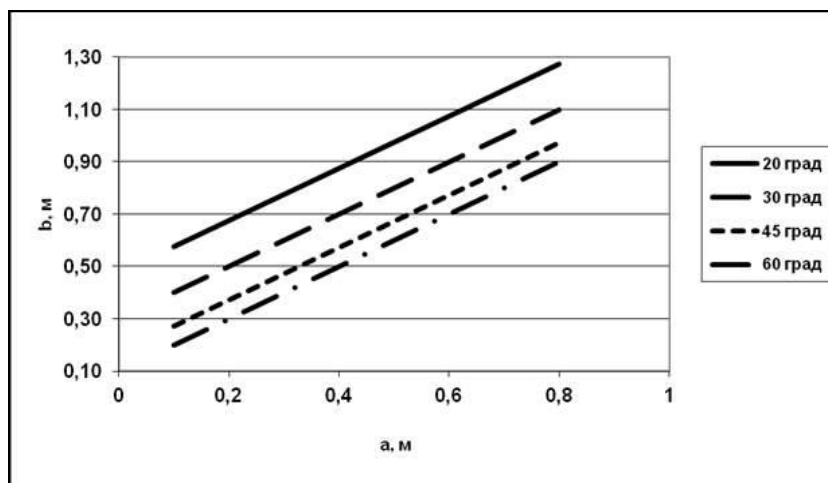


Рисунок 3.5 – Зависимость величины b от величины a при различных значениях угла β

Для зарядов с воздушным промежутком коэффициент уменьшения фактической длины заряда по сравнению с неразрывным зарядом равен [97, 174]

$$K_{возд} = 1 - \frac{1}{1 + 0,5 f_{креп}}, \quad (3.38)$$

где $f_{креп}$ - коэффициент крепости горных пород по М.М. Протодяконову.

В соответствии с (3.36) и (3.38), определяем условие эффективного применения рукава с точки зрения использования энергии взрыва заряда ЭВВ на дробление. Рассматриваемая конструкция рукава будет позволять достигать эффективного использования энергии взрыва при $N = K_{возд}$.

$$\frac{\frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta}{3 \left(1 + \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right)} = \frac{1}{1 + 0,5 f_{креп}}. \quad (3.39)$$

На рисунке 3.6 приведены зависимости между коэффициентом крепости горной породы и величиной a при различных значениях угла β для достижения эффективного использования энергии взрыва на дробление отбиваемых пород.

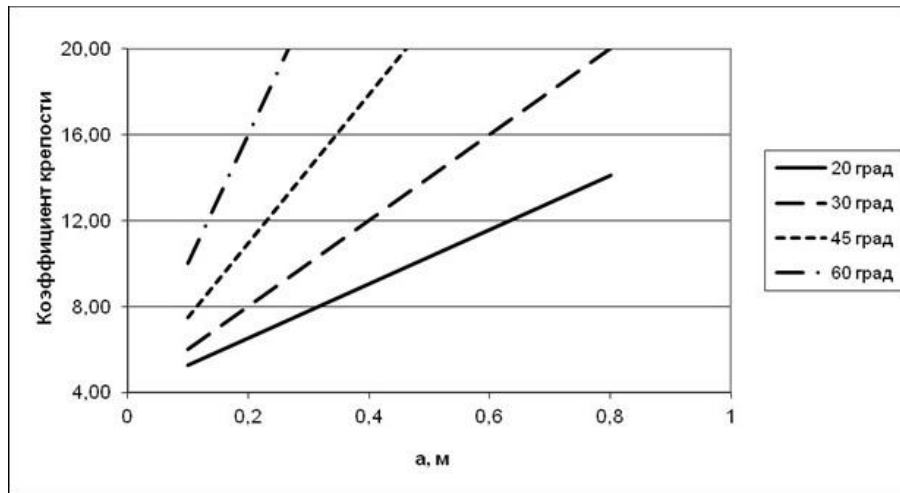


Рисунок 3.6 – Зависимости между коэффициентом крепости горной породы и величиной a при различных значениях угла β для достижения эффективного использования энергии взрыва на дробление отбиваемых пород

Однако важнейшей задачей рукава в нашем случае является создание условий удержания заряда в восходящей скважине. Априори ясно, что если каждая «ячейка» рукава после ее заполнения ЭВВ останется неподвижной, то и весь размещенный в рукав заряд не выпадет из скважины.

Рассмотрим «ячейку» рукава после заполнения ее ЭВВ до уровня $x = D \operatorname{ctg} \beta$ (рисунок 3.2).

Оставшаяся незаполненной часть «ячейки» компенсирует последующее расширение ЭВВ вследствие его газификации, наступающей, как правило, через 20...30 минут после зарядки.

Оставленное пространство, с учетом (3.35), создает начальную пористость α заряда ЭВВ в «ячейке» равную

$$\alpha = \frac{V_1}{V} = \frac{z-1}{2z+1} = \frac{\frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta}{3 + 2 \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta}, \quad (3.40)$$

где $V_1 = \frac{\pi}{3} R^2 (b-a) = \frac{\pi R^2 a}{3} (z-1)$ - объем незаполненной части «ячейки».

На рисунке 3.7 представлена зависимость пористости α от величины a при различных значениях угла β и при $R = 0,05\text{ м}$ и $r = 0,02\text{ м}$.

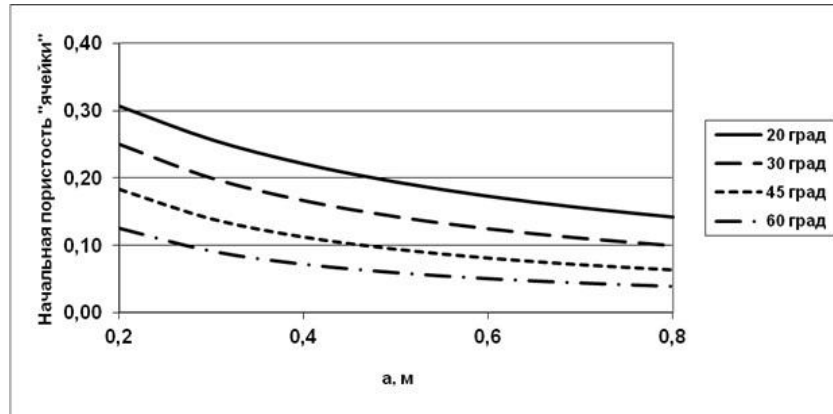


Рисунок 3.7 – Зависимости начальной пористости «ячейки» α от величины a при различных значениях угла β и при $R = 0,05\text{ м}$ и $r = 0,02\text{ м}$

Определим условия равновесия данной «ячейки» рукава под воздействием веса ЭВВ, сил трения между рукавом и вытягивающимся из «ячейки» зарядным шлангом и удерживающих «ячейку» сил трения между оболочкой и стенкой скважины.

Вес ЭВВ при рассматриваемой степени заполнения «ячейки» равен

$$P = \pi R^2 \rho g \left(a + \frac{1}{3}(b - a) \right) = \frac{\pi R^2 \rho g a}{3} (z + 2), \quad (3.41)$$

где ρ – начальная плотность ЭВВ, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Суммарная сила трения, действующая на «ячейку», равна разнице между силой трения рукава о стенки скважины, которая удерживает «ячейку», и силой трения между рукавом и зарядным шлангом, которая способствует выпадению «ячейки» из скважины, составляет:

– при $c > D \text{ctg} \beta$

$$F_{mp} = k_{mp} \cdot 2\pi R \rho g \int_0^a x dx - f_{mp} \cdot 2\pi r \rho g \int_{c-D \text{ctg} \beta}^a x dx = \pi R \rho g a^2 \left(k_{mp} - f_{mp} \left(1 - \left(\frac{c}{a} - \frac{D}{a} \text{ctg} \beta \right)^2 \right) \frac{r}{R} \right) \quad (3.42)$$

– при $c \leq D \text{ctg} \beta$

$$F_{mp} = k_{mp} \cdot 2\pi R \rho g \int_0^a x dx - f_{mp} \cdot 2\pi r \rho g \int_0^a x dx = \pi R \rho g a^2 \left(k_{mp} - f_{mp} \frac{r}{R} \right), \quad (3.43)$$

где x – текущая координата вдоль образующей «ячейки», м; k_{mp} , f_{mp} – коэффициенты трения в паре «рукав–горная порода» и в паре «рукав–зарядный шланг», соответственно. При этом полагаем, что выполняется условие формирования «ячейки»: $c < b - 2d$.

Условие неподвижности «ячейки» в скважине:

$$P \leq F_{mp}. \quad (3.44)$$

На основании (3.42)-(3.44), с учетом (3.34), находим ограничение на коэффициент трения в паре «материал рукава-горная порода», при котором восходящий заряд не выпадает из скважины:

– при $c > D \operatorname{ctg} \beta$

$$k_{mp} \geq \frac{R}{a} \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right) + f_{mp} \frac{r}{R} \left(1 - \left(\frac{c}{a} - \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right)^2 \right), \quad (3.45)$$

– при $c \leq D \operatorname{ctg} \beta$

$$k_{mp} \geq \frac{R}{a} \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{a} \operatorname{ctg} \beta \right) + f_{mp} \frac{r}{R}. \quad (3.46)$$

На рисунке 3.8 представлены зависимости минимальной значения коэффициента трения в паре «материал оболочки – горная порода» от величины a при различных значениях угла β , при которых заряд не выпадает из восстающей скважины. Приведена практически значимая область $k_{mp} \leq 0,3$.

При построении графиков на рисунке 3.8 полагали, что $f_{mp} = 0,3$; $c = 0,3$; $R = 0,05$ м и $r = 0,02$ м.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3.5 и рисунке 3.7, показывает, что при использовании рукавов конструкции [139], размещаемых в 100-миллиметровых скважинах, для отбойки скальных в широком диапазоне

крепости пород, их геометрические параметры должны лежать в диапазоне:

$$0,6\text{ м} \leq a \leq 1,0\text{ м}, \quad 1,1\text{ м} \leq b \leq 1,5\text{ м}, \quad 0,4\text{ м} \leq c \leq 0,6\text{ м}, \quad D \cong 0,19\text{ м}, \quad d \cong 0,1\text{ м} \quad \text{и} \quad 20^\circ \leq \beta \leq 40^\circ.$$

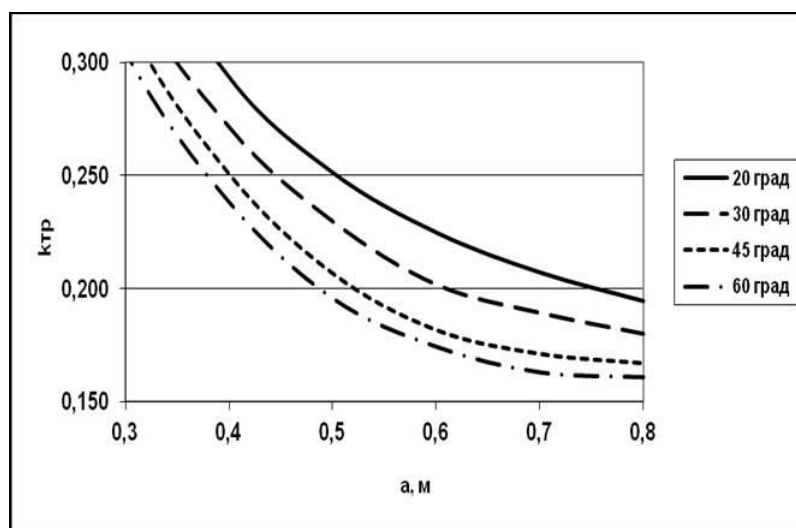


Рисунок 3.8. Зависимости минимальной величины коэффициента трения в паре «материал оболочки-горная порода» от величины a при различных значениях угла β , при которой заряд не выпадает из скважины (диапазон значений $k_{mp} \leq 0,3$)

В этом случае достигается благоприятная для прохождения детонации пористость ЭВВ после газификации (10...20% объемных), а благодаря оптимальному заполнению скважин ЭВВ достигается более равномерное дробление пород даже при уменьшенном на 10...15% расходе ЭВВ (по сравнению с колонковым зарядом). Указанное позволяет получить экономическую выгоду, несмотря на затраты на приобретение рукавов и повышение трудоемкости зарядных работ.

3.4 Выводы по главе 3

Разработана математическая модель 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 с начальными и граничными условиями, определяющими адиабатические условия «теплого взрыва» ВВ, что позволило определить безопасность применения ЭВВ. 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).

Получена 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 котором обеспечивается безопасность применения ЭВВ при взрывных работах в сульфидных рудах. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными.

Выяснено, что существует геохимическое ограничение на возможность применения ЭВВ без специальных изолирующих заряд оболочек, обусловленное степенью минерализации шахтных вод.

Получены критические условия механической устойчивости необходимые для безопасной технологии заряжания восстающих скважин зарядами ЭВВ в рукавах-оболочках кососимметричной конструкции определения геометрических параметров рукавов для применения в восходящих скважинах, при которых формируют детонационно способный заряд ЭВВ, энергия которого эффективно используется на дробление пород.

Таким образом, **второе** и **третье** научные положения доказаны.

ГЛАВА 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОПЛОТНЫХ ЭМУЛЬПОРОВ

4.1 Оценка характеристической плотности эмульпоров

В соответствие с терминологией, предложенной в работе [108], ЭВВ, сенсibilизированные гранулами пенополистирола, будем называть эмульпорами. В дальнейшем следуем работе [107].

Как известно, при плотностях эмульпоров более $0,73 \text{ г/см}^3$ (для ЭВВ с окислительной фазой на аммиачной селитре) эмульсионная фаза является сплошной и постоянной дисперсионной средой для гранул пенополистирола (гранулы пенополистирола равномерно распределены в сплошной эмульсии). В этом случае возбуждение ВВ реализуется вследствие возгорания компонентов матричной эмульсии при втекании его под воздействием ударной волны в поверхностные поры гранулы пенополистирола. При этом возгорание вещества эмульсии осуществляется вследствие его разогрева, обусловленного совместным действием теплоты сжимаемых в поре газов и теплоты внутреннего трения в эмульсии при ее втекании в пору [37, 108].

При более низких плотностях эмульпоров их эмульсионная фаза теряет односвязность, и принятая для объяснения детонации модель теряет физическое обоснование.

Однако данные области низкоплотных эмульпоров представляют значительный практический интерес для разработки высокомеханизированных технологий при проведении взрывных работ по заоткоске бортов карьеров и(или) добыче горных пород, содержащих ценные хрупкие включения вследствие:

1. Эмульпоры обеспечивают формирование скважинного заряда, на которую практически не влияет усадка под воздействием гидростатического давления (в диапазоне до 5...6 бар, этого достаточно для реального применения);

2. Из-за низкой плотности заряда следует ожидать низкого уровня давления взрывоопасного газа в скважине, что снизит разрушающее воздействие заряда на горную породу.

Для объяснения детонационного процесса в низкоплотных эмульпорах выдвинуты следующие положения:

а) учитывая низкую плотность ЭВВ, в нем образуется целостная система «частицы пенополистирола - воздушные поры»;

б) наличие сквозных каналов изменяет механизм возбуждения детонации в таком заряде ЭВВ (возбуждение эмульгаторов низкой плотности будет осуществляться в соответствии с механизмом, предложенным в работах [36, 41, 48, 195, 196, 197]).

Согласно указанным выше работам, во взрывчатых веществах низкой плотности возбуждение происходит под действием потока газа с высокой энтальпией, фильтрующегося из зоны высокого давления. В этом случае происходит химическая реакция в виде поверхностного горения (взрывоопасных) частиц, которые взаимодействуют с воздушным потоком.

В этом параграфе определен критерий формирования в эмульпорах связанного механизма «частицы пенополистирола–воздушные поры» в эмульгаторе. В данном варианте структура ЭВВ может быть выражена в виде «тумана» из капель матричной эмульсии, которая проходит через воздушные включения и/или низкопрочные, высокопористые (материалы, в которых 90...98% их объема – это заполненные газом поры) частицы веществ с акустической жесткостью, близкой к акустической жесткости матричной эмульсии.

Далее ведем следующие обозначения:

$R_{гр}$ – средний радиус гранулы пенополистирола;

$2a$ – среднее расстояние между центрами гранул;

$k_{уп}$ – коэффициент упаковки ячеек (отношение объема ячейки к объему шара радиуса a);

$\chi_{\text{возд}}$ – коэффициент воздушной пористости матричной эмульсии (воздух «подхватывается» системой в процессе смешения);

$\chi_{\text{зр}}$ – коэффициент гранульной пористости;

ζ – отношение насыпного объема гранул пенополистирола к объему матричной эмульсии;

$\rho_{\text{оо}}$ – плотность ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола;

$\rho_{\text{эм}}$ – плотность матричной эмульсии;

$\rho_{\text{нн}}$ – насыпная плотность гранул пенополистирола.

Представим рассматриваемое ЭВВ в виде ансамбля из ячеек, содержащих одну гранулу пенополистирола и имеющих некоторый характерный размер a . Тогда для гранульной пористости ЭВВ имеем:

$$\chi_{\text{зр}} \cong \left(\frac{R_{\text{гр}}}{a} \right)^3 \frac{1}{k_{\text{yn}}}. \quad (4.1)$$

Обозначим через $V_{\text{яч}}$, $V_{\text{гр}}$, $V_{\text{эм}}$ и $V_{\text{возд}}$ – объемы ячейки, гранулы пенополистирола, матричной эмульсии и объем воздуха, содержащиеся в ячейке.

Тогда воздушная пористость эмульсии равна

$$\chi_{\text{возд}} = \frac{V_{\text{возд}}}{V_{\text{яч}} - V_{\text{гр}}}. \quad (4.2)$$

В варианте низкоплотных ЭВВ частицы пенополистирола расположены ближе друг к другу (параметр a лишь незначительно превосходит средний радиус гранулы $R_{\text{гр}}$), поэтому по аналогии с заполнением пространства одними и теми же шарами [24] мы предполагаем, что каждая ячейка будет окружена 8 соседними ячейками. Согласно принципу симметрии, предполагаем, что основной объем воздуха ячейки будет находиться в 8-ми одинаковых пузырьках, которые прилипают к поверхности гранулы пенополистирола.

Полагая, что данные пузырьки имеют форму полусфер и, учитывая, что $V_{\text{яч}} = k_{\text{уп}} V_{\text{гр}}$, на основании (4.1), (4.2) определяем

$$r_{\text{п}} = \frac{R_{\text{гр}}}{2} \left(\frac{2\chi_{\text{возд}}(1-\chi_{\text{зр}})}{\chi_{\text{зр}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4.3)$$

где $r_{\text{п}}$ – радиус прилипшего к поверхности гранулы пузырька воздуха.

Из (4.1) получаем, что расстояние между гранулами

$$\delta = 2R_{\text{гр}} \left[\frac{1}{(k_{\text{уп}}\chi_{\text{зр}})^{\frac{1}{3}}} - 1 \right].$$

Тогда минимальная толщина слоя матричной эмульсии в промежутке между соседними гранулами будет равна

$$\delta_* = 2R_{\text{гр}} \left[\frac{1}{(k_{\text{уп}}\chi_{\text{зр}})^{\frac{1}{3}}} - 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{2\chi_{\text{возд}}(1-\chi_{\text{зр}})}{\chi_{\text{зр}}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (4.4)$$

Связная «гранульно–воздушной система» («сквозные каналы») возникает в случае соприкосновения воздушных пузырьков с поверхностями соседних гранул, то есть при выполнении условия

$$\delta_* \leq 0. \quad (4.5)$$

Найдем полезные соотношения между параметрами $k_{\text{уп}}$, $\chi_{\text{возд}}$, $\chi_{\text{зр}}$ и ζ .

Положим, что рассматриваемое ЭВВ получается из смешения гранул, имеющий некоторый насыпной объем $V_{\text{гр}}^{\text{нас}}$, и объема матричной эмульсии $V_{\text{эм}}^*$. Объем собственно гранул $V_{\text{гр}}^*$ найдется из уравнения: $V_{\text{гр}}^{\text{нас}} \cong k_{\text{уп}} V_{\text{гр}}^*$.

Тогда, учитывая, что по определению $\zeta = \frac{V_{\text{гр}}^{\text{нас}}}{V_{\text{эм}}^*}$, получаем

$$\frac{V_{\text{гр}}^*}{V_{\text{эм}}^*} = \frac{\zeta}{k_{\text{уп}}}. \quad (4.6)$$

Для ячейки имеем очевидное равенство

$$V_{\text{яч}} = V_{\text{эм}} + V_{\text{гр}} + V_{\text{возд}}. \quad (4.7)$$

Так как соотношение (4.6) определено для произвольных значений $V_{\text{гр}}^{\text{нас}}$ и $V_{\text{эм}}^*$, то оно выполняется и для величин $V_{\text{гр}}$, $V_{\text{эм}}$.

По определению

$$\chi_{\text{ср}} = V_{\text{гр}} / V_{\text{яч}}. \quad (4.8)$$

На основании (4.2), (4.5) и (4.8) определяем, что критерий низкоплотности эмульпора можно представить в следующем удобном для технического анализа виде

$$1 + \frac{1}{4} \left[\frac{2k_{\text{yn}}}{\zeta} \left(\frac{\rho_{\text{эм}} - \zeta \left(\frac{\rho_{\text{оо}}}{k_{\text{yn}}} - \rho_{\text{nn}} \right)}{\rho_{\text{оо}}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{3}} - \left[\frac{\rho_{\text{эм}} - \zeta \left(\frac{\rho_{\text{оо}}}{k_{\text{yn}}} - \rho_{\text{nn}} \right)}{\zeta \rho_{\text{оо}}} + \frac{1}{k_{\text{yn}}} \right]^{\frac{1}{3}} \geq 0 \quad (4.9)$$

Показатель низкоплотности (4.9) определяет диапазон возможных характерных значений начальной плотности ЭВВ ρ_{00} , а также отношение объема частиц пенополистирола к объему матричной эмульсии ζ при заданном значении плотности матричной эмульсии $\rho_{\text{эм}}$, объемную плотность частиц пенополистирола ρ_{nn} и коэффициента их упаковки k_{yn} , при котором в ЭВВ образуется когерентная система «частицы пенополистирола–воздушные поры». В этом случае структура ЭВВ выражается в виде «тумана» из капель матричной эмульсии, отделенных друг от друга воздушными включениями и/или частицами с низкой прочностью и (или) малопрочными высокопористыми (с 90...98%объемн. пористостью) гранулами.

На рисунках 4.1, 4.2 представлены области образования «сквозных каналов» в ЭВВ с матричной эмульсией типа «Порэмит-1А» ($\rho_{\text{эм}}=1,33$ г/см³)

и типа «Украинит-ПП-2» ($\rho_{эм} = 1,48 \text{ г/см}^3$) при $k_{уп} = 1,8$ и различных значений насыпной плотности гранул пенополистирола.

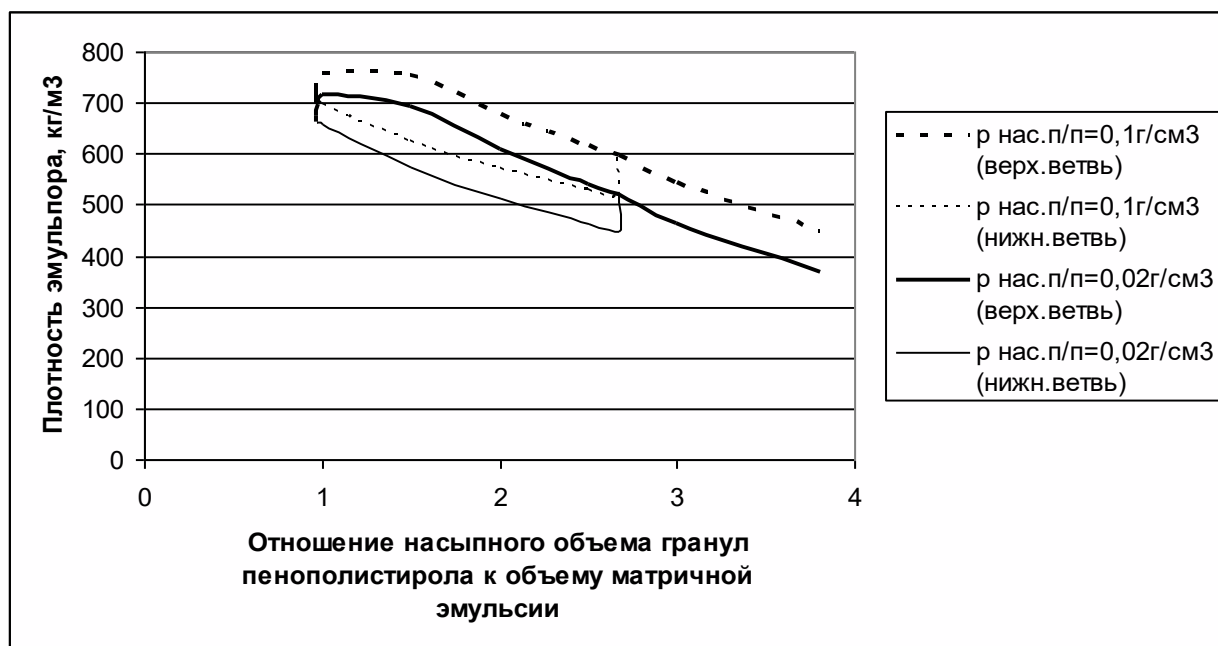


Рисунок 4.1 – Область образования «сквозных каналов» в ЭВВ с матричной эмульсией типа «Порэммит-1А»

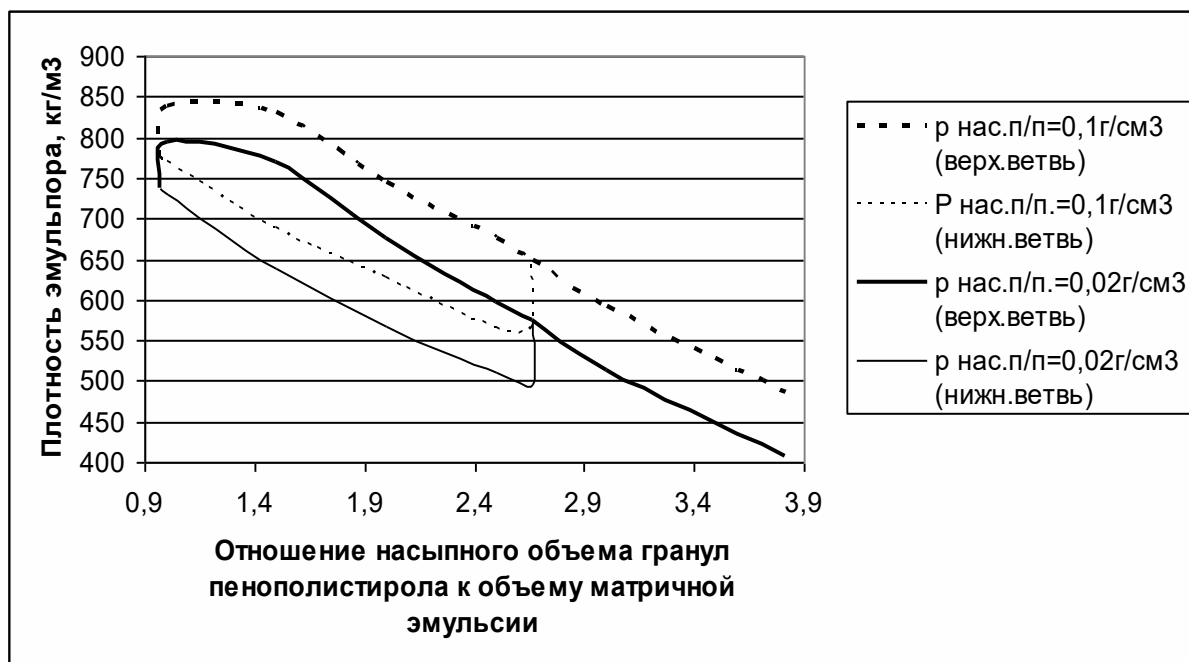


Рисунок 4.2 – Область образования «сквозных каналов» в ЭВВ с матричной эмульсией типа «Украинит-2-ПП»

Верхняя ветвь диаграммы отражает ограничение на начальную плотность ЭВВ, где пористость (содержание газовых включений) является минимальной, в то время как нижняя ветвь отражает максимально возможное количество «запертого» в ЭВВ воздуха. Исходя из эксперимента по газификации ЭВВ, предполагается, что максимально возможное значение пористости «запертого» воздуха составляет 30%, в противном случае ЭВВ будет «сжиматься» вместе с выходящим из него избытком воздуха.

«Хвосты» образуются в области, где образуется связующая система «гранульно–воздушной системы» (см. рисунки 4.1, 4.2), что соответствует области, в которую были заключены частицы пенополистирола, а эмульсия будет располагаться только во внутреннем пространстве частиц.

Для иллюстрации полученных результатов рассчитаны значения критических плотностей, разграничивающих область односвязности эмульсионной фазы и область возникновения разрыва эмульсионной фазы на отдельные капли, для эмульпоров, матричные эмульсии которых имеют следующие составы:

– Состав №1 (NH_4NO_3 – 78,0 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза: И-20 – 5,5 %, эмульгатор «РЭМ» – 1,0 %);

– Состав №2 (NH_4NO_3 – 62,0 %, NaNO_3 – 15,0 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза: И-40 – 6,5 %, эмульгатор «РЭМ» – 1,0 %);

– Состав №3 (NH_4NO_3 – 48,7 %, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 27,8 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза: летнее ДТ- 7,0 %, эмульгатор «Лубризор» – 1,0 %).

Расчеты по предложенной методике дают следующие значения критической плотности: Состав №1 – 0,73 г/см³; Состав №2 – 0,78 г/см³; Состав №3 – 0,81 г/см³.

Учитывая, что $\rho_{nn} \ll 0,73 \text{ г/см}^3$, определяем, что для эмульпоров независимо от рецептурного состава их окислительной фазы областью значений ζ , при которой образуется связная система «гранулы пенополистирола-воздушные поры», является область – $1,9 < \zeta$.

4.2 Учет коэффициента вспенивания гранул полистирола при расчете плотности эмульпоров

В данном параграфе представим учет коэффициента вспенивания гранул при расчете плотности эмульпоров, при этом отметим, что из пористых органических веществ максимальный интерес при применении их в качестве сенсibilизатора в ЭВВ определяют гранулы вспененного полистирола. Эти гранулы можно характеризовать не только развитой пористой структурой, которая обеспечивает высокую площадь контакта с газовой средой, но и также низкой плотностью, легкостью, инертностью к большинству элементов и компонентов ЭВВ, с учетом того, что, являясь продуктом устойчивого и управляемого органического синтеза, данные компоненты повторяют внутреннюю структуру. Помимо этого, такой материал доступен, как по стоимости, так и по снабжению [124]. Кроме того, гранулы пенополистирола имеют, так называемые «закрытые» поры что препятствует проникновению в них нефтепродукта из состава эмульсии (заполнение пор нефтепродуктом из состава эмульсии приведет к разрешению самой эмульсии от утонения пленок нефтепродукта разделяющего мицеллы раствора окислителя; и отсутствию газовых пор как таковых – что лишит рассматриваемую систему взрывчатых свойств). К примеру, использование вермикулита (продукт термopереработки слюды) в качестве материала для состояния пористой структуры ЭВВ не оправдало надежд, так как вермикулит имеет систему открытых пор в которые, за счет капиллярного эффекта, затягивается нефтепродукт из окружающей эмульсии, от чего эмульсия разрушается а сама система – теряет пористость, такое ЭВВ со временем (потери пористости и разрешении структуры эмульсии), теряет способность детонировать.

Рассчитанные теоретические, также полигонные и опытно-промышленные работы [31, 32, 99, 108] представили, что рабочая способность эмульпоров с учетом их химического состава, структуры гранул и матричной эмульсии, также методов перемешивания и плотности, модифицирующихся в

обширных пределах, сопоставима с порохами и граммонитами. В результате данные ЭВВ имеют весьма вариативные характеристики, а их классификация (по плотности и вытекающей из этого энергетике воздействия на окружающую среду) предполагает собой сложную задачу, которая требует учета многих факторов. При этом данные ЭВВ имеют широкую область использования на открытых горных работах. Тем не менее, в настоящий период времени не существует методики расчета технологической плотности данных ЭВВ, которая бы учитывала сортность исходных гранул полистирола и коэффициента вспенивания их, что в результате затрудняет работу взрывников-технологов при проектировании, а также снабженцев – при поиске и закупке требуемых для изготовления эмульпоров материалов.

В данном параграфе представлены результаты работы и разработка методики расчета технологической плотности эмульпоров, которая учитывает сортность исходных гранул полистирола и коэффициент вспенивания. При этом, отметим, что наиболее плотные и однородные гранулы обеспечивают стабильную и предсказуемую детонацию, также пористая структура способствует наиболее быстрому распространению детонационной волны при наименьшей энергии инициирования [113].

Образование гранул пенополистирола происходит способом нагревания гранул суспензионного вспенивающегося полистирола в пароводяной среде, при этом сам суспензионный вспенивающийся полистирол - получают из эмульсии изопентана в стироле при полимеризации стирола и грануляции такой полимеризующейся массы [124].

Далее представлены обозначения показателей:

$r_{гр}^o$, $R_{гр}$ – изначальный радиус гранулы суспензионного вспенивающегося полистирола и радиус этой гранулы после вспенивания, соответственно;

$r_{пор}$ – средний радиус поры в грануле после вспенивания;

$\rho_{пс}^o$, $\rho_{ип}$ – плотность полистирола и изопентана, соответственно;

χ_{un} – изопентанная пористость;

ρ_{oo}^{enc} – плотность вещества гранулы суспензионного вспенивающегося полистирола;

δ – средняя толщина перегородки между порами гранулы пенополистирола;

$K_{вспен.}$ – критерий вспенивания, который определяется как отношение объема вспененной гранулы к изначальному;

$k_{упак.}$ – показатель упаковки, который определяется как отношение совместного объема, занимаемого гранулами, к своему объему гранул при свободной засыпке вспененных гранул полистирола.

При этом, плотность вещества гранулы суспензионного вспенивающегося полистирола в границах принятых обозначений представлена как:

$$\rho_{oo}^{enc} = \chi_{un}\rho_{un} + (1 - \chi_{un})\rho_{nc}^o. \quad (4.10)$$

В данном расчете учитываются исследования структуры гранул пенополистирола [38] в системе коэффициентов вспенивания, которые предполагают собой практический интерес ($K_{вспен.} > 6$), при этом выполняется следующее условие $\delta \ll r_{пор}$, в результате из данного условия сохранения массы полистирола в грануле до и после вспенивания выполняется следующее уравнение:

$$\frac{4\pi}{3} (r_{гр}^o)^3 \rho_{nc}^o (1 - \chi_{un}) \cong \frac{1}{2} \cdot 4\pi_{пор}^2 \delta N_{пор} \rho_{nc}^o, \quad (4.11)$$

где $N_{пор}$ – количество пор в грануле:

$$N_{пор} \approx \left(\frac{R_{гр}}{r_{пор}} \right)^3. \quad (4.12)$$

По определению

$$K_{\text{вспен.}} = \left(\frac{R_{\text{гр}}}{r_{\text{гр}}^o} \right)^3. \quad (4.13)$$

На основании (4.10)-(4.13) имеем

$$\frac{\delta}{r_{\text{пор}}} \cong \frac{2}{3K_{\text{вспен.}}} \cdot \frac{\rho_{oo}^{\text{cnc}} - \rho_{\text{ин}}}{\rho_{\text{nc}}^o - \rho_{\text{ин}}}. \quad (4.14)$$

Далее представим на рассмотрение насыпную плотность пенополистирола $\rho_{\text{nn}}^{\text{нас}}$. В итоге для массы полистирола в грануле распишем следующее уравнение:

$$\frac{1}{2} \cdot 4\pi r_{\text{пор}}^2 \delta N_{\text{пор}} \rho_{\text{no}}^o \cong \frac{4\pi}{3} R_{\text{гр}}^3 k_{\text{упак}} \rho_{\text{nn}}^{\text{нас}}. \quad (4.15)$$

На основании (4.12), (4.15) получается следующее соотношение:

$$\frac{\delta}{r_{\text{пор}}} \cong \frac{2}{3} \cdot \frac{k_{\text{упак}} \rho_{\text{nn}}^{\text{нас}}}{\rho_{\text{nc}}^o}. \quad (4.16)$$

Из формул (4.14), (4.16) представим уравнение:

$$\rho_{\text{nn}}^{\text{нас}} \cong \frac{\rho_{\text{nc}}^o}{k_{\text{упак}} K_{\text{вспен.}}} \cdot \frac{\rho_{oo}^{\text{cnc}} - \rho_{\text{ин}}}{\rho_{\text{nc}}^o - \rho_{\text{ин}}}. \quad (4.17)$$

Отметим следующий показатель через m_0 , которая показывает массовую долю изопентана в суспензионном полистироле, в итоге плотность вещества гранула суспензионного полистирола для вспенивания представлена следующим уравнением:

$$\rho_{oo}^{\text{cnc}} = \left(\frac{m_0}{\rho_{\text{ип}}} + \frac{1-m_0}{\rho_{\text{пс}}^o} \right)^{-1}. \quad (4.18)$$

Согласно (4.17), (4.18), получаем

$$\rho_{nn}^{нас} \cong \frac{\rho_{nc}^o}{k_{упак} K_{вспен}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{m_o}{1 - m_o} \cdot \frac{\rho_{nc}^o}{\rho_{un}}} \quad (4.19)$$

Согласно [106], плотность ρ_{oo} эмульпора, равна

$$\rho_{oo} = k_{упак} \rho_{nn}^{нас} \chi_{zp} + \rho_{эм} (1 - \chi_{возд}) (1 - \chi_{zp}), \quad (4.20)$$

где χ_{zp} , $\chi_{возд}$ – количество пор в грануле гранульная и воздушная пористости в эмульсии ЭВВ, соответственно; $\rho_{эм}$ – количество пор в грануле плотность матричной эмульсии.

На базе формул (4.19) и (4.20) устанавливаем плотность ЭВВ, сенсibiliзирoванного гранулами пенополистирола:

$$\rho_{oo} = \frac{1 - \chi_{возд}}{k_{упак} + \zeta(1 - \chi_{возд})} \left(\frac{\rho_{nc}^o \zeta}{K_{вспен} \left(1 + \frac{m_o}{1 - m_o} \cdot \frac{\rho_{nc}^o}{\rho_{un}} \right)} + k_{упак} \rho_{эм} \right). \quad (4.21)$$

При $\rho_{nc}^o = 1,06 \text{ г/см}^3$; $\rho_{un} = 0,62 \text{ г/см}^3$; $k_{упак} = 1,8$, выражение упрощается, и значение ρ_{oo} в г/см^3 равно

$$\rho_{oo} = \frac{1 - \chi_{возд}}{1 + 0,555\zeta(1 - \chi_{возд})} \left(\rho_{эм} + \frac{0,589\zeta}{K_{вспен} \left(1 + \frac{1,613m_o}{1 - m_o} \right)} \right). \quad (4.22)$$

В формуле (4.22) показатель m_o известен из паспорта на суспензионный полистирол, критерий $K_{вспен}$ может задаваться заказчиков (производитель ЭВВ, сенсibiliзирoванного гранулами пенополистирола), показатель $\chi_{возд}$ зависит от технологического смешивания эмульсии с гранулами пенополистирола [108], критерий ζ может задаваться взрывником-технологом.

4.3 Расчет удельной теплоты взрыва эмульпоров

В написании настоящего параграфа использованы результаты работ [103, 106, 111].

Удельная теплота взрыва является важной характеристикой ВВ, входящей в многочисленные формулы для определения технологических параметров взрывных работ.

В настоящее время одними из самых распространенных промышленных ВВ в России и за рубежом являются ЭВВ. Однако, несмотря на относительно длительное время применения данных ПВВ, в настоящее время отсутствуют экспериментальные данные о непосредственном измерении удельной теплоты взрыва ЭВВ, что обусловлено отсутствием калориметрических бомб, способных выдержать взрыв десяти и более килограмм данных ВВ. Отсутствие экспериментальных данных приводит к необходимости использования расчетных методов.

Допустим, что при детонации ЭВВ происходит химическая реакция согласно уравнению:

$$\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j, \quad (4.23)$$

где A_m – количество пор в грануле начальные вещества в составе ЭВВ; X_i – количество пор в грануле газообразные продукты взрыва; Y_j – количество пор в грануле твердотельные продукты взрыва; a_m, b_i, f_j – количество пор в грануле мольные коэффициенты.

Согласно общепринятым методикам, удельная теплота взрыва Q_v определяется из уравнения Гесса (при конечной температуре продуктов взрыва 298K) [10]:

$$Q_v = \frac{1}{G} \left(\sum b_i Q_p^{X_i} + \sum f_j Q_p^{Y_j} - \sum a_m Q_p^{A_m} + 0,592 \Delta b \right), \quad (4.24)$$

где $Q_p^{X_i}$, $Q_p^{Y_j}$, $Q_p^{A_m}$ – количество пор в грануле стандартные теплоты образования X_i -веществ, Y_j -веществ и A_m -веществ, соответственно, ккал/моль; G – масса вещества вступившего в реакцию, кг; $G = \sum a_m \mu_m$, где μ_m – количество пор в грануле молекулярная масса m -вещества, кг/моль; $\Delta b = \sum f_j$ – количество молей газообразных продуктов взрыва.

Однако при расчетном определении удельной теплоты взрыва для ЭВВ по уравнению (4.25) возникают сложности, обусловленные

– отсутствием надежных данных о химическом составе топливной фазы, используемой при изготовлении ЭВВ.

– отсутствием надежных экспериментальных данных о составе продуктов взрыва.

Вследствие того, что различные авторы используют различные брутто-формулы для описания одних и тех же топлив [19, 30, 166] предварительно рассмотрим вопрос о химическом составе топливной фазы, используемой при изготовлении ЭВВ.

В общем виде брутто-формула элементов топлива имеет вид $C_a H_b O_c S_d$ [166].

При определении значений коэффициентов в этой брутто-формуле используем эмпирическую формулу Крэга для определения молекулярной массы нефтепродукта (г/моль) и данные об элементарном составе топлива [50, 51].

Согласно Крэгу среднее значение молекулярной массы нефтепродукта (г/моль) равна [171]:

$$\mu = \frac{44,29 \rho_{15}}{1,03 - \rho_{15}}, \quad (4.25)$$

где ρ_{15} – плотность нефтепродукта при $15^\circ C$, г/см³.

Если известна плотность нефтепродукта при 20 °С (например, для промышленных масел), то для определения ρ_{15} можно использовать формулу Менделеева [171]:

$$\rho_{15} = \rho_{20} + 5 \cdot 10^{-4} (18,310 - 13,233 \rho_{20}), \quad (4.26)$$

где ρ_{20} – плотность нефтепродукта при 20 °С, г/см³.

В таблице 4.1 приведены брутто-формулы и данные, используемые при их определении для наиболее распространенных жидких топлив, применяемых при изготовлении ЭВВ.

Таблица 4.1 – Результаты определения брутто-формул жидких топлив, применяемых при изготовлении ЭВВ

Вид топлива	ρ_{15} , г/см ³	$\mu_{расч}$, г/моль по Крэгу	μ , г/моль по брутто-формуле	Массовая доля веществ в топливе, %				Брутто-формула
				[C]	[H]	[S]	[O]	
ДТ арктическое	0,830	183,8	183,7	85,6	14,0	0,4	-	$C_{13,1}H_{25,8}S_{0,023}$
ДТ зимнее	0,840	195,8	194,4	86,2	13,5	0,2	-	$C_{14}H_{26}S_{0,013}$
ДТ летнее	0,860	224,1	222,3	86,6	13,2	0,2	-	$C_{16}H_{30}S_{0,01}$
Масло И-20А	0,893	288,7	287,9	87,2	11,8	1	-	$C_{20,9}H_{33,9}S_{0,1}$
Масло И-40А	0,903	314,9	314,4	87,5	11,5	1	-	$C_{22,9}H_{36,4}S_{0,1}$

Примечания: ДТ – дизельное топливо.

В ходе расчетов использовались данные о плотностях рассматриваемых топлив [50, 51], формула Крэга для определения их молекулярных масс и справочные сведения о массовых долях веществ в этих топливах.

Теплота образования топлива может быть определена из теплоты их сгорания и полученных брутто-формул.

Согласно формуле Д.И. Менделеева низшая теплота сгорания углеводородного топлива равна [177]

$$Q_{гор.низш.} = 81[C] + 246[H] - 26([S] - [O]) - 6[W] \text{ ккал/кг}, \quad (4.27)$$

где $[C]$, $[H]$, $[S]$, $[O]$, $[W]$ – массовая доля в процентах содержания в топливе углерода, водорода, серы, кислорода и воды, соответственно.

По закону Гесса теплота образования топлива равна разнице между теплотой образования продуктов сгорания и теплотой сгорания топлива

$$Q_{образ} = 94,03a + 57,801 \cdot \frac{b}{2} + 70,95 \cdot d - Q_{гор.низш.} \cdot \frac{\mu}{1000}, \text{ ккал/моль}. \quad (4.28)$$

В уравнении (4.28): 94,03 ккал/моль, 57,801 ккал/моль и 70,95 ккал/моль – теплоты образования двуокиси углерода, воды (пар) и двуокиси серы, соответственно [168].

В таблице 4.2 приведены результаты вычислений теплоты образования для указанных в таблице 4.1 видов углеводородных топлив. Вычисления выполнены на основании (4.27), (4.28).

Таблица 4.2 – Расчетные значения теплоты образования углеводородных топлив, применяемых при изготовлении ЭВВ

Показатели	Вид топлива				
	ДТ арктическое	ДТ зимнее	ДТ летнее	Масло И-20	Масло И-40
Теплота образования, ккал/моль	74,77	66,97	92,19	99,68	105,06

На основании (4.24) определяем вклад теплоты образования топлива в удельную теплоту взрыва ЭВВ

$$\Delta Q_{топл} = -10\alpha_{топл} \cdot \frac{Q_p^{топл}}{\mu_{топл}}, \text{ ккал/кг} \quad (4.29)$$

где $\mu_{топл}$ – молекулярная масса топлива, г/моль; $Q_p^{топл}$ – теплота образования топлива, ккал/моль; $\alpha_{топл}$ – массовая доля топлива в ЭВВ в процентах.

В настоящее время в России и за рубежом достаточно широкое распространение получили синтетические эмульгаторы, образованные макромолекулами вида [76]:



или



где n – число повторяющихся структурных звеньев; X, Y – концевые полярные группы. $X, Y \rightarrow COH, COOH$ для эмульгаторов «РЭМ» и «ПИБСА», описываемых уравнением (4.30), а для эмульгатора фирмы JCJ Australia (уравнение (4.31) – $X, Y \rightarrow NH_2$.

Параметр n имеет значение порядка десятков и сотен единиц. Это обстоятельство позволяет пренебречь вкладом концевых групп в энергию образования эмульгатора.

Теплота образования групп $CH_2C(CH_3)_2$ и C_2H_4 , рассчитанная по энергиям связи [10], оказалось равной:

– для группы $CH_2C(CH_3)_2$ – (+30,2 ккал/моль – с учетом изомерного эффекта);

– группы C_2H_4 – (+12,6) ккал/моль.

Следовательно, теплота образования эмульгаторов $Q_p^{эмул} \approx 30,2n$ будет для эмульгатора вида (4.30) и $Q_p^{эмул} \approx 12,6n$ ккал/моль – для (4.31).

Положим, что $\alpha_{эмул}$ – массовая доля эмульгатора в ЭВВ в процентах.

На основании (4.24) определяем вклад теплоты образования эмульгатора в удельную теплоту взрыва ЭВВ

$$\Delta Q_{эм} = -10\alpha_{эмул} \cdot \frac{Q_p^{эмул}}{\mu_{эмул}}, \text{ ккал/кг} \quad (4.32)$$

где $\mu_{\text{эмул}}$ – молекулярная масса эмульгатора, г/моль ($\mu \approx 56n$ г/моль для эмульгатора вида (4.30) и $\mu \approx 28n$ г/моль – для (4.31), т.к. $n \gg 1$); $Q_p^{\text{эмул}}$ – теплота образования эмульгатора, ккал/моль.

Исходя из (4.29), (4.32), определяем вклад теплоты образования рассматриваемых эмульгаторов в удельную теплоту взрыва ЭВВ:

$$\Delta Q_{\text{эм}} \approx -5,4\alpha_{\text{эмул}}, \text{ ккал/кг} - \text{для эмульгатора вида (4.30);} \quad (4.33)$$

$$\Delta Q_{\text{эм}} \approx -4,5\alpha_{\text{эмул}}, \text{ ккал/кг} - \text{для эмульгатора вида (4.31).} \quad (4.34)$$

Для иллюстрации полученных результатов в таблице 4.3 представлены результаты расчета удельной теплоты взрыва («вода-пар») для ЭВВ, матричные эмульсии которых имеют следующие составы:

– состав №1 (NH_4NO_3 – 78,0 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза: И-20 – 5,5 %, эмульгатор «РЭМ» – 1,0 %);

– состав №2 (NH_4NO_3 – 62,0 %, NaNO_3 – 15,0 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза: И-40 – 6,5 %, эмульгатор «РЭМ» 1,0 %);

– состав №3 (NH_4NO_3 – 48,7 %, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 27,8 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза: летнее ДТ- 7,0 %, эмульгатор «Лубризор» – 1,0 %).

Таблица 4.3 – Значения плотности и теплоты взрыва рассматриваемых эмульсий

Состав эмульсии	Плотность эмульсии, г/см ³	Удельная теплота взрывчатого разложения эмульсии (вода – «пар»), Ккал/кг
1	1,33	616,9
2	1,42	579,5
3	1,48	641,2

Согласно [120] процесс ударного разложения пенополистирола сопровождается карбонизацией продуктов распада и происходит по схеме:



Общий тепловой эффект ударной газификации пенополистирола равен

$$q_{nn} = 219,9 \text{ кДж / моль} = 52,55 \text{ Ккал / моль} . \quad (4.36)$$

Рассмотрим эмульпор, полученный при смешивании эмульсии массой $G_{эм}$ и пенополистирола массой G_{nn} . При взрывчатом разложении данной смеси практически не происходит взаимодействия продуктов разложения эмульсии и пенополистирола, т.к. эмульсии имеет нейтральный, а чаще отрицательный кислородный баланс [19, 76].

Удельная теплота взрыва эмульпора равна

$$Q_{\text{эмульпор}} = \frac{q^* G_{nn} + Q_v G_{эм}}{V_{\text{эмульпор}}}, \quad (4.37)$$

где $q^* = \frac{q_{nn} G_{nn}}{\mu_{nn}}$ – удельная теплота ударного разложения пенополистирола (из (4.36), $q^* = 505,3 \text{ Ккал/кг}$).

Учитывая, что $G_{nn} = \rho_{nn}^{нас} V_{nn}$, $G_{эм} = \rho_{эм} V_{эм}$ на основании (4.37) определяем удельную теплоту взрыва эмульпоров

$$Q_{\text{эмульпор}} = q^* \rho_{nn}^{нас} + \frac{Q_v \rho_{эм} - q^* \rho_{nn}^{нас}}{1 + \zeta}, \quad (4.38)$$

где ζ – отношение объема гранул пенополистирола к объему эмульсии в смеси.

4.4 Физико-математическое описание детонации низкоплотных эмульпоров

Экспериментальным путем обосновано, что низкоплотные ЭВВ (как исходные взрывчатые вещества) могут допускать механизированную зарядку в нисходящие скважины, также при низкой плотности, которая составляет менее $0,5 \text{ г/см}^3$, они могут обеспечивать достаточную детонационную способность к разложению [108, 165], что открывает новые перспективы для

повышения производительности буровзрывных работ, что особенно в условиях при применении традиционных наиболее плотных взрывчатых веществах затруднено. При этом низкоплотные эмульпоры обеспечивают формирование скважинного заряда практически не подверженных усадке по воздействием гидростатического давления (для достаточного практического использования достаточно в пределах до 5...6 бар), при шадящем взрыве следует ожидать низкий уровень давления взрывных газов из-за малых плотностей ЭВВ. Стоит обозначить, что принятая в работе [108] модель детонации лишается своего обоснования, если плотность эмульпоров наиболее низкая, так как их эмульсионная фаза теряет односвязность.

Выдвигается следующая гипотеза, которая показывает детонацию эмульпоров при плотности ЭВВ, лежащих в интервале 0,4...0,5 г/см³:

- формируется связная система «гранулы пенополистирола-воздушные поры» при малой плотности рассматриваемого ЭВВ;
- механизм возбуждения ЭВВ меняется при наличии сквозных каналов.

Возбуждение будет происходить по механизму, предложенному в работах [36, 41, 48, 195, 196, 197], – под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления. При этом химическая реакция происходит в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа.

Для того, чтобы проверить данные гипотезы были проведены экспериментальные и теоретические исследования [41, 48, 197].

При полигонных исследования проводились экспериментальные опыты, которые измеряли полноту и скорости детонации при подрыве открытого вида цилиндрических зарядов изучаемого ЭВВ в картонных оболочках (гильзах).

В данном эксперименте гильзы производились из листов ламинированного электротехнического картона (толщина 1 мм), они навивались в 3 оборота на заблаговременно подготовленные цилиндрические шаблоны. После навивки на шаблон листы картона фиксировали лентой «скотч» после того, как извлекался шаблон один из торцов полученной трубы,

заполняли монтажной пеной «Макрофлекс», после этого гильза принимала законченный вид («пробка» из затвердевшей монтажной пены препятствовала вытеканию Эмульпора из гильзы; в таком виде заполненную Эмульпором гильзу удобно перемещать на полигоне). Гильза имела следующие характеристики: ее длина была 1000 мм, длина заражаемой ЭВВ части гильзы составляла не менее 900 мм. При этом необходимо отметить, что при измерении скорости детонации применялась аппаратура «VOD Mate» («Instantel») и «HandyTrap» («MREL»), которая постоянно измеряла показатель сопротивления электрической цепи проводника-датчика, при этом датчик – проводник наклеивался на листке картона, перед тем как навить шаблон.

Для разработки ЭВВ применялась эмульсия такого химического состава как: NH_4NO_3 – 75,0 %; H_2O – 18 %; эмульгатор – 1,0 %; индустриальное масло – 6,0 %. Плотность эмульсии при данном химическом составе на основании лабораторных измерений составила 1328 кг/м^3 .

Для проведения испытаний проводилось две серии опытов.

На рисунке 4.3 показана последовательность выполнения первой серии опытов. При изучении передачи детонации использовалась медная пластинка, которая перекрывала сечение заряда и имела толщину 4 мм. Пластинка размещалась перпендикулярно оси заряда на расстоянии 500 мм от места инициирования заряда. ЭВВ изготавливалось смешением гранул пенополистирола с эмульсией.

Диаметр зарядов в первой серии опытов – 90 мм. Средний диаметр гранул пенополистирола – 1...2 мм. Насыпная плотность – 30 кг/м^3 .

Вывод из первой серии опытов: при плотности заряда ниже $0,70 \text{ г/см}^3$ передачи детонации через медную пластинку не наблюдается.

Во второй серии опытов измерялась скорость распространения взрывного процесса по заряду ВВ. Взрывались заряды диаметром 130 мм и 240 мм. ЭВВ изготавливалось смешением гранул пенополистирола с эмульсией. Средний диаметр гранул пенополистирола составлял 2–3 мм, а насыпная плотность – 40 кг/м^3 .



а



б



в



г



д



е

Рисунок 4.3 – Иллюстрация первой серии опытов (буквы под фотографиями указывают на последовательность действий)

Рисунок 4.4 показывает внешний вид опытного заряда в картонной гильзе, диаметр которого 130 мм. В данном варианте $\zeta = 1,95$; $\rho_{oo} = 600 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{эм} = 1328 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{nn}^{nac} = 40 \text{ кг/м}^3$. Результаты эксперимента показали, что при инициировании состава промежуточными детонаторами из тротильовых шашек Т-1000-Л-ПО, он целиком детонирует, также установлено, что скорость детонации составляет 4123 м/с при взрыве диаметром 240 мм, что показано на рисунке 4.5. и 4065 м/с при взрыве диаметром заряда 130 мм, что представлено на рисунке 4.6.

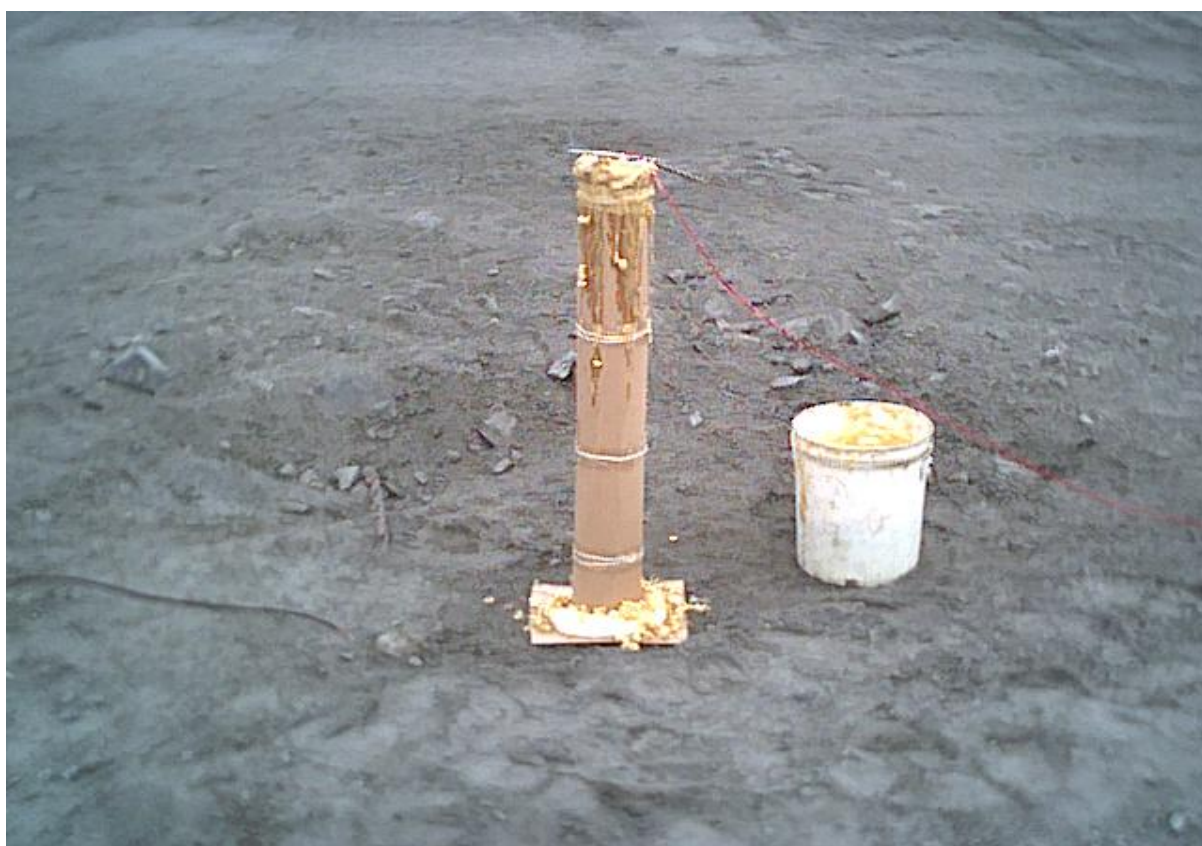


Рисунок 4.4 – Внешний вид опытного заряда в картонной гильзе диаметром 130 мм

До этого при выполнении в эмульпоре (4.9) формируется связная система «сенсibiliзирующие гранулы-воздушные поры», при этом структура исследуемого ВВ представляет «туман» из капель матричной эмульсии, разделенных воздушными включениями и (или) легкими малопрочными

гранулами пенополистирола. Подставляя данные показатели в (4.9), получается следующая система, что критерий низкоплотности равен $0,089 > 0$.

Что касается коэффициента упаковки гранул пенополистирола, то он устанавливается лабораторным путем и составляет 1,8.

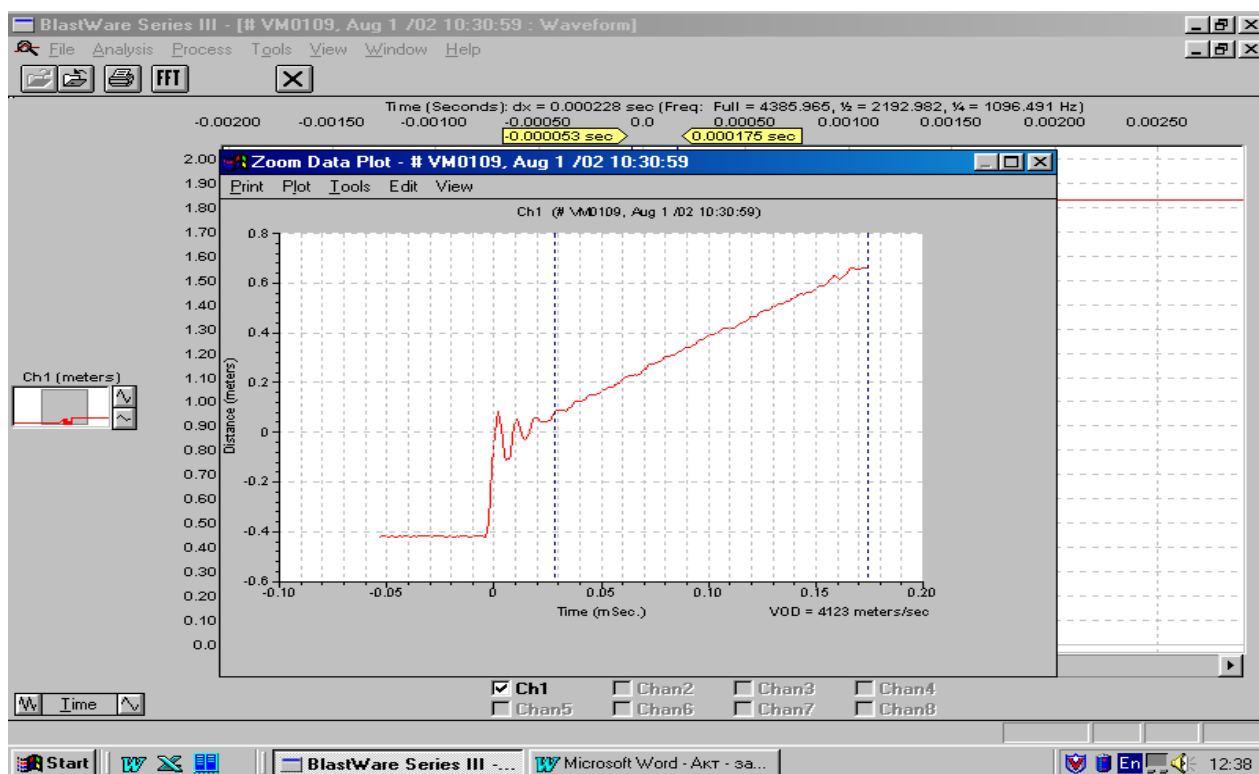


Рисунок 4.5 – Зависимость пути, пройденного детонационной волной от времени (диаметр заряда – 240 мм; VOD = 4123 м/с; ПД – шашка Т-1000-Л-П; $\rho_{oo} = 600 \text{ кг/м}^3$)

В результате приходим к выводу, что в исследуемой серии опытов структура ЭВВ предполагает собой «туман» из капель матричной эмульсии, которые разделены друг от друга воздушными включениями и (или) легкими и непрочными гранулами пенополистирола.

Предположим, что процессы детонации описываются моделью, которая предложена в работах [30, 37, 45, 88] для отображения детонационного процесса промышленных аммиачно-селитренных ВВ.

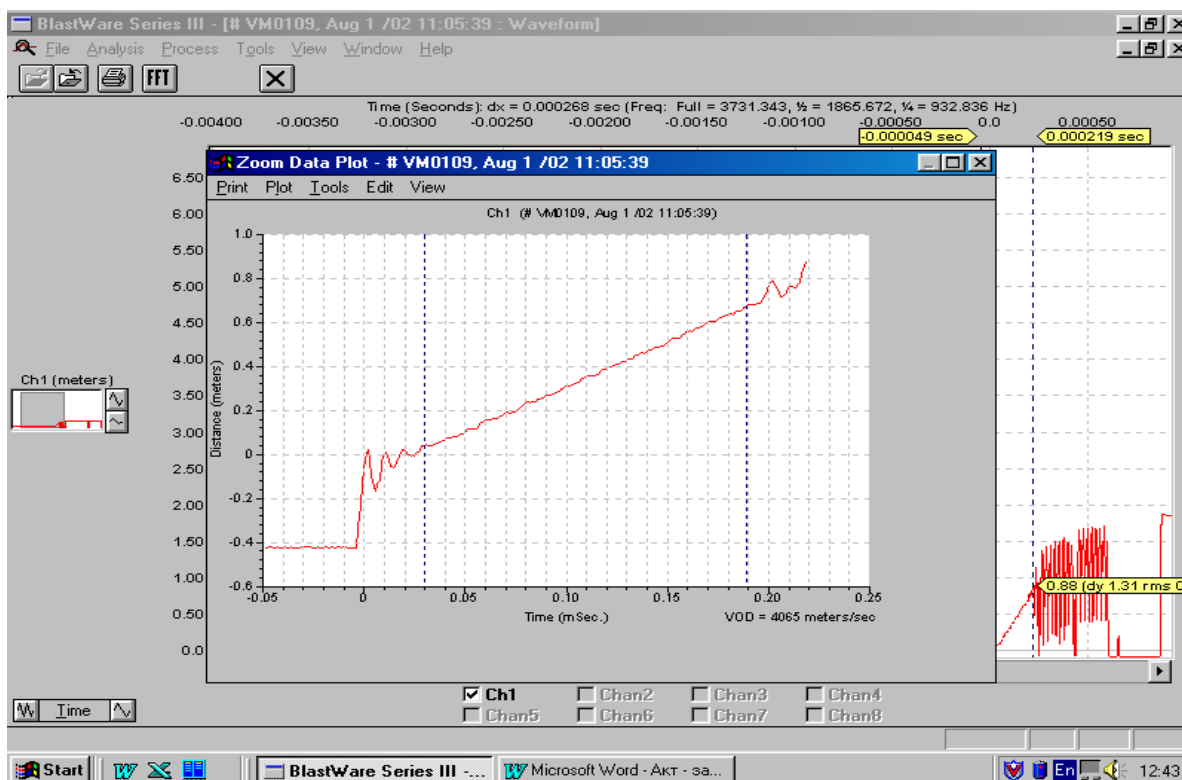


Рисунок 4.6 – Зависимость пути, пройденного детонационной волной от времени (диаметр заряда – 130 мм; $VOD = 4065$ м/с; ПД – шашка Т-1000-Л-П; $\rho_{oo} = 600$ кг/м³)

Предпочтение данной модели определено тем, что она позволяет довольно адекватно воспроизводить основные экспериментальные данные, которые касаются скорости детонации, давления, плоскости и распределения давления за гранью детонационной волны. В изначальный период начинает происходить уплотнение элементов ВВ впоследствии заполнения ими порового пространства, разогрев элементов, определенный внутренним трением и также теплотой газов, которые заполняют пространство, и только последующее возгорание взрывчатого вещества. Важным принципом модели является предположение о стремительном химическом превращении ВВ в продукты детонации в узкой зоне реакции, при этом толщина данной зоны существенно ниже характерных масштабов, что в результате позволяет рассматривать ее как поверхность взрыва.

При создании модели, учитываются такие характеристики как уплотненная среда, которая приобретает дополнительную скорость в направлении детонационной волны, что объясняется рядом ранее малопонятных кинематических эффектов при распространении детонации в аммиачно-селитренных ВВ [40, 43]. При этом, отвечая закону сохранения энергии, суммарная энергия системы до детонации должна быть равна суммарной энергии после детонации, что означает то, что внутренняя энергия ВВ до детонации плюс энергия, которая затрачена на инициирование детонации должна приравниваться внутренней энергии продуктов детонации плюс кинетической энергии их расширения.

В данном варианте это можно показать следующим образом:

$$\frac{Q_{\text{эмульпор}}}{D^2} \left(1 - \frac{3 \sum_j f_j \xi_j}{c \Delta b}\right) = \frac{1}{2(k+1)} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \left(\frac{1}{K_+ \alpha \rho_0^{2a3}}\right)^{(k-1)} + \frac{\sum_j \beta_j}{k+1} \left(1 + (k+1) \frac{u}{D}\right)^2 - \\ & - \frac{1}{k+1} \left(k \frac{\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0}}{\frac{1}{\rho_{00}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} + (k+2) \left(1 + k \frac{\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0}}{\frac{1}{\rho_{00}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} \right) \frac{u}{D} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4.39)$$

где $\bar{c}$ – сравнительная мольная теплоемкость продуктов взрыва;

k – показатель политропы продуктов взрыва;

γ – показатель адиабаты взрывных газов;

$\sum_i \beta_i$ – суммарная доля твердого вещества в продуктах взрыва;

$\sum_i \frac{\beta_i}{\rho_i}$ – общий сравнительный объем твердых продуктов взрыва;

ρ_o^{2a3} – плотность газообразных продуктов взрыва в момент начала разложения ЭВВ;

K_+ – показатель, который характеризует объем газообразных продуктов взрыва в месте сопряжения при двухполитропном показе $P=P(V)$ газообразных продуктов взрыва (на базе обрабатывания эмпирических данных $K_+ \approx 4,4$ [34]);

u – показатель приращения скорости движения продуктов взрыва во фронте детонационной волны;

$\rho_o = k_p \rho_{oo}$ – показатель плотности ВВ во время разложения;

k_p – коэффициент уплотнения ВВ в момент начала его разложения;

c_v – показатель удельной теплоемкости продуктов взрыва;

α – коволюм продуктов взрыва (по Власову);

Показатель изначальной плотности газообразных продуктов взрыва представлен следующим образом:

$$\rho_0^{gaz} = \rho_0 (1 - \beta_j) \left(1 - \rho_0 \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right)^{-1}. \quad (4.40)$$

Показатель $\frac{u}{D}$ устанавливается на основе закона сохранения импульса, что обуславливается тем, что в замкнутой системе (при отсутствии внешних воздействий) суммарный импульс всех элементов остается постоянным, то есть часть системы теряет импульс, другая же часть приобретает эквивалентный импульс. Поэтому, в данном варианте представлена следующая формула:

$$\frac{u}{D} \approx k_p - 1. \quad (4.41)$$

Формулу состояния взрывных газов представим следующим образом:

$$\frac{Q_{\text{эмульпор}}}{D^2} = \frac{\bar{c}}{2(k+1)} \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_0^{gaz} \right) (1 - \sum \beta_i). \quad (4.42)$$

Детонационная скорость D в системе координат, которая движется в направлении процесса с быстротой u , равна:

$$D^2 = \frac{2(k+1)Q_{\text{эмульпор}}}{\bar{C} \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_0^{gaz} \right) (1 - \sum_j \beta_j)}. \quad (4.43)$$

Измеряемая детонационная скорость (скорость детонации в лабораторной системе координат) представлена как:

$$D_* = D + u \quad (4.44)$$

В итоге система уравнений (4.39)-(4.42) разрешается в том варианте, если известен показатель коэффициента уплотнения k_p .

В данном варианте показатель k_p реализуется методом экстраполяции исходных и расчетных данных для плотностей эмульпоров в интервале от 1,0 до 1,27 г/см³ (показатель k_p рассчитывается по методике работ [41, 108]). На рисунке 4.7 представлен график экстраполяции. Для оценки принимали следующие критерии: $k_p \approx 1,45 - 0,37\rho_{oo}$, где ρ_{oo} в г/см³. При $\rho_{oo}=0,6$ г/см³ показатель $k_p=1,23$.

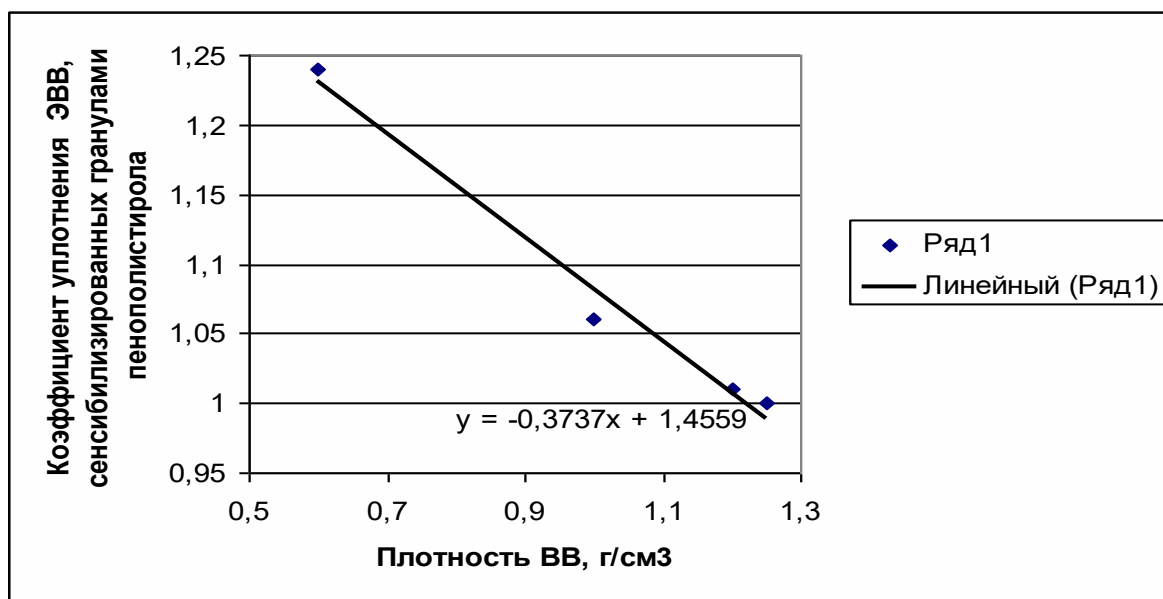


Рисунок 4.7 – Зависимость коэффициента уплотнения ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола, от плотности ЭВВ (экстраполяция)

Расчет скорости детонации был представлен по вышеприведенным уравнениям для изучаемой серии опытов, уравнение представим ниже:

$$D_* = 3195 \text{ м/с } (D = 2622 \text{ м/с } u = 572 \text{ м/с}).$$

Расчетные показатели существенно меньше полученного в процессе экспериментов, поэтому гипотеза, что детонационное разложение исследуемого ЭВВ определяется его разогревом с учетом внутреннего трения при заполнении порогового пространства или теплоемкостью газов в сжимающих порах, не может пояснить настолько высокие скорости детонации при подобной малой плотности ЭВВ. В результате для того, чтобы объяснить наблюдаемые скорости детонации нужна иная концепция. Далее, рассмотрим другое предположение: предположим, в низкоплотных ЭВВ (существует связная гранульно-воздушная система) детонационное возбуждение происходит в соответствии с процессом возбуждения ВВ, рассмотренных в работе [41]. В таком варианте возбуждение показанных ЭВВ может происходить под воздействием высокоэнтальпийного газового потока, который фильтруется из области высокого давления. В данном процессе химическая реакция будет происходить в виде поверхностного горения частиц ВВ, которые будут взаимодействовать с потоком газа.

Установим характеристики фильтрующего потока взрывных газов высокого давления, при этом введем свои обозначения: u_* – показатель скорости потока сравнительно неподвижного наблюдателя; ρ_f , T_f – показатели плотности и температуры взрывных газов в головной части потока взрывных газов, исходящих из области высокого давления; ρ_x , T_x – критерий плотности и температуры воздуха в головной части ударной воздушной волны, которая вызвана потоком взрывных газов.

В данном варианте газодинамических соотношений [10] в пределах двухполитропной модели расширения взрывных газов [89], которая является усовершенствованным аналитическим инструментом, который переназначен для описания термодинамического поведения продуктов детонации при их адиабатическом расширении

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

$$\times \left(\frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{\gamma a3}} \right)^{\frac{k-\gamma}{2\gamma}} \left(\frac{u_*}{D} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.45)$$

$$\rho_f = \left(\frac{(\gamma_a + 1)(k+1)\rho_a u_*^2}{2\rho_o^{\gamma a3} D^2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{k+1}{k} K_+ \alpha \rho_o^{\gamma a3} \right)^{\frac{k}{\gamma}} \frac{1}{K_+ \alpha} \quad , \quad (4.46)$$

$$T_f = \frac{2k}{k+1} T_B \left(\frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{\gamma a3}} \right)^{\frac{k-\gamma}{\gamma}} \left(\frac{(\gamma_a + 1)(k+1)\rho_a u_*^2}{2\rho_o^{\gamma a3} D^2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad , \quad (4.47)$$

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

В данном процессе применение двухполитропной модели необходимо для моделирования расширения газов в широком диапазоне давлений, при анализе взрывных процессов в конденсированных взрывчатых веществах, при этом при первоначальные давления достигают десятков или даже сотен гигапаскалей, а конечные давления сравниваются с атмосферными. При данных существенных модификациях давления состав продуктов детонации может изменяться по причине протекания химической реакции, также фазовых переходов и диссоциации молекул. Данные процессы воздействуют на показатель политропы и как следствие – на термодинамическое состояние газа, при этом поток взрывных газов вызывает в воздухе, находящемся между легкими гранулами и также в гранулах (с пористостью 95-98%объемн.) ударную волну. Ударная волна, которая образуется в результате и следующий за ней поток горячих взрывных газов постепенно обтекают капельки «тумана» из матричной эмульсии. В процессе, если капельки вспыхивают за меньший период времени, чем длительность процесса разложения ВВ в пределах активной химической реакций, то распространение по низкоплотному ЭВВ будет обуславливаться скоростью распространения этого зажигательного процесса.

Период зажигания таких капелек эмульсии оценивается на базе работы [21].

Индукционный период τ , который определяется зажиганием капли эмульсии при обдуве ее ударной волной и также потоками взрывных газов находим из следующей формулы (4.48) (считаем, что результате чрезвычайной краткости процесса зажигания, важную роль в его реализации может играть лучистая энергия):

$$\tau = \tau_9 t_a \quad t_a = \frac{cRT_s^2}{EQz} \exp\left(\frac{E}{RT_s}\right) \quad \tau_9 = \frac{1 - 0,2|\Theta_H| + 0,36\Theta_H^2}{1 - 0,8\beta}, \quad (4.48)$$

где $\Theta_H = \frac{E(T_H - T_s)}{RT_s^2}$ – температурный напор; $\beta = \frac{RT_s}{E}$ – критерий зависимости скорости реакции от температурного режима. T_H – изначальная температура эмульсии; T_s – температура поверхности капли эмульсии в процессе обдува ее ударной воздушной волной и потоком взрывных газов.

Определение температуры поверхности капли эмульсии осуществляем с учетом торможения ударной волны и потока взрывных газов и тепловой активностью веществ, участвующих в процессе теплопередачи [84]:

$$T_s = T_H + T_{уд.в.}^{тормож} \frac{K_{\varepsilon}^{уд.в.}}{1 + K_{\varepsilon}^{уд.в.}} + T_{поток}^{тормож} \frac{K_{\varepsilon}^{поток}}{1 + K_{\varepsilon}^{поток}}, \quad (4.49)$$

$$T_{уд.в.}^{тормож} = T_{уд.в.} + \frac{V_{уд.в.}^2}{2c_{возд.}}. \quad V_{уд.в.} = \frac{\gamma_a + 1}{2} u_*; \quad T_{поток}^{тормож} = T_f + \frac{u_*^2}{2c_{поток}}, \quad (4.50)$$

где K_{ε} – коэффициенты тепловой активности по отношению к веществу эмульсии; $T_{уд.в.}$ – температура воздуха в ударной волне (находится на основании решений [10]).

Порядок появления передачи детонации струйными потоками взрывных газов, вытекающих в области высокого давления, происходит при выполнении следующего условия:

$$\tau < t_{\text{хим.р.}}, \quad (4.51)$$

где $t_{\text{хим.р.}}$ – период времени химической реакции в области высокого давления.

В исследуемом случае придерживаемся следующего условия:

$$t_{\text{хим.р.}} = \frac{R_{\text{др}}}{v_{\text{гор.}}}, \quad (4.52)$$

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

Скорость абляционного горения устанавливаем по следующему уравнению [6]:

$$v_{\text{гор.}} = \left(\frac{\rho_f}{\rho_{\text{эм}}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\chi_g u_*^2}{R_{\text{др}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4.53)$$

где χ_g – показатель температуропроводности взрывных газов в головной части потока.

В результате данное соотношение (4.45-4.50) показывает оценку скорости распространения детонационно-подобного процесса, а формулы (4.51-4.53) показывают вероятность передачи данного процесса струями взрывных газов, которые истекают из области высокого давления. В данном процессе химическая реакция должна происходить в виде поверхностного горения частиц ЭВВ, которые взаимодействуют с потоком раскаленного газа.

Рассмотрим результаты исследований по модели струйной передачи детонации для эмульпора с показателем плотности $\rho_{00} = 600 \text{ кг/м}^3$.

Скорость газового потока, которая истекает из области высокого давления, составляет 3837 м/с. Скорость ударной воздушной волны, которая распространяется перед потоком, составляет 4221 м/с. Период химической реакции составляет 56,2 мкс. Время индукции загорания эмульсии составляет 51,7 мкс.

В данном варианте гипотеза о возбуждении низкоплотного ЭВВ струями взрывных газов, которые истекают из зоны высокого давления, разрешают получить количественные показатели для скорости детонации к определенным экспериментально. Расчетные данные по разработанной методике представляют следующие характеристики струйной детонации для данного варианта: коэффициент политропы – 1,907, коэффициент адиабаты – 1,289; теплота взрыва – 596,5 ккал/кг; удельный объем газов – 1093 л/кг; плотность взрывных газов в головной части потока – 0,0457 г/см³; температура взрывных газов в головной части потока – 628 °К; давление во взрывных газах в головной части потока – 115 бар; давление в области активного протекания хим. реакции – 1,69 ГПа.

Дополнительные оценки показывают, что коэффициент работоспособности рассматриваемого эмульпора относительно аммонита №6ЖВ (1 г/см³) составляет – 0,433 (по Ванштейну [18]), 0,412 (по Лангефорсу [198]), 0,415 (по Кукибу [8]), 0,395 (по однополитропному приближению [54, 79]), 0,431 (по двухполитропному приближению [34]).

Анализ результатов выполненного расчета показывает, что в отличие 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 детонации [83]. 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.

Рассмотрим результаты опытно-промышленных испытаний. Опытно-промышленная проверка возможности осуществления гладкого взрывания

при помощи низкоплотного эмульпора была осуществлена АО «Ураласбест» на опытно-промышленном взрыве блока 141/15-центр [120].

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

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

Расчет требуемой плотности заряжения при применении низкоплотного ЭВВ осуществлялся по эмпирической формуле, предложенной в работе [81] для гладкого взрывания

$$\rho_{ee} = \rho_{st} \left(\frac{D_{st}}{D_{ee}} \right)^2 \left(\frac{E_{st}}{E_{ee}} \right)^{1,25}, \quad (4.54)$$

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

При $\rho_{st} = 96 \text{ кг/м}^3$, $D_{st} = 4800 \text{ м/с}$, $E_{st} = 1$, $D_{ee} = 3200 \text{ м/с}$, $E_{ee} = 0,5$ (E_{ee} оценивался по термодинамическому критерию [54, 79]) на основании (18), имеем $\rho_{ee} = 513 \text{ кг/м}^3$.

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

В процессе экспериментальных данных было взорвано 98 сухих скважин диаметром 115мм. Длина скважин – 16,5м; длина заряда – 12,5м. Плотность заряжения – 485 кг/м³.

При этом использовалось инициирование мгновенное.

Расчетные данные показали, что при предоставленной плотности ЭВВ: коэффициент политропы – 1,88, коэффициент адиабаты – 1,285; давление во взрывных газах во фронте потока – 11,8 МПа; давление в области активного протекания хим. реакции – 1050 МПа; скорость газового потока, истекающего из области высокого давления – 2934 м/с; скорость ударной воздушной волны, распространяющейся перед потоком – 3227 м/с.

Качественные характеристики гладкого взрывания при применении низкоплотных ЭВВ оказалось сравнимым с качеством гладкого взрывания при обычном применении гирляндных зарядов из патрона аммонита №6ЖВ. Результаты эксперимента, которые сделаны свидетельствуют о возможности результативного использования низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола, при производстве гладкого взрывания на открытых горных работах подтвердились.

Таким образом, получено экспериментально подтвержденное физико-математическое описание детонации низкоплотного ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола.

Представлено, что детонации в низкоплотных ЭВВ, сенсibilизированных гранул пенополистирола обладает струйным характером и показывает распространяющийся по заряду детонационно-подобной волной горения капле эмульсии в струях раскаленных взрывных газов, которые истекают из движущейся со скоростью детонации области высокого давления. Это доказывает **четвертое** научное положение.

4.5 Влияние химического состава окислительной фазы низкоплотных эмульпоров на их взрывчатые характеристики

Ввиду применения при создании матричной эмульсии для производства ЭВВ различных селитр важное значение приобретает оценка влияния

химического состава окислительной фазы эмульсии ЭВВ на взрывчатые характеристики низкоплотных эмульпоров.

В основу указанной оценки положены результаты, изложенные в п. 4.3 настоящей работы и в работе [32].

Рассматривались эмульпоровы, матричные эмульсии которых имели следующие составы:

- состав №1 (NH_4NO_3 – 78,0 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза – 6,5 %);
- состав №2 (NH_4NO_3 – 62,0 %, NaNO_3 – 15,0 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза – 7,5 %);
- состав №3 (NH_4NO_3 – 48,7 %, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 27,8 %, H_2O – 15,5 %, топливная фаза – 8,0 %).

Состав эмульсий формировался на основе методики работы [16]. Плотность ЭВВ в ходе экспериментов изменялась путем регулирования объемов смешиваемых гранул пенополистирола и матричной эмульсии. Использовались гранулы пенополистирола средним диаметром 3 мм и насыпной плотности 0,05 г/см³.

Экспериментально определялись скорости детонации и величины коэффициента политропы ЭВВ. Во избежание ошибочных выводов о детонационных свойствах ЭВВ, обусловленных возможной близостью принятых при исследовании диаметров зарядов к критическому диаметру, при опытах использовались заряды различных диаметров. Инициирование зарядов производилось от промежуточного детонатора, состоящего из системы НЭСИ Искра-С-0 и шашки ПТП-750П.

В качестве методики измерения скорости детонации и величины коэффициента политропы ЭВВ была принята методика, изложенная в работе [17]. В основу последней положено одновременное измерение как скорости детонации ЭВВ, так и скорости ударной волны, вызванной данным взрывом в среде с хорошо известной ударной адиабатой. Указанные измерения производятся с применением аппаратуры «Handitrap VOD recorder» (или

аналогичной, реализующей «реостатный» метод измерения). Полученные данные позволяют на основе уравнений газо- и гидродинамики получить искомый коэффициент.

Опыты проводились с размещением заряда в воде. Вода является средой с надежно определенной ударной адиабатой [10], не вступает в экзотермическую реакцию с продуктами взрыва и легкодоступна.

Полигонные испытания проводились на предприятиях: Ковдорский ГОК (г. Ковдор), ОАО «Ураласбест» (г. Асбест), АО «ПВВ» (г. Междуреченск), рудник «Удачный» АК «АЛРОСА» (г. Удачный).

В связи с относительно низким детонационным давлением при взрыве низкоплотного эмульпора в методику измерений [17] было внесено изменение способа размещения измерительного кабеля в заряде, а именно, кабель приклеивался не к картонной оболочке заряда, а к стальному стержню квадратного сечения 3х3 мм, размещаемому по оси заряда. Данный способ размещения измерительного кабеля позволял практически в четыре раза увеличить давление, действующее на кабель, вследствие отражения волн нагрузки от твердой поверхности стержня [10]. Данное обстоятельство позволяло обеспечить уровень давления, сжимающего измерительный кабель в воде до 3...4 ГПа, что обеспечивало надежность «срабатывания» кабеля.

Применяемая схема измерений представлена на рисунке 4.8. Данная схема позволяла осуществлять непрерывную фиксацию скорости разрушения измерительного провода, как в ВВ, так и в воде вблизи заряда.

На участке провода, расположенного в заряде ВВ, измерения показывают скорость детонации взрывчатого вещества $D_{ВВ}$, а на участке, расположенном в воде – скорость распространения ударной волны D_x .

Введем следующие обозначения: k , γ – коэффициенты политропы и адиабаты продуктов взрыва; $\rho_{ВВ}$, ρ_{H_2O} – плотности ВВ и воды; P_H , P_x –

давления во фронте детонационной волны и фронте ударной волны в воде, соответственно; u_e – массовая скорость воды за фронтом ударной волны.

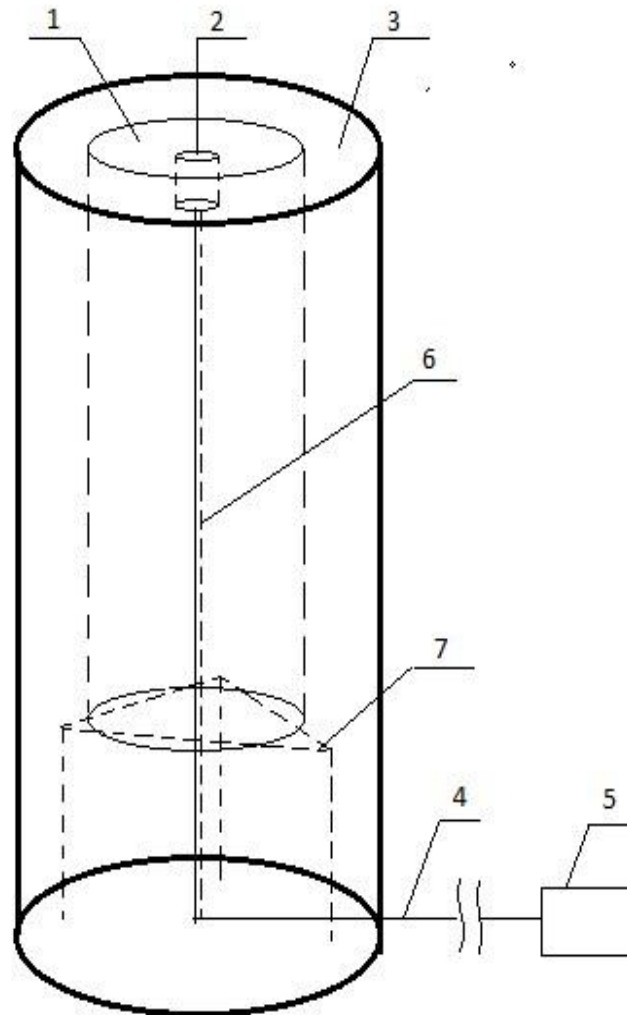


Рисунок 4.8 – Принципиальная схема эксперимента: 1 – заряд ВВ, 2 – промежуточный детонатор, 3 – вода, 4 - датчиковый провод «Probecable-НТ», 5 – реостатный прибор «Handitrap VOD recorder», 6 – стальной стержень 3х3 мм, подставка под заряд

Давление в ударной волне в воде равно:

$$P_x = \rho_{H_2O} D_x u_e. \quad (4.55)$$

Ударную адиабату воды принимаем в виде [10]

$$D_x = 1483 + 25306 \lg \left(1 + \frac{u_e}{5190} \right), \text{ м/с.} \quad (4.56)$$

На основании (4.55), (4.56) имеем:

$$P_x = \rho_{H_2O} D_x \cdot 5190 \left(10^{\frac{D_x - 1483}{25306}} - 1 \right). \quad (4.57)$$

Согласно [10] давление в продуктах взрыва на границе с водой равно

$$P_{BB} = \frac{\rho_{BB} D_{BB}^2}{k+1} \left(1 - \left(u_x - \frac{D_{BB}}{k+1} \right) \cdot \frac{k^2 - 1}{2k D_{BB}} \right)^{\frac{2k}{k-1}}. \quad (4.58)$$

Из условия $P_x = P_{BB}$ на границе «продукты взрыва-вода» и уравнений (4.55)-(4.58) по известным значениям параметров ρ_{H_2O} , ρ_{BB} , D_{BB} , D_x численными методами определяется значение коэффициента политропы продуктов взрыва k .

Результаты полигонных испытаний по измерению скоростей детонации в ЭВВ и ударной волны в воде представлены в таблице 4.4.

Анализ таблицы 4.4 показывает, что эксперименты выполнены при величине диаметров заряда выше предельных значений, поэтому представляется возможность верификации предложенной модели детонации низкоплотных ЭВВ сличением измеренных и расчетных значений скоростей детонации и коэффициентов политропы.

Таблица 4.4 – Результаты полигонных испытаний по измерению скорости детонации и ударной волны в воде представлены

Состав ЭВВ	Диаметр заряда, мм	Плотность эмульпора, г/см ³	Скорость детонации, м/с	Скорость ударной волны в воде, м/с
1	180	0,472	3010	2095
		0,558	3160	2150
		0,622	3195	2180
	220	0,472	3020	2100
		0,558	3150	2165
		0,622	3190	2180
2	180	0,484	2900	2080
		0,574	3080	2100
		0,642	3110	2110
	220	0,484	2890	1990
		0,574	3010	2070
		0,642	3100	2100
3	180	0,492	2940	1950
		0,585	3060	2040
		0,657	3160	2100
	220	0,492	2950	1970
		0,585	3080	2060
		0,657	3150	2110

В таблице 4.5 представлены экспериментальные и расчетные значения скорости детонации и коэффициента политропы эмульпоров. Анализ таблицы показывает согласие между экспериментальными и расчетными значениями указанных величин.

Таблица 4.5 – Сравнение экспериментальных и расчетных значения скорости детонации и коэффициента политропы эмульпоров.

Состав ЭВВ	Плотность эмульпора, г/см ³	Скорость детонации, м/с		Коэффициент политропы	
		Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
1	0,472	3020	2970	1,74	1,71
	0,558	3150	3120	1,80	1,82
	0,622	3190	3240	1,95	1,91
2	0,484	2860	2890	1,81	1,84
	0,574	3030	3010	1,97	1,94
	0,642	3070	3100	1,99	2,00
3	0,492	2950	2980	2,04	2,01
	0,585	3080	3060	2,00	2,03
	0,657	3150	3130	2,09	2,08

Для наглядности полученных результатов на рисунке 4.9 представлены графики расчетной зависимости скорости детонации низкоплотных эмульпоров, имеющих различный химический состав, от их плотности. На координатной плоскости нанесены также экспериментальные точки.

Аналогично на рисунке 4.10 представлены графики расчетной зависимости коэффициента политропы эмульпоров, имеющих различный химический состав, от их плотности. На координатной плоскости нанесены также соответствующие экспериментальные значения.

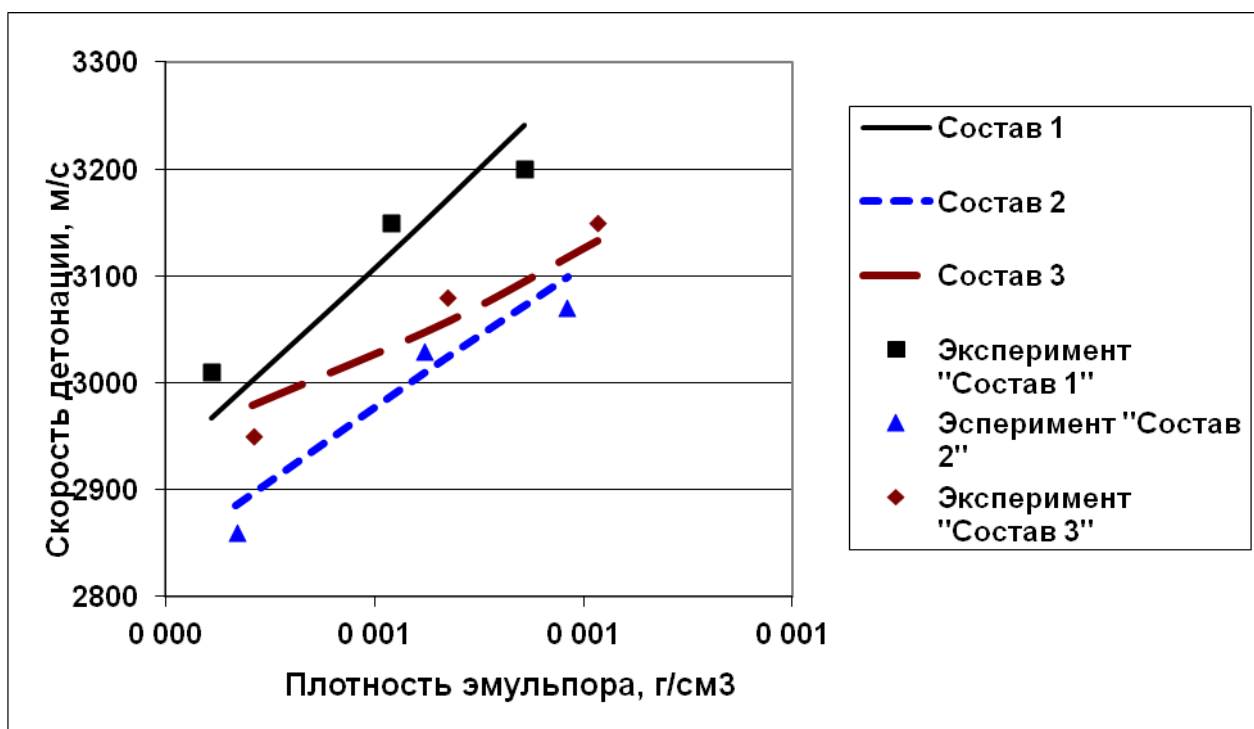


Рисунок 4.9 – Зависимость скорости детонации низкоплотных эмульпоров, имеющих различный химический состав, от их плотности

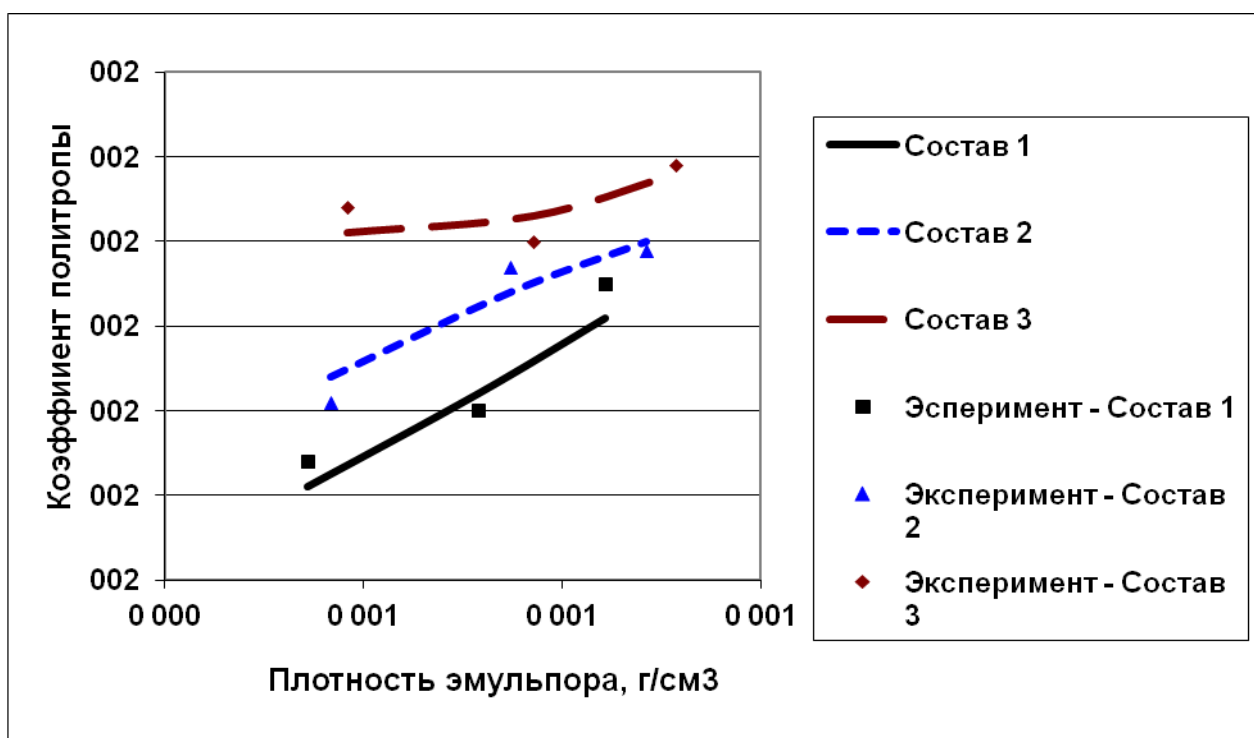


Рисунок 4.10 – Зависимости коэффициента политропы эмульпоров, имеющих различный химический состав, от их плотности

Анализ полученных результатов показывает, что наилучшие взрывчатые характеристики имеют эмульпоры с окислительной фазой на базе аммиачной селитры, что согласуется с результатами работы [32], где рассматривались эмульпоры с плотностью более $0,73 \text{ г/см}^3$.

4.6 Обоснование требований к удельной электропроводности эмульпоров

Настоящий параграф разработан по материалам работы [40] в которой дана теоретическая оценка влияния структуры и электропроводности ЭВВ на возможность ее разрушения под воздействием заряженных гранул пенополистирола, находящимся в изучаемой эмульсии.

Принимаем следующую физическую модель, которая описывает коагуляцию частиц (глобул) в эмульсиях, используемых для изготовления ЭВВ.

Электрическое поле, образованное в эмульсии, заряженной гранулами полипропилена, поляризует окружающую гранулу среду, вследствие отличия в диэлектрических проницаемостях окислительной и топливной фаз, появляется диполь, который расположен вдоль силовых линий поля. Он образует дополнительное электрическое поле, влияющее на движение и взаимодействие частиц в эмульсии. Эффект поляризации, зависит от некоторых факторов, включая показатель заряда гранулы, диэлектрические характеристики окислительной и топливной фаз, концентрацию гранул в эмульсии.

Отмечается, чем выше заряд гранулы и различие в диэлектрических проницаемостях, тем интенсивнее выражен эффект поляризации. Воздействие электрического поля на коалесценцию капель в эмульсии является сложным процессом, с одной стороны который показывает, что поляризационные силы способствуют притяжению между каплями, что повышает вероятность их

объединения. С другой стороны – электростатическое отталкивание между одноименными зараженными каплями препятствуют коалесценции.

Эффект полностью зависит от баланса этих сил, определяющийся свойствами эмульсии и условиями ее хранения и обработки [22, 23, 92].

Теоретический метод основан на использовании метода молекулярного моделирования, полученные результаты лучше показывают механизм стабилизации и дестабилизации эмульсии, которая содержит заряженные гранулы.

Введем следующие обозначения для модели. Δ – средний размер глобулы эмульсии, м; R_{gr} – средний радиус гранулы пенополистирола, м; U – потенциал заряда на поверхности гранулы пенополистирола, В; ϵ_o – относительные диэлектрические проницаемости окислительной и топливной фазы, соответственно; ϵ_o – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м. σ_o – наибольшая поверхностная плотность поляризационного заряда окислительной фазы глобулы, К/м²; σ_m – поверхностная плотность поляризационного заряда на пленке топливной фазы, разделяющей глобулы, К/м²; q_o – поляризационный заряд диполя-глобулы, К; q_m – поляризационный заряд пленки, разделяющей глобулу, К; h_o – начальная толщина пленки топливной фазы, м; h – текущая толщина пленки топливной фазы, м; F – сжимающая сила, действующая на поверхность топливной пленки, разделяющей глобулы, Н; η – динамическая вязкость топливной фазы, Па·с; u_o – начальная скорость движения поверхности пленки топливной фазы в направлении уменьшения ее толщины, м/с; u – текущая скорость движения поверхности пленки топливной фазы в направлении уменьшения ее толщины, м/с; ρ_o – плотность окислительной фазы, кг/м³; ρ_m – плотность топливной фазы, кг/м³; ξ – отношение массы топливной фазы к массе окислительной фазы в эмульсии; τ – время слияния окислительных фаз смежных глобул, с; t – текущее время, с; $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля, вызванного электризованной гранулой пенополистирола; $\vec{P}_o$ – вектор поляризации

окислительной фазы глобулы; P_m – вектор поляризации пленки топливной фазы.

Соответственно [19,76] в ЭВВ величина глобул эмульсии равна 1...10 мкм. Величина гранул пенополистирола, используемых для сенсibiliзирующих ЭВВ равна 1...5 мм [19, 76, 108]. Поэтому, выполняется следующее условие:

$$R_{gr} \gg \Delta. \quad (4.59)$$

Учитывая (1), электрическое поле $\vec{E}$ считается в границах глобулы, а поляризационные поля $\vec{P}_o$, $\vec{P}_m$ в границах соответствующих фаз сходными.

Далее воспользуемся работами [175, 176].

При поляризации окислительной фазы глобулы, внутри глобулы возникает однородное электрическое поле с напряженностью $\vec{E}_*$, равной

$$\vec{E}_o = -\frac{\vec{P}_o}{3\epsilon_o}. \quad (4.60)$$

В таком варианте, общее суммарное поле внутри окислительной фазы глобулы рассчитывается как:

$$\vec{E}_{\Sigma} = \vec{E} - \vec{E}_o = \vec{E} - \frac{\vec{P}_o}{3\epsilon_o}. \quad (4.61)$$

$$\text{Однако} \quad \vec{P}_o = (\epsilon_{of} - 1)\epsilon_o \vec{E}_{\Sigma}. \quad (4.62)$$

На основании (4.61), (4.62), имеем

$$\vec{P}_o = \frac{3(\epsilon_{of} - 1)}{\epsilon_{of} + 2} \epsilon_o \vec{E}. \quad (4.63)$$

Для модуля дипольного момента глобулы $P_o V_{\Sigma}$ справедливо равенство

$$q_o \Delta = P_o V_{\text{эл}}, \quad (4.64)$$

где $V_{\text{эл}}$ – объем глобулы ($V_{\text{эл}} = \frac{\pi}{6} \Delta^3$).

На основании (4.63) и (4.64), получаем

$$q_o = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{оф}} - 1}{\varepsilon_{\text{оф}} + 2} \varepsilon_o E \Delta^2. \quad (4.65)$$

В таком случае, средняя поверхностная площадь заряда, определенная поляризацией исключительно окислительной фазы глобулы равна:

$$\sigma_o = \frac{\varepsilon_{\text{оф}} - 1}{\varepsilon_{\text{оф}} + 2} \varepsilon_o E. \quad (4.66)$$

Поле $\vec{E}$, которое оказывает поляризующее воздействие и на топливную фазу, которая разделяет в виде тонкой пленки смежные глобулы эмульсии. При этом поляризации топливной фазы образует внутри данной фазы однородное электрическое поле с напряженностью $-\frac{\vec{P}_m}{\varepsilon_o}$. Суммарное поле внутри пленки (без учета воздействия поля поляризованной глобулы) равно

$$\vec{E}_m = \vec{E} - \frac{\vec{P}_m}{\varepsilon_o}. \quad (4.67)$$

$$\text{Однако} \quad \vec{P}_m = (\varepsilon_m - 1) \varepsilon_o \vec{E}_m. \quad (4.68)$$

С учетом (4.67), (4.68), имеем следующее:

$$\vec{P}_m = \frac{\varepsilon_m - 1}{\varepsilon_m} \varepsilon_o \vec{E}. \quad (4.69)$$

Показатель заряда q_m на поверхности топливной фазы, определенного поляризацией предоставленной фазы, рассчитывается из следующего уравнения (V_m – объем топливной фазы между смежными глобулами)

$$q_m = \frac{P_m V_m}{h_o} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\varepsilon_m - 1}{\varepsilon_m} \varepsilon_o E \Delta^2. \quad (4.70)$$

В таком варианте средняя плотность поверхностного заряда, определенного поляризацией исключительно топливной пленки, равно:

$$\sigma_m = \frac{\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} \varepsilon_o E. \quad (4.71)$$

Действительный поляризационный заряд q_* на поверхности топливной пленки, которая разделяет смежные глобулы, учитывая формулы (4.70), (4.71) равен:

$$q_* = q_o - q_m = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\varepsilon_{o\phi} - 1}{\varepsilon_{o\phi} + 2} - \frac{\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} \right) \varepsilon_o E \Delta^2. \quad (4.72)$$

Реальная напряженность электрического поля E_* внутри пленки топливной фазы находится из следующего уравнения, с учетом формул (4.66), (4.70).

$$E_* = E - \frac{\sigma_o - \sigma_m}{\varepsilon_o} = \left(\frac{3\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} - \frac{\varepsilon_{o\phi} - 1}{\varepsilon_{o\phi} + 2} \right) E. \quad (4.73)$$

В результате, диэлектрофоретическая сила, которая действует на поверхность топливной пленки со стороны смежных глобул и стремится сблизить данные глобулы, равна:

$$F = q_* E_* = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\varepsilon_{o\phi} - 1}{\varepsilon_{o\phi} + 2} - \frac{\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} \right) \left(\frac{3\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} - \frac{\varepsilon_{o\phi} - 1}{\varepsilon_{o\phi} + 2} \right) \varepsilon_o E^2 \Delta^2. \quad (4.74)$$

Скорость сближения поверхностей топливной пленки u , разделяющей смежные глобулы, под воздействием силы F рассчитывается из уравнения Рейнольдса [90]:

$$F = \frac{3\pi\eta\left(\frac{\Delta}{2}\right)^4}{2h^3} u. \quad (4.75)$$

Используя (4.74), (4.75), рассчитываем:

$$u = \frac{16h^3}{3\eta} \left(\frac{\varepsilon_{o\phi} - 1}{\varepsilon_{o\phi} + 2} - \frac{\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} \right) \left(\frac{3\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} - \frac{\varepsilon_{o\phi} - 1}{\varepsilon_{o\phi} + 2} \right) \varepsilon_o \left(\frac{E}{\Delta} \right)^2. \quad (4.76)$$

Среднее значение начальной толщины топливной пленки между глобулами находится из соотношения масс топливной и окислительной фаз эмульсии и равно:

$$h_o = \frac{\rho_{o\phi}\zeta}{3\rho_m} \Delta. \quad (4.77)$$

Предположим, $U(t)$ – потенциал заряда гранулы пенополистирола в момент времени t (принимая, что $t = 0$ в момент ввода гранулы в эмульсию).

Максимальное значение напряженности электрического поля может достигаться на поверхности гранулы и равно:

$$E_{max} = \frac{U(t)}{R_{gr}}. \quad (4.78)$$

Как известно [60], падение потенциала на поверхности заряженной сферы в среде с удельным сопротивлением γ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\dot{\gamma}i}$ в зависимости от времени определяется зависимостью,

$$U(t) = U_o \exp\left(-\frac{t}{T_*}\right), \quad (4.79)$$

где U_o – начальный потенциал гранулы; T_* – характерное время процесса разрядки сферы (стекания заряда со сферической частицы).

$$T_* = \varepsilon_{эм} \varepsilon_o \eta b \quad (4.80)$$

Учитывая формулы (4.59), (4.65), (4.66), подставляем значение h_o (4.76) в уравнение (4.79) и находим начальную скорость сближения смежных глобул, которые расположены вблизи гранулы пенополистирола (в момент времени $t = 0$):

$$u_o = \frac{16}{81\eta} \left(\frac{\varepsilon_{оф} - 1}{\varepsilon_{оф} + 2} - \frac{\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} \right) \left(\frac{3\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} - \frac{\varepsilon_{оф} - 1}{\varepsilon_{оф} + 2} \right) \cdot \left(\frac{\zeta \rho_{оф}}{\rho_m} \right)^3 \varepsilon_o \left(\frac{U_o}{R_{gr}} \right)^2 \Delta. \quad (4.81)$$

Тем не менее, $u = -\frac{dh}{dt}$. Теперь на базе формул (4.76) и (4.81), имеем следующее уравнение движения, которое описывает сближение смежных глобул под воздействием диэлектрофоретических сил:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{u_o}{\Delta^3} \left(\frac{3\rho_m}{\rho_{оф}\zeta} \right)^3 h^3 \exp\left(-\frac{2t}{T_*}\right). \quad (4.82)$$

Интегрируя уравнение (4.82), рассчитываем:

$$\frac{1}{h(t)^2} = \frac{1}{h_o^2} + \frac{u_o T_*}{\Delta^3} \left(\frac{3\rho_m}{\zeta \rho_{оф}} \right)^3 \left(1 - \exp\left(-\frac{2t}{T_*}\right) \right), \quad (4.83)$$

где $h(t)$ – толщина пленки между смежными глобулами в области нормальной к линиям электрического поля в момент времени t .

На основании (4.77), (4.83) получаем

$$\frac{h_o}{h(t)} = \left(1 + \frac{3\rho_m}{\zeta \rho_{оф}} \cdot \frac{u_o T_*}{\Delta} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_*}} \right) \right)^{0,5}. \quad (4.84)$$

В следующих расчетах принимаем, что при снижении толщины топливной пленки до размера $2\Delta_*$ (Δ_* – размер нанокристаллов окислительной

фазы [35]) совершается слияние смежных глобул, так как топливная пленка, которая разделяет глобулы, становится до такой степени тонкой, что способна нарушаться даже при небольших возмущениях системы «смежные глобулы – топливная пленка, разделяющая эти глобулы».

Учитывая уравнения (4.77), (4.80), (4.82) и (4.84) рассчитывается сопротивление эмульсии, при которой разрушение эмульсии в электростатическом поле гранулы пенополистирола не происходит:

$$\gamma < \frac{27\eta}{16\varepsilon_{эм}\varepsilon_o^2} \left(\frac{\rho_m}{\zeta\rho_{оф}} \right)^2 \left(\frac{R_{gr}}{U_o} \right)^2 \frac{\left(\frac{\zeta\rho_{оф}}{6\rho_m} \cdot \frac{\Delta}{\Delta_*} \right)^2 - 1}{\left(\frac{\varepsilon_{оф} - 1}{\varepsilon_{оф} + 2} - \frac{\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} \right) \left(\frac{3\varepsilon_m - 1}{2\varepsilon_m} - \frac{\varepsilon_{оф} - 1}{\varepsilon_{оф} + 2} \right)}. \quad (4.85)$$

Перейдем к обсуждению результатов. Предельное воздействие на эмульсию со стороны поля гранулы пенополистирола, может возникать при ее максимальной электризации, в данном варианте:

$$\frac{R_{gr}}{U_o} = \frac{1}{E_{np}}, \quad (4.86)$$

где E_{np} – критерий напряженности электрического поля, при котором совершается пробой эмульсии.

Далее рассмотрим эмульсии следующих химических составов:

№1 – NH_4NO_3 – 77,0 %, H_2O – 16,0 %, топливная фаза – 7,0 %;

$\rho_{оф}^{№1} = 1,37$ г/см³; $\Delta_*^{№1} = 14$ нм.

№2 – NH_4NO_3 – 46,0 %, $Ca(NO_3)_2$ – 30%, H_2O – 16,0 %, топливная фаза – 8,0 %; $\rho_{оф}^{№2} = 1,49$ г/см³; $\Delta_*^{№2} = 36$ нм.

Показатели величины нанокристаллов окислительной фазы заимствованы из работы [34].

На рисунке 4.11 и рисунке 4.12 показаны зависимости критической удельной электропроводности эмульсий (размер $\frac{1}{\gamma}$) от размера глобул.

При построении зависимостей принимали следующие характеристики показателей: $E_{np} = 1000 \text{ В/см}$ [76]; $\varepsilon_{эм} \approx 10$ (рассчитано по уравнению Лихтенеккера для мелкодисперсных смесей) ; $\varepsilon_m \approx 2$; $\frac{\varepsilon_{оф} - 1}{\varepsilon_{оф} + 2} \approx 1$, т.к. $\varepsilon_{оф} \gg 1$; $\eta \approx 0,01 \text{ Па*с}$.

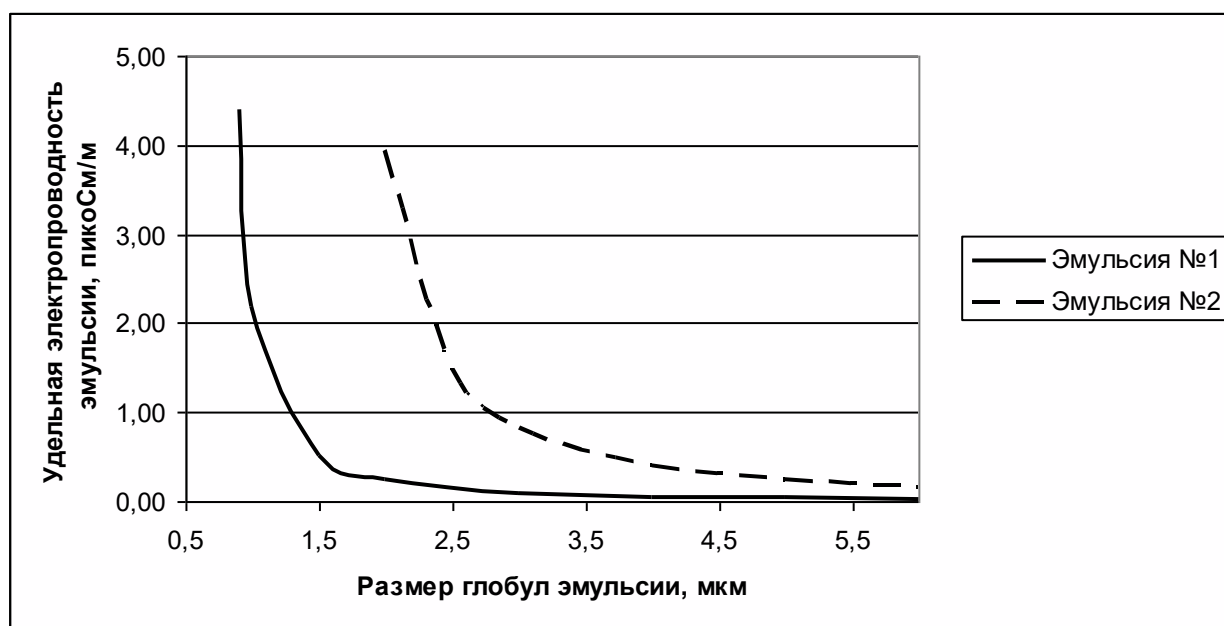


Рисунок 4.11 – Зависимость критической удельной электропроводности эмульсий от размера глобул

Анализ рисунка 4.11 показывает, что при уменьшении размера глобул эмульсии для ее сохранения от разрушения диэлектрофоретическими силами следует увеличивать ее удельную электропроводность. Однако при достаточно высокой электропроводности эмульсии ЭВВ на ее основе теряют чувствительность к инициирующему импульсу [76]. Поэтому сенсibilизироваться гранулами пенополистирола могут эмульсии, имеющие размеры глобул больше некоторой характерной величины, зависящей от химической природы окислительной фазы эмульсии.

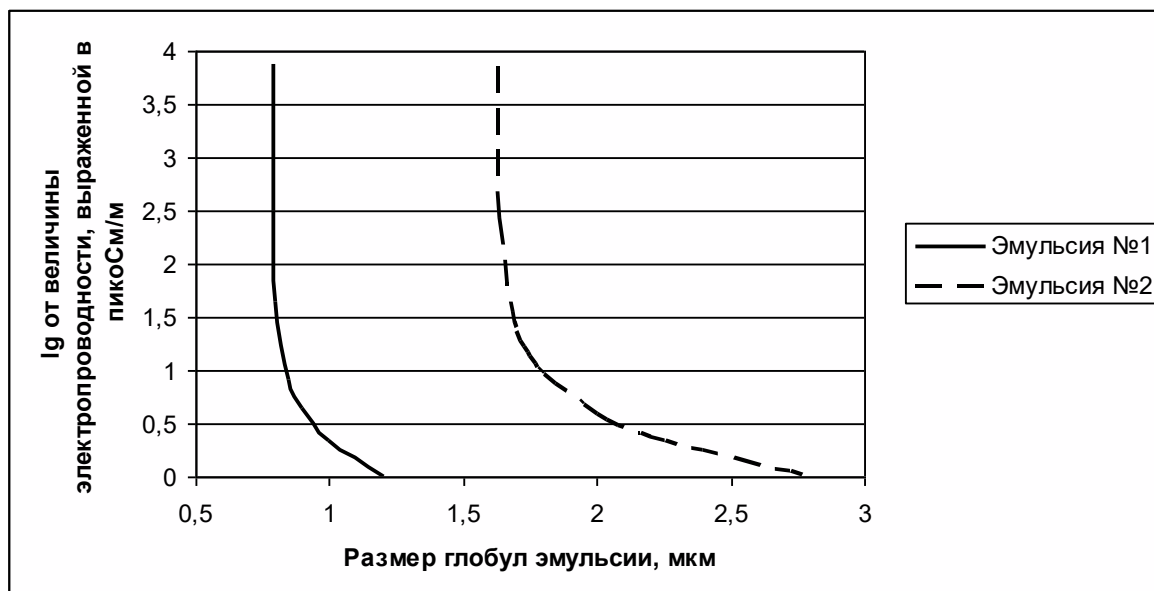


Рисунок 4.12 – Зависимость критической удельной электропроводности эмульсий от размера глобул в области глобул критически малых размеров

На рисунке 4.12. показаны области глобул критически небольших размеров. Под критически небольшими размерами понимаются такие размеры, при которых толщина топливной пленки, отгорая разделяет смежные глобулы, располагает размерами, сравнимыми с размерами зародышей нанокристаллов окислительной фазы: $h_o \sim \Delta_*$.

При подобных размерах глобул для сохранения эмульсии от разрушения диэлектрофоретическими силами нужно обеспечить или понижение потенциала U_o , или существенно увеличить электропроводимость эмульсии.

Первый вариант может быть достигнут посредством обработки поверхности гранул пенополистирола антистатическими средствами (сажа или соединения с ионной проводимостью [52]).

При втором варианте, при использовании специальных добавок в топливную фазу для понижения ее удельного сопротивления [28, 55], что ускоряет процесс стекания электрического заряда с гранулы пенополистирола.

4.7 Выводы по главе 4

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. Это доказывает **четвертое** научное положение.

Разработана методика определения основных параметров детонации в низкоплотных эмульпорах, 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 эмульпорах связанной «гранульно-воздушной» системы.

Получено выражение для определения плотности эмульпора, 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 эмульпора наблюдается благоприятное для проведения щадящего взрывания постепенное возрастание давления в продуктах разложения ВВ.

Экспериментально и теоретически доказано, что наилучшие взрывчатые характеристики имеют эмульпоры с окислительной фазой на базе аммиачной селитры.

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

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 эмульпоров.

ГЛАВА 5

ПРИМЕНЕНИЯ СУЛЬФИДОУСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И НИЗКОПЛОТНЫХ ЭМУЛЬПОРОВ В ГЕОТЕХНОЛОГИИ

5.1 Технология заряжания эмульсионных взрывчатых веществ в восстающие скважины с использованием рукавов-оболочек

Настоящий параграф написан на основании работ [139, 142, 143].

В настоящий период времени широкое распространение получило заряжание взрывных скважин гранулированными и водоземными промышленными взрывчатыми веществами – с применением самоходных напорно-подающих насосных установок [87].

ЭВВ возможно заряжать как сухие, так и обводненные скважины, тем не менее данные ВВ имеют ограничения по условиям применения. К примеру, при применении ЭВВ в обводненных скважинах нужно учитывать их удельную плотность и водоустойчивость. В случае, когда плотность ВВ меньше плотности воды - заряд может всплывать, что приводит к нарушению контакта заряда с горной породой. При этом отмечается, что при заряжании скважин, которые пробурены в сильно трещиноватых массивах горных пород, данные ВВ могут существенно растекаться по трещинам. В итоге будет иметь место существенный перерасход ВВ по причине растекания его по трещинам; что касается сульфидных руд, то данная ситуация может привести к дополнительной опасности разогрева ВВ на большой площади контакта ВВ с рудой и - взрыву.

Главной проблемой, которая возникает при заряжании ЭВВ в восходящую скважину, становится удержание заряда, в особенности при условии высокой обводненности горного массива, в случае выдавливания ЭВВ из скважины внутрипластовыми водами.

При этом при применении ЭВВ в обводненных скважинах учитывается гидродинамическая давление, которое оказывает вода на заряд. Такое

давление приводит к деформации или разрушению заряда, в особенности при больших длинах (глубинах) скважин.

В настоящий период времени, основным наиболее важным является использование патронов в виде длинномерного тканевого рукава с защитным торцом, который размещается в скважине.

В настоящее время перспективным является применение патронов в виде длинномерного тканевого рукава с зашитым торцом, размещаемого в скважине. В данной ситуации предполагается применить рукав для создания патрона взрывчатого вещества, который содержит водонепроницаемую оболочку с герметичным верхним торцом и размещен с закреплением внутри шланга от подающего зарядного устройства.

Отметим тот факт, что оболочку важно заполнить промышленным взрывчатым веществом (гранулированным, водоземлюльсионным, водногелевым), ее длина одинакова с длиной заражаемой части скважины, также оболочка выполняется из тканого или нетканого полотна с гидрофобной пропиткой посредством сшивания боковых срезов полотна по указанной длине с поперечным прошиванием через одинаковые промежутки размером не менее 4х диаметров оболочки, в данном процессе оставляется боковой проход для шланга, который подает зарядное устройство. Диаметр оболочки должен быть больше диаметра заражаемой скважины [142].

Реализация данного процесса предполагает несколько основных преимуществ: первое – водонепроницаемость оболочки обеспечивает устойчивость взрывчатого вещества даже в условиях повышенной влажности или непосредственного контакта с водой, что является важным при проведении взрывных работ в шахтах. Герметичный верхний торец предотвращает высыпание взрывчатых вещества и тем самым обеспечивает сохранность при хранении и транспортировании. Фиксирование патрона внутри шланга, который подает зарядное устройство, упрощает и также ускоряет процесс зарядки шпуров или скважин, такой процесс актуален на участках с ограниченным пространством и сложными условиями доступности.

Помимо этого, такая конструкция понижает риск рассыпания взрывчатого вещества, что обеспечивает безопасность проведения взрывных работ. В некоторых случаях исполнения конструкции, поперечная прошивка с оставлением бокового прохода для шланга подающего зарядного устройства может быть постоянно повторяющейся или кососимметричной.

Рукав, применяемый для создания патрона, может изготавливаться как из полиэтилена, так и других полимеров, которые обладают достаточной прочностью и водонепроницаемостью. Данный процесс, особенно в частных случаях может выполняться перпендикулярно продольной оси рукава, также и под углом.

Оболочка должна быть выполнена с поперечным прошиванием под углом к продольной ее оси через одинаковые промежутки, размером не менее 4-х диаметров оболочки и также с оставлением бокового прохода для шланга зарядного устройства с одной боковой стороны оболочки между ее стенкой и прошивками. Что касается открытого нижнего торца, то оболочка должна оснащаться клапаном для герметизации, который заполняется ВВ оболочки при извлечении шланга от зарядного устройства.

Примеры исполнения рукава для патрона ВВ приведены на рисунке 5.1. На этом рисунке показано, что патрон ВВ содержит водонепроницаемый рукав 1 в виде трубчатой оболочки с герметичным верхним торцом 2 и открытым нижним торцом 3. Внутри рукава размещен заряд взрывчатого вещества 4, который окружен демпфирующим материалом 5, заполняющим пространство между зарядом ВВ и внутренней поверхностью рукава, далее открытый нижний торец 3 рукава герметизирован пробкой 6, которая закреплена при помощи обжимного кольца 7. При этом пробка 6 выполнена из материала, который обеспечивает воспламенение заряда ВВ при контакте с водой.

В таком же варианте исполнения, рукав 1 может быть изготовлен из биоразлагаемого материала, что понижает отрицательное воздействие на окружающую среду после применения патрона ВВ. в данном варианте, демпфирующий материал 5 выбирается из биоразлагаемых элементов.

Поперечное прошивание рукава проводится под углом к его продольной оси (от 30 гр. до 45 гр.), в некоторых вариантах исполнения устройства поперечная прошивка может выполняться перпендикулярно продольной оси рукава.

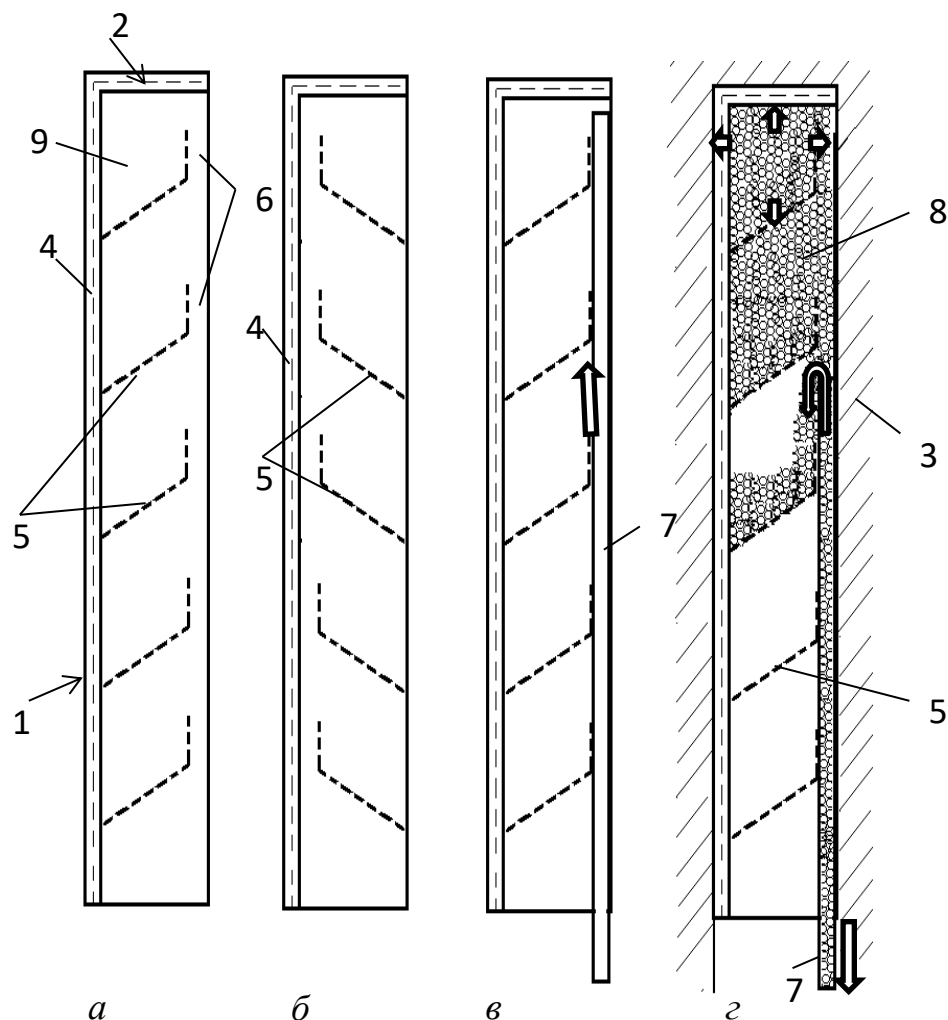


Рисунок 5.1 – Схемы расположения рукава для патрона ВВ в скважинах: *а, б* – варианты исполнения рукава патрона ВВ в восходящей скважине; *в* – размещение шланга от зарядного устройства в рукаве; *г* – размещение рукава со шлангом в восстающей скважине и заполнении рукава для получения патрона ВВ

Для увеличения водонепроницаемости, внешнюю поверхность рукава можно покрыть тонким слоем воска или иного гидрофобного состава. Отметим, что на рисунке 5.1,*а*. показан первый вариант, соответственно

которому прошивки 5 проходят от шва в направлении к противоположному расположению стенки рукава. На рисунке 5.1,б показан вариант, когда прошивки идут от стенки рукава в направлении ко шву. Для таких вариантов боковой проход для шланга зарядного устройства может выполняться с одной боковой стороны рукава между стенкой рукава и прошивками, такая конструкция является простой и технологичной.

Рассмотрим другой вариант: диаметр рукава больше диаметра заряжаемой скважины. Данное устройство применяют следующим образом. Изначально в восходящей скважине располагают промежуточный детонатор на волноводе или детонирующем шнуре, то есть до проектной отметки установки промежуточного детонатора в скважине, также такой детонатор оснащается автономным устройством фиксации в скважине.

На рисунке 5.1,в показан сам процесс, то есть рукав 1 одевают на зарядный шланг 7 и подают его в восходящую скважину, после осуществляют заряд скважины 3 ВВ извлекая зарядный шланг 7 из рукава 1. После извлекают рукав 1 из скважины 3, при этом ВВ остается в скважине 3. Так как прошивки обладают однонаправленным положением, то при сборке «в гармошку» рукав собирается на шланге по одну общую сторону.

В случае ввода «гармошки» в скважину складки спадают и не цепляются за стенки скважины. Далее происходит включение зарядного устройства и подача в ВВ 8 в рукав 1 по шлангу 7 (показано на рисунке 5.1,г.). В изначальный момент времени конец шланга 8 располагается в боковом проходе на уровне проема доступа к полости 9 первого кармана, который ограничен прошивкой и верхним торцом рукава. Под напором ВВ проходят сквозь проем и заполняется полость 9 первого кармана, далее, при заполнении кармана воздух из него выходит через поры ткани рукава 1 и в боковом шве, при этом ВВ остается внутри оболочки рукава 1.

Наибольший сравнительно диаметра скважины рукав распирается и тем самым удерживается силами трения в скважине. В данном варианте, за счет не идеальности внутренней поверхности скважины (трещины в горном массиве,

вывалы при бурении), и также благодаря эластичности материалов рукава, обеспечивается плотное облегание стенок скважины, что критически важно при предотвращении утечки ВВ, в особенности в обводненных условиях или при применении сыпучих взрывчатых веществ. Плотное прилегание рукава к стенкам скважины также содействует наиболее результативной передаче энергии взрыва горному массиву, повышая радиус дробления и понижая отрицательное воздействие на окружающую среду.

После всего шланг опускают до проема ниже находящегося кармана и процесс по его заполнению воспроизводится аналогично заполнению ВВ и так до последнего кармана.

Из заряжаемой скважины достается зарядный шланг 7 с размеренной скоростью, которая равна скорости образования колонки восстающего скважинного заряда ВВ (скорость извлечения зарядного шланга равна соотношению объемной производительности зарядного устройства к внутреннему объему одного погонного метра заражаемой скважины).

Также, поперечные прострочки рукава исполняют роль запорных устройств и делят колонку образуемого заряда на множество элементов, при этом препятствуя объединениям плотности ВВ по длине восстающего заряда [108].

Проникновение воды из скважины внутрь рукава неосуществимо вследствие гидрофобной обработки ткани рукава, так как данная обработка образует микроскопический барьер, который отталкивает воду и мешает ее проникновению сквозь структуру ткани внутрь рукава. Молекулы гидрофобного состава, который прочно связан с волокнами материала силами адгезии, образуют поверхностный слой с малым поверхностным натяжением, что существенно повышает угол контакта капли воды с тканью и снижает ее смачивание.

Можно также применить иную модель рукава для образования патрона взрывчатого вещества [143]. Данная модель, показанная на рисунке 5.2, строится следующим образом – рукав включает водонепроницаемую и также

герметичную трубчатую оболочку для расположения внутри нее шланга от зарядного устройства с одной стороны, которая подает в оболочку промышленное взрывчатое вещество для создания патрона ВВ, также оболочка выполняется как из тканого, так и нетканого полотна с гидрофобной пропиткой посредством сшивания боковых срезов полотна по длине, при этом диаметр оболочки выполняется больше диаметра заряжаемой скважины. Что касается герметичного торца, то он представляет собой верхний торец оболочки, который вводится в восходящую скважину, при этом оболочка выполняется газопроницаемой с поперечным прошиванием под углом к ее продольной оси через одинаковые интервалы не менее 4х диаметров оболочки и сохранением бокового прохода для шланга зарядного устройства между стенкой оболочки и прошивками. При этом проход у одних прошивок образован с одной стороны стенки оболочки, проход у других прошивок сформирован у противоположной стенки, каждая из которых располагается между двумя первыми прошивками.

Винтообразное расположение образованных прошивками карманов позволяет получать наименьшую по длине сборку рукава «в гармошку», которая предварительно собиралась для облегчения расположения рукава на шланге зарядного устройства перед подачей рукава на шланге в восстающую скважину. При этом тканевые складки, которые сформировались при собирании рукава «в гармошку», могут укладываться по винтовой линии, чтобы не мешать друг другу, что обеспечивает получение компактной сборки рукава «в гармошку».

В некоторых вариантах выполнения данного устройства поперечная прошивка с сохранением бокового прохода для шланга подающего зарядного механизма может постоянно повторяться или быть кососимметричной. При этом в некоторых случаях выполнение подобной конструкции поперечная прошивка может быть как перпендикулярна продольной оси рукава, также и под углом к оси.

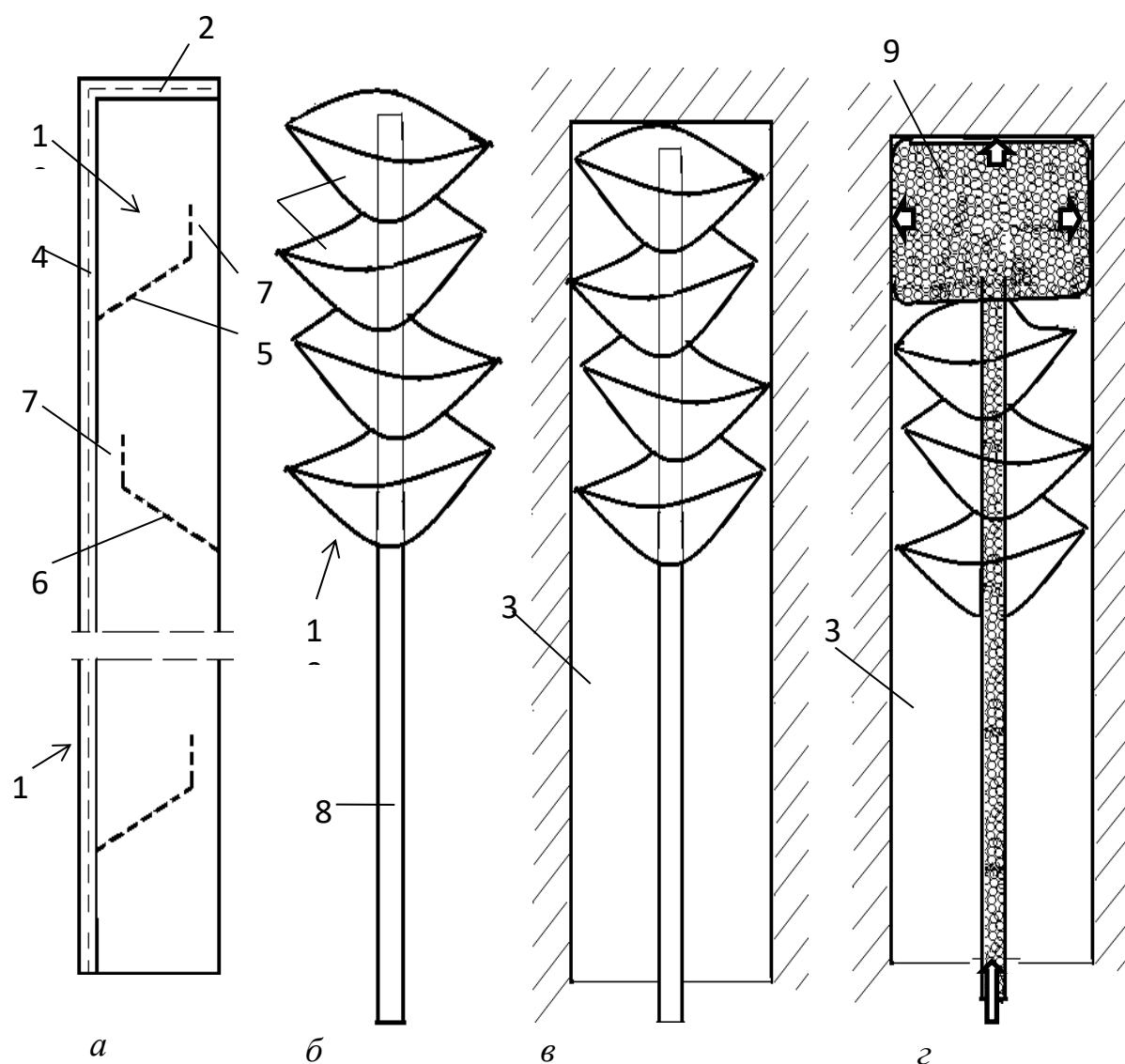


Рисунок 5.2 – Схемы размещения рукава для патрона ВВ: *а* – для восходящей скважины; *б* – на шланге от зарядного устройства; *в* – на шланге от зарядного устройства в восходящей скважине; *г* – со шлангом для восходящей скважины при заполнении рукава ВВ

Данная модель является одной из возможных конструкций рукава патрона ВВ для применения ее в восходящей скважине.

В данном варианте рукав для патрона ВВ предполагает собой водонепроницаемую газопроницаемую оболочку, которая выполнена с герметичным верхним торцом для расположения внутри неё шланга от зарядного устройства, подающего в данную оболочку промышленное взрывчатое вещество. Такая оболочка выполняется как из тканого, так и

нетканого полотна с гидрофобной пропиткой методом сшивания боковых срезов полотна по его длине, диаметр которых больше диаметра заряжаемой скважины. Такая оболочка выполняется поперечным сшиванием под углом к продольной ее оси через одинаковый интервал размером не менее 4-х диаметров оболочки и также с оставлением бокового прохода для шланга зарядного устройства между стенкой оболочки и прошивками. Отметим, что со стороны открытого нижнего торца оболочка оборудуется клапаном для герметизации, наполненной ВВ оболочки при доставании шланга от зарядного устройства. Такое устройство обеспечивает оптимальное распределение ВВ в скважине, при этом предотвращая его расслоение и формирование пустот. Гидрофобная пропитка защищает ВВ от воздействия влаги, что является важным в условиях повышенной влажности или при наличии грунтовых вод. Газопроницаемость данной оболочки обеспечивает выход образующихся при взрыве газов, предотвращая неконтролируемое нарастание давления.

Поперечное прошивание под углом к продольной оси обеспечивает ей дополнительную прочность и устойчивость к деформации, что является главным при заполнении скважины ВВ под давлением. Угол прошивки может колебаться в зависимости от необходимых характеристик рукава: эластичность и прочность на разрыв. Герметичный торец отводит утечку ВВ и тем самым обеспечивает надежное соединение со шлангом зарядного устройства. Устройство торца может различаться, но зачастую включает обжимное кольцо или иную систему крепления, при этом обеспечивая герметичность соединения, что необходимо для поддержания необходимой концентрации взрывчатых газов внутри рукава и предотвращения их утечки в окружающую среду.

Далее рассматриваются примеры исполнения рукава для патрона ВВ.

Патрон ВВ включает водонепроницаемый рукав 1, который показан как трубообразная оболочка с герметичным верхним торцом 2. Рукав 1 равен длине скважина 3, который выполняется как из тканого, так и нетканого полотна с гидрофобной пропиткой. Для того, чтобы изготовить рукав применяются тканые или нетканые полотна с газопроницаемостью.

На рисунке 5.2.*а* показано, что рукав выполняется методом сшивания 4 боковых срезов полотна по всей длине 5 и 6 показывают поперечные прошивки рукава через одинаковые интервалы по всей длине рукава не менее 4х диаметров рукава. 7 показывает боковой проход для зарядного шланга 8. Поперечное прошивание рукава может производиться под углом к его продольной оси, в некоторых вариантах устройства такая прошивка может выполняться перпендикулярно продольной оси. У прошивок 5 проход 7 образован с одной стороны стенки оболочки. У прошивок 6, которые расположены между 2-мя первыми прошивками 5, проход 7 образован с другой стороны стенки оболочки для формирования винтообразного расположения образованных прошивками карманов вокруг шланга 8 (рисунок 5.2.*б*). Данная конструкция является простой и технологичной.

Шланг 8 размещен в боковом проходе 1. Диаметр рукава выполняется больше диаметра заряжаемой скважины. Такое устройство применяется следующим образом.

Изначально в восходящую скважину располагают промежуточный детонатор на волноводе или детонирующем шнуре, то есть до проектной отметки установки промежуточного детонатора в скважине, при этом промежуточный детонатор оборудуется автономным устройством фиксации в скважине.

Рукав 1 одевают на зарядный шланг 8, как показано на рисунке 5.2.*в* и подают его в восходящую скважину 3 до дна, но тем не менее проходы 7 располагаются по разные стороны, в итоге рукав образует винтообразный вид и собирается в гармошку. Так как прошивки обладают однонаправленным положением, то при сборке «в гармошку» рукав собирается на шланге по одну общую сторону.

В случае ввода «гармошки» в скважину складки спадают и не цепляются за стенки скважины. Далее происходит включения зарядного устройства и его подача в ВВ 9 в рукав 1 по шлангу 8 (показано на рисунке 5.2.*г*). В изначальный момент времени конец шланга 8 располагается в боковом проходе на уровне проема доступа к полости 10 первого кармана, который

ограничивается прошивкой и верхним торцом рукава. Под напором ВВ продвигаются сквозь проем и заполняется полость 10 первого кармана, далее, при заполнении кармана воздух из него выходит через поры ткани рукава 1 и в боковом шве, при этом ВВ остается внутри оболочки рукава 1.

Наибольший сравнительно диаметра скважины рукав расширяется и тем самым удерживается силами трения в скважине. В данном варианте, за счет не идеальности внутренней поверхности скважины (трещины в горном массиве, вывалы при бурении), и также благодаря эластичности материалов рукава, обеспечивается плотное облегание стенок скважины, что критически важно при предотвращении утечки ВВ. Из-за не идеальности внутри скважины совершается расширение заполненного ВВ рукава и его удержание внутри скважины за счет силы трения в паре «стенка скважины-материал рукава».

После всего шланг опускают до проема ниже находящегося кармана и процесс по его заполнению воспроизводится аналогично заполнению ВВ и так до последнего кармана.

Из заряжаемой скважины достается зарядный шланг 8 с размеренной скоростью, которая равна скорости образования колонки восстающего скважинного заряда ВВ (скорость извлечения зарядного шланга равна соотношению объемной производительности зарядного устройства к внутреннему объему одного погонного метра заражаемой скважины).

Также, поперечные прострочки рукава исполняют роль запорных устройств и делят колонку образуемого заряда на множество элементов, при этом препятствуя объединениям плотности ВВ по длине восстающего заряда.

Проникновение воды из скважины внутрь рукава неосуществимо вследствие гидрофобной обработки ткани рукава, так как данная обработка образует микроскопический барьер, который отталкивает воду и мешает ее проникновению сквозь структуру ткани. Молекулы гидрофобного состава, который прочно связаны с волокнами материала, образуют поверхностный слой с малым поверхностным натяжением, что существенно повышает угол контакта капли воды с тканью и снижает ее смачивание. Так как длина рукава отвечает длине заряжаемого места скважины, то вода не может попасть в рукав

сквозь нижний торец, который в итоге самозакрывается клапаном и тем самым целиком гидроизолирует образованный патрон.

Эффективность применения технологии заряжения восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек кососимметричной конструкции подтверждена Актом внедрения, приведенном в Приложении Б.

Результаты, полученные в данном параграфе, представляют собой практически значимую технологию заряжения восстающих скважин ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек кососимметричной конструкции, что обосновывает **пятое** научное положение.

5.2 Технология заряжения обводненных скважин низкоплотными эмульпорами

В основу настоящего параграфа положена работы [141, 144].

Заряжение 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.

Весьма технологичным представляется способ формирования заряда из низкоплотного ЭВВ в обводненной скважине путем его закачивания на дно скважины со скоростью, большей скорости всплытия этого ВВ, обеспечивающей заполнение сечения скважины и выдавливание из нее столба воды [128]. Однако такой способ не нашел должного применения из-за сложностей, связанных с созданием высокоскоростного напора подачи ЭВВ (более 4 м/с), при котором вода бы уходила поверх формируемого заряда.

В связи с этим был сделан вывод, что применение низкоплотных ЭВВ в обводненных скважинах возможно только при размещении их в рукавах-оболочках, которые при помощи каких-либо конструкций или приспособлений удерживаются в необходимом месте скважины.

В работе [127] предложен способ зарядания нисходящих скважин в полиэтиленовый рукав, герметизированный с одного конца, второй конец которого закреплен на устье скважины с возможностью подачи в полость рукава ВВ, при этом для удержания рукава с низкоплотным ВВ в обводненной скважине оно снабжено закрепленными на герметизированном конце рукава грузом и фиксирующим приспособлением, которое выполнено в виде парашюта-фиксатора из твердого материала, имеющего форму полого усеченного конуса с оторочкой большего основания, диаметр которого больше или равен 1,1 диаметра скважины, а угол конусности – не более 75° [127].

Однако такое решение организационно сложно выполнимо. При погружении груза рукава с фиксатором-парашютом на дно скважины сам рукав находится в не распрямленном состоянии и при этом находится в погруженном в воду состоянии (вода оказывает давление на сжатый рукав, сплющивая его стенки). Подача ВВ проводится сверху в ту часть рукава, которая находится поверх воды. В патенте указано, что подают в рукав низкоплотное ВВ, в котором потом еще больше понижают плотность газогенерирующими добавками. Но, если ВВ низкоплотное (с плотностью ниже плотности грунтовой воды), то оно будет находиться поверх воды и не уйдет внутрь сплющенного рукава. Внутри сжатого рукава может проникнуть только ВВ с высокой плотностью, превышающей плотность грунтовой воды. При этом подача такого высокоплотного ВВ должна быть с серьезным напором, чтобы преодолеть давление воды на стенки рукава. При низкоплотном ВВ этого нельзя достичь. Предположение о возможности выдавливания грунтовой воды за счет нагнетания низкоплотного ВВ в сплющенный рукав не соотносится с физикой природных явлений.

При зарядании обводненных нисходящих скважин возможна откачка насосом большей части воды из полости скважины, но в зоне дна скважины все равно остается слой воды. Если после откачки и до момента зарядания скважины прошло время, то этот слой воды увеличивается из-за притока дополнительной воды из грунта. Кроме того, не всегда возможно осушить все скважины и приходится работать со скважинами, заполненными водой. В

связи с этим важным становится решение задачи по укладке концевой герметичной части рукава на дно скважины при любом количестве в ней воды и решение задачи по стабилизации положения рукава в скважине в момент заполнения рукава низкоплотным ВВ.

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 [140].

Как показано на рисунке 5.3, это достигается тем, что нижний герметизированный конец трубчатой формы оболочки выполнен из водонепроницаемого тканевого материала, отличного от материала оболочки, а полость в зоне этого конца заполнена тяжелой жидкостью с удельной плотностью выше удельной плотности грунтовой воды. При этом в зоне герметизированного конца поперечный размер оболочки, заполненной взрывчатой смесью, совпадает с поперечным размером скважины, на остальном участке поперечный размер оболочки, заполненной взрывчатой смесью, выполнен меньше поперечного размера скважины, а переход участка меньшего поперечного размера в участок большего поперечного размера выполнен в виде наклонной поверхности оболочки с углом β наклона в $30...34^\circ$.

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, а тяжелая жидкость размещена в полости полого цилиндра на этом слое ткани.

Тяжелая жидкость 3 может быть непосредственно налита в оболочку 1 или изначально помещена в гибкую свободную упаковку, позволяющую принимать увеличенную форму по площади (расплываться в упаковке), которую опускают на дно оболочки.

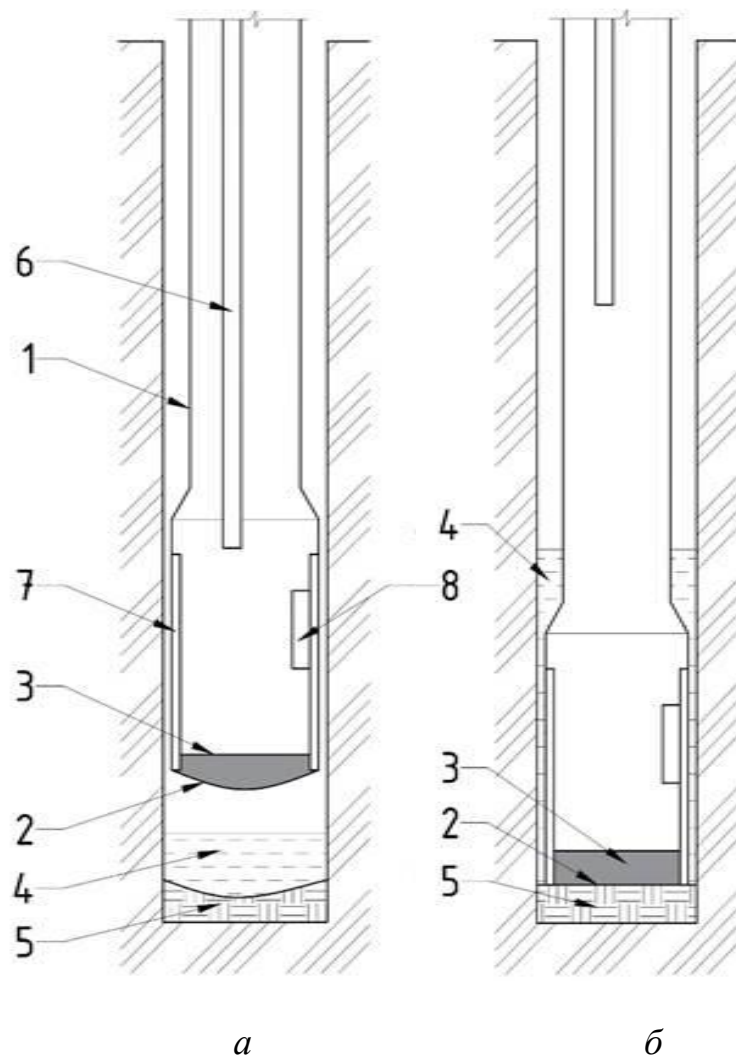


Рисунок 5.3 Общий вид – *а* – схема введение рукава в скважину; *б* – положение рукава в обводненной скважине при заполнении его взрывчатым составом

При опускании оболочки рукава в скважину тяжелая жидкость 3 вытягивает концевую часть, а при опускании на илистое дно 5 расплывается по площади дна скважины. При этом из-за размеров нижней части рукава, приближенных к поперечному размеру скважины, рукав практически соприкасается со стенкой скважины. Вода, которая оставалась в донной части скважины, поднимается, так как вытесняется объемом нижней части рукава, нагруженного тяжелой жидкостью, и занимает объем над широкой частью рукава. При этом эта 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, скручена и т.д.). При погружении рукава изначально в него вводится зарядный шланг 6.

В частности, на рисунках 5.3,*а* и 5.3,*б* представлен вариант исполнения рукава, у которого нижняя часть 4 оболочки (по крайней мере часть стенки оболочки) со стороны размещения тяжелой жидкости 3 выполнена из нерастяжимого материала и имеет форму полого цилиндра 7. Нижний торец этого цилиндра закрыт слоем ткани, выполненной из водонепроницаемого стрейчевого материала, а тяжелая жидкость размещена в полости полого цилиндра на этом слое ткани. Под понятием «нерастяжимый материал» понимается то, что он держит форму полой трубы, но при этом может сохранять эту форму (жесткий или полужесткий вариант исполнения) и, как вариант, может обладать свойством быть изгибаемым.

Учитывая, что сама оболочка, кроме ее концевой части, выполнена из гибкого изминаемого материала, не позволяющего сохранять без внешней нагрузки устойчивую в пространстве объемную форму, то для понимания технического существа заявленного изобретения в дальнейшем оболочка рукава будет рассматриваться в устойчивой форме цилиндрической тонкостенной трубы. Такое положение оболочки занимает после полного ее заполнения взрывчатой смесью. Поэтому к такой устойчивой форме будут применяться термины «поперечный размер» и «диаметр».

В нижней части поперечный размер (диаметр) оболочки, заполненной взрывчатой смесью, совпадает с поперечным размером скважины. На остальном участке поперечный размер (диаметр) заполненной взрывчатой смесью оболочки выполнен меньше поперечного размера участка оболочки в нижней части и меньше поперечного размера (диаметра) нисходящей скважины.

Таким образом, оболочка выполнена из двух участков различного диаметра. При опускании рукава вместе с зарядным шлангом 6 на дно скважины тяжелая жидкость касается дна (рисунок 5.3,*б*) и, опускаясь,

растекается по илистому дну по типу лепешки или блина, занимая всю площадь этого дна и повторяя его поверхность в контактной зоне. Придонная грунтовая вода 4 при этом поднимается и занимает объем скважины поверх вдоль стенок рукава (полость зазора и далее над этой полостью. Зарядный шланг 6 опускается до зоны, приближенной к блину и начинают по нему нагнетать взрывчатый состав. Рукав на нижнем участке заполняется составом и распрямляется как в поперечном направлении, так и по высоте по мере заполнения. По мере заполнения зарядный шланг 6 поднимается вверх. При полном заполнении нижнего участка рукава в зазоре между стенкой оболочки и стенкой скважины остается только та часть воды, которая равна объему этого зазора. Остальной объем воды вытеснен в зону наверх от нижнего участка и занимает полость зазора между стенкой оболочки на этом участке и стенкой скважины. Избыток воды вытекает через устье скважины. Обеспечивается точное проектное заглубление рукава в скважину. Данный процесс описан применительно к случаю, когда в осушенной скважине вода остается или накапливается только в придонной зоне. Но, если скважина не осушена, и вода ее полностью заполняет, то этот же процесс укладки и заполнения рукава остается без изменений, за исключением того, что большее количество воды будет вытекать наружу через устье скважины.

Для рассматриваемого рукава наличие воды в скважине не является препятствием для ее зарядания. Применение тяжелой жидкости в качестве груза гарантированно обеспечивает укрепление рукава на дне скважины. А постепенное заполнение трех участков рукава низкоплотным взрывчатым составом позволяет в том же темпе заполнения сформировать процесс выдавливания воды в сторону устья скважины. Оставшаяся в полостях зазоров вода не препятствует срабатыванию взрывчатого состава от промежуточного детонатора 8, помещенного в нижнюю часть рукава. Более того, наличие грунтовой воды над нижним участком рукава действует благоприятно на стабилизацию рукава в скважине. Рукав заполняется низкоплотным взрывчатым составом, который легче грунтовой воды. Вода, охватывающая рукава на верхнем участке, принимает уравновешенное давление и

позиционирует положение этой части рукава из-за того, что давление с ее стороны на облегченную часть рукава выше давления от рукава на воду. Верхняя часть рукава выпрямляется.

Преимуществом также является то, что к рукаву предъявлено только одно требование – это быть выполненным из водонепроницаемого материала. В качестве такого материала могут использоваться водонепроницаемые ткани или полимерные пленки. Водонепроницаемые ткани — это ткани, которые по своей сути были обработаны, чтобы стать устойчивыми к проникновению воды и намоканию. Обычно это натуральные или синтетические ткани, которые ламинированы или покрыты гидроизоляционными материалами, такими как воск, резина, полиуретан (PU), поливинилхлорид (ПВХ), силиконовый эластомер или фторполимеры.

В части применения водонепроницаемой ткани возможно использование водонепроницаемых тканей с функцией пропускания воздуха (так называемые дышащие ткани). При заполнении рукава возможно образование воздушных карманов в оболочке. В этом случае воздух может выходить через ткань в воду.

Но наличие воды в полостях указанных зазоров может оказывать отрицательное влияние на протекание процесса взрыва в части совмещения действия воздушной волны и кольцевом зазоре от детонационной волны кольцевом зазоре между стенкой оболочки и стенкой скважины. Для исключения этого совмещения переход 8 участков меньшего поперечного размера оболочки в участок большего поперечного размера выполнен в виде наклонных поверхностей оболочки с углом β наклона в $30...34^\circ$. Это позволяет обеспечить отставание ударной воздушной волны в кольцевом зазоре от детонационной волны. Данное значение углов получены экспериментально именно для рукава заявленной конструкции. При этом именно на этих скошенных поверхностях образуется опорное давление от грунтовой воды в зоне нижнего участка.

Настоящая технология промышленно применима и позволяет заряжать обводненные нисходящие скважины низкоплотной взрывчатой смесью без

дополнительных (обязательных) операций по осушке скважин, что существенно сокращает время на подготовку скважин к взрыванию. Это подтверждается Актом внедрения, приведенном в Приложении Б.

Рассмотрим второй способ, который заключается в применении для заряжения обводненных нисходящих скважин низкоплотным взрывчатым составом рукава, снабженного устройством, исключающим всплытия рукава при его заполнении низкоплотным ВВ [144].

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 клиновую систему, приводимую в действие шнуром, завязанным узлом-самосбросом, который стягивает «башмаки» системы при ее сборке. Принципиальная схема работы клиновой системы для удержания заряда низкоплотного ЭВВ, размещенного в оболочку из водонепроницаемого гибкого материала показана на рисунке 5.4.

Груз состоит из нескольких частей специальной геометрической формы:

- центральной части, в форме усеченной пирамиды, выполненной из тяжелого материала (например, бетона), в которой по крайней мере две противоположно лежащие грани выполнены плоскими и наклонены к основанию пирамиды под одинаковым углом;

- башмаков, каждый из которых выполнен в виде цилиндра из высокоплотного материала (например, бетона) с направленным от верхнего основания к нижнему плоским скосом, угол наклона которого к верхнему основанию равен углу наклона плоской грани центральной части, каждый башмак скосом обращен к одной плоской грани центральной части с расположением образующей такого цилиндра («башмака») вдоль стенки скважины.

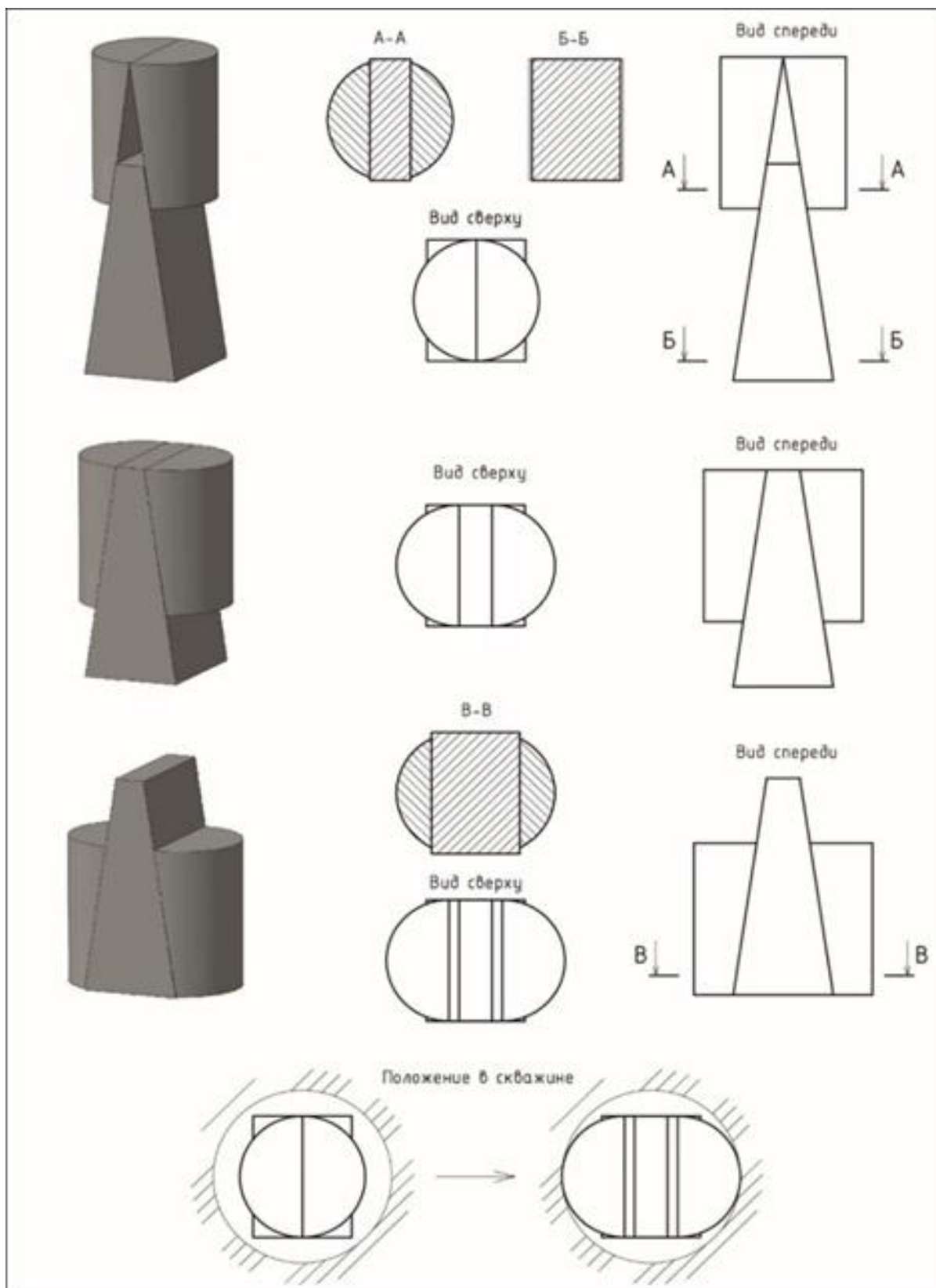


Рисунок 5.4 – Принципиальная схема работы клиновой системы для удержания заряда низкоплотного ЭВВ, размещенного в оболочку из водонепроницаемого гибкого материала

При этом вдоль высоты усеченной пирамиды выполнено сквозное отверстие для пропуска шнура, один конец которого связан с основанием этой пирамиды, а другой прикреплен к герметизированному концу трубчатой формы оболочки, а в башмаках выполнены поперечные сквозные отверстия для пропуска в каждом башмаке шнура, один конец которого связан с этим башмаком, а другой прикреплен к герметизированному концу трубчатой формы оболочки с расположением нижней части плоского скоса каждого башмака на верхней части плоской грани усеченной пирамиды. Угол наклона граней усеченной пирамиды относительно высоты самой усеченной пирамиды и плоских скосов, относительно образующей цилиндров равен 20° .

Рассмотрим условия саморасклинивания предлагаемой системы удержания рукава, наполненного низкоплотным ЭВВ, в обводненной скважине.

На рисунке 5.5 и рисунке 5.6 представлены силы, действующие на элементы клиновой системы для удержания легкого заряда от всплытия.

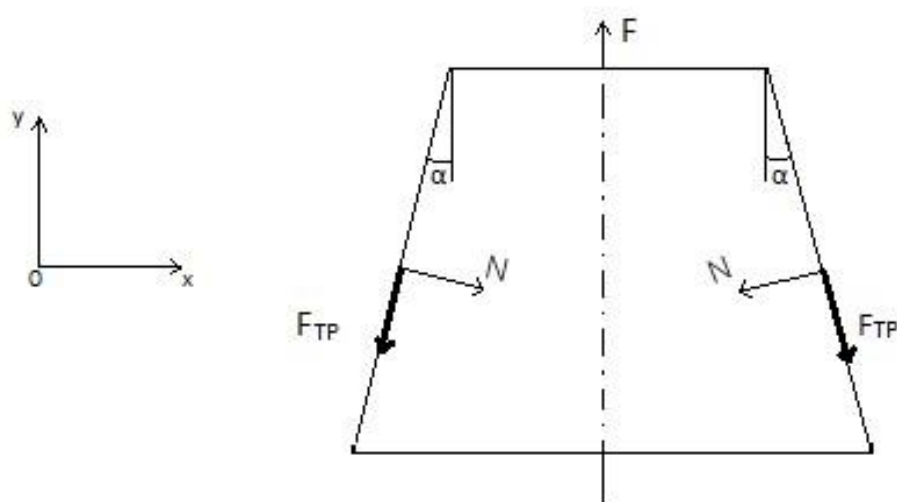


Рисунок 5.5 – Расчетная схема для определения сил, действующих на центральную часть клиновой системы

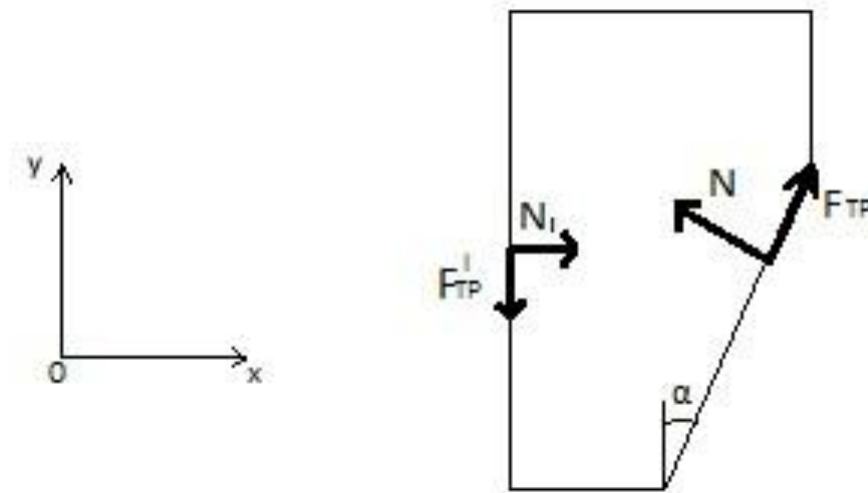


Рисунок 5.6 – Расчетная схема для определения сил, действующих на «башмак» системы

Введем обозначения:

F – сила, действующая на центральную часть клиновой системы со стороны рукава, наполненного низкоплотным ЭВВ;

N – сила давления, действующая перпендикулярно поверхности соприкосновения центральной части и «башмаков»;

$F_{тр}$ – сила трения между центральной частью и «башмаком»;

$F_{тр}^I$ – сила трения между «башмаком» и горной породой;

k_1^{mp} – коэффициент трения между центральной частью и «башмаком»;

k_2^{mp} – коэффициент трения между «башмаком» и горной породой;

α – угол наклона граней усеченной пирамиды относительно высоты.

Оценочные расчеты показывают, что в обводненной скважине выполняются условия:

$$F \gg M_{кл} g \text{ и } F \gg M_{б} g \quad (5.1)$$

где $M_{кл}$, $M_{б}$ – массы центральной части и «башмака», соответственно; g – ускорение свободного падения.

Условия (5.1) позволяют при оценке сил, действующих между центральной частью системы и «башмаком», а также «башмаком» и стенками скважины, пренебречь весом элементов клиновой системы.

Тогда, на основании расчетной схемы, приведенной на рисунке 5.12, получаем следующее уравнение равновесия по оси O_y :

$$F - 2(N \sin \alpha + k_1^{mp} N \cos \alpha) = 0. \quad (5.2)$$

На основании расчетной схемы, приведенной на рисунке 5.13, получаем следующее уравнение равновесия по оси O_x :

$$N_1 - N \cos \alpha + k_1^{mp} N \sin \alpha = 0. \quad (5.2)$$

Условие отсутствия движения «башмака» вдоль оси O_y :

$$N \sin \alpha + k_1^{mp} N \sin \alpha - k_2^{mp} N_1 \leq 0. \quad (5.3)$$

Из уравнений (5.1)-(5.3) получаем следующее условие расклинивания рассматриваемой системы

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{k_2^{mp} - k_1^{mp}}{1 + k_1^{mp} k_2^{mp}}. \quad (5.4)$$

Анализ условия (5.4) 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 «башмаков».

При использовании для изготовления клиновой системы бетона контактирующие плоскости центральной части и «башмаков» покрывают тонким слоем парафина. Тогда $k_2^{mp} \approx 0,5$, а $k_1^{mp} \approx 0,1$.

В соответствие с (5.4) получаем: $\operatorname{tg} \alpha \leq 0,38$ или $\alpha \leq 20,8^\circ$.

На рисунках 5.7 – 5.10 приведен рекомендуемый вариант технического исполнения клиновой системы.

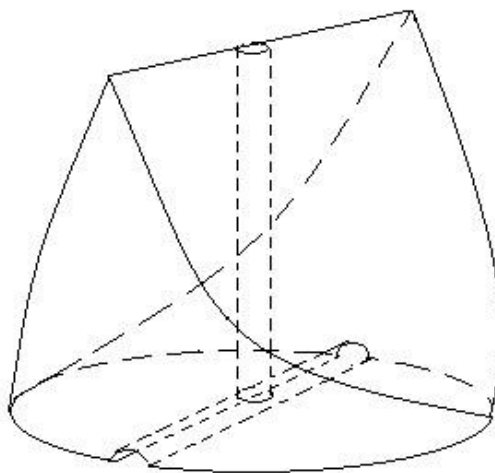


Рисунок 5.7 – Общий вид центральная часть клиновой системы

Параметры центрального клина системы рассчитывались по следующим формулам:

- диаметр основания – $D_{\text{кл}} = 0,75D_{\text{скв}}$;
- высота центрального клина – $H_{\text{кл}} = D_{\text{скв}}$,

где $D_{\text{скв}}$ – диаметр скважины.

Параметры боковых «башмаков» системы рассчитывались по следующим формулам:

- ширина в верхней части – $B_{\text{б}} = 0,75D_{\text{скв}}$;
- ширина в нижней части – $A_{\text{б}} = 0,113D_{\text{скв}}$;
- общая высота – $H_{\text{б}} = 0,7D_{\text{скв}}$;
- толщина – $T_{\text{б}} = 0,375D_{\text{скв}}$
- высота скошенной части – $H_{\text{м}} = 0,8D_{\text{скв}}$.

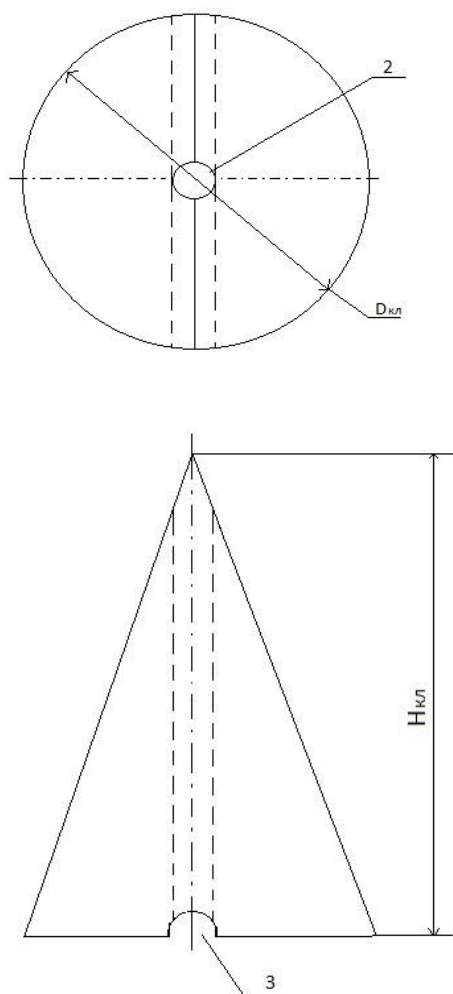


Рисунок 5.8 – Центральная часть клиновой системы

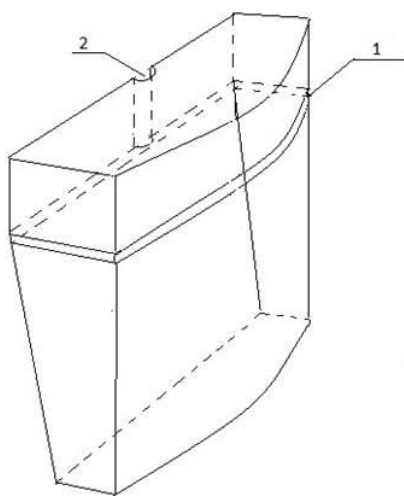


Рисунок 5.9 – «Башмак» (общий вид)

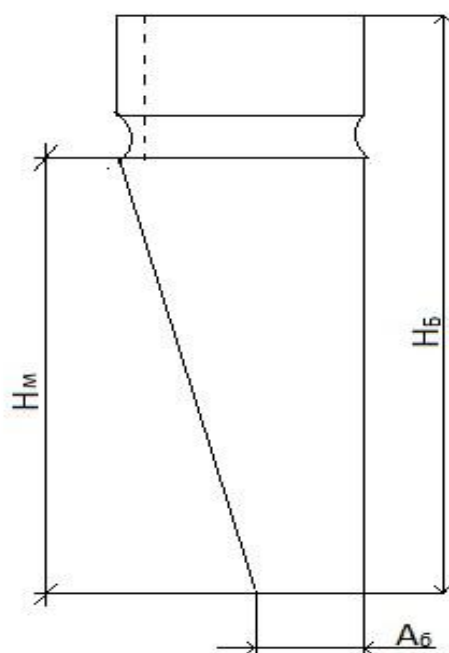
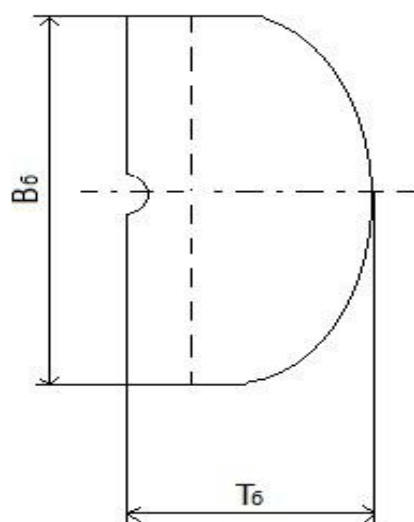


Рисунок 5.10 – «Башмак»

Сборка клиновой системы показана на рисунке 5.11.

На рисунках 5.8, 5.9 и 5.11 приняты следующие обозначения: 1 – желобок сечением 15x15 мм для размещения шнура управления стартом работы системы; 2 – отверстие для рабочего каната, привязанного верхним концом к нижней части рукава, а нижним – к стопору; 3 – желоб сечение 50x50 мм для размещения стопора рабочего каната).

Масса элементов приведенной на рисунках 5.7-5.10 клиновой системы рассчитывается исходя из геометрических параметров и составляет:

$$M_{кл} \approx 0,38\rho_{ms}D_{скв}^3; M_{б} = 0,08\rho_{ms}D_{скв}^3, \quad (5.5)$$

где ρ_{ms} – плотность материала, из которого изготовлена система.

Конструкция клиновой системы, приведенная на рисунках 5.11 не является единственно возможной, что наглядно показано на рисунках 5.12 - 5.14.

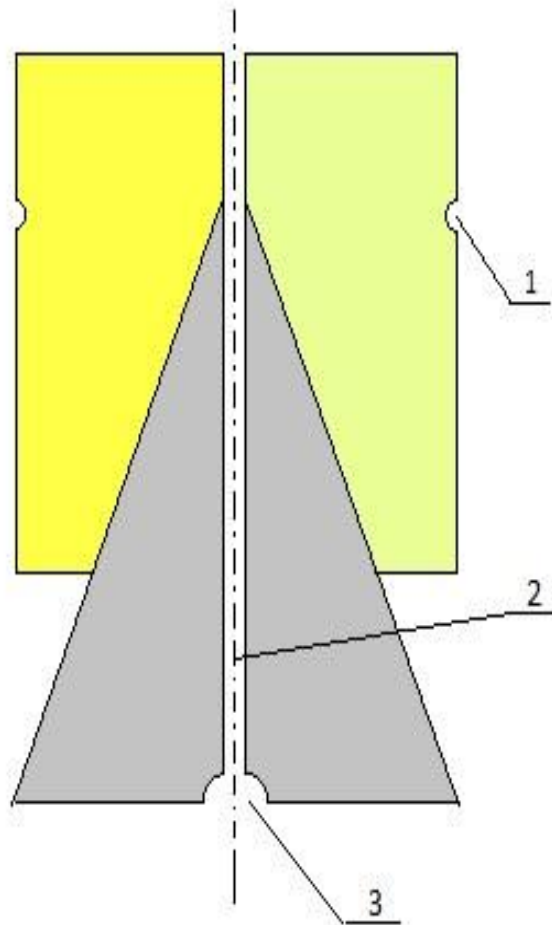


Рисунок 5.11 – Клиновая система в собранном виде перед погружением в скважину

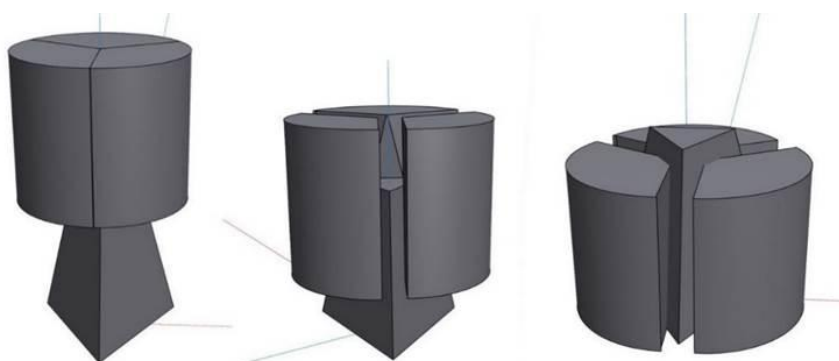


Рисунок 5.12 – Клиновая система, имеющая 3 «башмака»

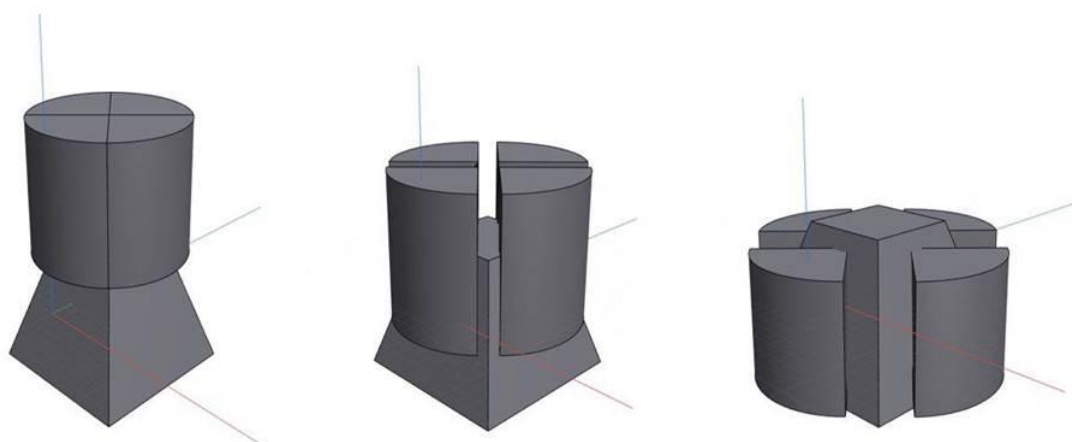


Рисунок 5.13 – Клиновая система, имеющая 4 «башмака»

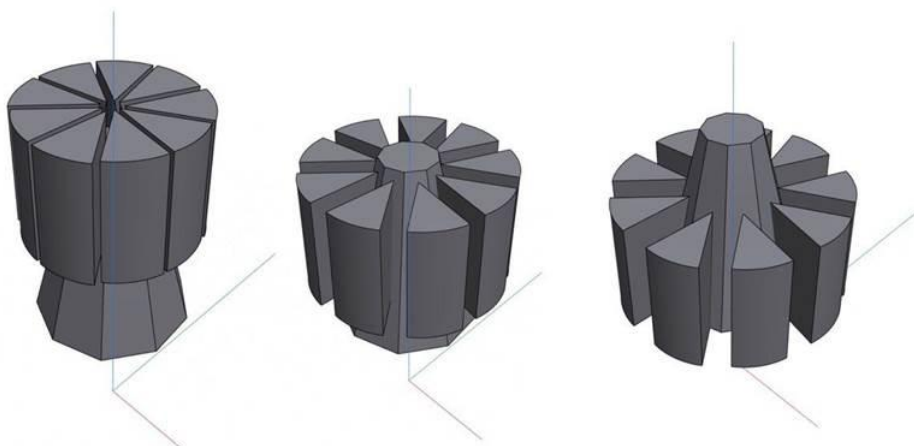


Рисунок 5.14 – Клиновая система, имеющая 9 «башмаков»

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 Актом внедрения, приведенном в Приложении Б.

Результаты, приведенные в настоящем параграфе, представляют собой практически значимую технологию по заряданию обводненных нисходящих скважин низкоплотными эмульпорами с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда, что подтверждает **шестое** научное положение.

5.3 Технико-экономическое обоснование выбора эмульпоров при открытых горных работах

Ввиду использования при создании эмульсии для производства ЭВВ окислительных составов на основе различных селитр важное практическое значение приобретает их выбор для создания эффективного эмульпора.

При выборе эффективных составов эмульпоров необходимо рассмотреть два случая их применения:

1. Для формирования зарядов рыхления;
2. Для создания контурной щели.

Рассмотрим 1-й случай взрывного рыхления горных пород.

В этом случае при оценочных расчетах используем энергетический принцип, изложенный в работе [56].

Согласно [56] величина линии наименьшего сопротивления равна

$$W = \Xi d \sqrt{\frac{E_v}{\varepsilon}}, \quad (5.6)$$

где Ξ – постоянный для данных условий взрывания коэффициент, $\Xi = 40 \div 48$;
 E_v – объемная концентрация энергии ВВ; ε – удельная энергия разрушения;
 d – диаметр заряда.

Объем горной массы, отбиваемой одним зарядом равен

$$V_{горн.массы} = \Phi H_{уст} W^2, \quad (5.7)$$

где Φ - коэффициент сближения скважин; $H_{уст}$ - высота уступа.

Удельные затраты на отбойку 1 кубометра горной массы равны

$$З = \frac{Ц_{ВВ} + Ц_{зар} + Ц_{бур}}{V_{горн.массы}}, \quad (5.8)$$

где $Ц_{ВВ} = \frac{\pi}{4} d^2 L_{зар} \rho_{эмульпор} C_{ВВ}$ - стоимость ВВ заряда ($C_{ВВ}$ - стоимость 1 кг ВВ);

$Ц_{зар} = \frac{\pi}{4} d^2 L_{зар} \rho_{эмульпор} C_{зар}$ - стоимость зарядки ($C_{зар}$ - стоимость затрат за размещение в скважине 1 кг ВВ);

$Ц_{бур} = C_{бур} (H_{уст} + H_{перебур})$ - стоимость бурения скважины ($C_{бур}$ - стоимость бурения 1 п.м. скважины, $H_{перебур}$ - глубина перебура).

Согласно [80] стоимость бурения 1 п.м. скважины можно оценить по формуле:

$$C_{бур} = 3 f d \cdot S_*, \quad (5.9)$$

где S_* - курс руб/дол.

Учитывая, что $E_v = \rho_{эмульпор} Q_v$, на основании (5.6)-(5.9) получаем

$$З = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\varepsilon L_{зар}}{\Phi H_{уст} \Xi^2} \cdot \frac{C_{ВВ}}{Q_v} \left(1 + \frac{C_{зар}}{C_{ВВ}} + \frac{12 f S_*}{\pi d \rho_{эмульпор}} \cdot \frac{H_{уст} + H_{перебур}}{L_{зар} C_{ВВ}} \right). \quad (5.10)$$

Так как $\frac{C_{зар}}{C_{ВВ}} \ll 1$, то принимая в оценочных расчетах, что $S_* \approx 100$ и

$\frac{H_{уст} + H_{перебур}}{L_{зар}} \approx 1,6$, исходя из (5.10), имеем следующие соотношения затрат при

применении эмульпоров с различными окислительными фазами

$$\frac{3_{AN}}{3_{NaN}} \approx \frac{\rho_{\text{эмульпор}}^{NaN} Q_v^{NaN}}{\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} Q_v^{AN}} \cdot \frac{d\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} C_{BB}^{AN} + 600 f}{d\rho_{\text{эмульпор}}^{NaN} C_{BB}^{NaN} + 600 f}, \quad (5.11)$$

$$\frac{3_{AN}}{3_{CaN}} \approx \frac{\rho_{\text{эмульпор}}^{CaN} Q_v^{CaN}}{\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} Q_v^{AN}} \cdot \frac{d\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} C_{BB}^{AN} + 600 f}{d\rho_{\text{эмульпор}}^{CaN} C_{BB}^{CaN} + 600 f}, \quad (5.12)$$

где индексы AN , NaN , CaN относятся к эмульпорам с окислительной фазой из аммиачной, натриевой + аммиачной, кальциевой + аммиачной селитры, соответственно.

В соответствие с энергетическим принципом для осуществления технико-экономического сравнения эмульпоров необходимо рассмотреть случай равенства объемной концентрации энергии эмульпоров, т.е. выполнение равенства

$$\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} Q_v^{AN} = \rho_{\text{эмульпор}}^{NaN} Q_v^{NaN} = \rho_{\text{эмульпор}}^{CaN} Q_v^{CaN}. \quad (5.13)$$

Согласно (5.11)-(5.13), имеем

$$\frac{3_{AN}}{3_{NaN}} = \frac{d\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} C_{BB}^{AN} + 600 f}{d\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} C_{BB}^{AN} \left(\frac{C_{BB}^{NaN}}{Q_v^{NaN}} \cdot \frac{Q_v^{AN}}{C_{BB}^{AN}} \right) + 600 f}, \quad (5.14)$$

$$\frac{3_{AN}}{3_{CaN}} = \frac{d\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} C_{BB}^{AN} + 600 f}{d\rho_{\text{эмульпор}}^{AN} C_{BB}^{AN} \left(\frac{C_{BB}^{CaN}}{Q_v^{CaN}} \cdot \frac{Q_v^{AN}}{C_{BB}^{AN}} \right) + 600 f}. \quad (5.15)$$

Анализ выражений (5.14), (5.15) показывает, наибольшую эффективность имеет эмульпор с наименьшей стоимостью энергии взрыва:

$$\frac{C_{BB}}{Q_v} \rightarrow \min. \quad (5.16)$$

На основании данных таблицы 4.3 об удельной теплоте взрыва различных эмульпоров и стоимостных показателей получаем

$$\frac{C_{BB}^{CaN}}{Q_v^{CaN}} \approx \frac{C_{BB}^{NaN}}{Q_v^{NaN}} > \frac{C_{BB}^{AN}}{Q_{BB}^{AN}}. \quad (5.17)$$

Таким образом, при производстве взрывов рыхления наиболее эффективным является эмульпор с окислительной фазой из аммиачной селитры.

Однако на основе технико-экономического анализа невозможно сравнить эффективность эмульпоров с окислительной фазой из натриевой + аммиачной и кальциевой + аммиачной селитрами. Для этого необходимы дополнительные сведения о детонационных способностях данных эмульпоров.

В таблицах 5.1-5.3 представлены результаты расчетов скорости детонации, предельного диаметра безоболочечного заряда и коэффициентов относительной работоспособности при различной плотности и химическом составе эмульпоров [112].

В качестве критериев относительной работоспособности использовали эмпирические критерии Кукиба Б.Н. [8], Лангефорса У. [198], Вайнштейна Б.И. [18].

При расчете относительной работоспособности ЭВВ термодинамические параметры, характеризующие аммонит №6ЖВ, заимствовали из работы [183].

Сравнивались эмульпоры, имеющие базисную эмульсию следующих химических составов: №1 - NH_4NO_3 - 76,0%, H_2O - 18,0%, топливная фаза - 6,0%; №2 - NH_4NO_3 - 60,6%, $NaNO_3$ - 15,0%, H_2O - 18,0%, топливная фаза - 6,4%; №3 - NH_4NO_3 - 60,3%, $Ca(NO_3)_2$ - 15,0%, H_2O - 18,0%, топливная фаза - 6,7%.

При выполнении расчетов полагали, что диаметр гранул пенополистирола – 3 мм, а пор в этих гранулах при насыпной плотности

0,035...0,05 г/см³ – 160 мкм [42] ; воздушная пористость смешения $\chi_{возд}$ при механическом смешении: $\chi_{возд} = 0,05$. Размер глобул эмульсии принимали равным 4 мкм [38]. Величина массовой доли эмульгатора марки РЭМ в составе матричной эмульсии принималась равной 0,8% от массы матричной эмульсии.

Таблица 5.1 – Расчетные значения коэффициента относительной работоспособности для состава №1

Показатели	Плотность эмульпора, г/см ³			
	1,00	1,05	1,10	1,15
Скорость детонации, м/с	3740	4000	4230	4530
Предельный диаметр, мм	240	300	400	500
Относительная работоспособность согласно [8]	0,825	0,865	0,904	0,947
Относительная работоспособность согласно [198]	0,808	0,847	0,885	0,927
Относительная работоспособность согласно [18]	0,777	0,831	0,882	0,943

Таблица 5.2 – Расчетные значения коэффициента относительной работоспособности для состава №2

Показатели	Плотность эмульпора, г/см ³			
	1,00	1,05	1,10	1,15
Скорость детонации, м/с	3330	3410	3520	3650
Предельный диаметр, мм	180	220	275	360
Относительная работоспособность согласно [8]	0,622	0,641	0,686	0,716
Относительная работоспособность согласно [198]	0,615	0,622	0,678	0,707
Относительная работоспособность согласно [18]	0,594	0,620	0,662	0,700

Таблица 5.3 – Расчетные значения коэффициента относительной работоспособности для состава №3

Показатели	Плотность эмульпора, г/см ³			
	1,00	1,05	1,10	1,15
Скорость детонации, м/с	3400	3500	3650	3950
Предельный диаметр, мм	140	170	215	350
Относительная работоспособность согласно [8]	0,672	0,692	0,741	0,807
Относительная работоспособность согласно [198]	0,664	0,671	0,732	0,797
Относительная работоспособность согласно [18]	0,641	0,671	0,715	0,791

Анализ данных, представленных в таблице 5.1-5.3, показывает, что скорость детонации эмульпоров меняется в широком диапазоне (от 3350 до 4500 м/с) в зависимости от их плотности и химического состава. При этом коэффициент относительной работоспособности ЭВВ изменяется также в широком диапазоне – от 0,6 до 0,9. Учитывая величину предельного диаметра, можно сделать следующие выводы [86, 112]:

- при применении скважинных зарядов диаметром 200-250 мм и более, целесообразно использование эмульпоров с окислительной фазой из аммиачной селитры. При этом их плотность желательна в диапазоне 1,05...1,10 г/см³;

- при применении скважинных зарядов диаметром 100-160 мм целесообразно окислительную фазу эмульпоров готовить на основе аммиачной и кальциевой селитр, т.к. данные ЭВВ имеют существенно меньший предельный (соответственно – критический) диаметр. Рекомендуемая плотность заряжения – 1,10...1,15 г/см³.

Эмульпоры с окислительной фазой на основе аммиачной и натриевой селитр обладают меньшей разрушительной силой (работоспособностью) по

сравнению с другими, рассматриваемыми в настоящей работе эмульпорами (при одинаковой плотности заряжения). Поэтому, если применяются скважинные заряды диаметром 150 мм и более, то данные эмульпоры целесообразно применять при отбойке обводненных горных пород с низкой устойчивостью уступов и(или) при содержании в разрушаемой среде ценных хрупких включений. Рекомендуемая плотность заряжения – 1,0...1,05 г/см³.

Рассмотрим 2-й случай создания контурной щели. В этом случае необходимо сравнить между собой затраты на образование единицы поверхности контурной щели для различных эмульпоров при равенстве их удельной объемной энергии (выполнении условия (5.12)).

Согласно [42] величина пробойного расстояния между смежными скважинами удовлетворяет уравнению

$$a_* = \varphi d \sqrt{P_H}, \quad (5.18)$$

где φ – параметр, зависящий от прочности пород на разрыв; P_H – начальное детонационное давление в эмульпоре:

$$P_H = \frac{\rho_{\text{эмульпор}} D}{k+1}. \quad (5.19)$$

Площадь поверхности контурной щели, образуемой одним зарядом равна

$$S_{\text{щели}} = 2a_* H_{\text{уст}}. \quad (5.20)$$

Удельные затраты на образование единицы поверхности контурной щели отбойку равны

$$z^* = \frac{C_{BB} + C_{\text{зар}} + C_{\text{бур}}}{S_{\text{щели}}}. \quad (5.21)$$

В соответствие с (5.18)-(5.21), имеем

$$3^* = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{L_{зар}}{\phi H_{уст}} \cdot \frac{C_{BB}}{D} \sqrt{\frac{k+1}{\rho_{эмульпор}}} \left(1 + \frac{C_{зар}}{C_{BB}} + \frac{12 f S_*}{\pi d \rho_{эмульпор}} \cdot \frac{H_{уст} + H_{переб}}{L_{зар} C_{BB}} \right). \quad (5.22)$$

Так как $\frac{C_{зар}}{C_{BB}} \ll 1$, то принимая в оценочных расчетах, что $S_* \approx 100$ и

$\frac{H_{уст} + H_{переб}}{L_{зар}} \approx 1,6$, исходя из (5.21), имеем следующие соотношения затрат при

применении эмульпоров с различными окислительными фазами

$$\frac{3_{AN}}{3_{NaN}} \approx \frac{C_{BB}^{AN}}{C_{BB}^{NaN}} \cdot \frac{D_{NaN}}{D_{AN}} \sqrt{\frac{\rho_{эмульпор}^{NaN} k_{AN} + 1}{\rho_{эмульпор}^{AN} k_{NaN} + 1}} \cdot \frac{d\rho_{эмульпор}^{AN} C_{BB}^{AN} + 600 f}{d\rho_{эмульпор}^{NaN} C_{BB}^{NaN} + 600 f}, \quad (5.23)$$

$$\frac{3_{AN}}{3_{CaN}} \approx \frac{C_{BB}^{AN}}{C_{BB}^{CaN}} \cdot \frac{D_{CaN}}{D_{AN}} \sqrt{\frac{\rho_{эмульпор}^{CaN} k_{AN} + 1}{\rho_{эмульпор}^{AN} k_{CaN} + 1}} \cdot \frac{d\rho_{эмульпор}^{AN} C_{BB}^{AN} + 600 f}{d\rho_{эмульпор}^{CaN} C_{BB}^{CaN} + 600 f}. \quad (5.24)$$

Из рисунка 4.11 имеем

$$\sqrt{\frac{k_{AN} + 1}{k_{NaN} + 1}} \approx \sqrt{\frac{k_{AN} + 1}{k_{CaN} + 1}} \approx 1.$$

Тогда, учитывая выполнение условия (5.8), а также зависимость $D \sim \sqrt{Q_v}$ [10], из (5.23), (5.24), имеем

$$\frac{3_{AN}}{3_{NaN}} = \frac{C_{BB}^{AN}}{Q_v^{AN}} \cdot \frac{Q_v^{NaN}}{C_{BB}^{NaN}} \cdot \frac{d\rho_{эмульпор}^{AN} Q_v^{AN} \cdot \left(\frac{C_{BB}^{AN}}{Q_v^{AN}} \right) + 600 f}{d\rho_{эмульпор}^{NaN} Q_v^{NaN} \cdot \left(\frac{C_{BB}^{NaN}}{Q_v^{NaN}} \right) + 600 f}, \quad (5.25)$$

$$\frac{3_{AN}}{3_{CaN}} = \frac{C_{BB}^{AN}}{Q_v^{AN}} \cdot \frac{Q_v^{CaN}}{C_{BB}^{CaN}} \cdot \frac{d\rho_{эмульпор}^{AN} Q_v^{AN} \cdot \left(\frac{C_{BB}^{AN}}{Q_v^{AN}} \right) + 600 f}{d\rho_{эмульпор}^{CaN} Q_v^{CaN} \cdot \left(\frac{C_{BB}^{CaN}}{Q_v^{CaN}} \right) + 600 f}. \quad (5.26)$$

Анализ выражений (5.25), (5.26) показывает, наибольшую эффективность имеет эмульпор с наименьшей стоимостью энергии взрыва:

$$\frac{C_{BB}}{Q_v} \rightarrow \min. \quad (5.27)$$

Таким образом, учитывая (5.17), при производстве взрывов по получению контурной щели наиболее эффективным является низкоплотный эмульпор с окислительной фазой из аммиачной селитры.

5.4 Выводы по главе 5

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

Разработана технология изготовления и заряжания нисходящих скважин низкоплотным ЭВВ с использованием специальных рукавов-оболочек скважинного заряда и методов удержания заряда.

Показано, что наилучшие технико-экономические показатели имеют низкоплотные эмульпоры с окислительной фазой из аммиачной селитры.

При выборе эмульпоров с плотностью большей характеристической необходимо:

- при применении скважинных зарядов диаметром 200...250 мм и более, целесообразно использование эмульпоров с окислительной фазой из аммиачной селитры. При этом их плотность желательна в диапазоне 1,05...1,10 г/см³;

- при применении скважинных зарядов диаметром 100...160 мм целесообразно окислительную фазу эмульпоров готовить на основе аммиачной и кальциевой селитр. Рекомендуемая плотность заряжания – 1,10...1,15 г/см³.

- эмульпоры с окислительной фазой на основе аммиачной и натриевой селитр целесообразно применять при отбойке горных пород с низкой

устойчивостью уступов и(или) при содержании в разрушаемой среде ценных хрупких включений. Рекомендуемая плотность заряжения – $1,0 \dots 1,05 \text{ г/см}^3$.

Показано, что при производстве контурной щели наилучшие технико-экономические показатели имеют низкоплотные эмульпоры с окислительной фазой из аммиачной селитры.

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 массовой долей 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 котором обеспечивается безопасность применения ЭВВ при взрывных работах в сульфидных рудах.

Определены геохимические ограничения на возможность применения ЭВВ без специальных изолирующих заряд оболочек, обусловленные 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, связной «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, сервисной организацией 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВ	– взрывчатые вещества;
ЭВВ	– эмульсионные взрывчатые вещества;
ПВВ	– промышленные взрывчатые вещества;
АСВВ	– аммиачно-селитренные взрывчатые вещества;
НКПР	– нижний концентрационный предел распространения пламени;
УВВ	– ударная воздушная волна;
АС	– аммиачная селитра;
КС	– кальциевая селитра
ТГА	– метод термогравиметрического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1272667 А1 СССР, МПК С06В 21/00, С06В 31/28. Способ оценки опасности самопроизвольного взрыва аммиачно-селитряных взрывчатых веществ в сульфидных рудах : № 3814990/23 : заявл. 20.11.1984 : опубл. 20.09.1999 / В. Б. Захаров, А. Г. Яковенков, В. Д. Тянь [и др.].
2. Айнбиндер, Г. И. Обоснование технологических решений по предотвращению самовозгорания сульфидов при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд : специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Айнбиндер Геннадий Игоревич ; Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). – Владикавказ, 2020. – 19 с.
3. Айнбиндер, Г. И. Исследование химической совместимости Граммотола Т-20 и Граммонита ТММ с вмещающими горными породами и внутрискважинными водами подземного рудника ПАО "Гайский ГОК" / Г. И. Айнбиндер, М. Д. Демчишин, Д. С. Печурина // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 4. – С. 47-52.
4. Акинин, Н. И. Совершенствование термодинамического метода для испытаний энергоемких эмульсий на совместимость с сульфидными рудами / Н. И. Акинин, А. С. Гармашов, В. В. Рудомазин // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 11. – С. 58-63. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-11-58-63.
5. Алешин, А. С. Исследование взрывов колчеданной пыли и способов борьбы с ними на горизонтах выпуска и вторичного дробления руды: специальность 520 «Техника безопасности и противопожарная техника» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук : / Алешин Алексей Степанович; Свердлов. горный ин. им. В. В. Вахрушева. – Свердловск, 1969. – 22 с.

6. Андреев, В. В. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ / В.В. Андреев, А.П. Ершов, Л.А. Лукьянчиков // Физика горения и взрыва. – 1979. – Т. 15. – №1 – С. 89-93.
7. Апин, А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ / А.Я. Апин // Доклады АН СССР. – 1945. – Т. 147. – № 5. – С. 1141-1143.
8. Афанасенков, А. Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ / А. Н. Афанасенков, Л. И. Котова, Б. Н. Кукиб // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 115-125.
9. Баранов, Е. Г. Малоплотные взрывчатые вещества для открытых горных работ / Е. Г. Баранов, А. Т. Ведин, И. Ф. Бондаренко. – Москва: Недра, 1993. – 107 с.
10. Баум, Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. – Москва: Гос. изд. физ.-мат. лит-ры, 1959. – 800 с.
11. Бахаревиц, Н. С. Предохранительные взрывчатые вещества для рудников, опасных по сульфидной пыли/ Н. С. Бахаревиц, А. И. Романов, Л.Г. Павловский, В.А. Хорев // Взрывное дело. – 1962. – № 49/4. – С. 190-201.
12. Бахаревиц, Н. С. Чувствительность сульфидных пылей к термическому и взрывному импульсу / Н. С. Бахаревиц, А. И. Романов // Взрывное дело. – 1962. – №49/6. – С. 181-189.
13. Белин, А. В. Процесс формирования пылевидных частиц при взрывном разрушении горных пород / А. В. Белин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – № 5. – С. 93-95.
14. Белин, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования по формированию пыли при ведении взрывных работ/ А. В. Белин, В. А. Белин, Б. Ф. Кирин, Г. М. Крюков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – № 5. – С. 95-98.

15. Борисов, А.А. Воспламенение порошкообразных горючих за ударными волнами / А.А. Борисов, В.П. Козенко, А.В. Любимов, С.М. Когарко // Физика горения и взрыва. – 1967. – Т.3. – №2. – С.308-309.
16. 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. DOI:10.18698/0372-7009-2023-9.
17. Брагин, П.А. Оперативные методы оценки полноты тепловыделения при взрыве промышленных ВВ местного производства / П.А. Брагин, С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 9 (специальный выпуск 35). – С. 3-17.
18. Вайнштейн, Б.И. Анализ методов определения работоспособности / Б.И. Вайнштейн, К.С. Чернов, М.К. Песоцкий // Взрывное дело. – 1982. – №84/41. – С. 75-83.
19. Ван, Сюйгуан. Эмульсионные взрывчатые вещества / Сюйгуан Ван ; пер. под ред. Старшинова А.В. – Красноярск: Metallurg Industry Press. China, 2012. – 380 с.
20. Викторov, С.Д. Оценка продолжительности безопасного разогрева колчеданного включения в аммиачно-селитренное ВВ / С.Д. Викторov, И.Ю. Маслов, С.А. Горинов // Взрывное дело. – 2021. – № 133/90. – С. 30-47.
21. Вилунов, В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В.Н. Вилунов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 189 с.
22. Виноградов, В.М. К вопросу об электрообезвоживании эмульсий в постоянном электрическом поле : 05.346 «Химическая технология топлива и газа» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Виноградов Виталий Михайлович ; Моск. ин-т нефтехим. и газовой пром-сти им. И. М. Губкина. – Москва, 1970. – 34 с.

23. Виноградов, В. М. Образование, свойства и методы разрушения нефтяных эмульсий / В. М. Виноградов, В. А. Винокуров. – Москва: ФГУП «Нефть и газ», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. – 31 с.
24. Власов, О. Е. Основы теории действия взрыва. – Москва: ВИА, – 1957. – 408 с.
25. Воган, Д. Химия сульфидных минералов / Д. Воган, Дж. Крейг. – Москва: Мир, 1981. – 575 с.
26. Волянки, П. Воспламенение и горение органических пылей в ударных волнах / П. Волянки // Физика горения и взрыва. – 1984. – №5. – С. 29-35.
27. Выявление источников образования взрывоопасных концентраций сульфидной пыли при отработке медно-колчеданных месторождений и разработка мероприятий по предотвращению взрывов сульфидной пыли в подземных условиях / Отчет о НИР № 2915/10/38-201-13. - Екатеринбург, УГГУ, 2015. – 169 с.
28. Гавриленко, Н. Д. Электризация жидкостей и ее предотвращение / Н. Д. Гавриленко, В. В. Захарченко, Н. И. Крячко. – Москва: Химия, 1975. – 126 с.
29. Галкин, В.В. Причины разложения и отказов заряда акватола / В.В. Галкин, В.Л. Ветлужский, В.М. Павлютенков // Безопасность труда в промышленности. – 1988. – №10. – С.47-49.
30. Горинов, С. А. Аппроксимационный метод расчета детонационных параметров низкоплотных аммиачно-селитренных ВВ / С. А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №10. – С.244-256.
31. Горинов, С. А. Влияние химической природы окислителя на детонационные характеристики ЭВВ / С. А. Горинов, В. П. Куприн, И. Л. Коваленко, Е. П. Собина // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. III Уральский горно-промышленный форум. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, – 2010. – С.191-201.

32. 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). Отдельные статьи (специальный выпуск). – 2011. – № 12. – С.9-16.

33. Горинов, С. А. Возгорание пылевоздушных смесей под действием ударных воздушных волн при подземной добыче колчеданных руд / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S33. – С. 13-22.

34. Горинов, С. А. Выбор химического состава окислительной фазы эмульсионных взрывчатых веществ для отбойки крепких горных пород скважинами уменьшенного диаметра / С. А. Горинов, В. П. Куприн, Н. В. Савченко // Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. – 2012. – №5. – С.56-60.

35. Горинов, С. А. Высококонцентрированные суспензии наночастиц аммиачной селитры - основа эмульсионных взрывчатых веществ / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов, Е. П. Собина // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 10. – С. 44-47.

36. Горинов, С.А. Детонация низкоплотного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного пористыми гранулами из легкого малопрочного материала / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Тезисы XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву, Москва. – 2020. – Т. 2. – С. 58-59.

37. Горинов, С. А. Инициирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ / С. А. Горинов. – Йошкар-Ола: ООО ИПФ «Стринг», 2020. – 214 с.

38. Горинов, С. А. Исследование структуры эмульпоров / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов, Е. П. Собина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – 2011. – № 9. – С.3-14.

39. Горинов, С. А. К вопросу о выборе эмульсионных взрывчатых веществ при добыче сульфидсодержащих горных пород / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Технология и безопасность взрывных работ: материалы науч.-произв. семинара по взрывным работам 2016 г. – Екатеринбург: Ин-т горн. дела УрО РАН, – 2016. – С. 70-75.

40. 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.

41. 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.

42. Горинов, С. А. Отбойка напряженных трещиноватых руд плоскими системами зарядов : специальность 05.15.02 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Горинов Сергей Александрович ; Ин-т горн. дела УрО РАН. – Свердловск, – 1985. – 23 с.

43. Горинов, С. А. Оценка детонационной способности эмульсионных взрывчатых веществ / С. А. Горинов, В. П. Куприн, И. Л. Коваленко // В кн.: Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: Арт-пресс, 2009. – С. 18-26.

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

45. Горинов, С. А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэмитов / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 8. – С. 121-130.

46. Горинов, С. А. Теплофизические свойства несенсибилизированной эмульсионной матрицы – компонента эмульсионных взрывчатых веществ / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – 2011. – №12. – С. 17-20.

47. 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. – №12 (специальный выпуск 33). – С. 3-12.

48. 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.

49. Горинов, С.А. 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. 127-137.

50. ГОСТ 20799-2022. Масла промышленные. Технические условия : межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 10 окт. 2022 г. № 1119-ст : взамен ГОСТ 20799-88 : дата введ. 2023 – 07 – 01. – Москва : ФГБУ «РСТ», 2022. – 12 с.

51. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия : межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. N 1871-ст : взамен

ГОСТ 305-82 : дата введ. 2015 – 01 – 01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 15 с.

52. Гуменова, Л. Ф. Антистатическая обработка гранул из вспенивающегося пенополистирола / Л. Ф. Гуменова, Н. Н. Сигаева, А. М. Кирюхин // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. – № 2. – С.103-108.

53. Гурин, А. А. Управление ударными воздушными волнами при взрывных работах / А. А. Гурин . – Москва : Недра, 1978. – 80 с.

54. Давыдов, В. Ю. Универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ / В. Ю. Давыдов, Л. В. Дубнов, А. М. Гришкин // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – №4. – С.102-107.

55. Данилов, А. М. Применение присадок в топливах / А. М. Данилов. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2010. – 368с.

56. Демидюк, Г. П. К вопросу о критериях оценки взрывных свойств ВВ для горных работ / Г. П. Демидюк // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1967. – № 1. – С. 43-52.

57. Ершов, А. П. О неклассических режимах детонации в низкоплотных ВВ / А. П. Ершов, А. О. Кашкаров, Э. Р. Прууэл, Н. П. Сатонкина // В сб. Динамика многофазных сред – XIV Всероссийский семинар, приуроченный к 75-летию академика РАН Фомина В. М., Новосибирск, 02–05 ноября 2015 года. – Новосибирск: Изд. ФГБУН ИТМП СО РАН, 2015. – С. 40-41.

58. Есин, О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. Реакции между газообразными и твердыми телами / О. А. Есин, П. В. Гельд – Свердловск-Москва: Госнаучтехиздат лит-ры по черн. и цвет. металлургии, 1950. – 510 с.

59. Закусило, В. Р. Низкоскоростные заряды для отбойки блочного камня / В. Р. Закусило, А. Н. Романченко // Евразийский Союз Ученых. – 2014. – Т. VIII. – С. 144-147.

60. Зисман, Г. А. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург: «Лань», 2007. – 352с.

61. Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритосодержащие колчеданные руды / Утв. зам. министра цветной металлургии СССР Н.Н. Чепеленко 28 апреля 1983 г. – 21 с.

62. Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритсодержащие колчеданные руды/ Утв. зам. министра металлургии СССР Г. П. Ермаковым 13 февраля 1991г. – 26 с.

63. Исследование причин несанкционированных взрывов на ОАО «Лебединский ГОК»: отчет / Державец А. С. – Москва: ЗАО «Взрывиспытания», 1997. – 25 с.

64. Каковский, И. А. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов / И. А. Каковский, С. С. Набойченко. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 272с.

65. Калинина, Н. М. Разработка щадящей технологии взрывных работ на основе применения сверхнизкоплотных взрывчатых смесей : специальность 05.15.11 «Физические процессы горного производства» : дисс. на соиск. ученой степени докт. техн. наук : защищена 05.10.1993 / Калинина Наталья Михайловна ; Ин-т физики и механики горных пород АН Кыргызской Республики. – Бишкек, 1993. – 221 с.

66. Катышев, С. Ф. Влияние добавок на взаимодействие аммиачной селитры с сульфидной рудой / С. Ф. Катышев, В. Н. Десятник, Л. М. Теслюк // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – № 5. – С. 54-57.

67. Катышев, С. Ф. Моделирование поведения аммиачной селитры в зарядных скважинах / С. Ф. Катышев, В. Н. Десятник, Л. М. Теслюк // Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. – 2012. – № 7. – С. 29-34.

68. Катышев, С. Ф. Определение условий безопасного применения аммиачно-селитровых взрывчатых веществ на сульфидных месторождениях / С. Ф. Катышев, В. Н. Десятник, Л. М. Теслюк // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18. – № 2. – С. 24-28.

69. Катышев, С. Ф. Стабилизация взаимодействия аммиачной селитры с сульфидными рудами / С. Ф. Катышев, В. Н. Десятник, Л. М. Теслюк // Пожаробезопасность. – 2012. – Т. 21. – №5. – С. 42-44.

70. Коваленко, И.Л. Взаимодействие эмульсионных взрывчатых веществ и их компонентов с сульфидными минералами / И. Л. Коваленко, В. П. Куприн // Взрывное дело. – 2010. – № 103/70. – С. 154-170.

71. Коваленко, И. Л. Влияние хлоридов феррума (III) и купрума (II) на термическое разложение энергонасыщенных систем на основе аммиачной селитры / И. Л. Коваленко // Труды Одесского политехнического университета. – 2013. – Вып. 3(42). – С. 233-237. DOI: 10.15276/oru.3.42.2013.47.

72. Коваленко, И. Л. Ингибирование взаимодействия пирита с аммиачно-селитренными взрывчатыми веществами / И. Л. Коваленко, В. П. Куприн // Современные ресурсосберегающие технологии горного производства. – 2013(11). – № 1. – С. 84-91.

73. Коваленко, И. Л. Исследование причин самопроизвольного разложения аммиачноселитренных горячельющихся ВВ на пиритсодержащих рудах / И. Л. Коваленко, В. П. Куприн В.П.// Материалы I Всеукраинской научно-практ. конф. «Украина научная-2001». – Днепропетровск. – 2001. – Т. 9. – С.43-50.

74. Коваленко, И. Л. Разработка и исследование гетерогенных систем на основе нитратов кальция и аммония : специальность 05.17.01 «Технология неорганических веществ» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук / Коваленко Игорь Леонидович ; УГХТУ. – Днепропетровск, 2002. – 20 с.

75. Козырев, С.А. Исследование химического взаимодействия аммиачной селитры с сульфидсодержащими минералами в составе гематит-

магнетитовых кварцитов Оленегорского месторождения / С. А. Козырев, Е. А. Власова // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – № 2. – С. 54-60.

76. Колганов, Е. В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. -1-ая книга (Составы и свойства) / Е. В. Колганов, В. А. Соснин - Дзержинск Нижегородской обл.: Изд-во ГосНИИ «Кристалл». – 2009. – 592 с.

77. Комаров, В. А. Геоэлектрохимия: Учебное пособие / А. Комаров. – Санкт-Петербург: С.- Петерб. ун-т, 1994. – 136 с.

78. Королева, М. Ю. Кинетика процессов и квазиравновесие в концентрированных обратных эмульсиях: специальность 02.00.11 «Коллоидная химия» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. докт. хим. наук / Королева Марина Юрьевна; Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева. – Москва, 2011. – 32 с.

79. Кудзило, С. Рабочие характеристики эмульсионных взрывчатых веществ / С. Кудзило, П. Кохличек, В.А. Тржчинский, С. Зеeman // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т.38. – №4. – С. 95-102.

80. Кузнецов, В. А. Обобщенная прогнозная оценка себестоимости бурения взрывных скважин и шпуров / В. А. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – № 5. – С. 126-130.

81. Кузнецов, В. А. Обоснование технологии буровзрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зонирования взрывааемых уступов : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук / Кузнецов Виктор Андреевич ; Моск. гос. гор. ун-т. – Москва, 2010. – 43 с.

82. Кузнецов, В. М. О детонации смеси ВВ с полистиролом / В. М. Кузнецов, Ф. И. Матвеенков // Физика горения и взрыва. – 1977. – Т. 13. – № 6. – С. 941-942.

83. Кук, М. А., 1980. Наука о промышленных взрывчатых веществах / М. А. Кук. - Москва: Недра, 1980. – 453с.
84. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов // 2014. –Москва: Изд. Юрайт, 2014. – 435с.
85. Куприн, В. П. О возможности применения водонаполненных аммиачно-селитренных ВВ для разрушения сульфидных руд / В. П. Куприн, И. Л. Коваленко // Горно-информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 8. – С. 131-136.
86. 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.
87. Кутузов, Б. Н. Разрушение горных пород взрывом (взрывные технологии в промышленности). Ч. II. Учебник для вузов. 3-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Издательство МГГУ, 1994. – 448 с.
88. Кутузов, Б. Н. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования / Б. Н. Кутузов, С. А. Горинов // Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2011. – №7. – С.34-52.
89. Ландау, Л. Д. Об изучении детонации конденсированных ВВ / Л. Д. Ландау, К. П. Станюкович // Доклады Академии наук СССР. – 1945. – Т. 45. – № 9. – С. 399-402.
90. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: Том VI. Гидродинамика. - 4-е изд. / Л. Д. Ландау, В. М. Лифшиц. – Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1988. – 736 с.
91. Лебедев, Н. Н. Сборник задач по математической физике / Н. Н. Лебедев, И. П. Скальская, Я. С. Уфлянд. – Москва: Госиздат техн.-теорет. лит-ры, 1955. – 420 с.

92. Левченко, Д.Н. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения / Д. Н. Левченко, Н. В. Бергштейн, А. Д. Худякова, Н. М. Николаева // – Москва: Химия, 1967. – 200 с.

93. Лещинский, А. В. Формирование зарядов с воздушными промежутками из пенополистирола в обводненных скважинах / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун, Г. Г. Воскресенский // Вестник ТОГУ. – Хабаровск, 2006. – Вып. 2 (3). – С. 71-80.

94. Лещинский, А. В. Научно-техническое обоснование рациональных средств и методов разрушения скальных пород при открытых горных работах : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»: автореф. дис. на соиск. ученой степ. доктора техн. наук / Лещинский Александр Валентинович ; Ин-т гор. дела ДВО РАН. – Хабаровск, 2010. – 34 с.

95. Литовка, О. Б. Исследование физико-химических свойств аммиачной селитры и смесей на ее основе : специальность 05.17.07 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ» : автореф. дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук / Литовка Ольга Борисовна ; Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева. – Москва, 2010. – 16 с.

96. Лыков, А. В. Теория теплопроводности – Москва: Высшая школа, 1967. – 599 с.

97. Марченко, Л. Н. Энергия взрыва и конструкция заряда. - Москва: Наука, 1965. – 110 с.

98. 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.

99. Маслов, И. Ю. Влияние размеров глобул эмульсии на детонационные характеристики ЭВВ при их сенсibilизации пластиковыми полимикросферами / И. Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – 2011. – № 12. – С.3-9.

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

101. 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.

102. 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.

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

104. 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.

105. 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.

106. Маслов, И.Ю. Оценка теплоты взрыва смесей эмульсии с гранулами пенополистирола / И. Ю. Маслов // Горная промышленность. – 2025. – № 3. – С.33-35. – DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-33-35.

107. 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.

108. Маслов, И. Ю. Повышение эффективности взрывной подготовки вмещающих горных пород на разрезах Кузбасса с применением эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : дис. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук : защищена 20.06.2013 / Маслов Илья Юрьевич ; МГРИ-РГГУ. – Москва, 2013. – 132с.

109. Маслов, И. Ю. Промышленные эмульсионные взрывчатые вещества и системы инициирования во взрывном деле / И. Ю. Маслов, В. И. Сивенков, С. В. Иляхин. – Москва: ВНИИГеосистем, 2018. – 416 с.

110. 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.

111. Маслов, И.Ю. Расчет теплоты взрыва эмульпоров / И. Ю. Маслов // Взрывное дело. – 2025. – № 148/105. – с.56.

112. 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.

113. 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.

114. Матвеенков, Ф. И. О детонации смеси ВВ со вспененным полистиролом / Ф. И. Матвеенков // Взрывное дело. – 1979. – № 81/38. – С. 158-160.

115. Маторин, А. С. Водосодержащие взрывчатые вещества местного приготовления / А. С. Маторин, В .М. Павлютенков. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2004. – 194 с.

116. Митишова, Н. А. Обоснование технологических решений по предотвращению сульфидной пыли при подземной разработке колчеданных руд : специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)» : дис. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук : защищена 21.10.2020 / Митишова, Наталия Александровна ; Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук. –Москва, 2020. – 157 с.

117. Митрофанов, С. И. Селективная флотация / С. И. Митрофанов. – Москва: Недра, 1968 г. – 584 с.

118. Неницеску К. Общая химия / К. Неницеску. – Москва: Мир, 1968. – 816 с.

119. Нифадьев, В .И. К вопросу о механизме детонации взрывчатых смесей, содержащих вспененный полистирол / В. И. Нифадьев, Н. М. Калинина // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 6. – С. 84-89.

120. Нифадьев, В. И. Роль вспененного полистирола в развитии первичных химических реакций в детонационной волне низкоплотных взрывчатых смесей/ В. И. Нифадьев, Н. М. Калинина // Вестник КРСУ. – 2007. – Т. 7. – № 1. – С. 33-41.

121. О причинах аварии, произошедшей 21 апреля 2017 года на Сибайском подземном руднике Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК» / Экспертное заключение. Утв. ген. директором Е. А. Козловской 03.05.2017 г. – Москва: ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша». – 2017. – 19 с.

122. Орлова, Е. Ю. Химия и технология взрывчатых веществ / Е. Ю. Орлова. – Ленинград: Химия, 1973. – 688 с.

123. Отчет о результатах испытаний химической стойкости промышленных эмульсионных взрывчатых веществ типа «Сибирит» (ТУ 727680-010-05608605-99) в смеси с сульфидными рудами / Лурье Б. А. – Москва : РХТУ им. Менделеева, 2002. – 15 с.

124. Павлов, В. А. Пенополистирол / В. А. Павлов. – Москва: Химия, 1973. – 239с.

125. Панченков, Г. М. Химическая кинетика и катализ / Г. М. Панченков, В. П. Лебедев. – Москва: Химия, 1985. – 592 с.

126. Парамонов, Г. П. Физические основы предотвращения сульфидной пыли на колчеданных рудниках : специальность 05.15.11 «Физические процессы горного производства» : дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук / Парамонов Геннадий Петрович ; С.-Петерб. гос. горный ин-т им. Г. В. Плеханова. – Санкт-Петербург, 1999. – 297 с.

127. Патент № 2133007 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 3/04. Способ заряжания нисходящих скважин для щадящего взрывания и устройство для его осуществления : № 98100909/03 : заявл. 14.01.1998 : опубл. 10.07.1999 / Б. Н. Кутузов, В. А. Белин, С. Г. Алябьев [и др.] ; заявитель Московский государственный горный университет, Институт ЯкутНИПроалмаз АК "Алроса".

128. Патент № 2305673 С1 Российская Федерация, МПК С06В 21/00, С06В 47/14, F42D 1/10. 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 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Промтехвзрыв".

129. Патент № 170984 U1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42B 3/087. Рукав для заряжания восходящих скважин эмульсионными взрывчатыми веществами : № 2017103552 : заявл. 02.02.2017 : опубл. 17.05.2017 / Е. А. Дубов ; заявитель Непубличное акционерное общество "НИПИГОРМАШ".

130. Патент на полезную модель № 182481 U1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 3/04. Скважинная забойка : № 2018120782 : заявл. 05.06.2018 : опубл. 21.08.2018 / Г. П. Парамонов, Р. С. Бабкин ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

131. Патент № 2104473 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08. Способ заполнения нисходящих скважин веществом в рукав и устройство для

его осуществления : № 96123451/03 : заявл. 18.12.1996 : опубл. 10.02.1998 / В. С. Прокопенко, А. В. Прокопенко.

132. Патент № 2148784 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/24. Шпуровая забойка : № 99117710/02 : заявл. 09.08.1999 : опубл. 10.05.2000 / Г. П. Парамонов, В. А. Артемов, Ю. А. Миронов ; заявитель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (Технический университет).

133. Патент № 2238256 С1 Российская Федерация, МПК С06В 31/38, С06В 25/04. Взрывчатое вещество для серных и колчеданных рудников : № 2003106037/02 : заявл. 03.03.2003 : опубл. 20.10.2004 / Г. П. Парамонов, Ю. А. Миронов, В. А. Артемов, В. И. Чернобай ; заявитель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет).

134. Патент № 2305674 С1 Российская Федерация, МПК С06В 31/38, С06В 25/08. Взрывчатый состав "ДИТОЛАН-с" : № 2005138227/02 : заявл. 08.12.2005 : опубл. 10.09.2007 / И. А. Абдрахманов, М. Ф. Газизов, Р. А. Ибрагимов [и др.].

135. Патент № 2317519 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08. Способ формирования воздушных промежутков элементами из пенополистирола : № 2006112163/03 : заявл. 12.04.2006 : опубл. 20.02.2008 / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун, Н. К. Лукашевич ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тихоокеанский государственный университет".

136. Патент № 2341766 С2 Российская Федерация, МПК F42D 1/08. Способ формирования воздушных промежутков из пенополистирола и автономная мобильная установка для его осуществления : № 2006142593/03 : заявл. 01.12.2006 : опубл. 20.12.2008 / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тихоокеанский государственный университет".

137. Патент № 2122178 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/20. Забойка для скважин большого диаметра : № 97105629/03 : заявл. 10.04.1997 : опубл. 20.11.1998 / Г. П. Парамонов, Ю. А. Миронов ; заявитель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет).

138. Патент на изобретение 015055 В1 (ЕАРО), МПК С 06В 31/28, С06В 47/14. 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 ; заявитель Кутузов Борис Николаевич, Куприн Виталий Павлович; Маслов Илья Юрьевич, Савченко Николай Васильевич Горинов Сергей Александрович.

139. Патент № 2804470 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 1/10, F42В 3/087. 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 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Глобал Майнинг Эксплозив - Раша".

140. Патент № 2753071 С1 Российская Федерация, МПК С06В 31/28, В01F 17/00. Эмульсионное взрывчатое вещество (варианты) : № 2020140483 : заявл. 09.12.2020 : опубл. 11.08.2021 / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Глобал Майнинг Эксплозив - Раша".

141. Патент № 2818120 С1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42В 3/087. Рукав для заряжания обводненных скважин низкоплотным взрывчатым составом : № 2023132949 : заявл. 13.12.2023 : опубл. 24.04.2024 / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Глобал Майнинг Эксплозив - Раша".

142. Патент на полезную модель № 154388 U1 Российская Федерация, МПК F42D 1/10. Рукав для патрона взрывчатого вещества : № 2015116741/03

: заявл. 05.05.2015 : опубл. 20.08.2015 / П. А. Брагин, И. Ю. Маслов, Е. Г. Сироткин ; заявитель ИП Маслов Илья Юрьевич.

143. Патент на полезную модель № 154389 U1 Российская Федерация, МПК F42D 1/10. Рукав для патрона взрывчатого вещества : № 2015116742/03 : заявл. 05.05.2015 : опубл. 20.08.2015 / П. А. Брагин, И. Ю. Маслов, Е. Г. Сироткин ; заявитель ИП Маслов Илья Юрьевич.

144. Патент на изобретение № 2824083 C1 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42B 3/087, E21C 41/26. Рукав для заряжания обводненных скважин низкоплотным взрывчатым составом : № 2024104329 : заявл. 21.02.2024 : опубл. 01.08.2024 / С. А. Горинов, И. Ю. Маслов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Глобал Майнинг Эксплозив - Раша".

145. Патент на полезную модель № 189566 U1 Российская Федерация, МПК F42D 1/00, F42B 1/00. Заряд для контурного взрывания : № 2018101797 : заявл. 17.01.2018 : опубл. 28.05.2019 / М. Н. Оверченко, С. П. Мозер, В. А. Белин.

146. Патент № 2088893 C1 Российская Федерация, МПК F42D 1/00. Способ заряжания обводненных нисходящих скважин водосодержащими взрывчатыми веществами : № 95112287/02 : заявл. 18.07.1995 : опубл. 27.08.1997 / Б. Н. Кутузов ; заявитель Московский государственный горный университет.

147. Першин, Г. Д. Современные технологические схемы добычи блочного высокопрочного камня / Г. Д. Першин, Н. Г. Караулов, М. С. Уляков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. – № 3. – С. 5-11.

148. Петров, Е. А. Влияние мочевины на термическую стабильность аммиачно-селитренных взрывчатых веществ в сульфидных средах / Е. А. Петров, П. И. Савин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 158-161.

149. Петров, Е. А. Исследование влияния концентрации ингибирующих добавок на химическую стойкость эмульсионных взрывчатых

веществ в среде пирита / Е. А. Петров, И. П. Вдовина, П. И. Савин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 1. – С. 54-58.

150. Петров, Е. А. Исследование влияния стабилизирующих добавок на термическое разложение эмульсионного взрывчатого вещества в среде пирита / Е. А. Петров, П. И. Савин, П. Г. Тамбиев, Н. В. Бычин // Горный журнал Казахстана. – 2016. – № 1. – С. 18-21.

151. Пинаев, А. В. Исследование взрывчатости аэровзвесей сульфидных руд при динамическом нагреве / А. В. Пинаев, А. А. Васильев, А. А. Еременко, П. А. Пинаев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 2. – С. 45-51.

152. Покалюхин, Н. А. Гранулированное промышленное взрывчатое вещество «Дитолан-С» для разработки сульфидных руд / Н.А. Покалюхин, С. А. Кабиров, А. А. Ибрагимов, Р. А. Ибрагимов // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 19. – № 19. – С. 137-140.

153. Прокопенко, В. С. Влияние неэлектрических систем инициирования на совершенствование технологии взрывных работ / В. С. Прокопенко, В.И. Тимошин // Взрывное дело. – 2009. – № 101/58. – С. 141-146.

154. Прокопенко, В. С. Физико-технические основы разрушения скальных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах : специальность 05.15.11 «Физические процессы горного производства» : дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук : защищена 27.02.2003 / Прокопенко Виктор Степанович ; Национальный НИИ охраны труда. – Киев, 2002. – 380 с.

155. Пупков, В. В. Оценка химической совместимости с разрабатываемыми горными породами / В. В. Пупков, И. Ю. Маслов, Л. В. Бачурин, С. М. Лебедев // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 4. – С. 37-40.

156. Пупков, В. В. Результаты дополнительного исследования обстоятельств инцидента, произошедшего 27.08.2003 г. в карьере ОАО

«Лебединский ГОК» при применении ЭВВ / В. В. Пупков, И. Ю. Маслов, Л. В. Бачурин, А. М. Балычев // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – № 6. – С. 14-15.

157. Разработка методических основ эффективного и безопасного применения эмульсионных взрывчатых веществ в сульфидсодержащих горных породах / Отчет о НИР – Москва, ИПКОН РАН, 2022. – 106 с.

158. Руководство по предупреждению самопроизвольных взрывов аммиачно-селитренных ВВ в сульфидных рудах / Утв. Министерством цветной металлургии СССР 4 января 1972, № НЧ – 63/23. – 10 с.

159. Руководство по предупреждению самопроизвольных загораний и взрывов взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры при производстве взрывных работ в медноколчеданных рудах. – Москва: Министерство металлургии, 1991. – 7 с.

160. Румянцев, А.Е. К вопросу влияния параметров заряда и свойств ВВ на формирование контурной щели / А. Е. Румянцев, Г. П. Парамонов, В. Н. Ковалевский // Горно-информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 5. – С. 309-313.

161. Рысс, Ю. С. Геоэлектрохимические методы разведки (Введение в геоэлектрохимию) / Ю. С. Рысс. – Ленинград: Недра, 1983. – 255 с.

162. Савин, П.И. Исследование влияния стабилизирующих добавок на термическую стабильность эмульсионных ВВ в сульфидных рудах / П. И. Савин, Е. А. Петров, П. Г. Тамбиев, Н. В. Бычин // Технологии и оборудование химической, биохимической и пищевой промышленности. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2017. – С. 64-68. – 536 с.

163. Сарнер, С. Химия ракетных топлив / С. Сарнер. – Москва: Мир, 1969. – 488 с.

164. Свешников, Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях / Г. Б. Свешников. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1967. – 159 с.

165. Сильвестров, В. В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ / В. В. Сильвестров, А. В. Пластинин // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 124-133.

166. Симонов, П. С. Анализ взрывчатых характеристик и условий применения эмульсионных взрывчатых веществ / П. С. Симонов, Г. Н. Терпеев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. – Т. 10. - № 1. – С. 8-12.

167. Соболев, А. Е. Кинетика растворения пирита и сфалерита в присутствии окислителей: специальность 02.00.04 «Физическая химия» и 02.00.01 «Неорганическая химия» : дис. на соиск. ученой степ. канд. химич. наук : защищена 24.06.2004 / Соболев Александр Евгеньевич ; ТТГУ. – Тверь, 2004. – 280 с.

168. Справочник по неорганической химии. Константы неорганических веществ / Р. А. Лидин, Л. Л. Андреева, В. А. Молочко. – Москва: Химия, 1987. – 320 с.

169. Столяров, П. Н. Исследование термической стойкости эмульсионных взрывчатых веществ Фортис Эклипс в контакте с сульфидсодержащими породами и рудами / П. Н. Столяров, М. И. Феодоритов, В. Г. Шеменев, Х. Лохни. - В кн. Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле», прошедшей в рамках IV Уральского горнопромышленного форума 12-14 октября 2011 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. – С. 133-142.

170. Страхов, А.Г. Новые промышленные ВВ для взрывания сульфидных руд // А.Г. Страхов, Н.Д. Преснякова, В.А. Тарасов, Р.Х. Габдулин // Горный журнал. – 2006. – № 5. – С. 41-42.

171. Суханов, В. П. Переработка нефти: учебник / В. П. Суханов – Москва: Высшая школа, 1979. – 335 с.
172. Теоретическая оценка детонационной способности эмульсионных ВВ, предназначенных для разрушения сульфидных руд // Отчет о НИР. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2010. – 104с.
173. Тогунов, М. Б. Повышение эффективности взрывания горных пород эмульсионными ВВ / М. Б. Тогунов, С. В. Семкин // В кн.: Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. – С.29-34.
174. Федотенко, С. М. Оптимизация взрывных работ путем рассредоточения заряда в скважинах разреза / С. М. Федотенко, С. В. Гришин, С. В. Кокин, В. С. Федотенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 3. – С. 261-268.
175. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Т. 5. М.: Мир, 1966. – 296 с.
176. Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения с ответами и решениями / Под ред. А. П. Леванюка. М.: Мир, 1969. – 624с.
177. Физико-химические и огнеопасные свойства органических химических соединений. Книга 1: Справочник / Г. Т. Земский. – Москва: ВНИИПО МЧС России, 2009. – 502 с.
178. Франк-Каменецкий, Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2008. – 408 с.
179. Чантурия, В. А. Электрохимия сульфидов: теория и практика флотации / В. А. Чантурия, В. Е. Вигдергауз. – Москва: Наука, 1993. – 206 с.
180. Чернобай, В. И. Снижение выбросов сернистого газа при производстве взрывных работ на колчеданных рудниках : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : автореф. дис. на соиск. ученой

степ. канд. тех. наук / Чернобай Владимир Иванович ; С.-Петерб. гос. гор. ин-т им. Г. В. Плеханова. – Санкт-Петербург, 2003. – 22 с.

181. Чернявский, Э. И. Исследование взрывов сульфидной пыли при проведении горных выработок и изыскание способов их предупреждения : специальность 311 «Подземная разработка и эксплуатация угольных, рудных и нерудных месторождений» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук / Чернявский Эдмонд Иосифович ; Свердл. горный ин-т им. В. В. Вахрушева. – Свердловск, – 1966. – 20 с.

182. Чернявский, Э. И. Забойка как основное средство борьбы со взрывами сульфидной пыли при скважинном взрывании / Э. И. Чернявский, В.Н. Бекчиу // Труды ин-та Унипромедь. – 1969. – Вып. XI.– С. 72-75.

183. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский– М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.

184. Шведов, К. К. О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке / К. К. Шведов, А. Н. Дремин // Взрывное дело. – 1976. - № 76/33. – С. 137-150.

185. Экспертное заключение №20170601-ЭПБ по оценке степени взрывопожароопасности пыли, химической совместимости применяемых промышленных аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с рудами и вмещающими породами с разработкой мероприятий по безопасности проведения взрывных и горных работ при разработке медно-колчеданных руд месторождений АО «Учалинский ГОК»/ Утв. 30. 11. 2017 г. ген. директором ООО «Глобал Майнинг Эксплозив – Раша» Е. Е. Козловской. – пос. Селятино, 2017 год. – 122 с.

186. Экспертное заключение №20170710-02-ЭПБ по разработке Мероприятий по безопасности проведения взрывных и горных работ при разработке медно-колчеданных руд ОАО «Сибирь-Полиметаллы» / Утв. 17.10.2017 г. ген. директором ООО «Глобал Майнинг Эксплозив – Раша» Е. Е. Козловской. – пос. Селятино, 2017 год. – 84 с.

187. Экспертное заключение №20170710-09-ЭПБ по разработке Мероприятий по безопасности проведения взрывных и горных работ при разработке медно-колчеданных руд ЗАО «Урупский ГОК» / УТВ. 23.10.2017 г. ген. директором ООО «Глобал Майнинг Эксплозив – Раша» Е. Е. Козловской. – пос. Селятино, 2017 год. – 45 с.

188. Яковенков, А. Г. ВВ при разработке руд колчеданных месторождений : специальность 05.15.03 «Открытая разработка месторождений полезных ископаемых» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук / Яковенков Александр Георгиевич ; Фрунзен. политехн. ин-т. – Фрунзе. – 1975. – 19 с.

189. Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. Code of Practice. Ammonium Nitrate Emulsions, Suspensions or Gels – ANEs (UN3375). Edition 2. 2012.

190. Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. Code of Practice. Elevated Temperature and Reactive Ground. – Ed. 3. – AEISG, June, 2012.

191. Djerdiev, Alex M. The mechanism of the spontaneous detonation of ammonium nitrate in reactive grounds/ Alex V. Djerdiev, P. Priyananda, // Journal of environmental chemical engineering. –2018. – V. 6 – Issue 1 – P. 281-288. DOI: 10.1016/J.JECE.2017.12.003.

192. Fu-qiang, Yang. Kinetic analysis of thermal decomposition process of emulsion explosive matrix in the presence of sulfide ores/ Fu-qiang Yang, Yong Guo, Yong Lai, Yidu Hong, Shuaiqi Yuan//Sustainability: MDPI. – 2022. – V. 14 (18). –P. 1-11. DOI:10.3390/su141811614

193. Fu-qiang, Yang. Spontaneous combustion tendency of fresh and pre-oxidized sulfide ores/ Yang Fu-qiang, Wu Chao, Li Zi-jun // J. Cent. South Univ. – 2014. – V. 21. – P. 715-719. DOI: 10.1007/s11771-014-1993-5

194. Good, B. H. The oxidation of sulfide minerals in the Sullivan Mine / B. H. Good// CIM Bull. 1977. – № 70 (Copyright (C) 2012 American Chemical Society (ACS). All Rights Reserved.). – P. 83-88.

195. Gorinov, S. A. Detonation characteristics of low-density emulsion explosives sensitized with polystyrene foam beads, and their applicability in perimeter blasting at quarries / Gorinov S. A., 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. – P. 96.
196. Gorinov, S. A. Detonation of a low-density emulsion explosive / Gorinov S. A., Maslov I. Yu. // In the book: Progress in detonation research. Edited by S.M. Frolov. – Moscow. – 2020. – C. 81-82. DOI: 10,30826/ICPDICD12A30.
197. Gorinov, S. A. Physical and technical evaluation of possibility using low-density explosives in smooth blasting / Gorinov S. A., Maslov I. Y. // 11th International Symposium on rock fragmentation by blasting, 24-28 august 2015, Sydney, Australia. - Published by: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – 2015. – P. 555-564.
198. Gunawan, R. Thermal stability and kinetics of decomposition of ammonium nitrate in the presence of pyrite/ Gunawan R., Zhang D. // Journal of hazardous materials. – December 2008. – V.165(1-3). – P. 751-758. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.10.054
199. Johansson, C. H. Methods of physical characterization of explosives / Johansson C. H., Langefors U.// Proc.of the 36th Intern.Congress on Industrial Chemistry. Brussels. – 1972. – V.III. – 610 p.
200. Jung, S. Sulphide Self-Heating: Moisture Content and Sulphur Formation – Montreal: McGill University, 2012. – 104 p.
201. Kovalenko, I. L. Ensuring the safety of the use of bulk emulsion explosives in sulphide rocks/ I. L. Kovalenko, D. V. Shevchik, V. L. Kovalenko// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Science. – 2019. – VII (23) – Issue 193. – P. 32-35. DOI:10.31174/SEND-NT2019-193VII23-07.
202. McKibben, M. A. Oxidation of pyrite in low temperature acidic solutions: Rate laws and surface textures / M. A. McKibben, H. L. Barnes // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1986. – Vol. 50.– P. 1509-1520.

203. Priyananda, P. Premature detonation of an NH_4NO_3 emulsion in reactive ground/ Priyananda P., Djerdjev A. M., Gore J., Neto C., Beattie J. K., Hawkett B. S.// *Journal of Hazardous Materials*. – 2014. – V. 283. – P. 314-320. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.08.070.
204. Rosenblum, F. The key role of sample weathering in self-heating testing methodologies for sulphides. Review of self-heating testing methodologies / F. Rosenblum // XXVII-th International Mineral Processing Congress, 20-24 October 2014, Santiago, Chile. – 9 p.
205. Rosenblum, F. Evaluation and control of self-heating in sulphide concentrates / F. Rosenblum, J. E. Nasset, P. Spira// *CIM Bulletin*. – 2001. – P. 92-99.
206. Rosenblum, F. Review of self-heating testing methodologies /F. Rosenblum, J. E. Nasset, J. A. Finch// 46th Annual Canadian Mineral Processors Operating Conference, Ottawa, Ontario, January 21-23, – 2014. – 9 p.
207. Rosso, K. M. Reactivity of sulfide mineral surfaces / Rosso K. M., Vaughan D. J. // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2006. – V. 61. – P. 557-608
208. Rosso, K. M. Sulphide mineral surfaces / K. M. Rosso, D. J. Vaughan // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2006. – V. 61. – P. 505-556
209. Schaufuss, A. G. Reactivity of surface chemical states on fractured arsenopyrite (FeAsS) toward oxygen / A. G. Schaufuss // *American Mineralogist*. – 2000. – V. 85. – P. 1754-1766.
210. Sherwood, T. K. Mass transfer/ T. K. Sherwood, R. L. Pigford, C. R. Wilke. – New York: McGraw-Hill, 1975. – 677 p.
211. Taylor, B. E. Oxygen and sulfur compositions of sulfate in acid mine drainage: Evidence for oxidation mechanisms / B. E. Taylor, M. C. Wheeler, D. K. Nordstrom // *Nature*. – 1984. – Vol. 308.– P. 538-541.
212. Taylor, B. E. Stable isotope geochemistry of acid mine drainage: Experimental oxidation of pyrite / B. E. Taylor, M. C. Wheeler, D. K. Nordstrom // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1984. – Vol. 48.– P. 2669-2678.

213. Varma, Mohan. Pressure dependence of thermal decomposition of ammonium nitrate oxidizer/ Varma Mohan, M. Pandey, B. L. Gupta// Journal Indian Chemistry Society. – 2003. – № 5 (80). – P. 569-574.

214. Wiersma, C. L. Rates of reaction of pyrite and marcasite with ferric iron at pH 2/ C. L. Wiersma, J. D. Rimstidt // Geochim. Cosmochim. Acta. – Vol. 48. – 1984. – P. 85- 92.

215. Wu, Chao. Investigation of chemical suppressants for inactivation of sulfide ores/ Wu Chao, Li Zi-jun, Zhou Bo, Wang Ping-long, Li Mao-nan// Journal of Central South University of Technology. – 2001. – V. 8(3). – P. 180-184. DOI:10.1007/s11771-001-0050-3

216. Xing-Hua, Xie. Thermal behavior and stability of emulsion explosives in the presence of ferrous ion/ Xing-Hua Xie, Yu-Qing Feng, Shang-Hao Liu, Jing Zhu// Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – V. 139. – P. 999–1006. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08494-0>.

217. Xu, Z. Influence of Iron Ion on Thermal Behavior of Ammonium Nitrate and Emulsion Explosives/ Xu Zhixiang, Liu Dabin, Hu Yiting, Ye Zhiwen, W Yanan// Central European Journal of Energetic Materials, 2010. – № 7(1). – P. 77-93.

218. Xu, Z. Thermal stability and mechanism of decomposition of emulsion explosives in the presence of pyrite/ Zhixiang Xu, Qian Wang, Xiaoru Fu// Journal of hazardous materials. – 2015. – V. 300. – P. 702-710. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.069.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Оценка химической активности горных пород месторождений, разрабатываемых Учалинским ГОКом, при их взаимодействии с аммиачной селитрой

В основу настоящего приложения положены результаты работы [197].

Наиболее целесообразным является обнаруживать химическое взаимодействие путем определения совместимости исследуемых горных пород с веществом – «индикатором»: аммиачной селитрой.

Для этого, все пробы горных пород подвергаются экспериментальным исследованиям на предмет каталитического влияния минералов исследуемого образца на термораспад аммиачной селитры – методом термогравиметрического анализа (ТГА).

Этим же методом пробы горных пород подвергаются экспериментальным исследованиям на предмет каталитического влияния минералов исследуемого образца на термораспад смеси аммиачной селитры с кальциевой селитрой (АС 83,4% и КС 16,6%), а также смеси аммиачной селитры с натриевой селитрой (АС 80% и НС 20%).

Исследуемые горные породы. С целью экспериментального подтверждения сделанных выше заключений, а также для установления качественных показателей наличия каталитического действия и химического взаимодействия АСВВ с представленными горными породами, были проведены следующие исследования.

Куски горных пород (таблица А.1) измельчали на шаровой мельнице до крупности 40 мкм.

Образцы горных пород смешивались с аммиачной селитрой и смесями селитр (АСВВ) и исследовались методом термогравиметрического анализа (ТГА) на стандартном ТГА-спектрометре «МХ-50» (производства «AND», Япония) со скоростью нагрева 10 градусов/минуту, до 200 градусов Цельсия (время опыта – 20 минут). Общий вид указанного ТГА-спектрометра показан на рисунке А1.



Рисунок А.1 – ТГА-спектрометр «MX-50»

Таблица А.1 – Перечень исследуемых горных пород и их геологическая характеристика

№ обра- зца	Наименование	Краткая геологическая характеристика
1	2	3
Молодежное месторождение		
1.	Медно-цинковый колчедан	Желтого цвета. Текстура массивная. Структура мелкозернистая. По плоскостям трещин развит кварц-карбонатный материал до 5%. <i>Si</i> около 1,2 %, <i>Zn</i> 1,7...2,2%, пирита до 35%
2.	Медный колчедан	Латунно желтого цвета. Текстура массивная. Структура среднезернистая. На плоскостях трещин – побежалость борнита (фиолетово-синего цвета). С единичными прожилками сфалерита. По трещинам нерудные минералы - кварц и кальцит сост. до 5%. <i>Si</i> до 5% и более, <i>Zn</i> до 2%, пирита более 35%
3.	Медно-цинковая вкрапленная руда по риолитовому порфиру	Пестро-серого цвета. Прожилково-вкрапленной текстуры, мелко-неравнозернистой структуры. Пирит в виде микрокристаллов размерами 1...2 мм (составляет до 15% от общей массы породы), халькопирит и сфалерит в виде лент (составляет 1...3% от общей массы породы), по трещинам кальцит и кварц карбонатный материал.
4.	Дацитовый порфир (подрудная толща)	Темно зеленого цвета, среднезернистой структуры, брекчиевидной текстуры. Интенсивно окварцованный (до 50%). Без видимой рудной минерализации.

Продолжение таблицы А1

1	2	3
5.	Гематит кварцевая порода по кварцевому дацитовому порфиру (надрудная толща)	Зеленовато-серого, вишнево-красного цвета, окварцованная (более 30%). Текстура брекчированная, структура неравномерно крупнозернистая без видимой рудной минерализации.
Озерное месторождение		
6.	Медноколчеданная руда мелкозернистой структуры, массивная	Халькопирит латунно-желтого цвета присутствует в виде тонкозернистой массы 10% Пирротин кремового цвета отмечается в виде прожилковидных образований – 7% Основная рудная масса выполнена мелкозернистым пиритом, который занимает 83% В руде также присутствуют продукты окисления пирротина буровато-черного цвета до 7 %
7.	Медноцинковая колчеданная руда брекчиевидной текстуры, массивная	Обломки размером до 1 см сложены мелкозернистым пиритовым агрегатом занимают 60% и халькопирит-пирит-сфалеритовым материалом до 10%. Обломки цементируются сфалерит-пиритовым материалом. Нерудные минералы представлены кальцитом в виде единичных гнезд
8.	Габбро-диорит мелкозернистой структуры, массивной текстуры	Минеральный состав: плагиоклаз - 40%, темноцветных минералов (пироксен) – 60%

Продолжение таблицы А1

1	2	3
9.	Диабаз тонко-мелкозернистой структуры, массивной текстуры	Минеральный состав представлен: плагиоклаз - 30%, темноцветных минералов (пироксен) - 70%
10.	Эксплозивные брекчии кислого состава зеленовато-серого цвета	Обломки остроугольной формы размером до 7 см., представлены риолитами скрытозернистой структуры, с мелкими кристаллами пирита и занимают до 75% от общей массы. Цементирующая масса окварцована, частично хлоритизирована и содержит сульфидную минерализацию представленная пиритом в виде гнездообразных скоплений
Западно-Озерное месторождение		
11.	Медная колчеданная руда неравномернозернистой структуры, массивной текстуры	Рудные минералы: халькопирит 5%, сфалерит 2%, пирит 93%
12.	Медно-цинковая колчеданная руда тонкозернистой структуры, массивной текстуры	Рудные минералы: халькопирит в виде тонкозернистых масс 10%, сфалерит в виде стяжений, прожилковидных образований до 7%, блёклая руда(тенантит) 3%, пирит 80%
13.	Андезиты тонкозернистой зернистой структуры, массивной текстуры, окварцованные	На общем фоне выделяются нечеткие вкрапленники плагиоклаза 3%, пироксена 3%. Трещины мощностью до 1 см, заполнены эпидот-кварцевым материалом
14.	Дацинты скрытозернистой структуры, массивной текстуры	На общем фоне выделяются вкрапленники плагиоклаза таблитчатой фермы 5...7%, основная масса затронута гематитизацией. По трещинам развивается кальцит

Продолжение таблицы А1

1	2	3
15.	Андезидациты тонкозернистой зернистой структуры, массивной текстуры	На общем фоне выделяются нечеткие вкрапленники плагиоклаза таблитчатой формы 3%, пироксена 7-10%, темно-зеленого цвета изометричной формы. Трещины заполнены эпидот-кварцевым материалом
Узельгинское месторождение		
16.	Медно-цинковый колчедан	Тонко-, мелкозернистой структуры, массивной текстуры. Минеральный состав: пирит 85...90%, халькопирит в виде тонкозернистых масс до 2%, сфалерит до 3%. Нерудные минералы: серицит
17.	Медно-цинковый колчедан	Тонко-, мелкозернистой структуры, массивной текстуры. Минеральный состав: пирит 85...90%, халькопирит в виде тонкозернистых масс до 2%, сфалерит до 3%. Нерудные минералы: серицит
18.	Серный колчедан	Массивной текстуры. Минеральный состав: пирит. Нерудные минералы: серицит
19.	Медный колчедан	Мелкозернистой структуры, массивной текстуры. Минеральный состав: халькопирит
20.	Эруптивная брекчия смешанного состава	В обломках пирит, дациты, липариты. В цементе туф кислого состава
21.	Базокварцевый дацитовый порфирит	Мелкозернистой структуры, массивной текстуры
22.	Кварцевый дацитовый порфирит	Порфировой структуры, массивной текстуры. Порфировые вкрапленники представлены кварцем до 40%

Продолжение таблицы А1

1	2	3
23.	Диабаз	Мелкозернистой структуры, массивной текстуры
24.	Плагиоклазовый порфирит	Порфировой структуры, массивной текстуры. В порфировые включения: плагиоклаз до 20%
25.	Известняк мраморизованный	Мелкозернистой структуры, массивной текстуры
26.	Медно-вкрапленная руда по кварц-хлоритовомуметасоматиту	Рудные минералы: халькопирит 10 %, пирит 10%
27.	Кварц-серицит-пиритовый метасоматит	Кварц до 20%, серицит 50%, пирит 30%
28.	Цинковый колчедан	Мелко-, тонкозернистой структуры, массивной текстуры. Минеральный состав: сфалерит до 70%, пирит до 20%, халькопирит 2%. Нерудные минералы: кварц, хлорит до 10%
Талганское месторождение		
29.	Гематит-кварцевая порода	Мелкозернистой структуры, массивной текстуры.
30.	Гематит-кварцевая порода с прожилковидной вкрапленностью сульфидов	Халькопирит до 2%, сфалерит до 3%
Учалинское месторождение		
31.	Риолит	Серого цвета скрытокристаллической структуры с редкими прожилками кварца по трещинам

Продолжение таблицы А1

1	2	3
32.	Базальты	Порфировой структуры, массивной текстуры с содержанием вкрапленников плагиоклаза до 15% от общей массы
33.	Дайка габбро-диоритового состава	Порфировой структуры массивной текстуры с мелкими прожилками кварц-эпидотового состава
34.	Риолит	Сероватого облика мелкозернистой структуры, массивной текстуры, серицитизированный, окварцованный. Встречаются мелкие прожилки кварц-эпидотового состава
35.	Массивный медно-цинковый колчедан	С равномернозернистой текстурой. Минеральный состав представлен халькопиритом около 3%; сфалеритом около 5%; пирита более 90%. По плоскостям трещин отмечается борнит. Из нерудных минералов по трещинам редко хлорит. По плоскостям трещин отмечается борнит
36.	Вкрапленный медно-цинковый колчедан	Со слоисто полосчатой текстурой. Слоистость чередуется сфалерит-пиритовыми слойками с халькопирит-пиритовыми слойками. Минеральный состав состоит из халькопирита около 2% сфалерита около 15%; пирита около 82%. Нерудный минерал представлен гематитом
Ново-Учалинское месторождение		
37.	Плагиоклазовый базальт	Порода состоит из вкрапленников (10...15%) плагиоклаза, пироксена до 5% и тонкозернистой основной массы

Продолжение таблицы А1

1	2	3
38.	Габбро порфировидной структуры, массивной текстуры	Крупные вкрапленники плагиоклаза (10%), пироксена. Основная масса полнокристаллической структуры сложена теми же минералами
39.	Игнимбритовидный туф риодацитового состава	Обломочный материал представлен окварцованными риолитами уплощённо-вытянутой формы и единичными базальтами. Размер обломков от 5 до 15 мм. Цементирующая масса представлена лавовым материалом, затронутым окварцеванием, серицитизацией
40.	Медная колчеданная руда неравнозернистой структуры, массивной текстуры	Минеральный состав: халькопирит в виде тонкозернистых масс 3%, сфалерит в виде рассеянных масс – 2%, пирит – 95%. Нерудные минералы кальцит до 1%
41.	Риодацит массивной текстуры	Из вкрапленников (15%) плагиоклаза, кварца (7%) и тонкой фельзитовой массы
42.	Массивная медно-цинковая колчеданная руда брекчиевидно-полосчатой текстуры	Минеральный состав представлен халькопиритом в виде рассеянных масс – 3%, сфалеритом в виде прожилковидных образований 10%, пиритом 85%. Нерудные минералы – кальцит до 2%

Результаты исследований. В качестве контрольных образцов («эталонных») исследовались методом ТГА-анализа также:

- чистая аммиачная селитра квалификации «ХЧ», с остаточной влажностью около 0,1% массовых;
- смесь селитр: 83,4% аммиачной и 16,6% кальциевой;
- смесь селитр: 80% аммиачной и 20% натриевой;
- смесь 90% аммиачной селитры с 10% пирита (FeS_2 – сильная каталитическая добавка);
- 90% смеси селитр (84,3% аммиачной и 16,6% кальциевой) с 10% пирита;
- 90% смеси селитр (80% аммиачной и 20% натриевой) с 10% пирита.

Образцы представленных на исследование горных пород предварительно измельчались вручную в фарфоровой ступке и смешивались в соотношении 10:90 (% , массовых):

- 10% порошок породы и 90% аммиачная селитра;
- 10% порошок породы и 90% смеси селитр (состава: 83,4% аммиачной селитры и 16,6% кальциевой);
- 10% порошок породы и 90% смеси селитр состава: 80% аммиачной селитры и 20% натриевой);
- 10% порошок породы и 90% аммиачная селитры с карбамидом: 95% аммиачной селитры и 5% карбамида);
- 10% порошок породы и 90% аммиачная селитры с уротропином: 95% аммиачной селитры и 5% уротропина).

Рекомендации по составу модельных образцов взяты из работы [62].

На рисунках А.2-А.145 приведены диаграммы ТГА-исследования на ТГА-спектрометре «МХ-50» и представлены в виде потери массы исследуемого образца (%) во времени (скорости нагрева образцов 10 градусов Цельсия в минуту, начиная с 5 °С). На указанных диаграммах отмечена потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту.

Из результатов ТГА-исследования следует, что образцы пород №№4, 5 (Молодежное месторождение), №№8,9,10 (Озерное месторождение), №№13, 14 (Западно-Озерное месторождение), №№ 20-25, 28 (Узельгинское месторождение), №29 (Талганское месторождение), №№31-34 (Учалинское месторождение), №№38, 39, 41 (Ново-Учалинское месторождение) не оказывают какого-либо значительного каталитического воздействия на аммиачную селитру.

Образцы №№ 7, 11, 16-20, 27, 30, 35, 40 в смесях аммиачной и кальциевой селитр проявляют высокую активность.

С активными породами, были проведены дополнительные замеры термораспада составов с добавлением карбамида и уротропина (до 5%) в качестве ингибиторов.

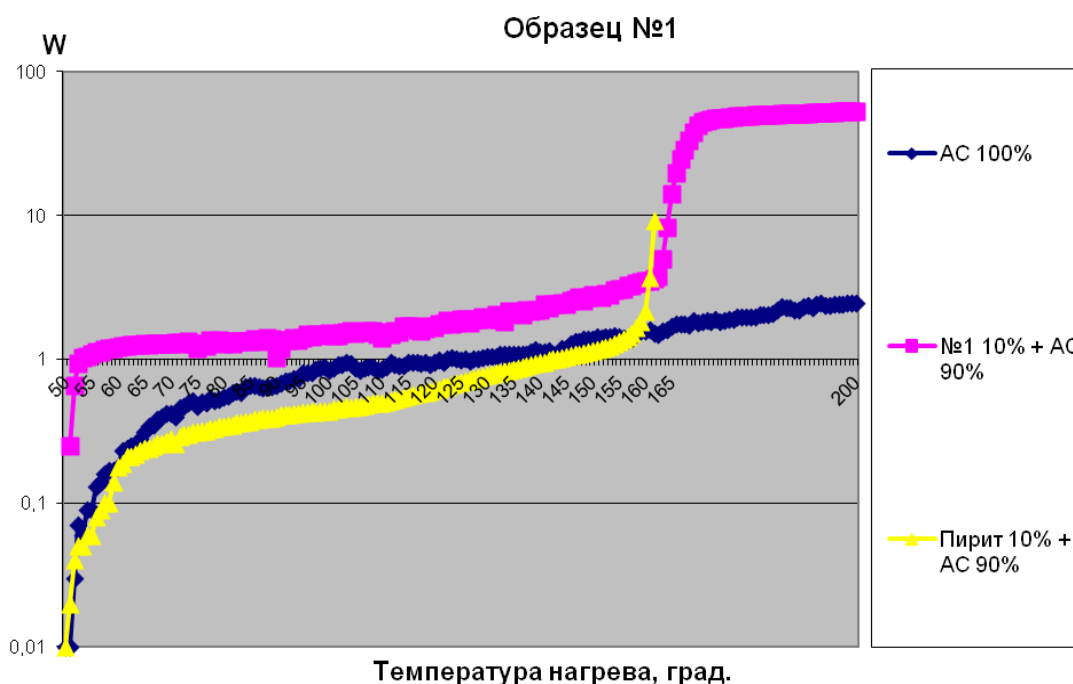


Рисунок А.2 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: AC – 100%; смесь 10% образца №1 с 90% AC; смесь 10% пирита с 90% AC

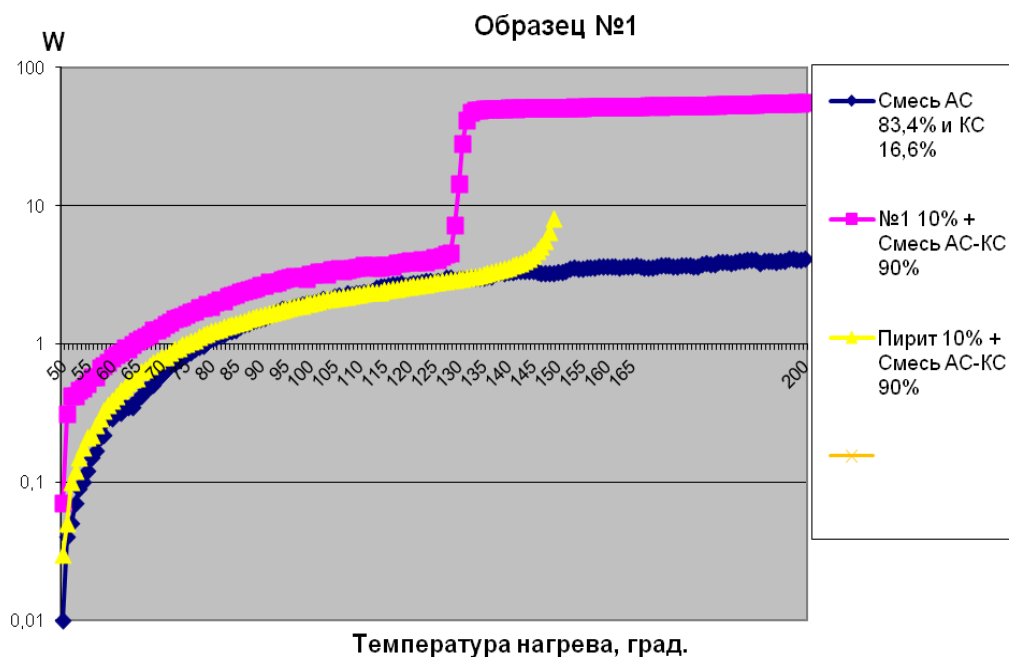


Рисунок А.3 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №1 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

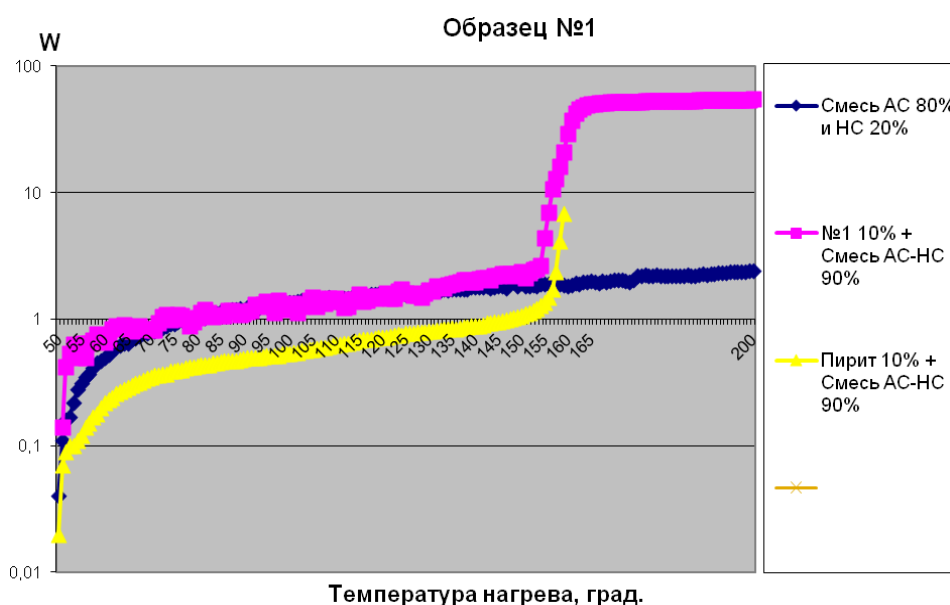


Рисунок А.4 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №1 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

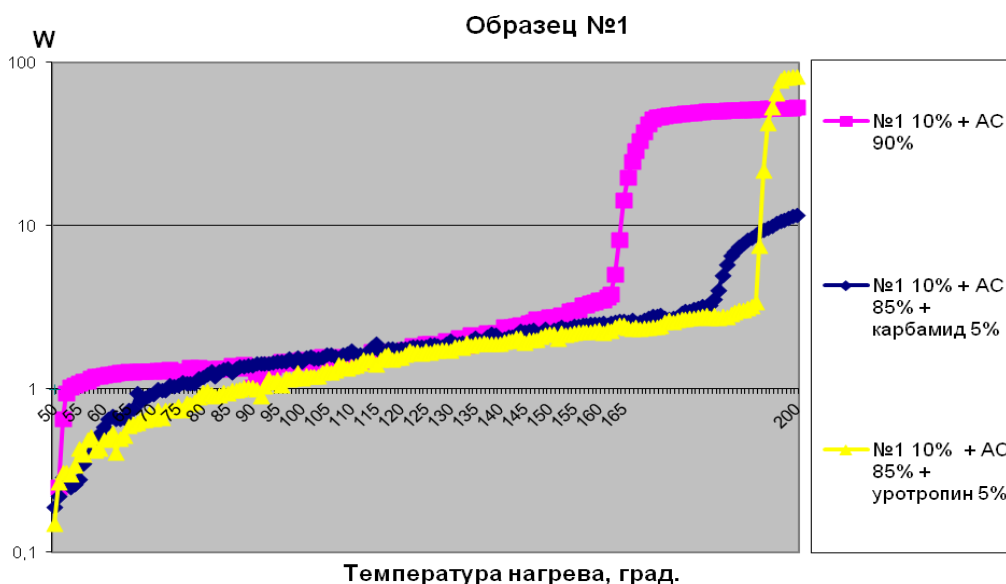


Рисунок А5 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №1 с 90% смеси AC; смесь 10% образца №1 с 85% смеси AC и 5% карбамида; смесь 10% образца №1 с 85% смеси AC и 5% уротропина

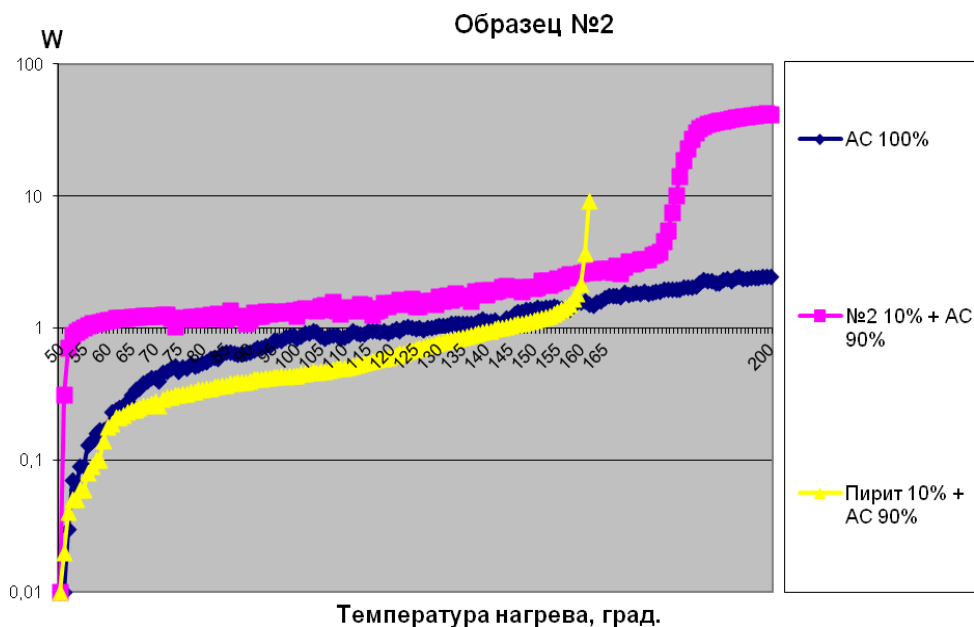


Рисунок А.6 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: AC – 100%; смесь 10% образца №2 с 90% AC; смесь 10% пирита с 90% AC

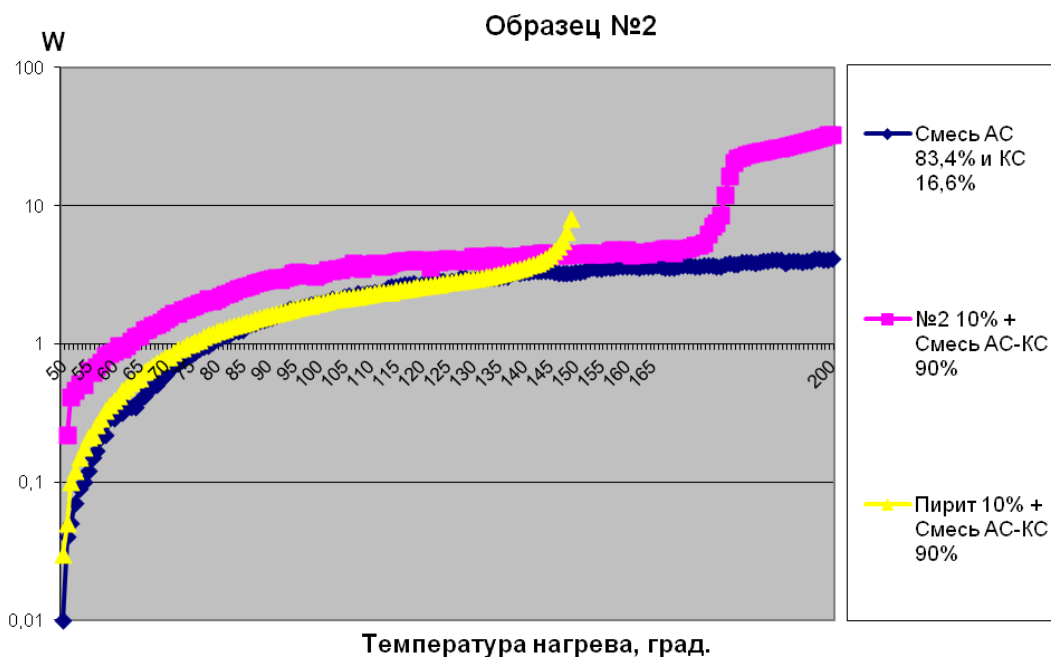


Рисунок А.7 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №2 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

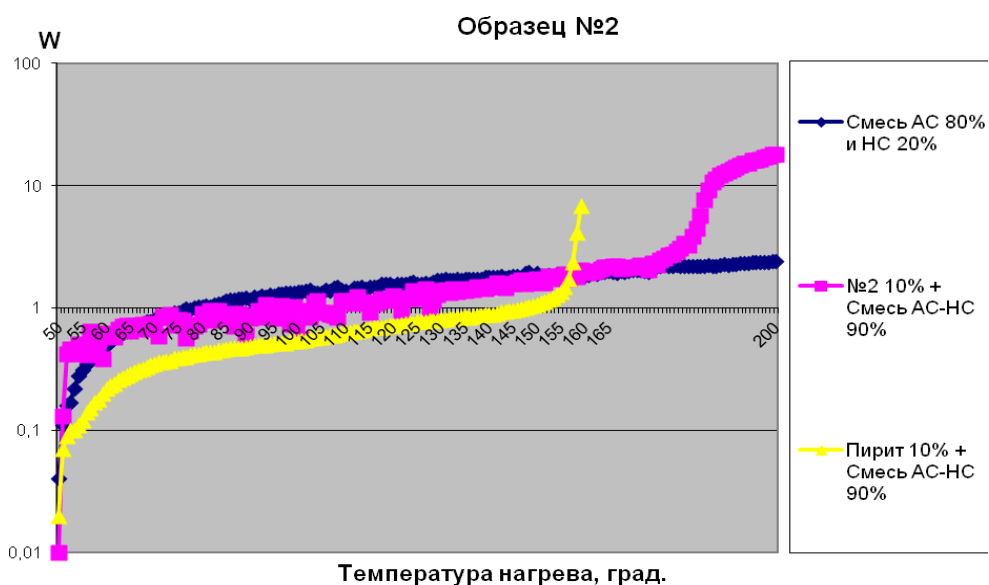


Рисунок А.8 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №2 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

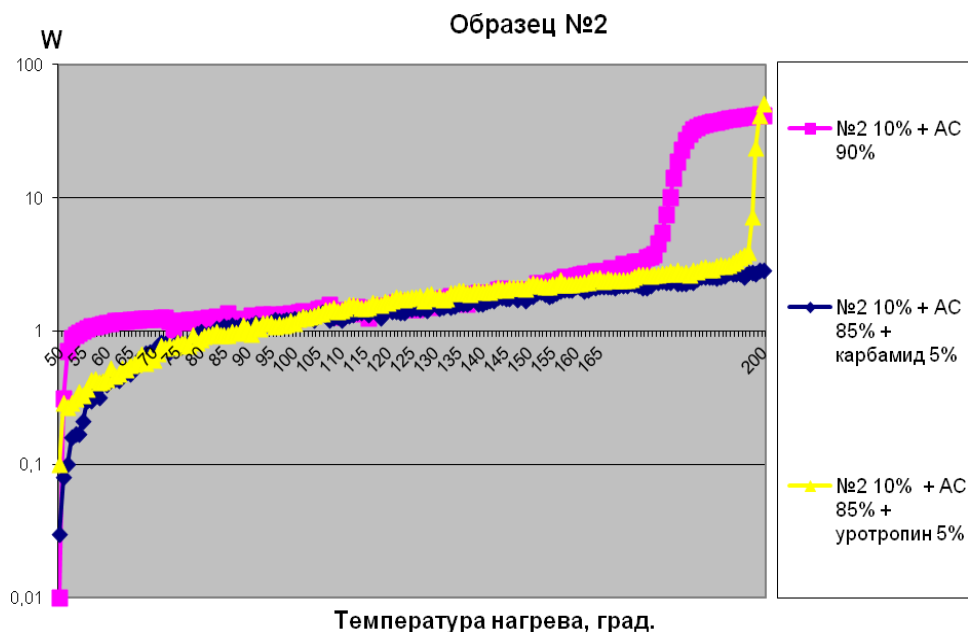


Рисунок А.9 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №2 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №2 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №2 с 85% смеси АС и 5% уротропина

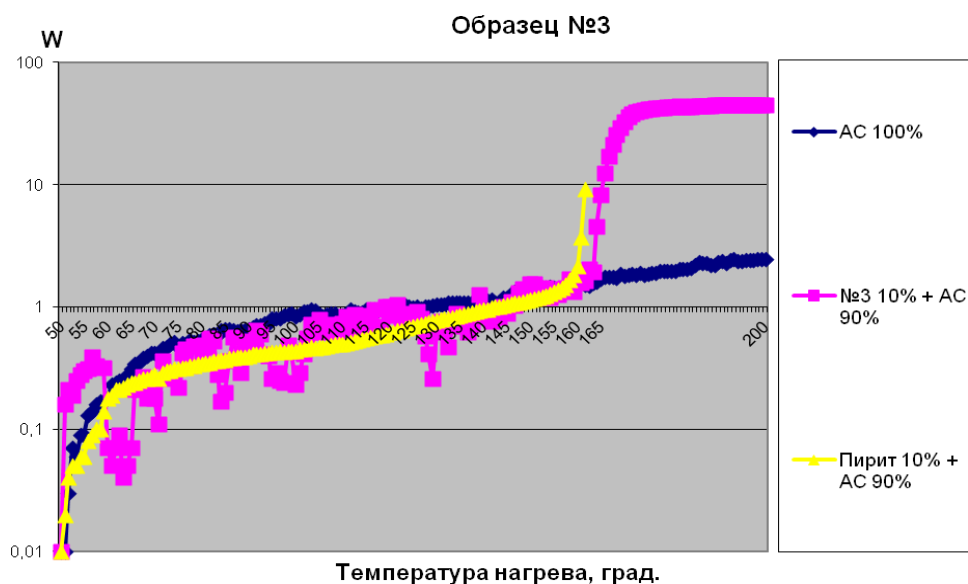


Рисунок А.10 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №3 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

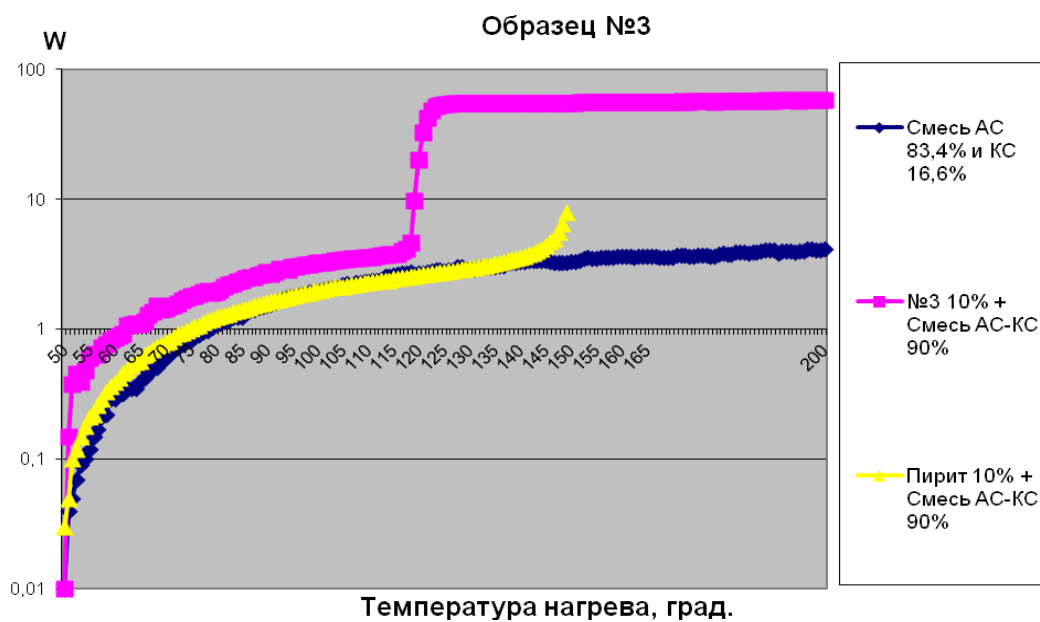


Рисунок П.11 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №3 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

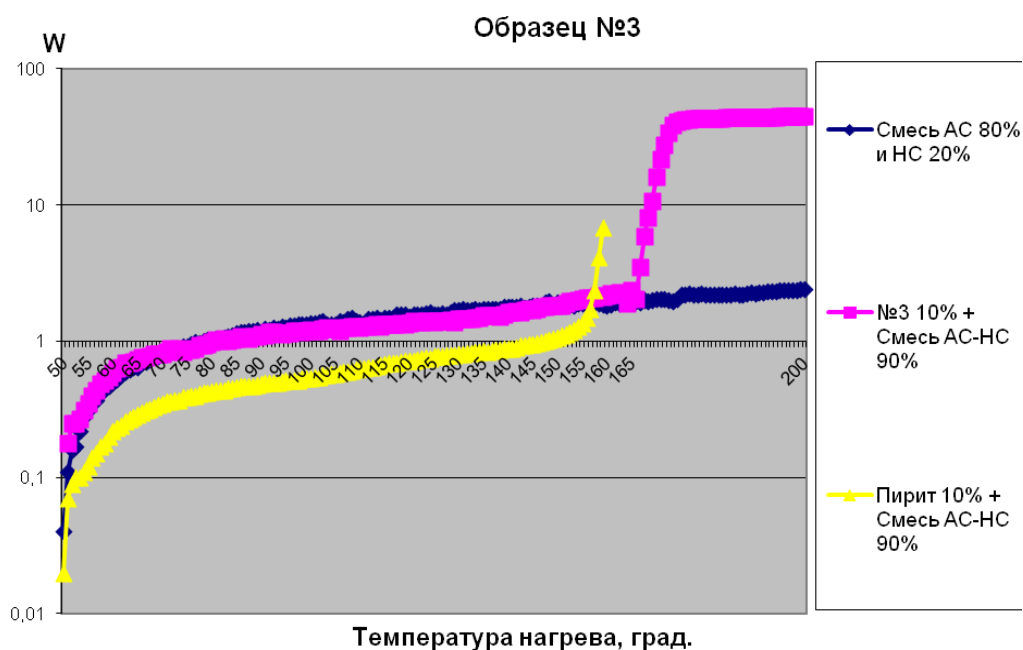


Рисунок А.12 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №3 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

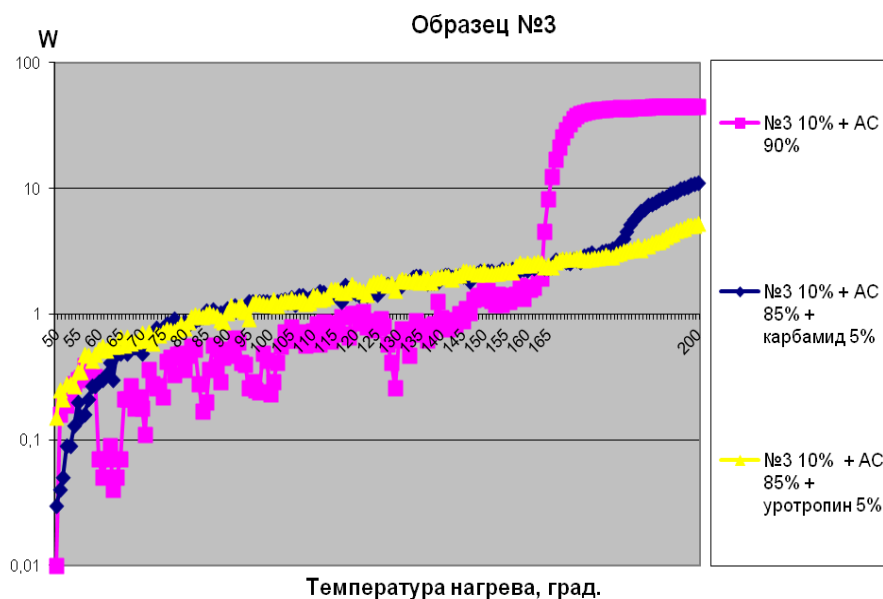


Рисунок А.13 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №3 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №3 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца 3 с 85% смеси АС и 5% уротропина

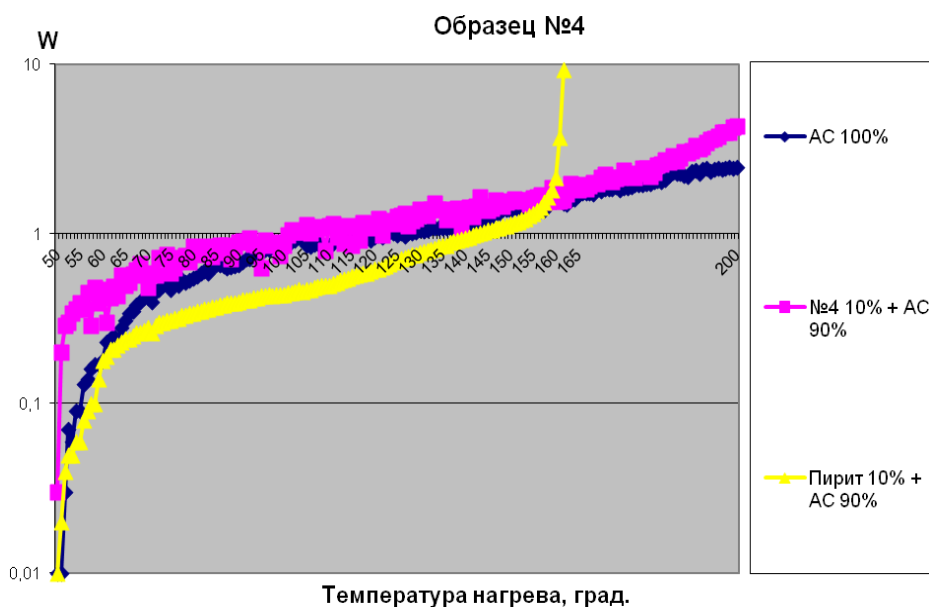


Рисунок А.14 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №4 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

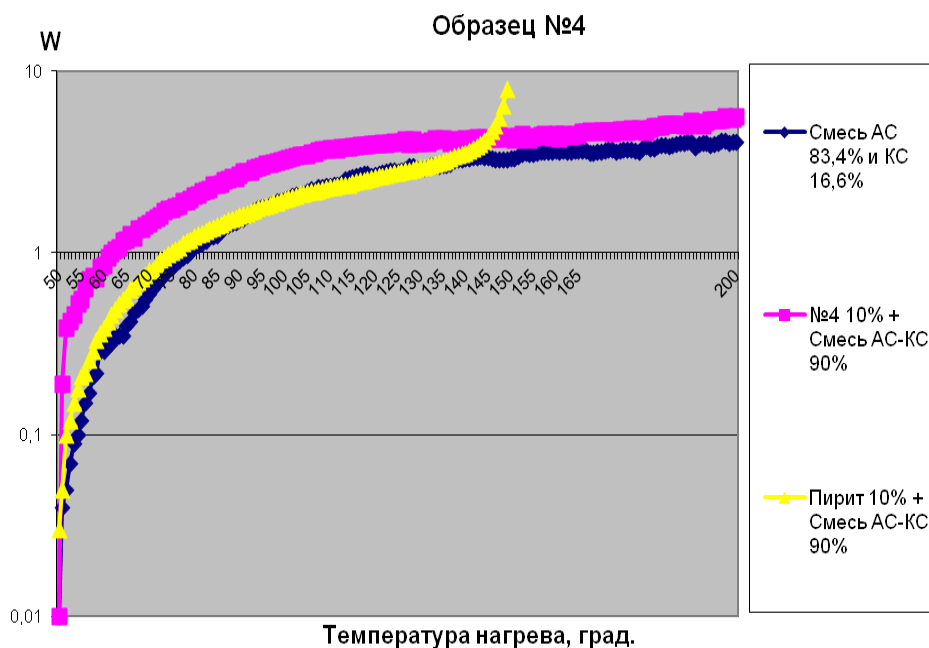


Рисунок А.15 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №4 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

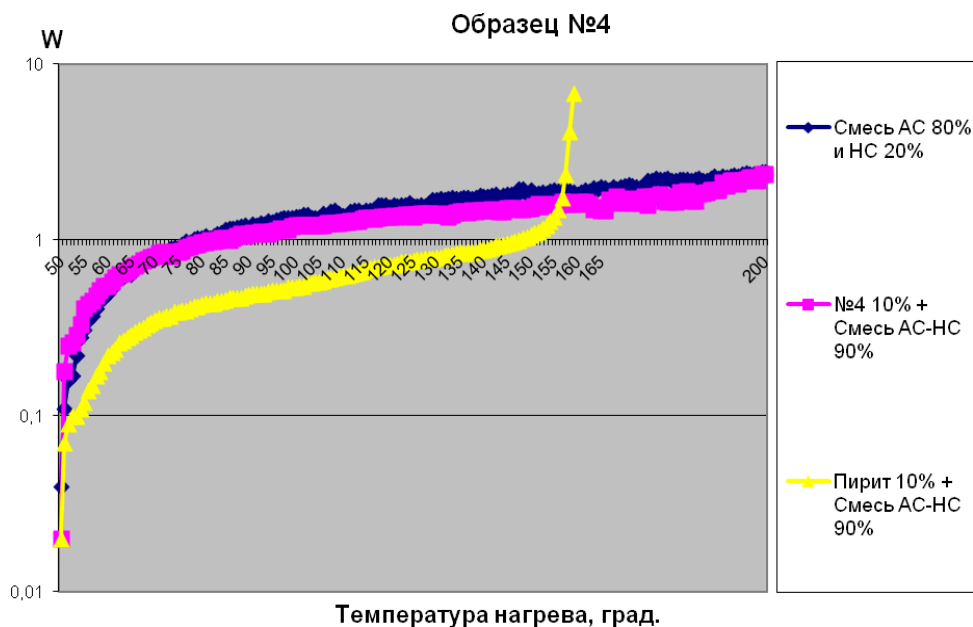


Рисунок А.16 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №4 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

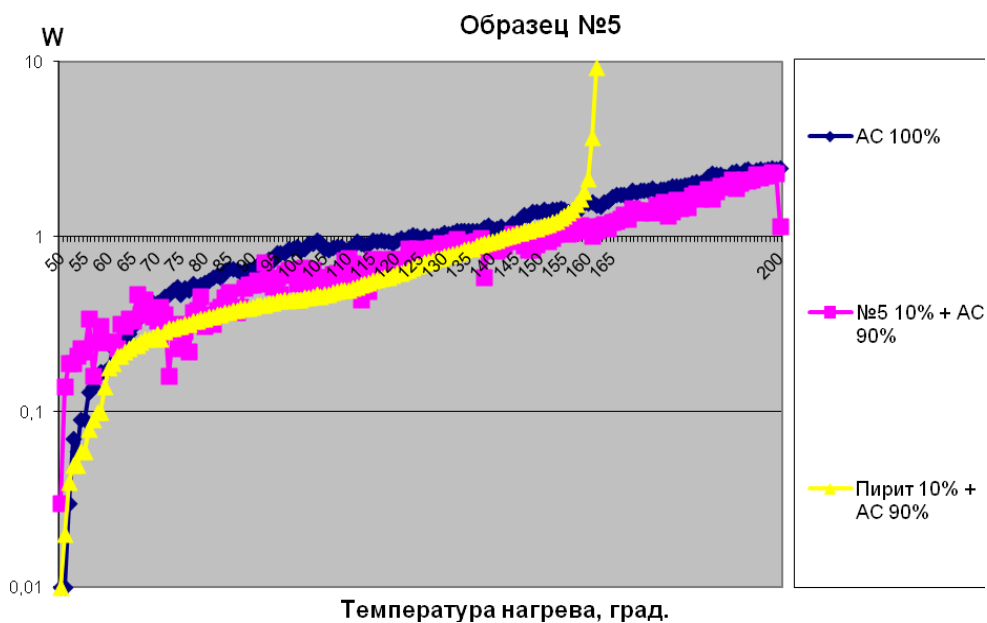


Рисунок А. 7 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №5 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

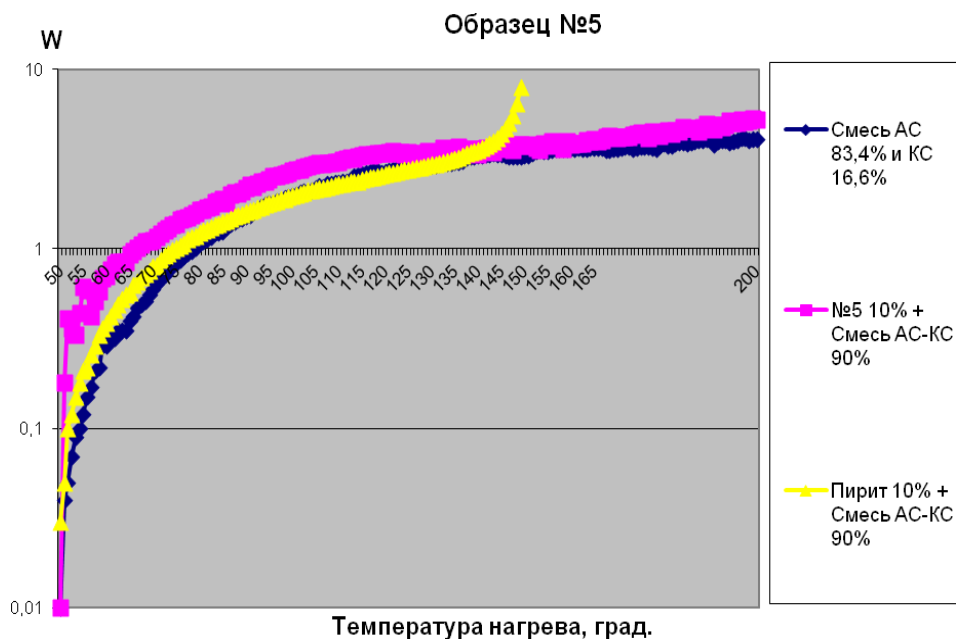


Рисунок А.18 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №5 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

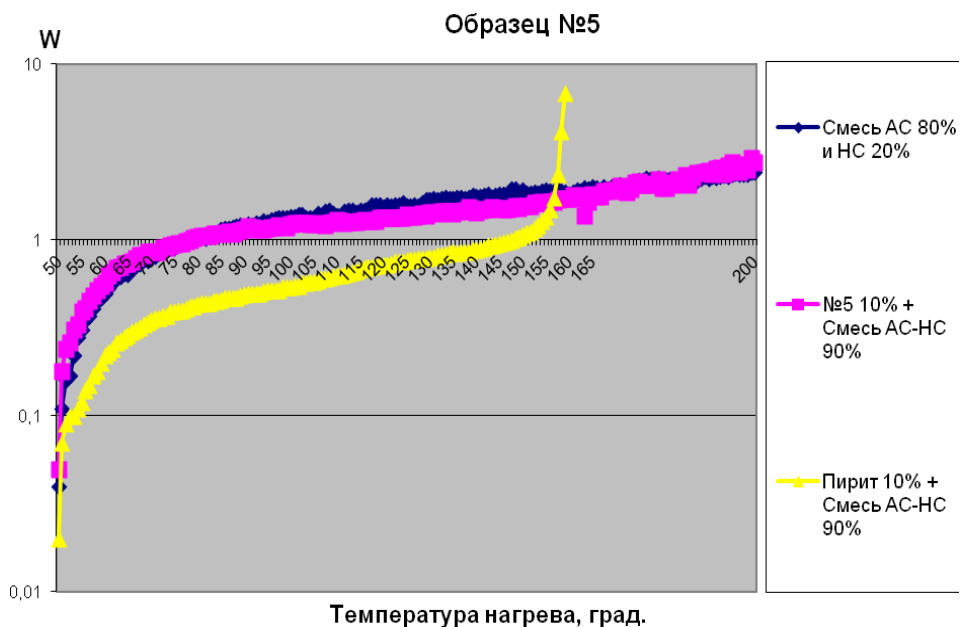


Рисунок А.19 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №5 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

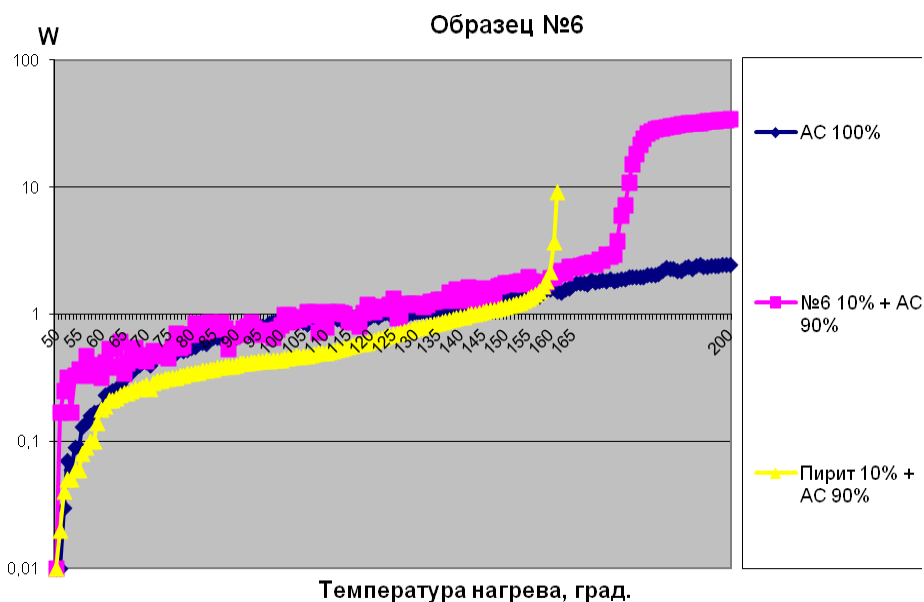


Рисунок А.20 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №6 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

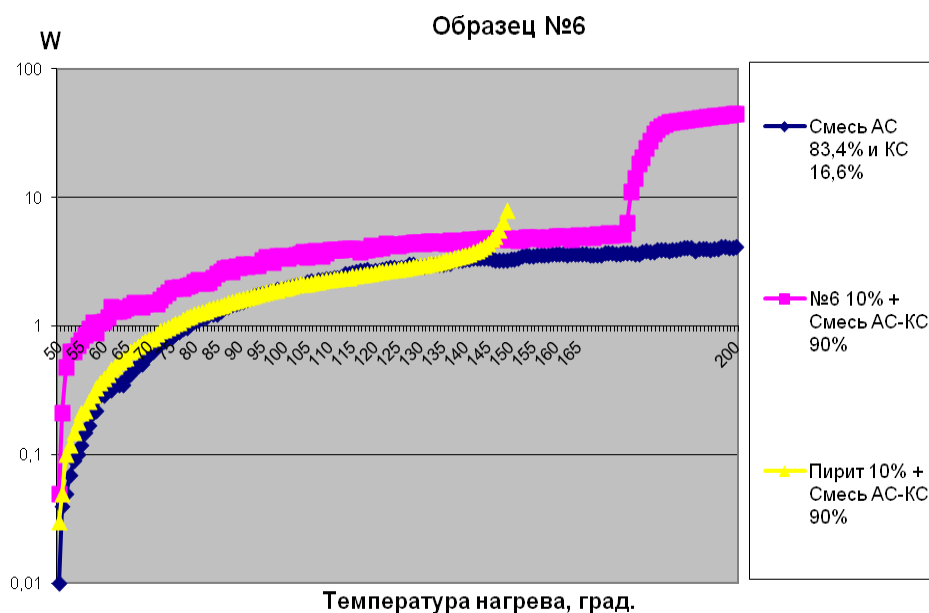


Рисунок П.21 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №6 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

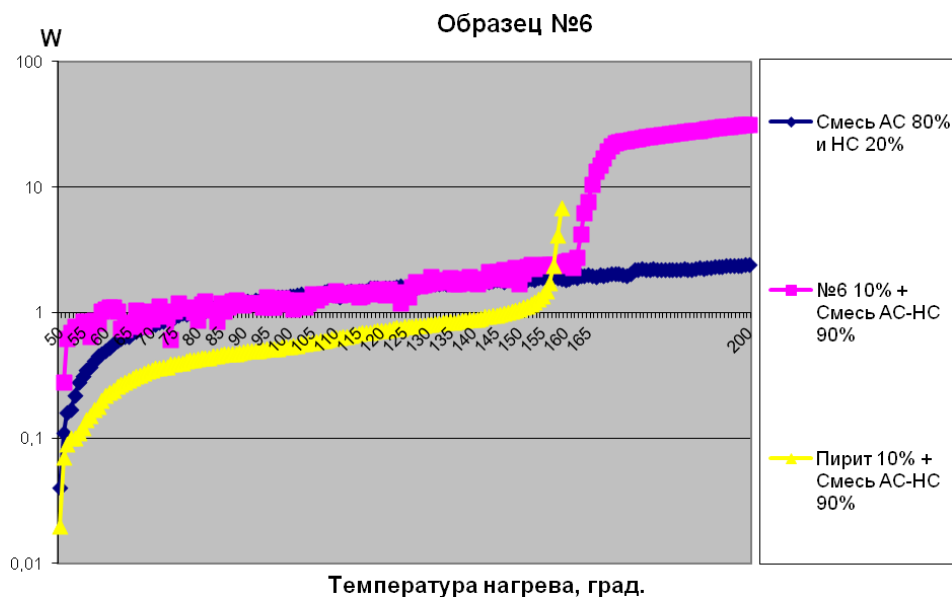


Рисунок А.22 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №6 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

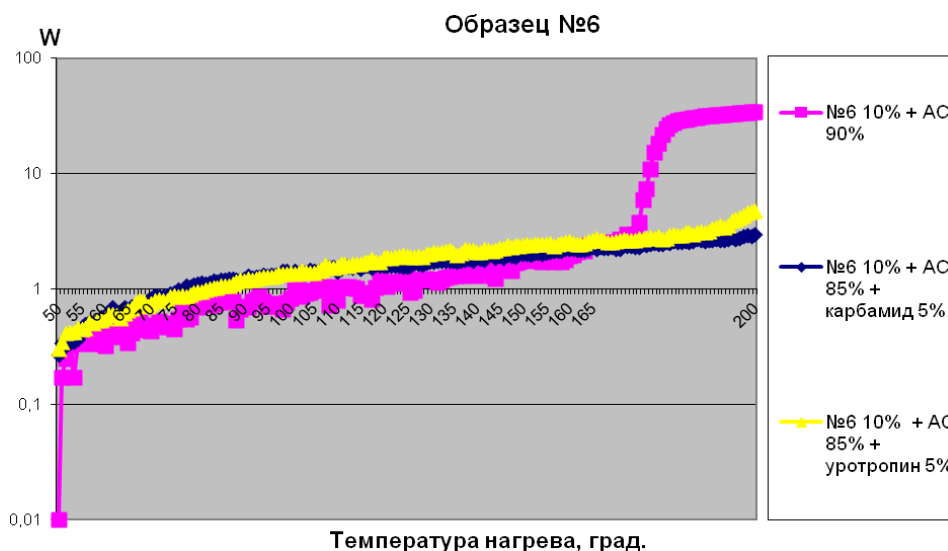


Рисунок А.23 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №6 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №6 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №6 с 85% смеси АС и 5% уротропина

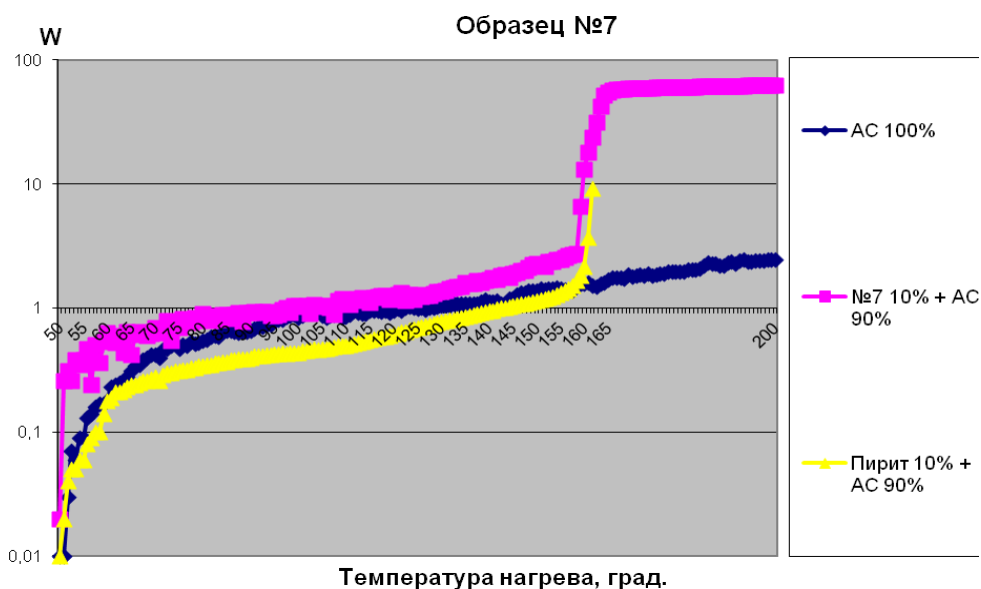


Рисунок А.24 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №7 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

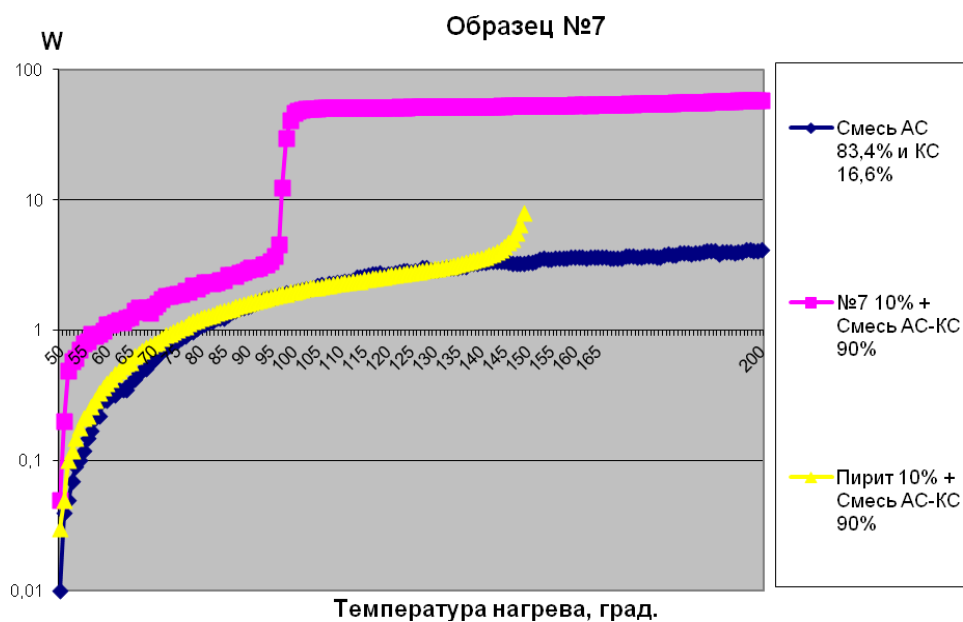


Рисунок А.25 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №7 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

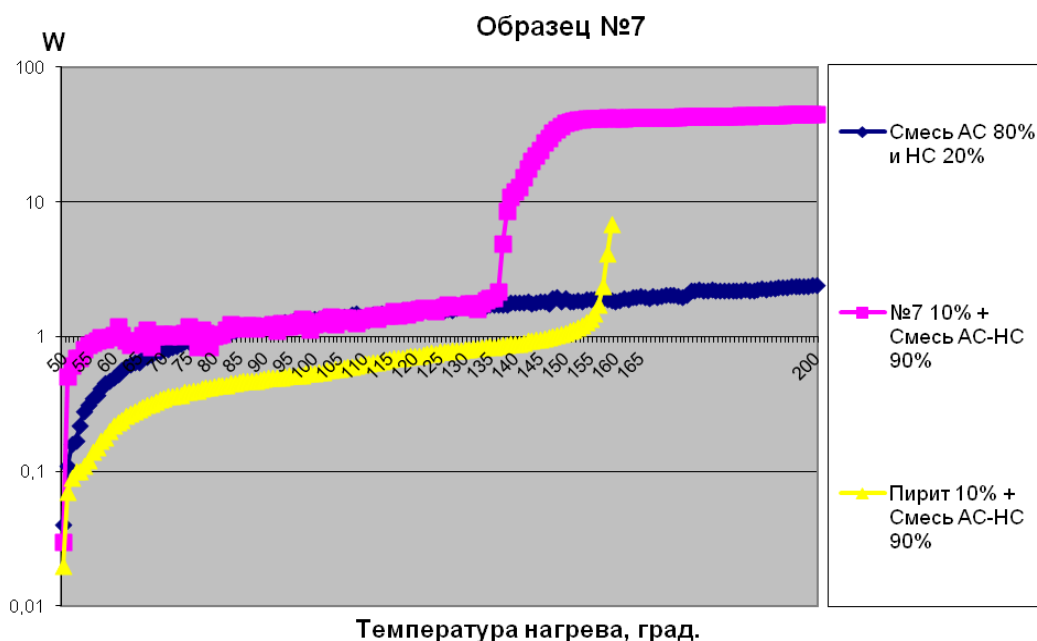


Рисунок А.26 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №7 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

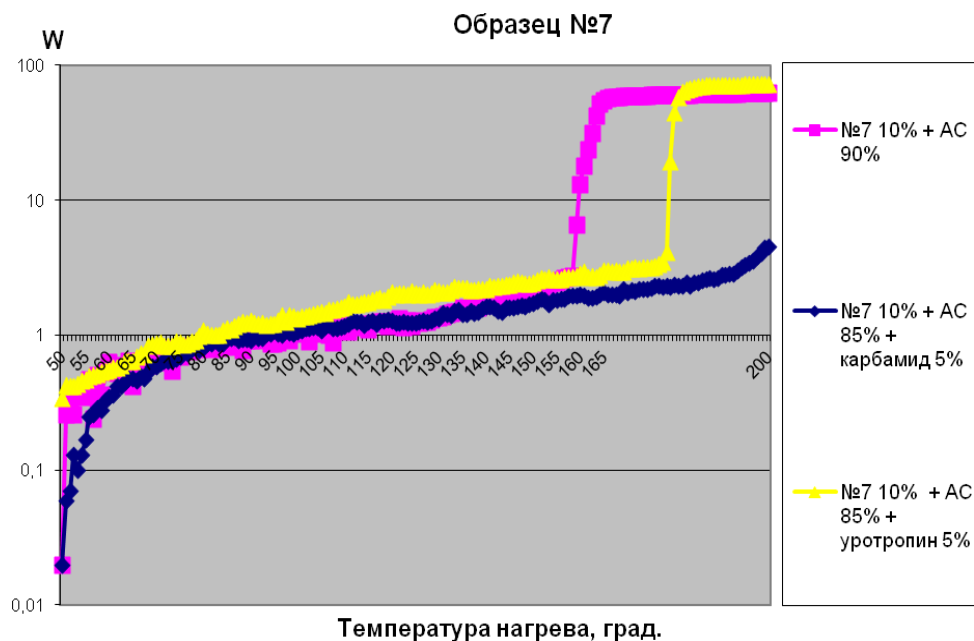


Рисунок А.27 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №7 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №7 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №7 с 85% смеси АС и 5% уротропина

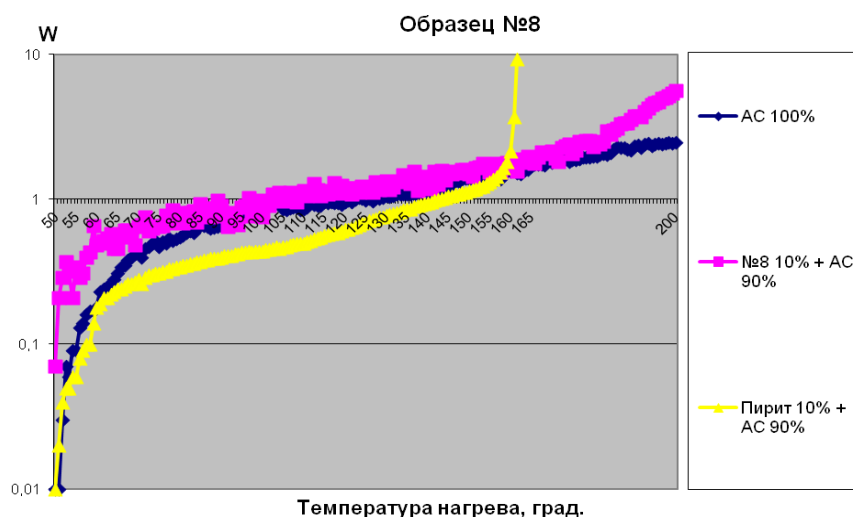


Рисунок А.28 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №8 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

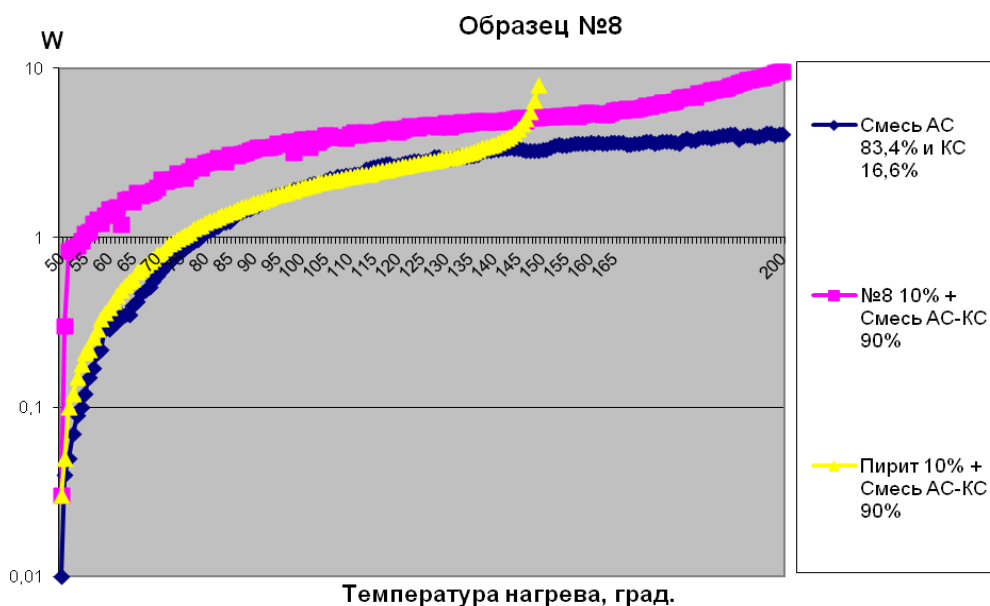


Рисунок А.29 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №8 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

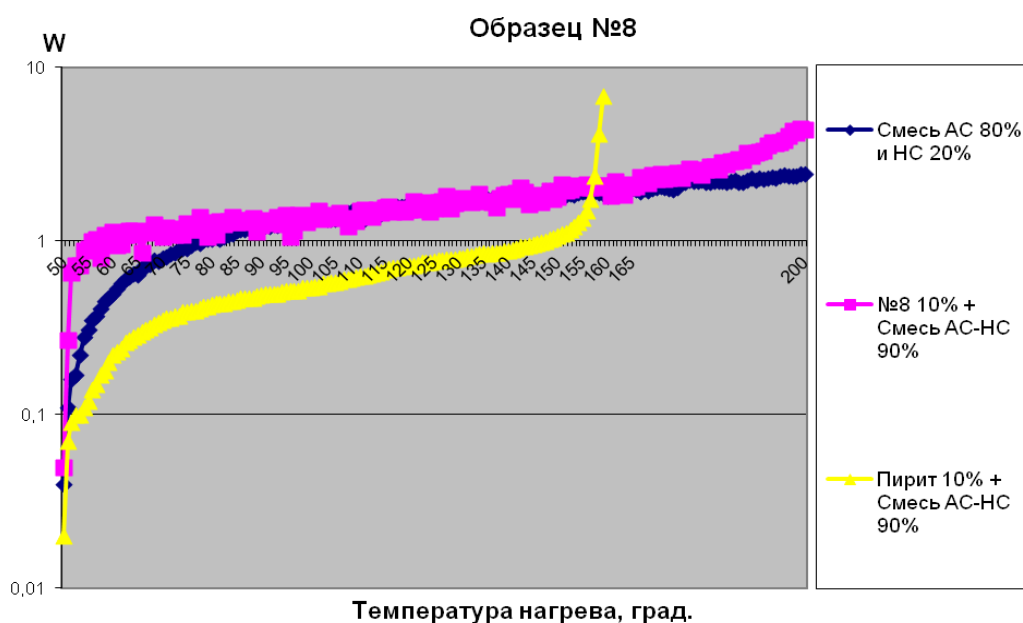


Рисунок А.30 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №8 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

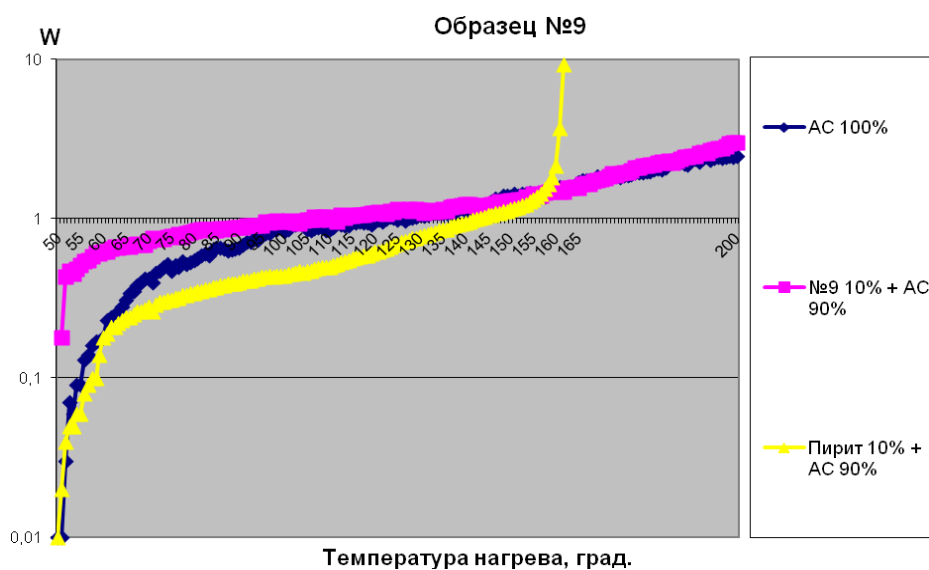


Рисунок А.31 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №9 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

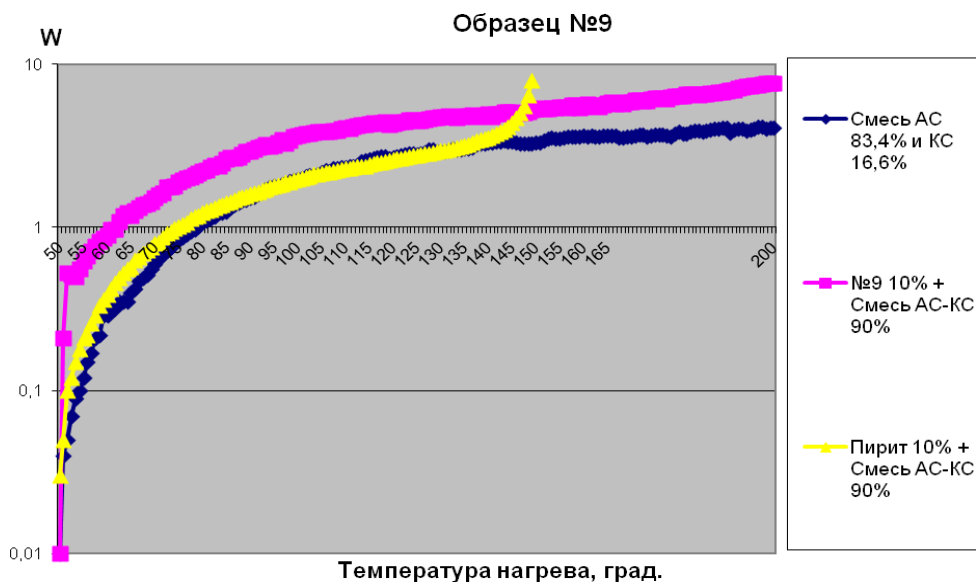


Рисунок А.32 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №9 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

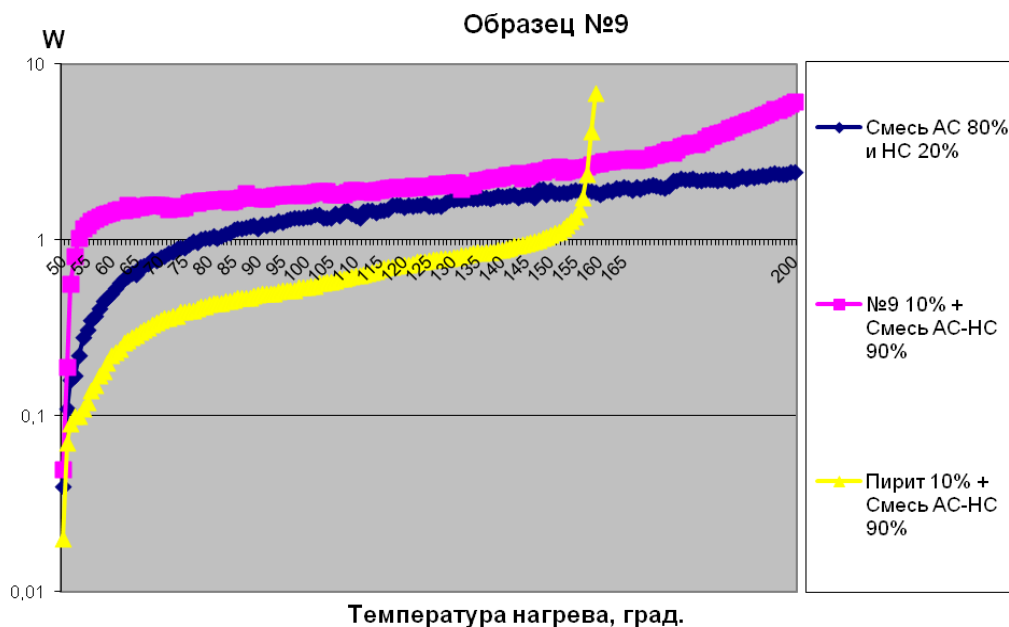


Рисунок А.33 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №9 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

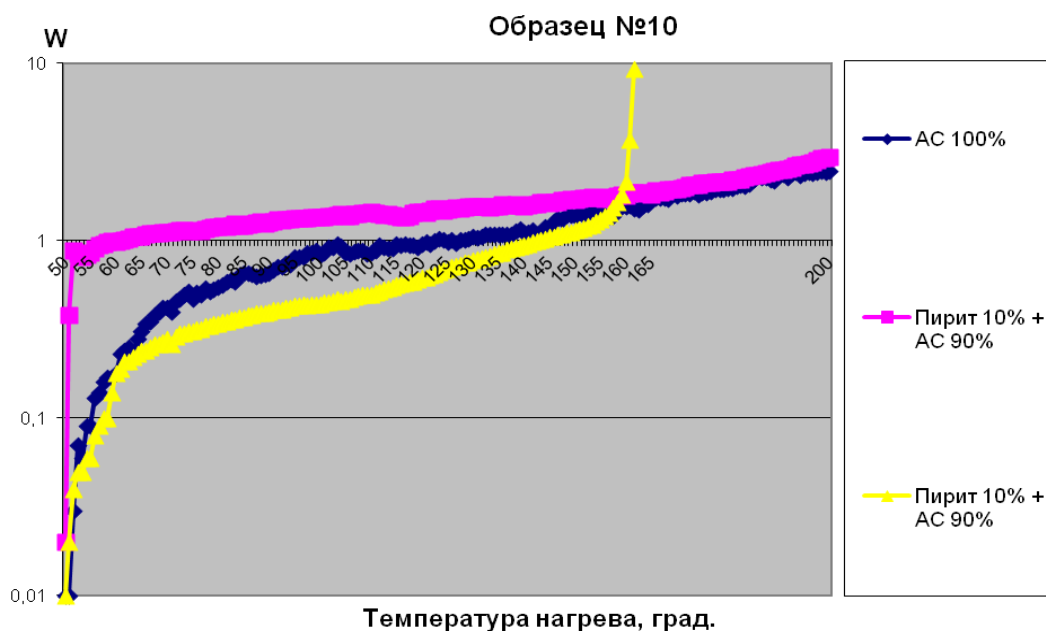


Рисунок А.34 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №10 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

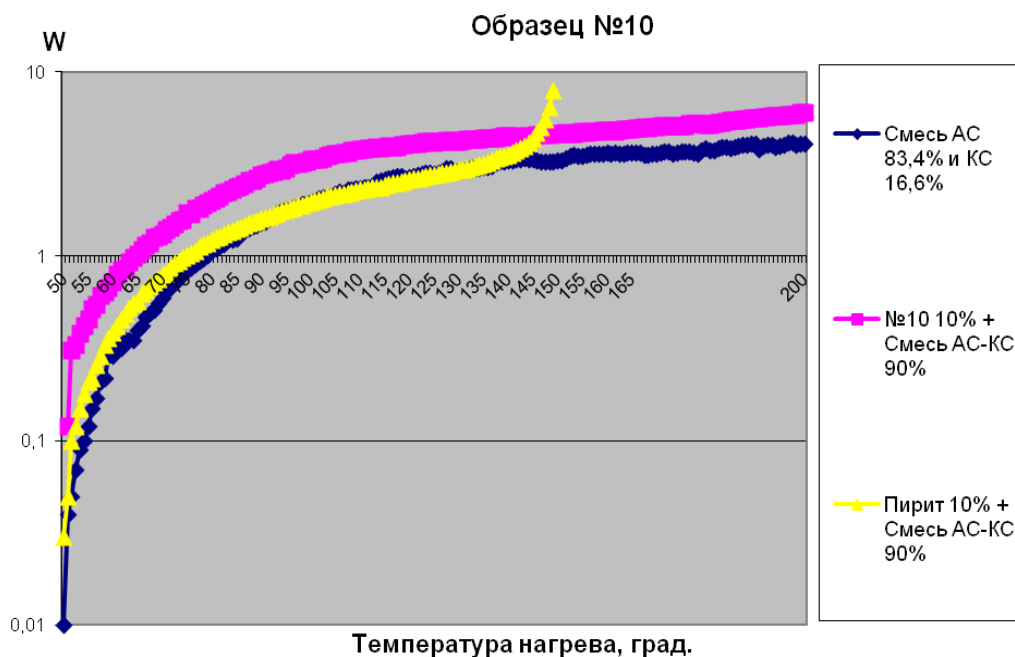


Рисунок А.35 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №10 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

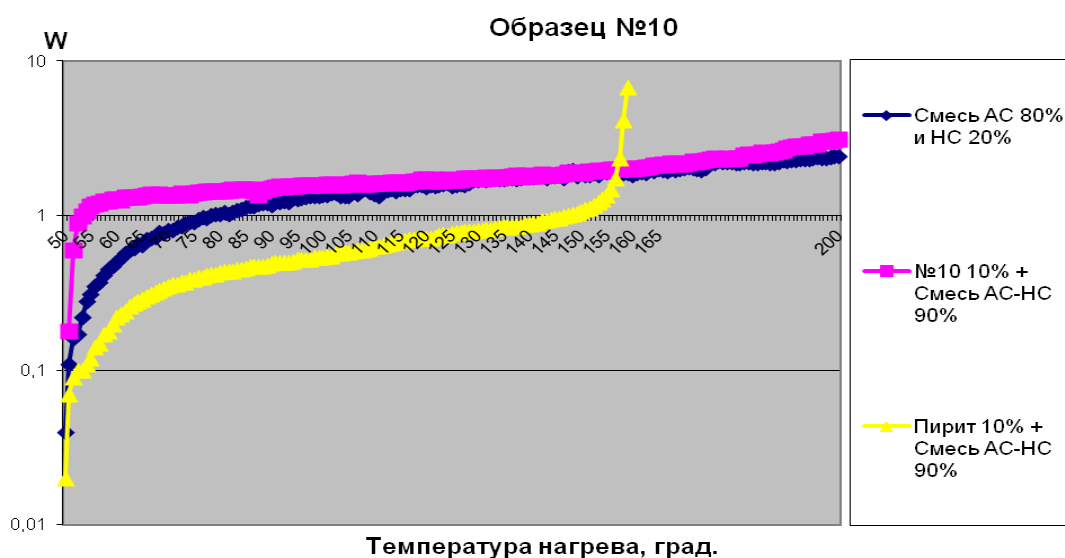


Рисунок А.36 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №10 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

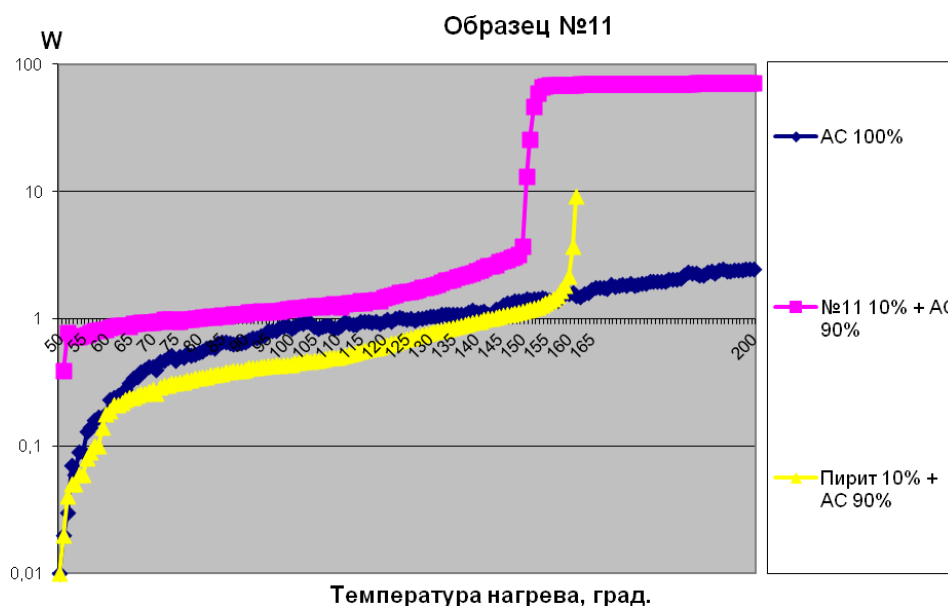


Рисунок А.37 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №11 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

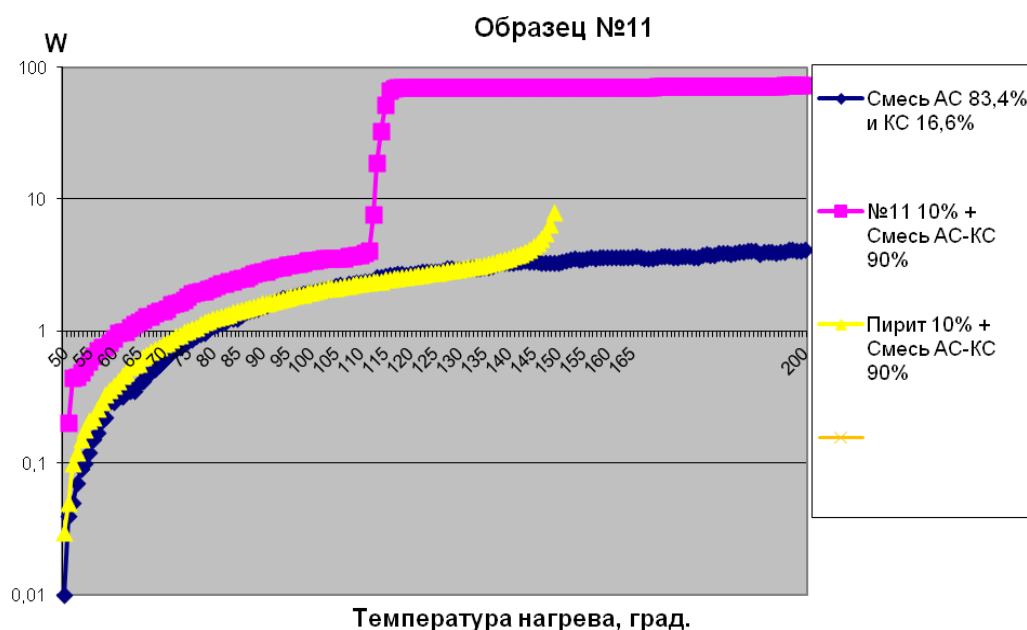


Рисунок А.38 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №11 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

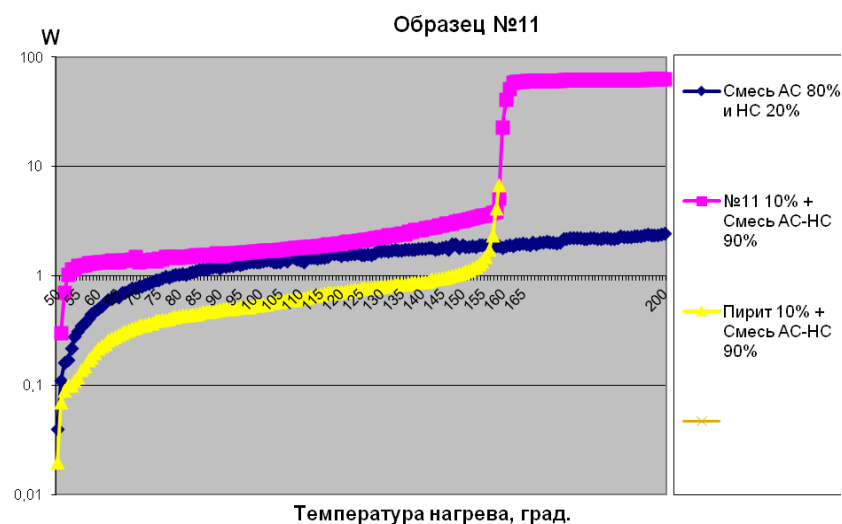


Рисунок А.39 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №11 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

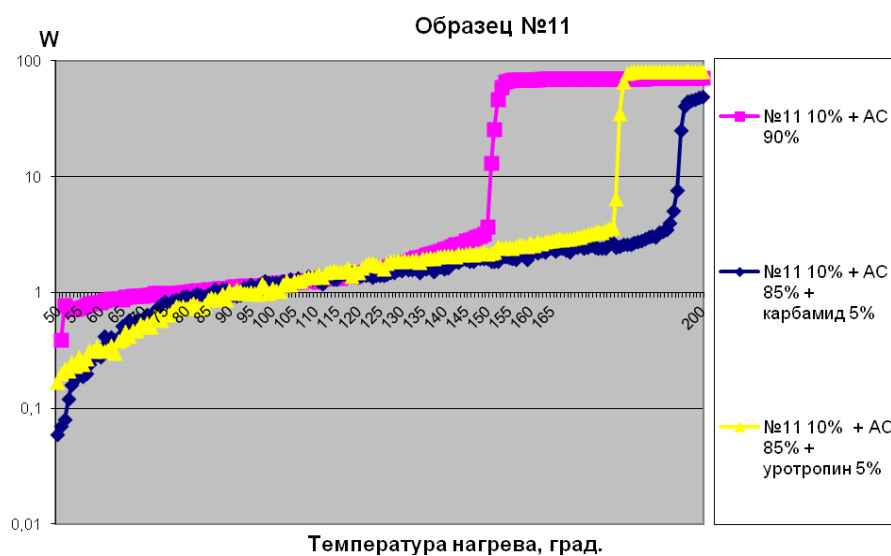


Рисунок А.40 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №11 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №11 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №11 с 85% смеси АС и 5% уротропина

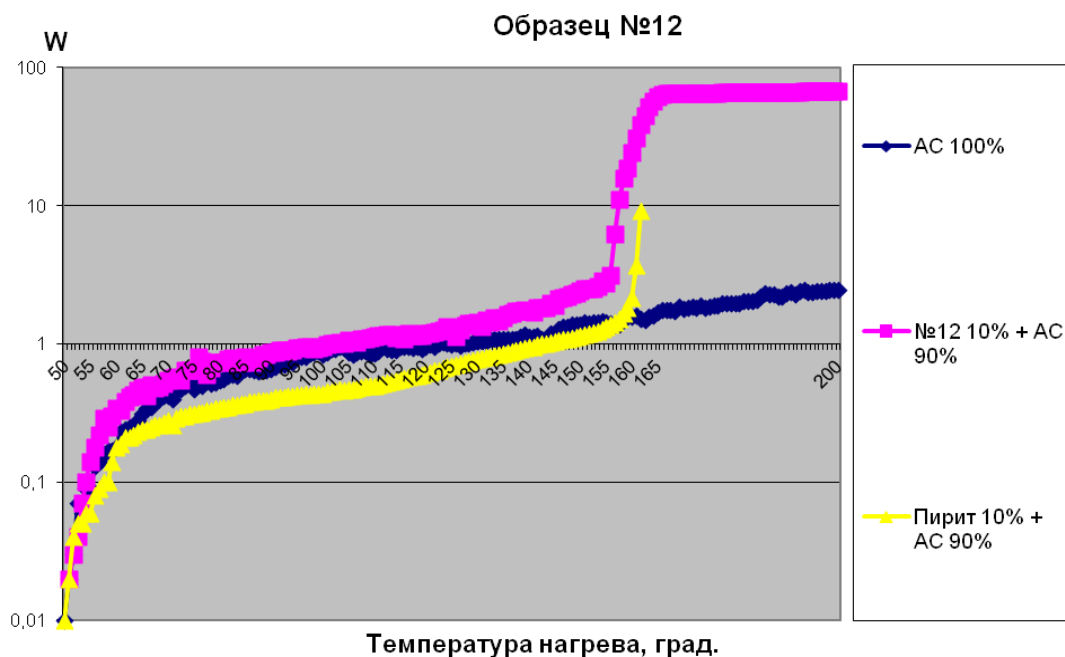


Рисунок А.41 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №12 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

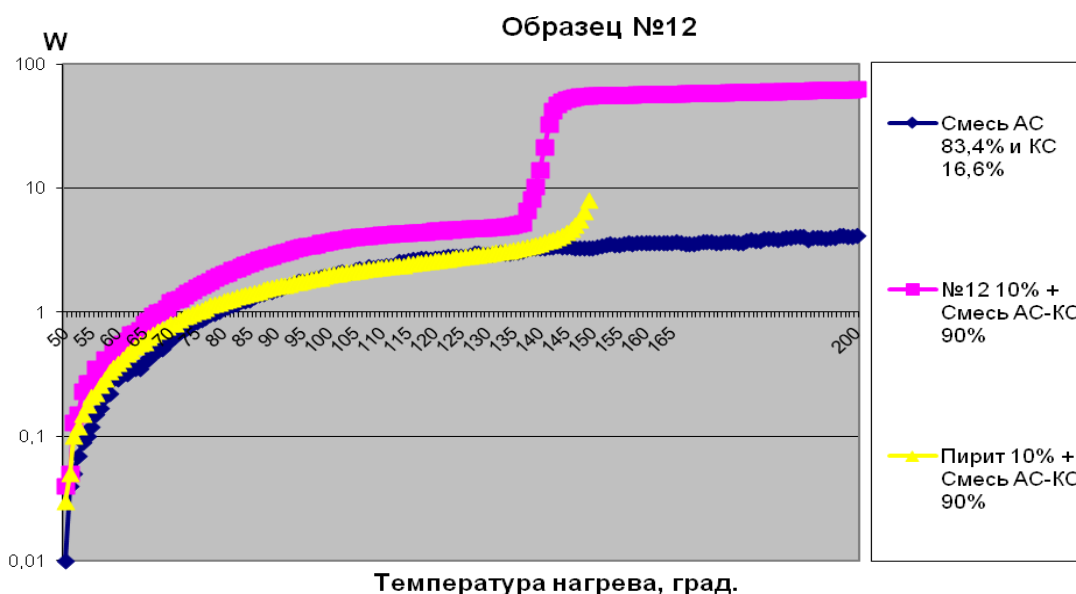


Рисунок А.42 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №12 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

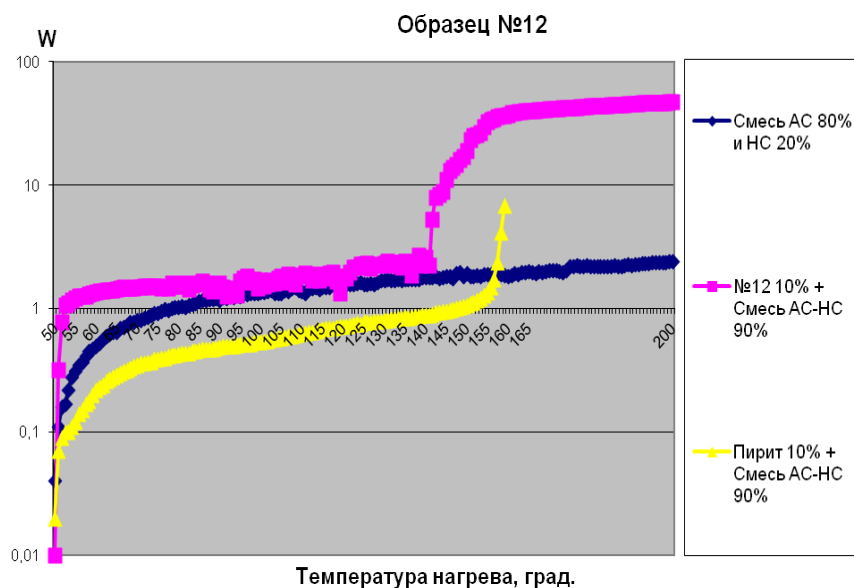


Рисунок А.43 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №12 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

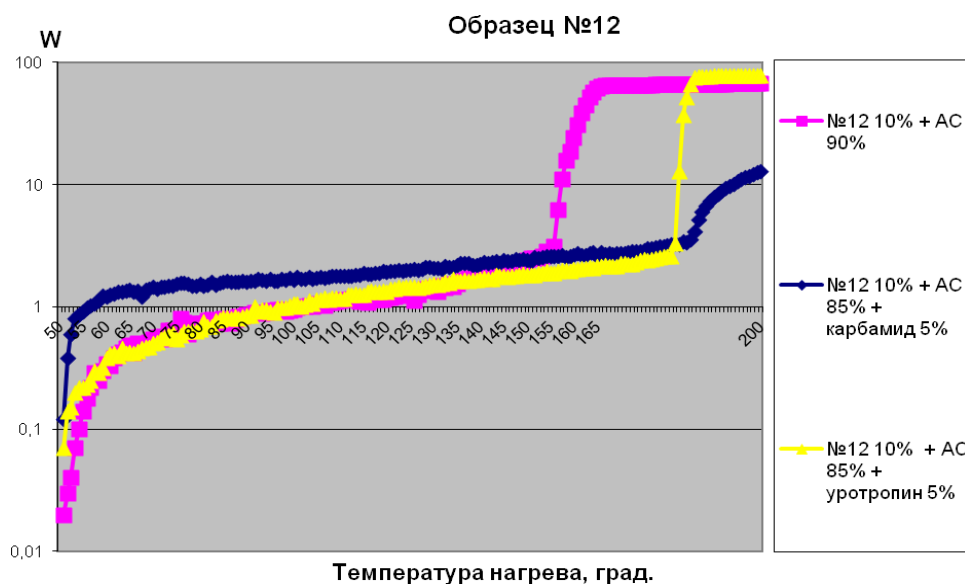


Рисунок А.44 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №12 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №12 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №12 с 85% смеси АС и 5% уротропина

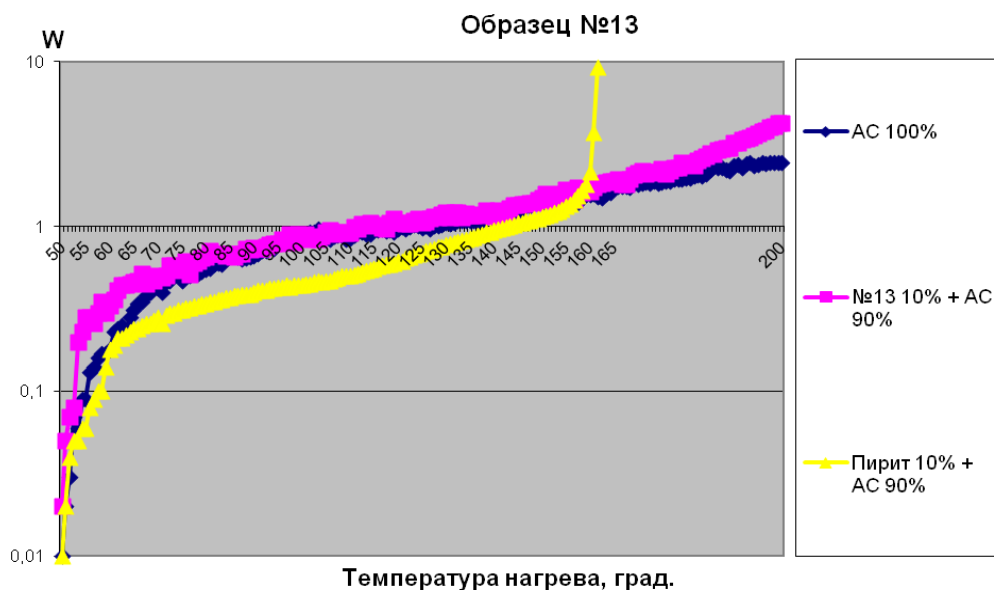


Рисунок А.45 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №13 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

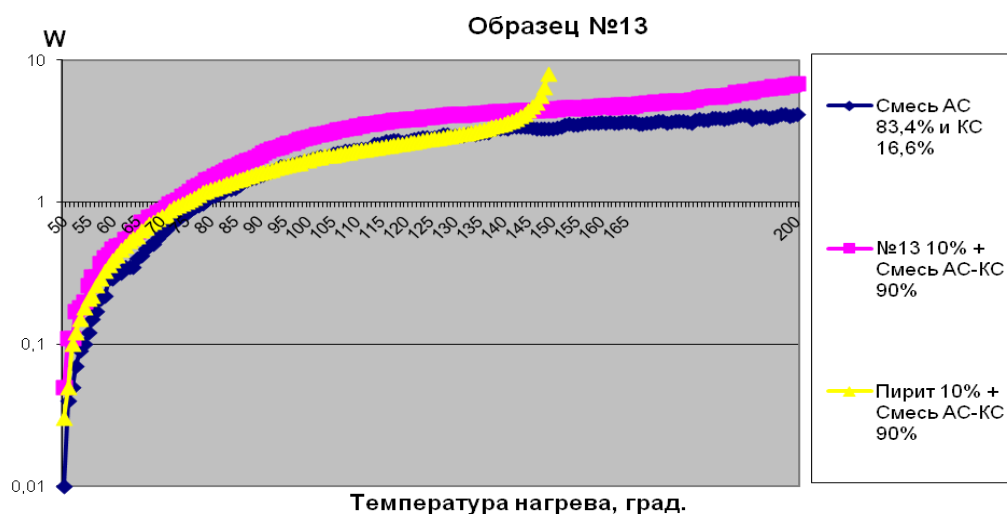


Рисунок А.46 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №13 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

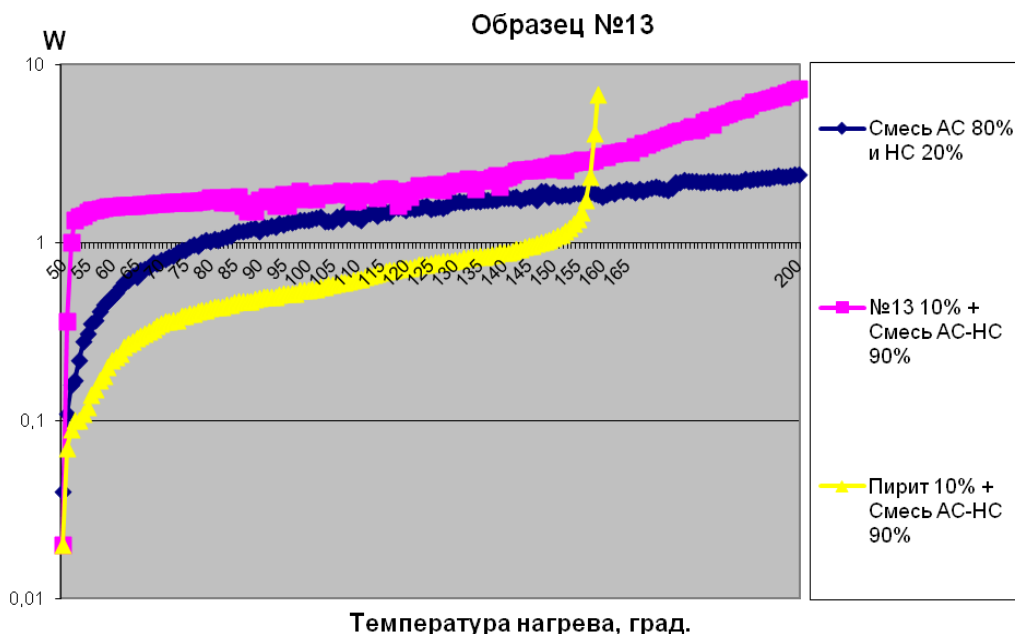


Рисунок А.47 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №13 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

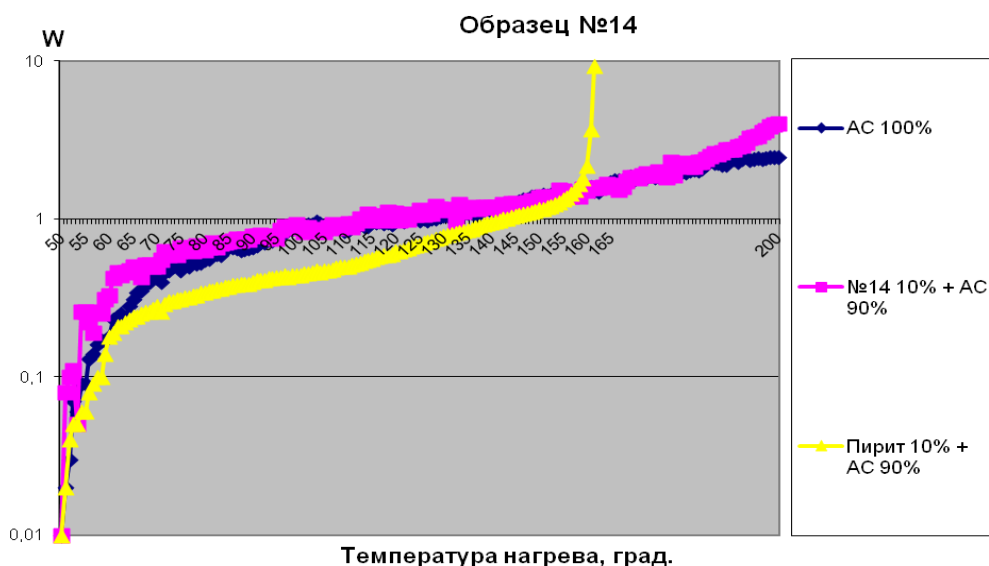


Рисунок А.48 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №14 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

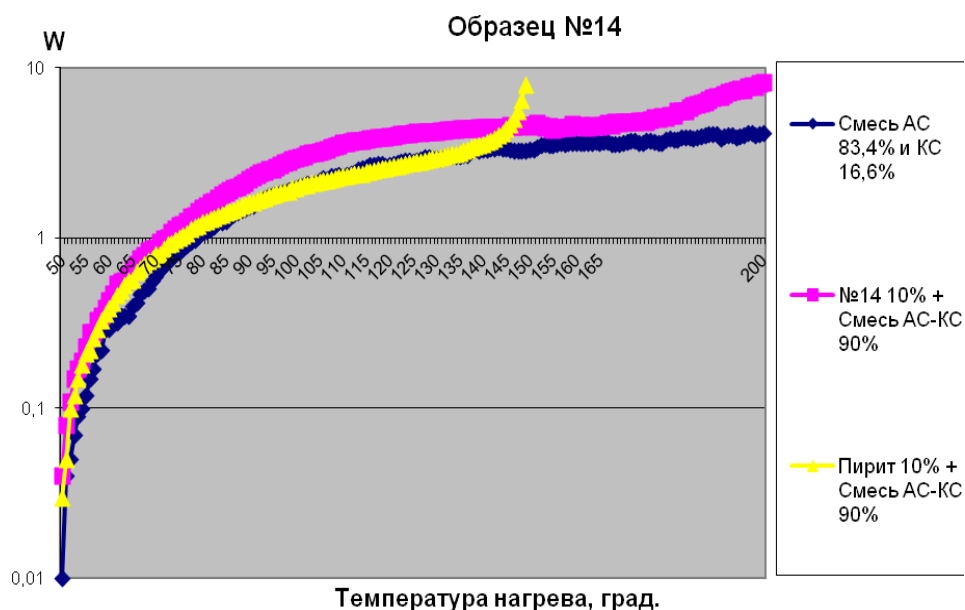


Рисунок А.49 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №14 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

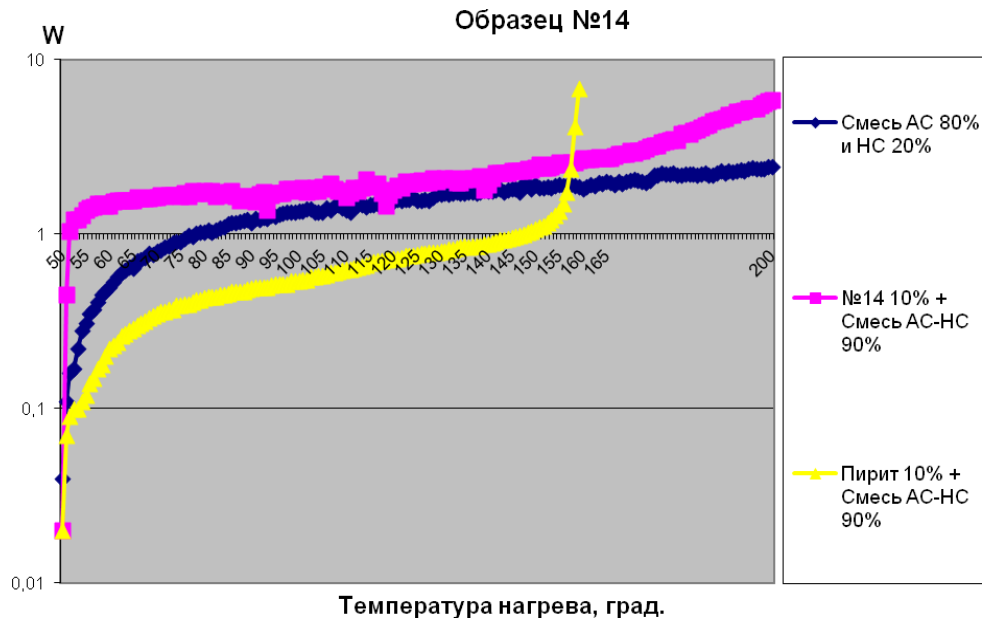


Рисунок А.50 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №14 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

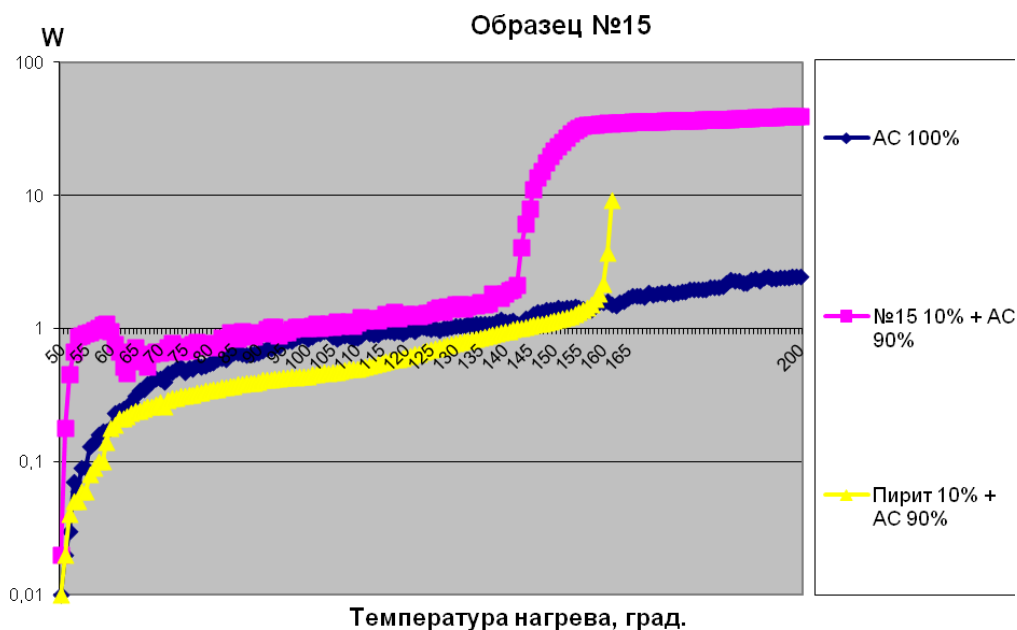


Рисунок А.51 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №15 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

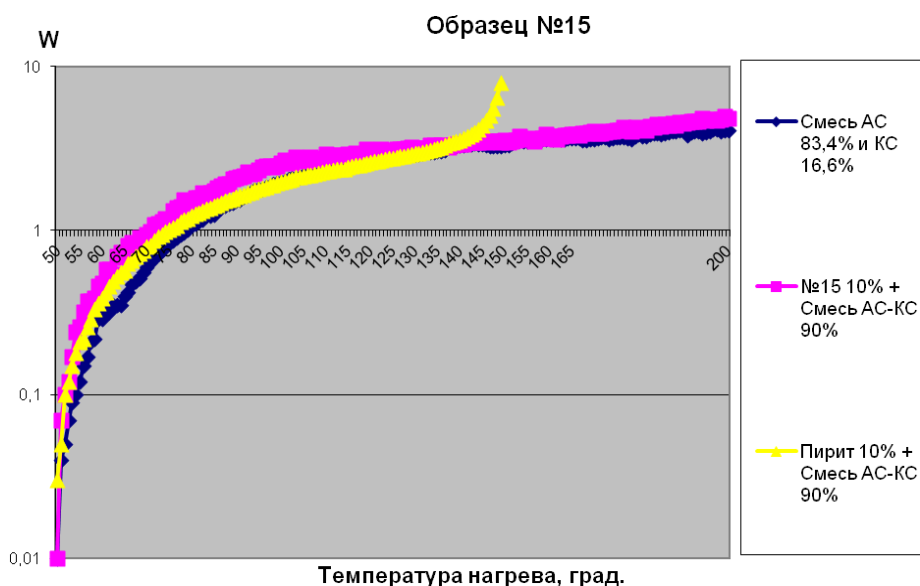


Рисунок А.52 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №15 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

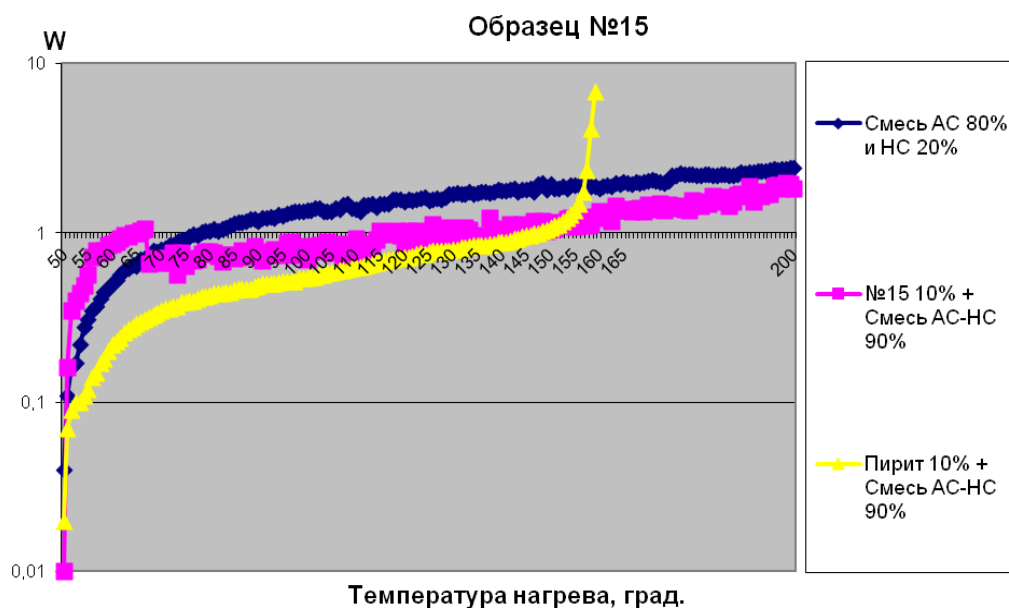


Рисунок А.53 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №15 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

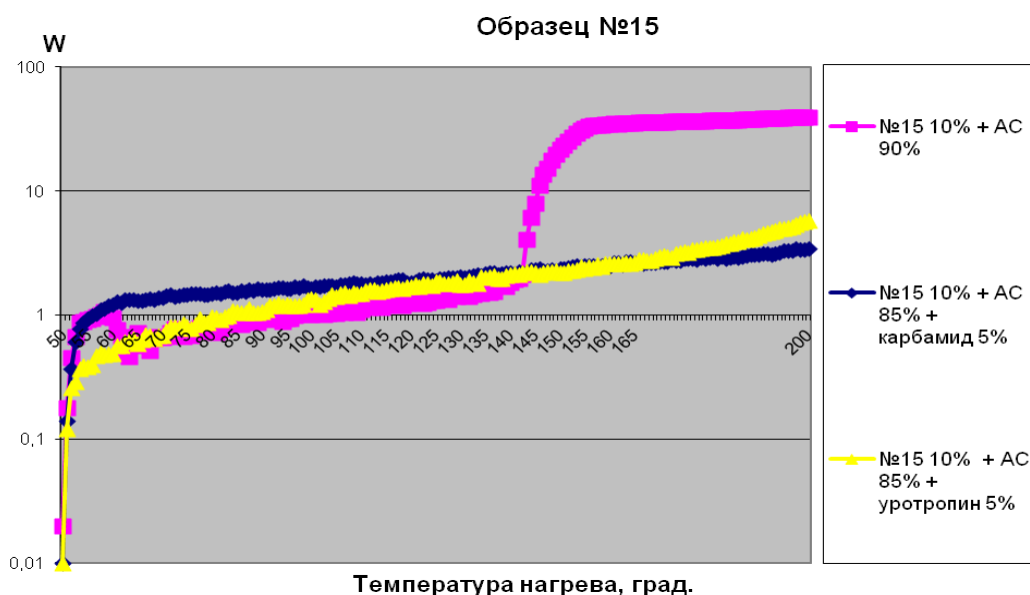


Рисунок А.54 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №15 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №15 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №15 с 85% смеси АС и 5% уротропина

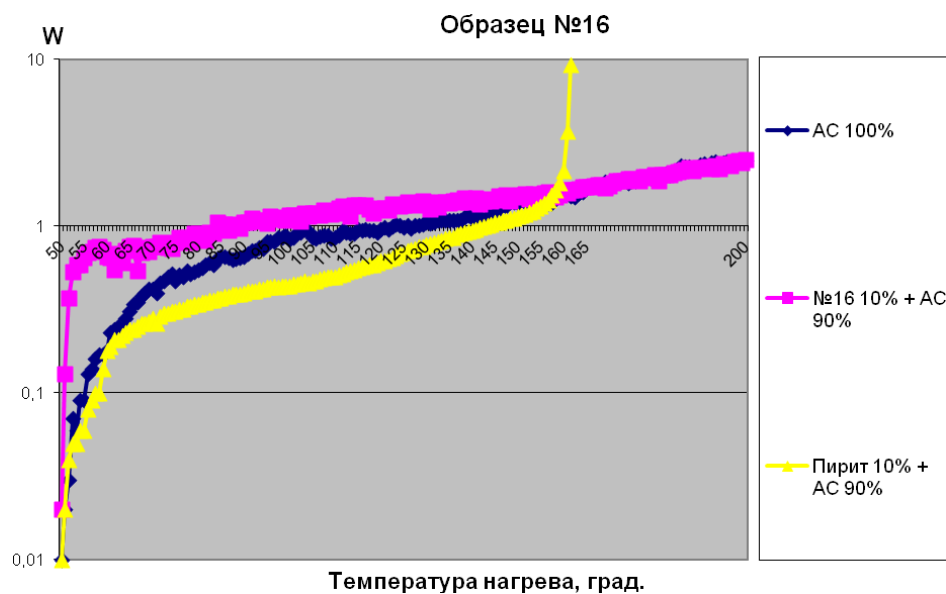


Рисунок А.55 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №16 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

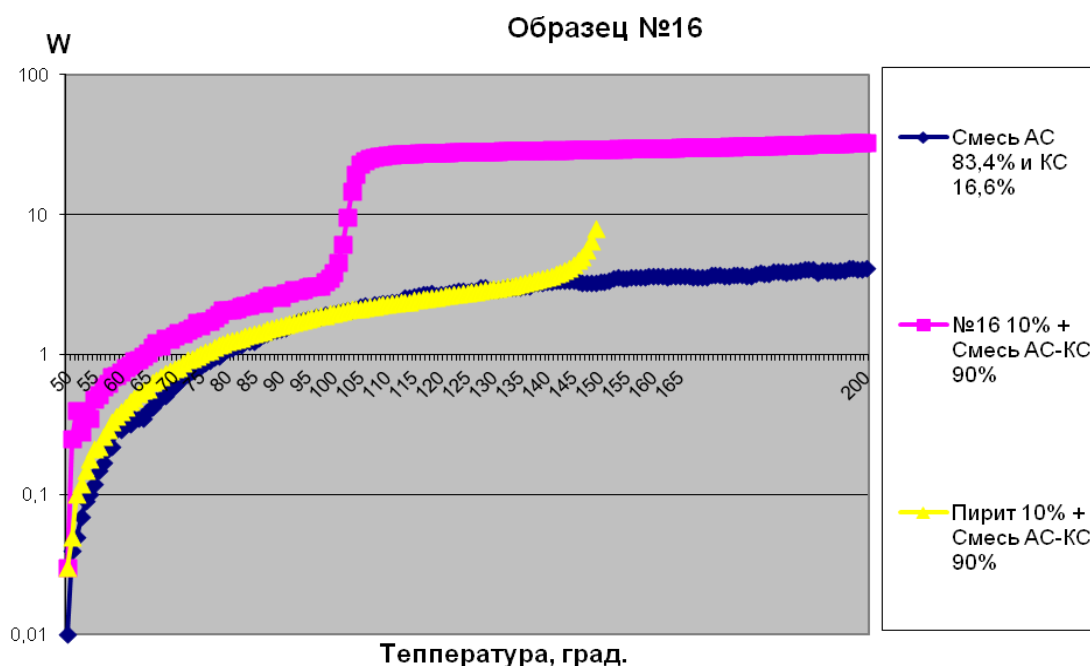


Рисунок А.56 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №16 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

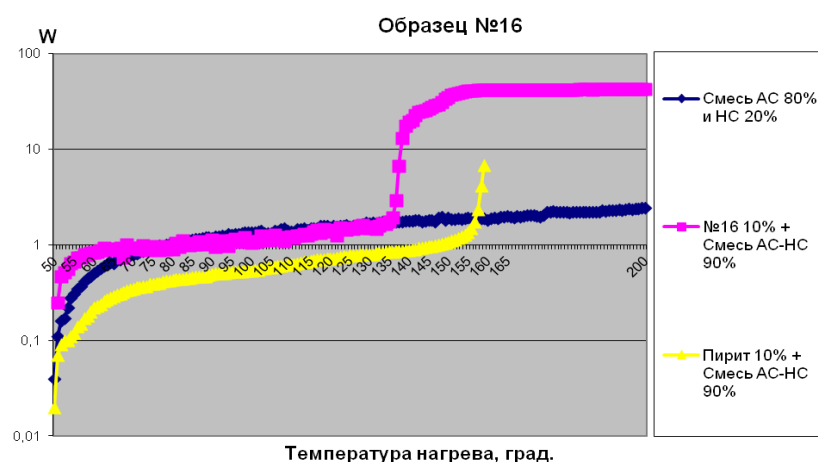


Рисунок А.57 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №16 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

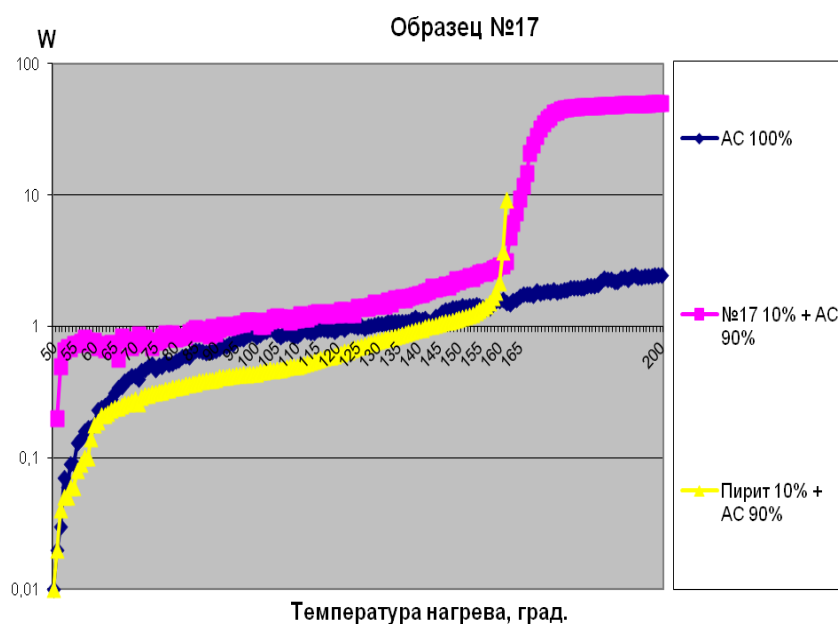


Рисунок А.58 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №17 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

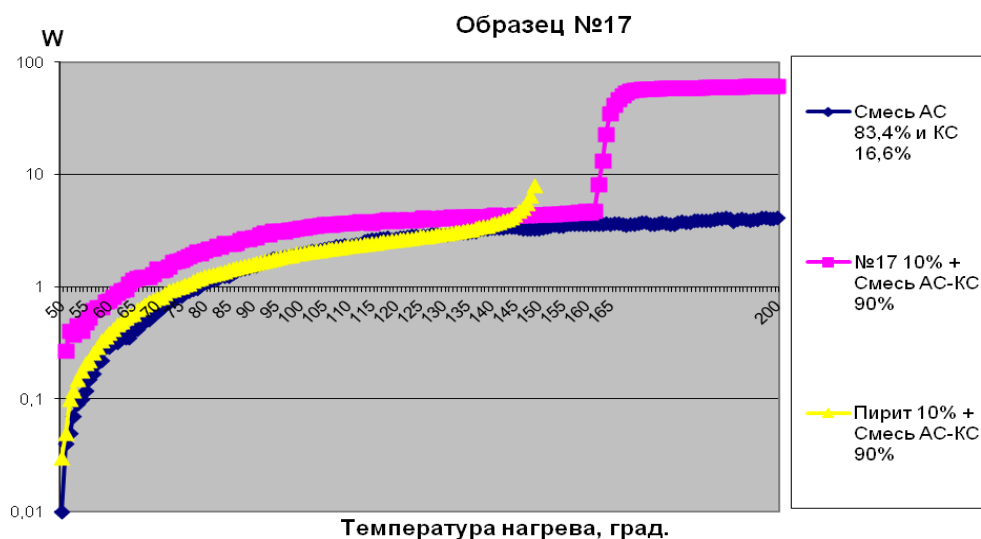


Рисунок А.59 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №17 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

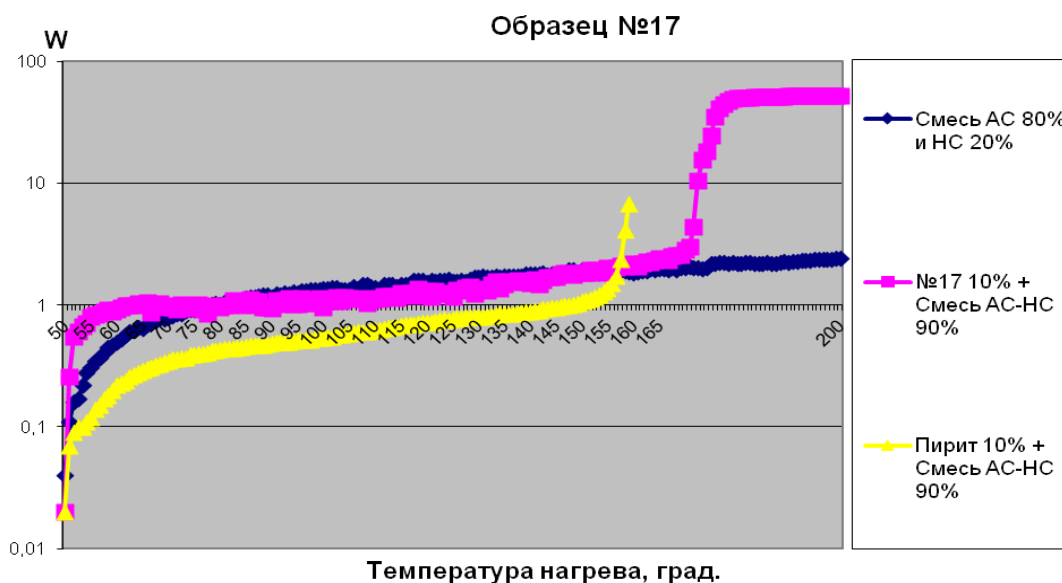


Рисунок А.60 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №17 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

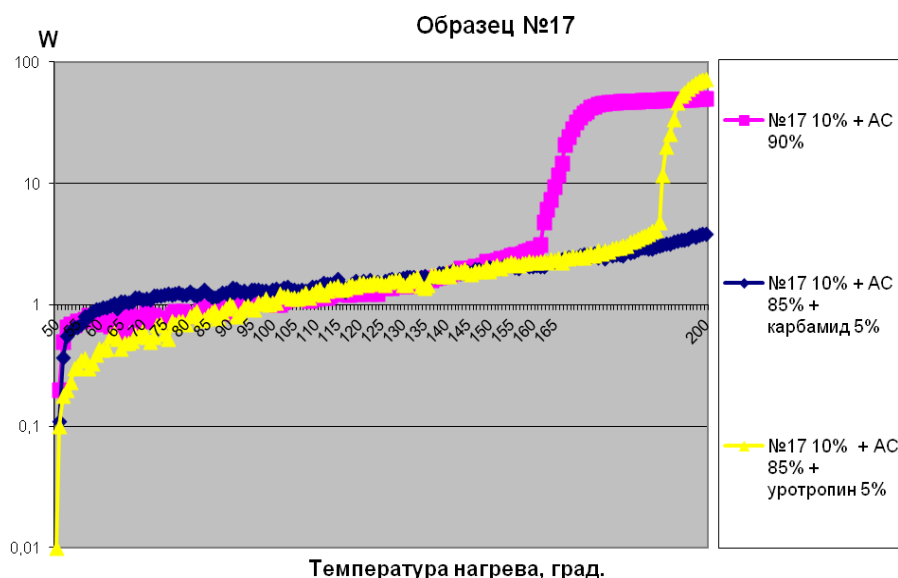


Рисунок А.61 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №17 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №17 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №17 с 85% смеси АС и 5% уротропина

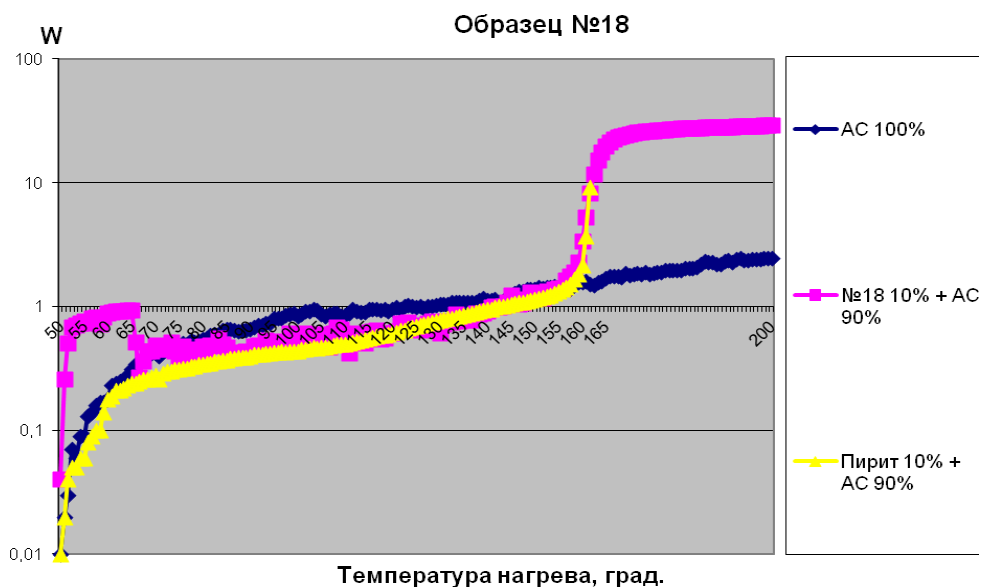


Рисунок А.62 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №18 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

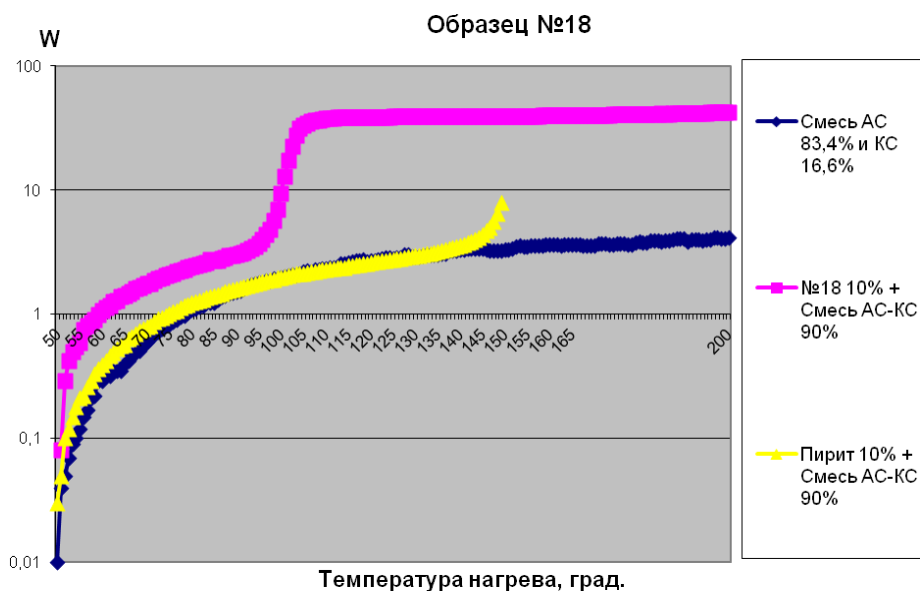


Рисунок А.63 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №18 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

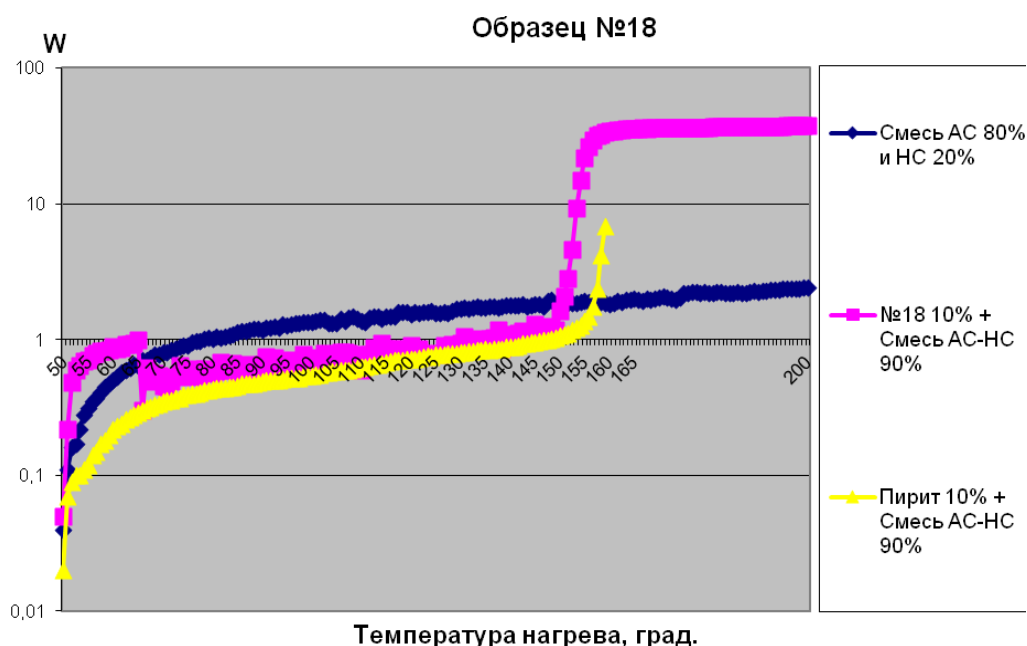


Рисунок А.64 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №18 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

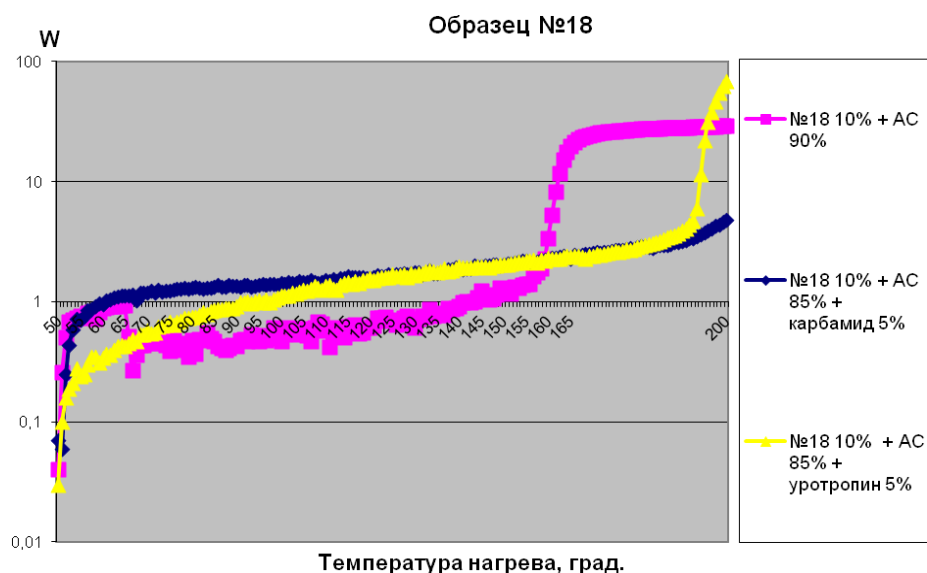


Рисунок А.65 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №18 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №18 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №18 с 85% смеси АС и 5% уротропина

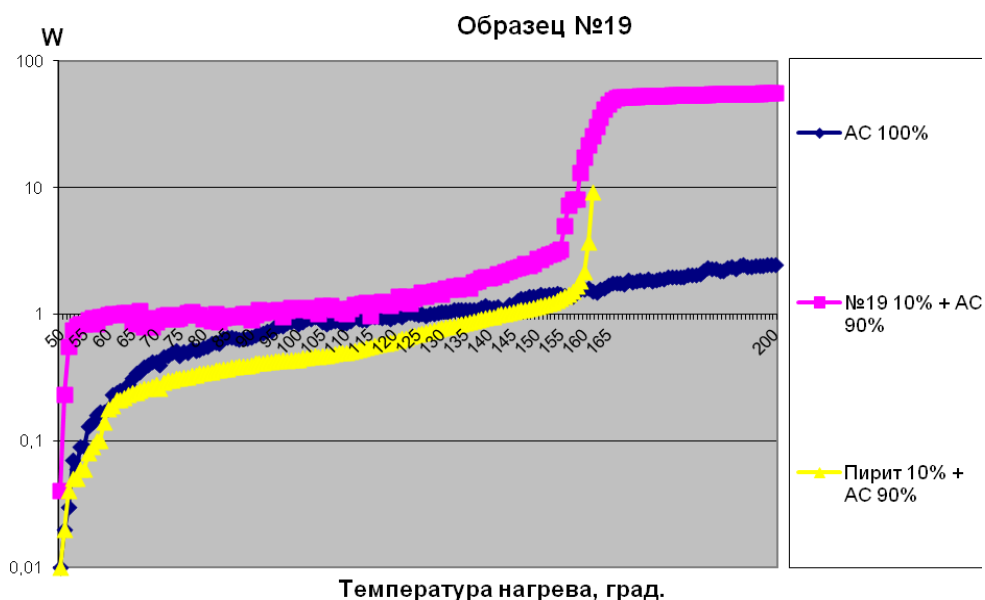


Рисунок А.66 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №19 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

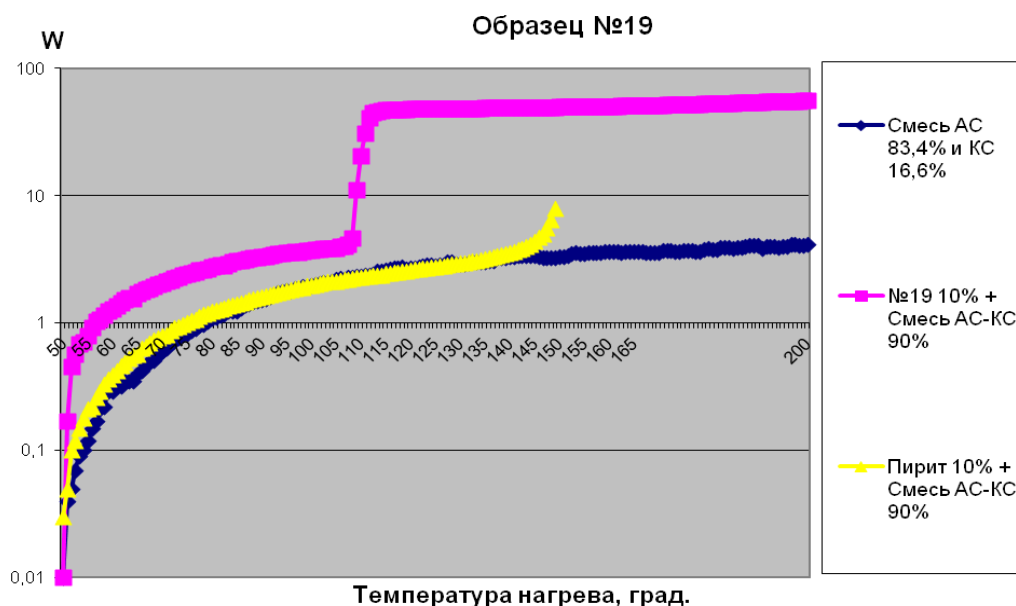


Рисунок А.67 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №19 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

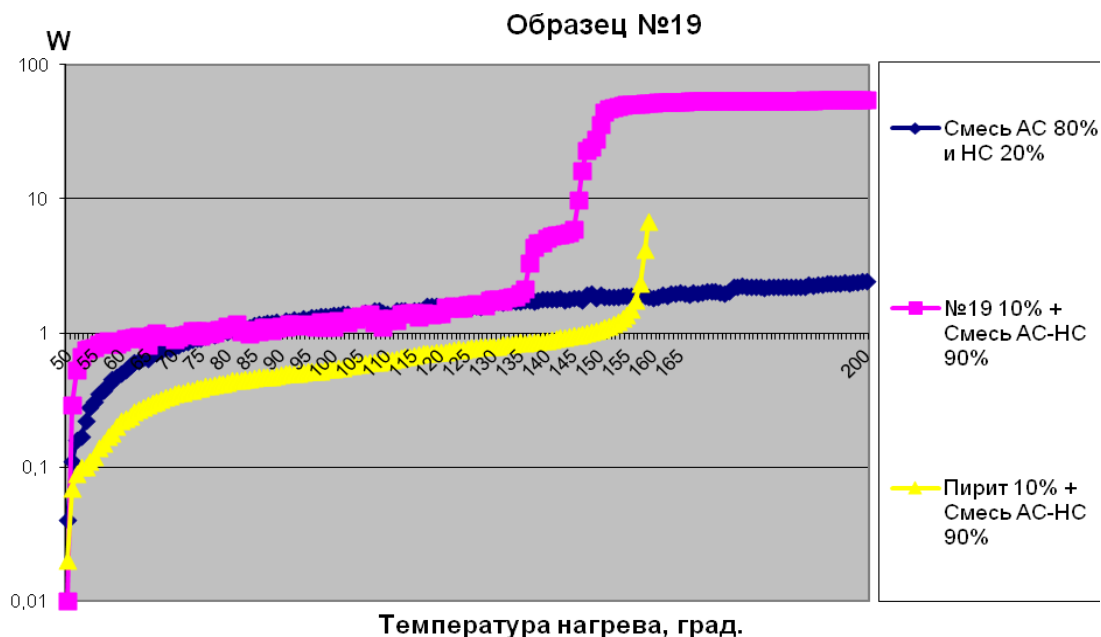


Рисунок А.68 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №19 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

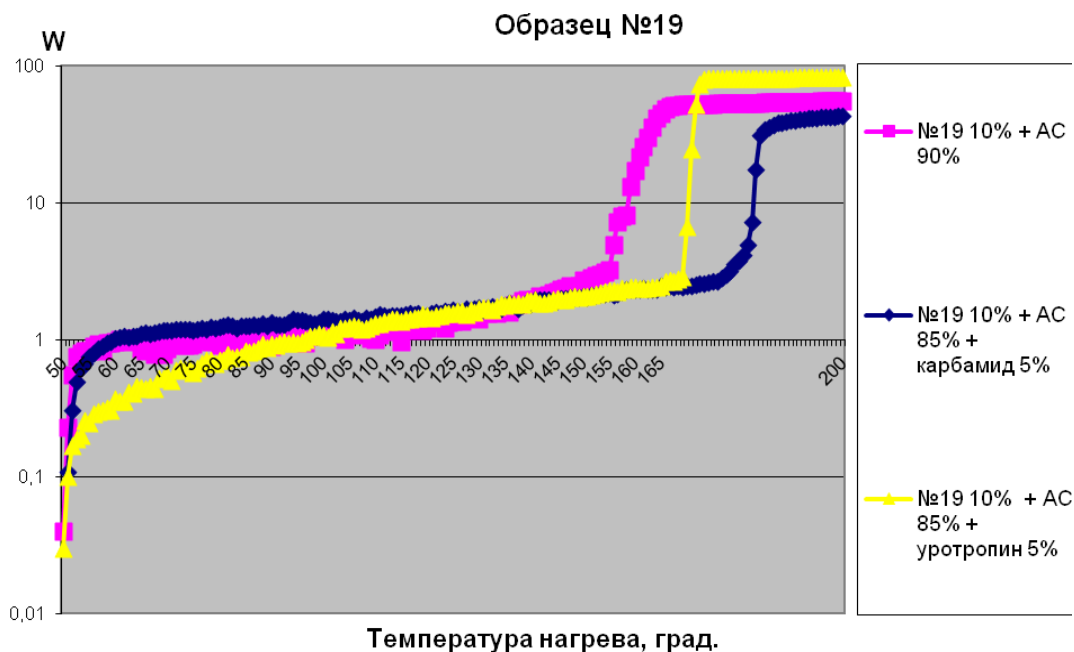


Рисунок А.69 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №19 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №19 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №19 с 85% смеси АС и 5% уротропина

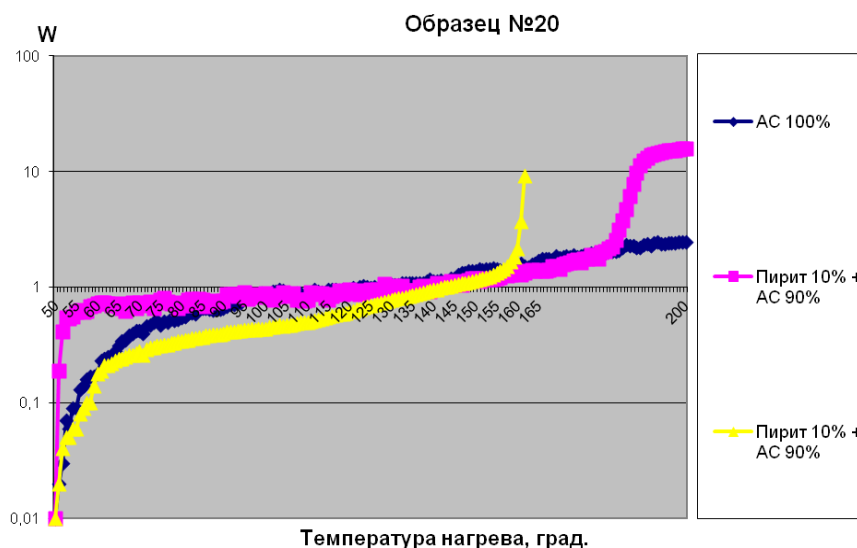


Рисунок А.70 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №20 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

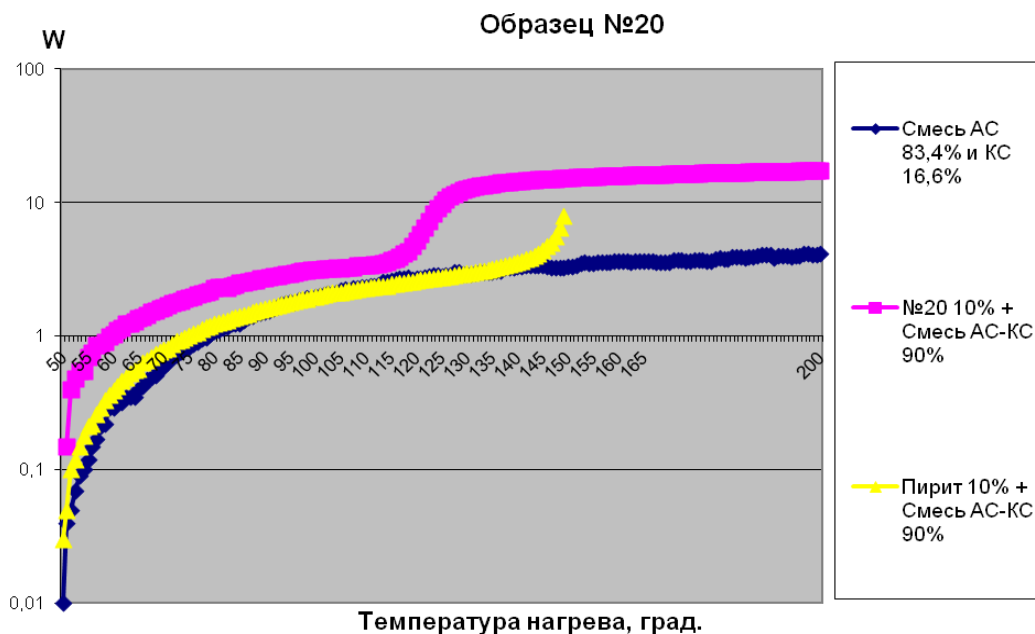


Рисунок А.71 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №20 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

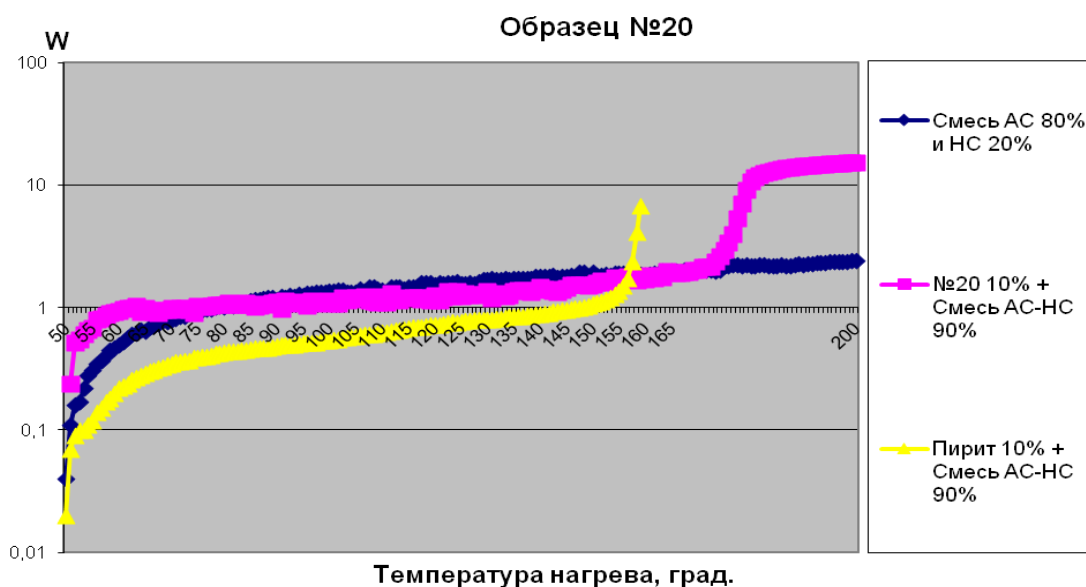


Рисунок А.72 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №20 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

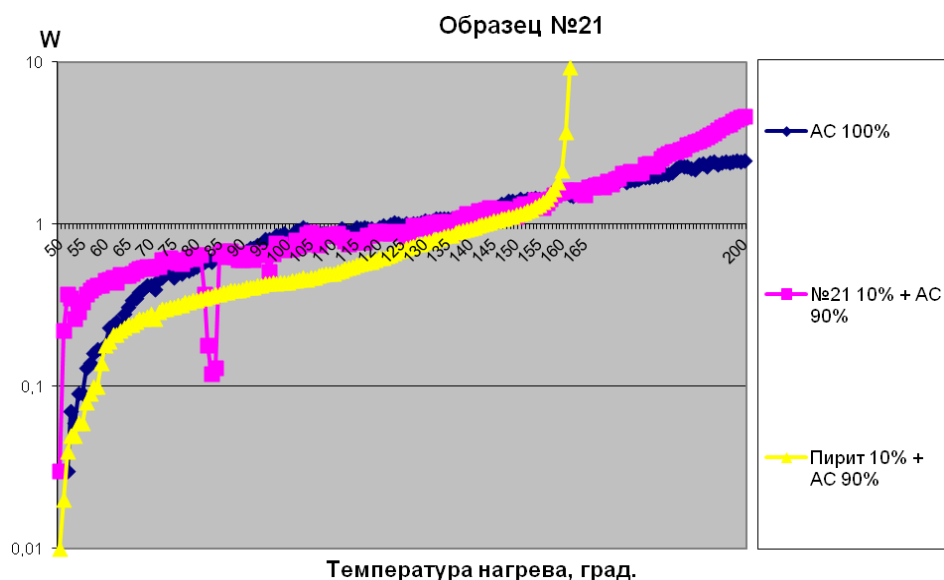


Рисунок А.73 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №21 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

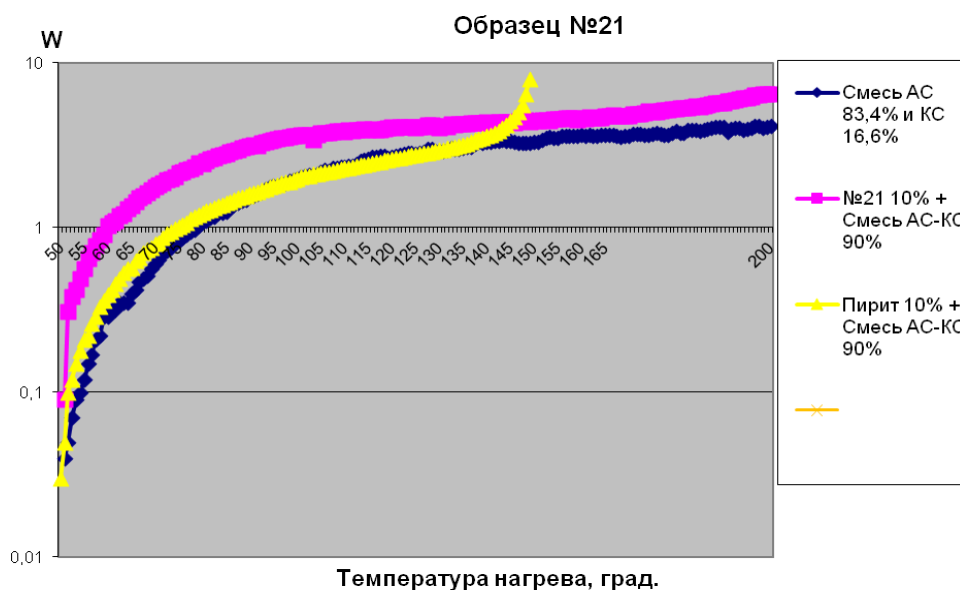


Рисунок А.74 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №21 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

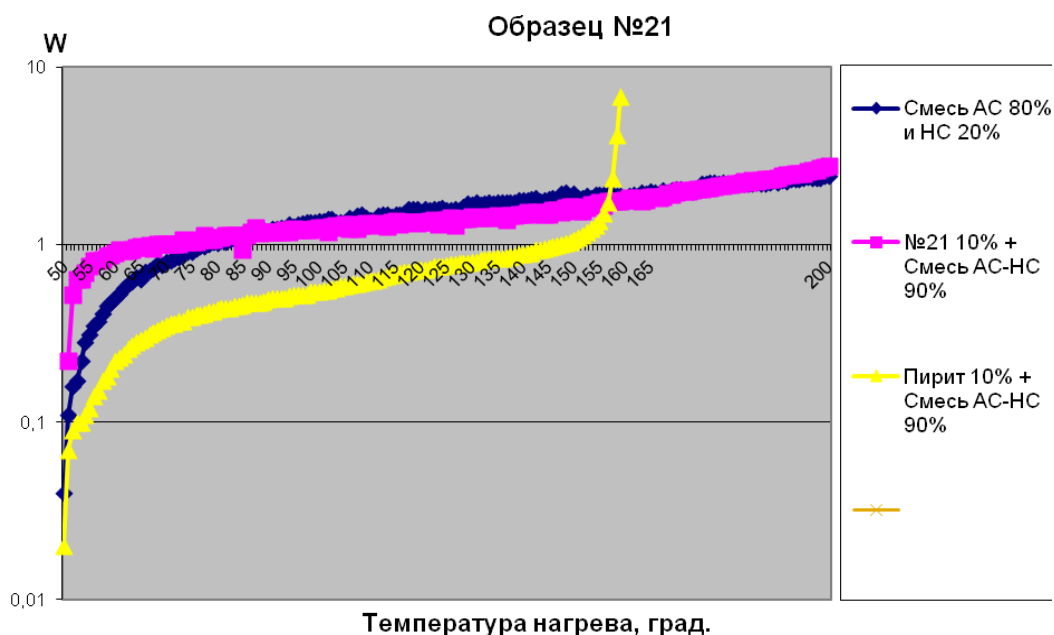


Рисунок А.75 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №21 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

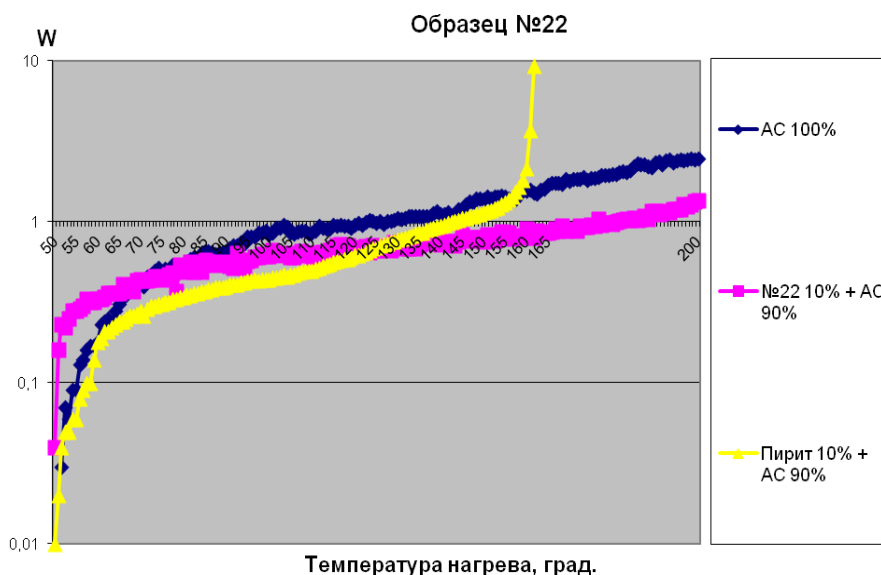


Рисунок А.76 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №22 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

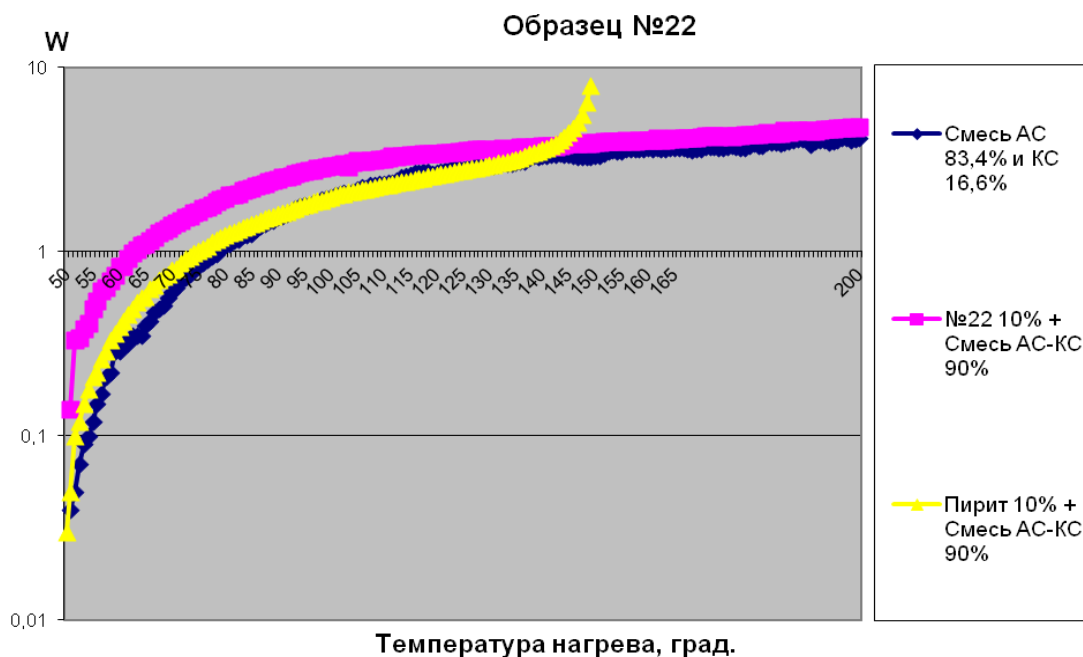


Рисунок А.77 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №22 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

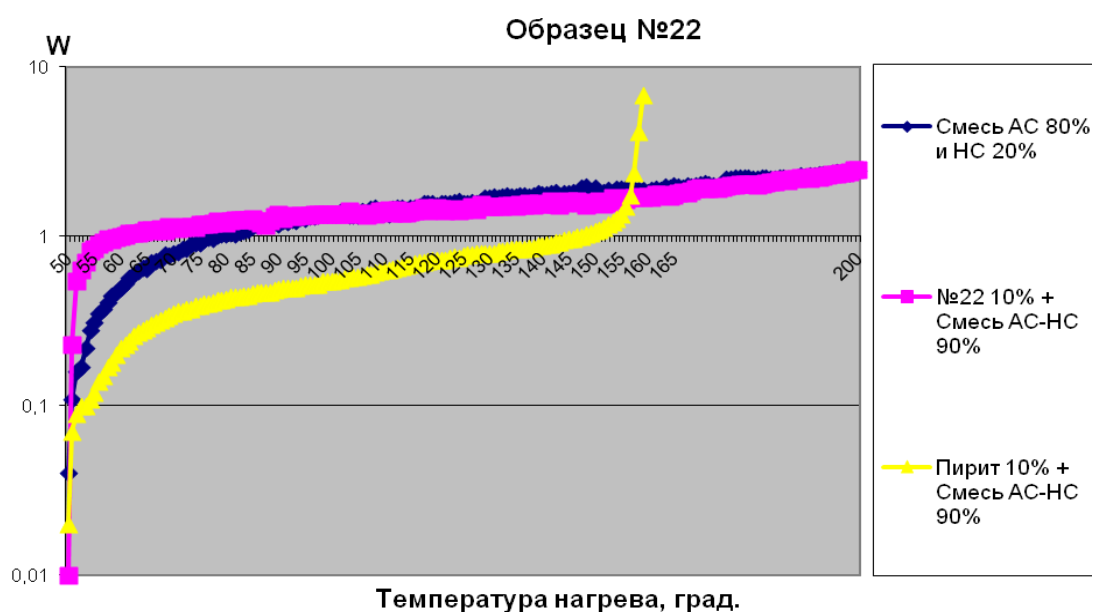


Рисунок А.78 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №22 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

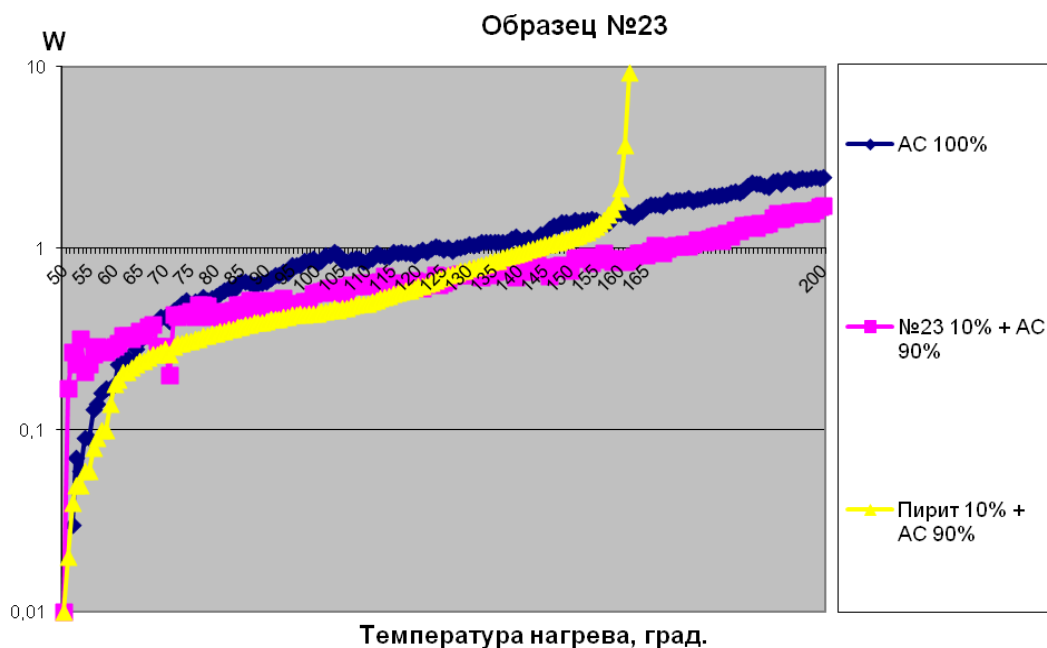


Рисунок А.79 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №23 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

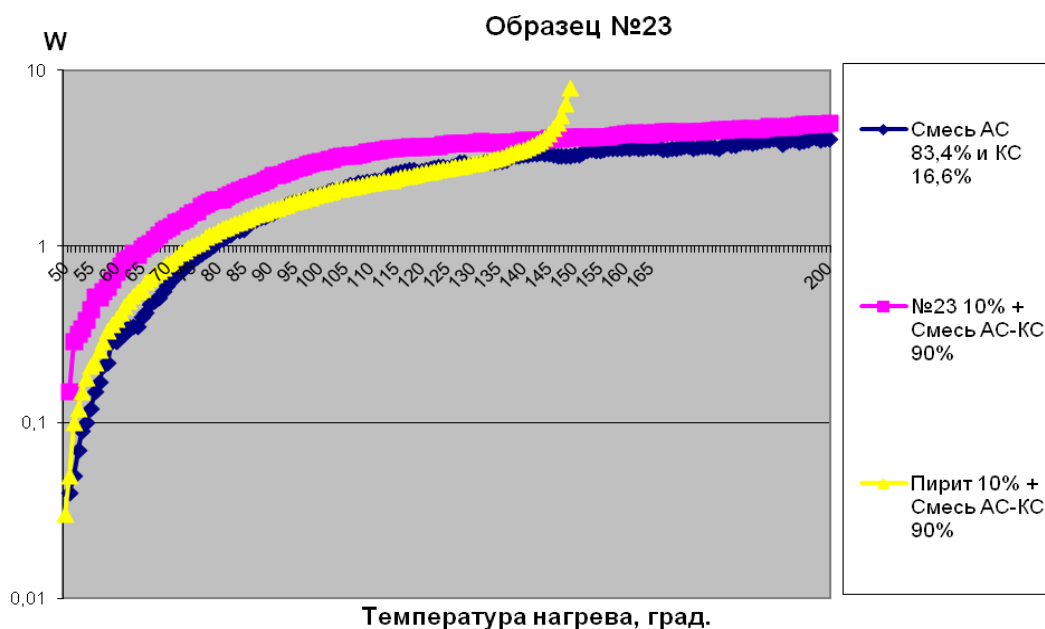


Рисунок А.80 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №23 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

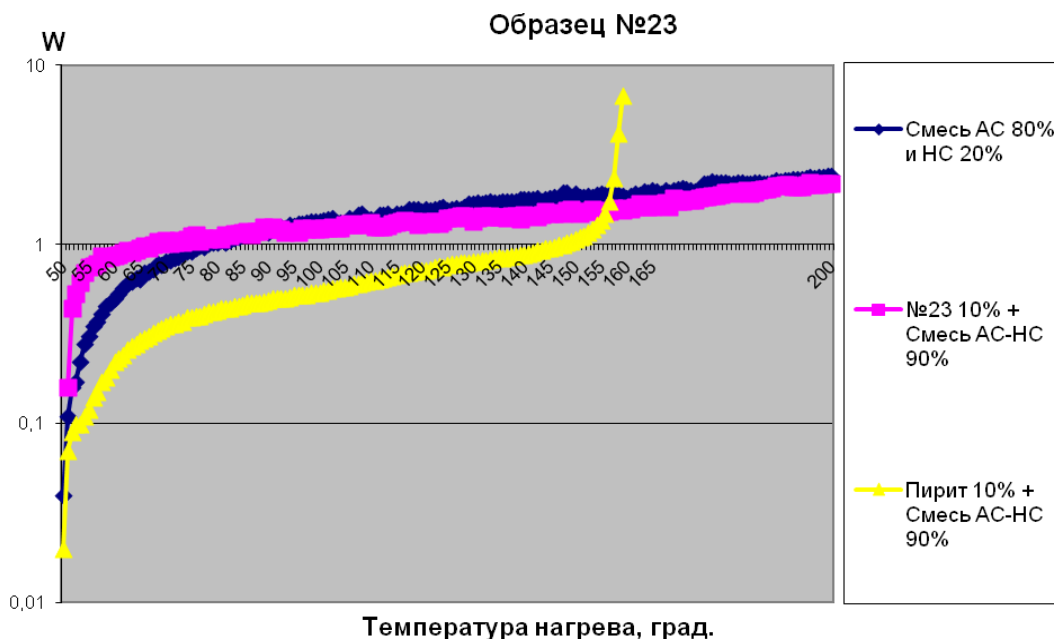


Рисунок А.81 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №23 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

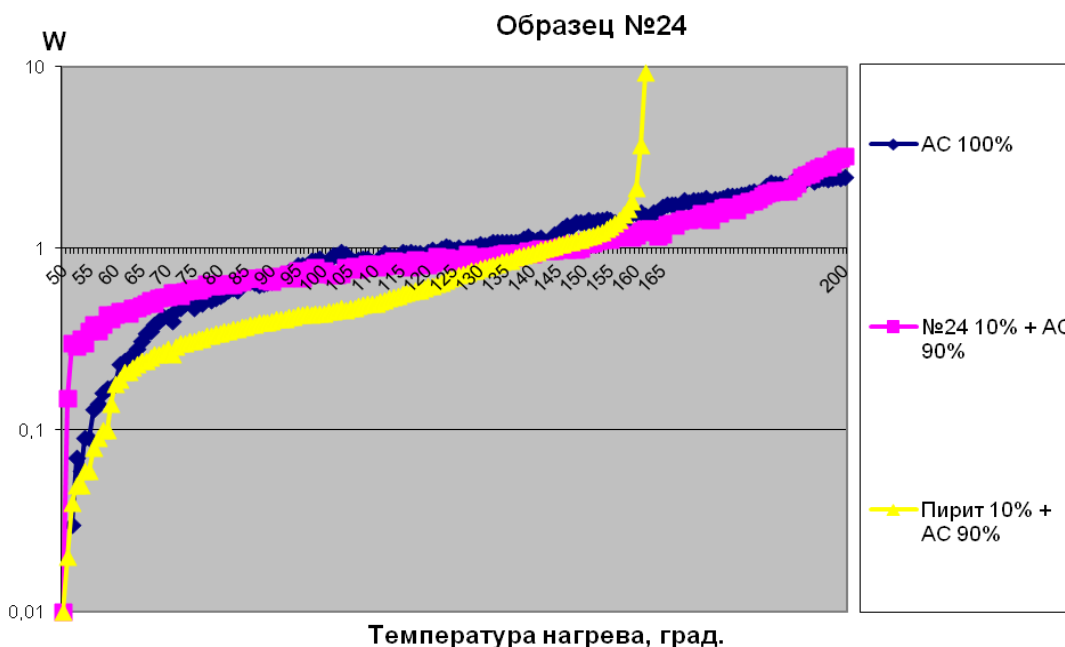


Рисунок А.82 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №24 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

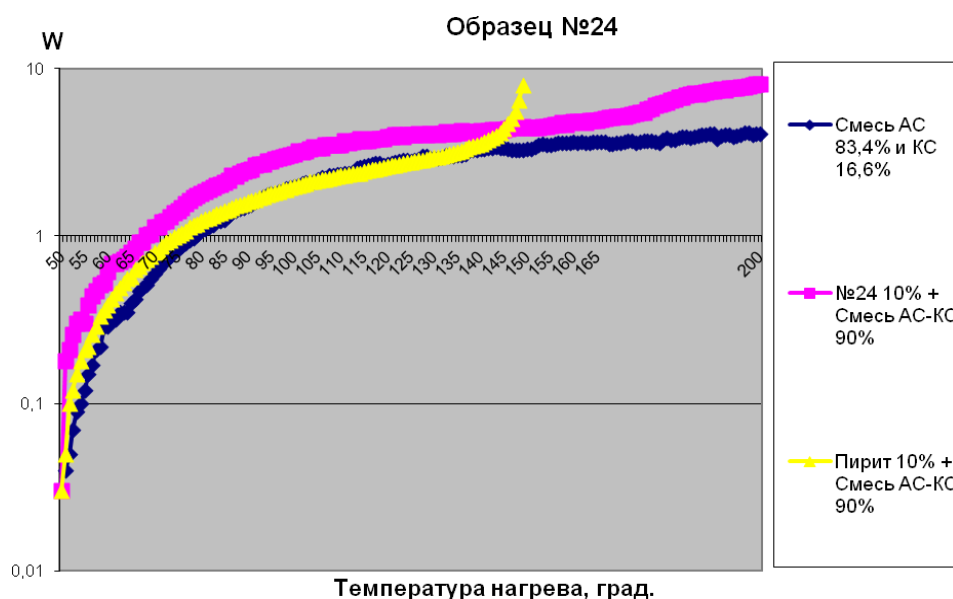


Рисунок А.83 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №24 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

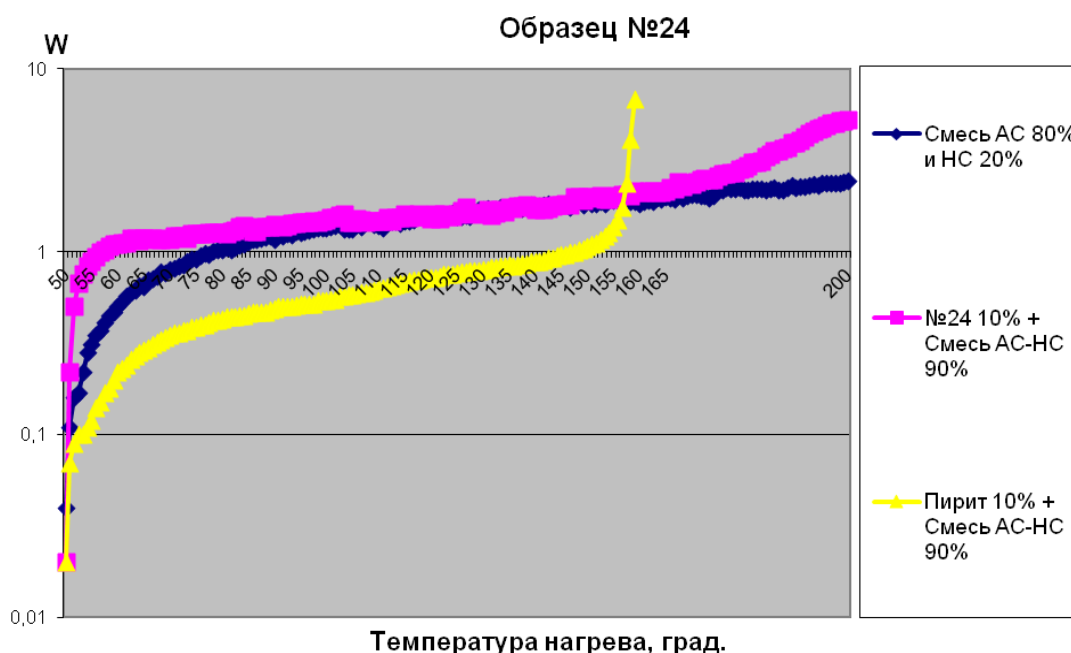


Рисунок А.84 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №24 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

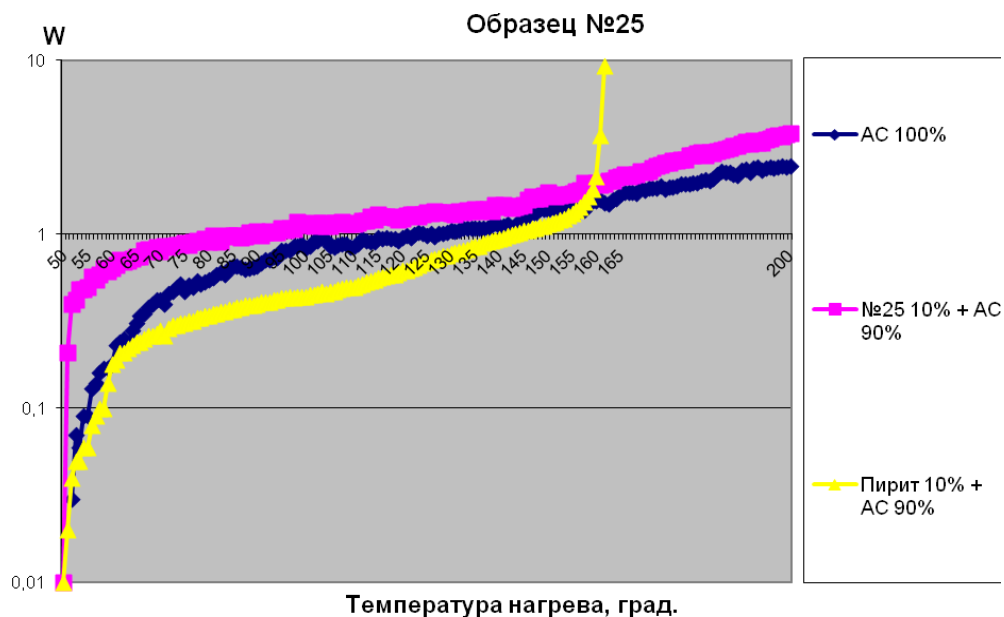


Рисунок А.85 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №25 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

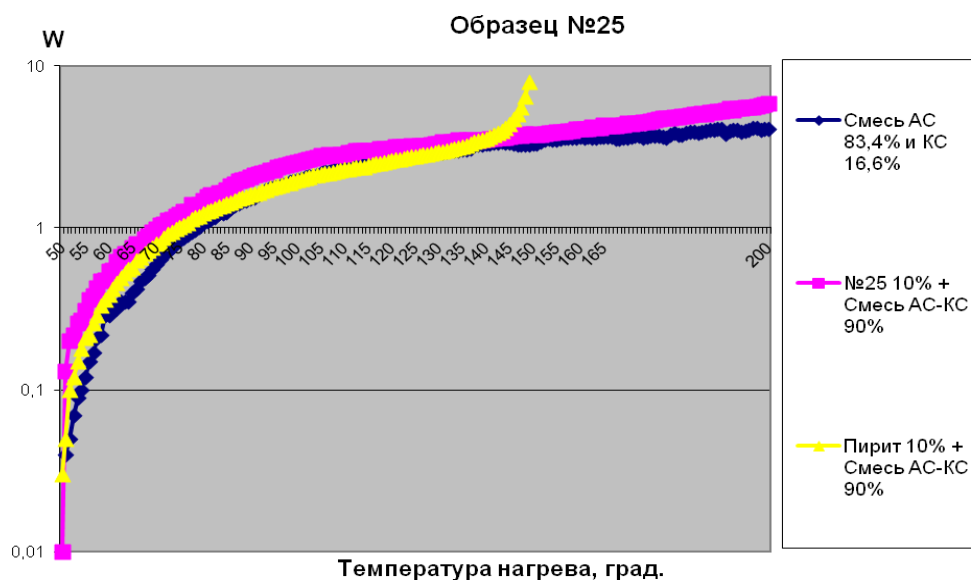


Рисунок А.86 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №25 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

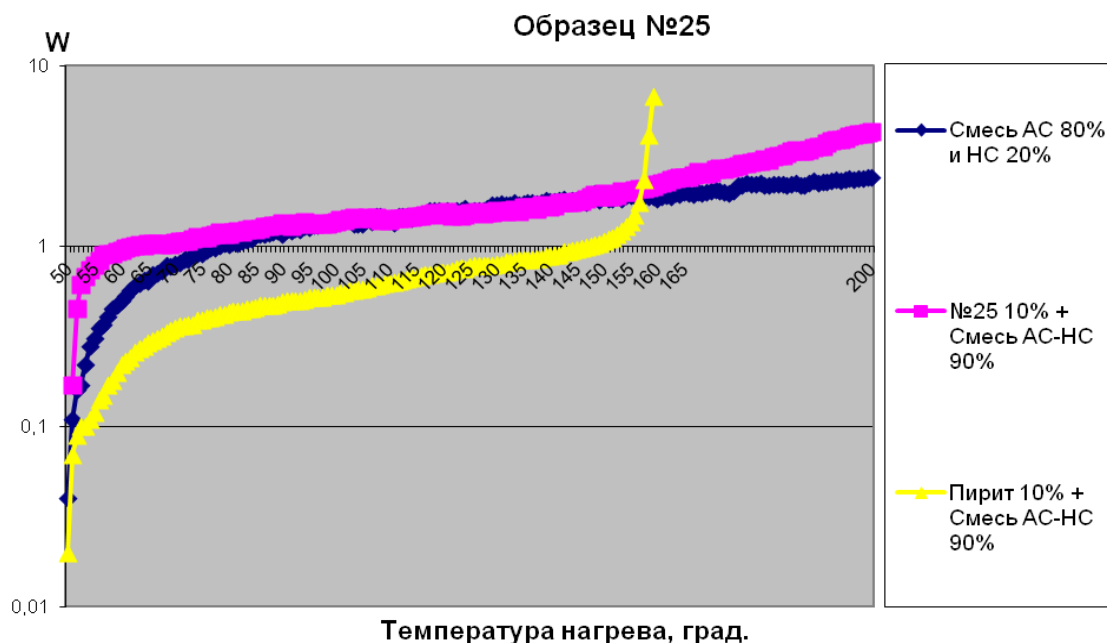


Рисунок А.87 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №25 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

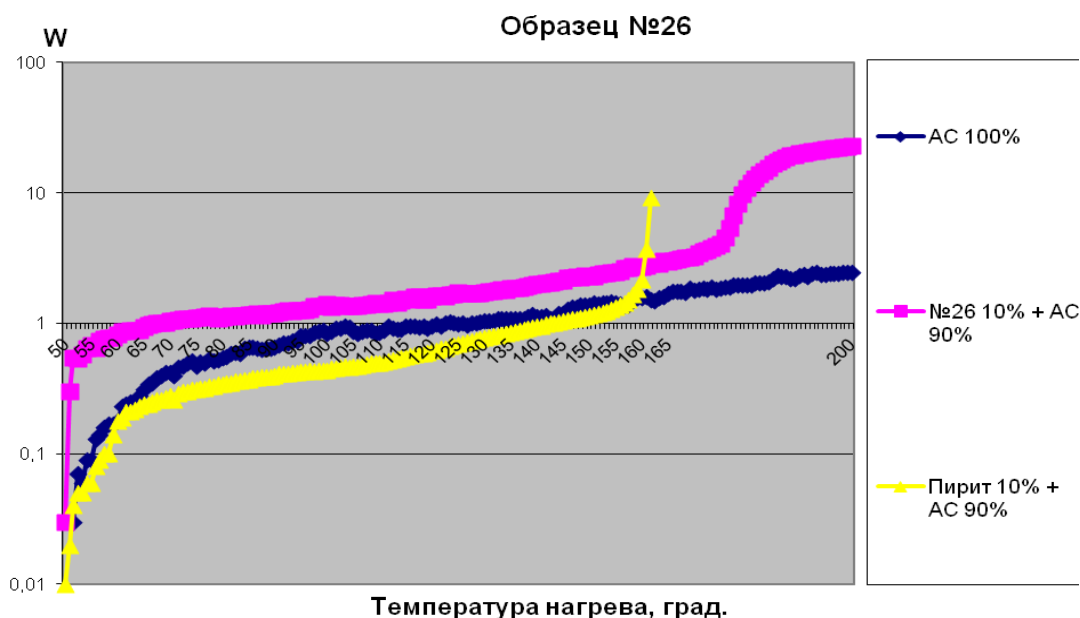


Рисунок А.88 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №26 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

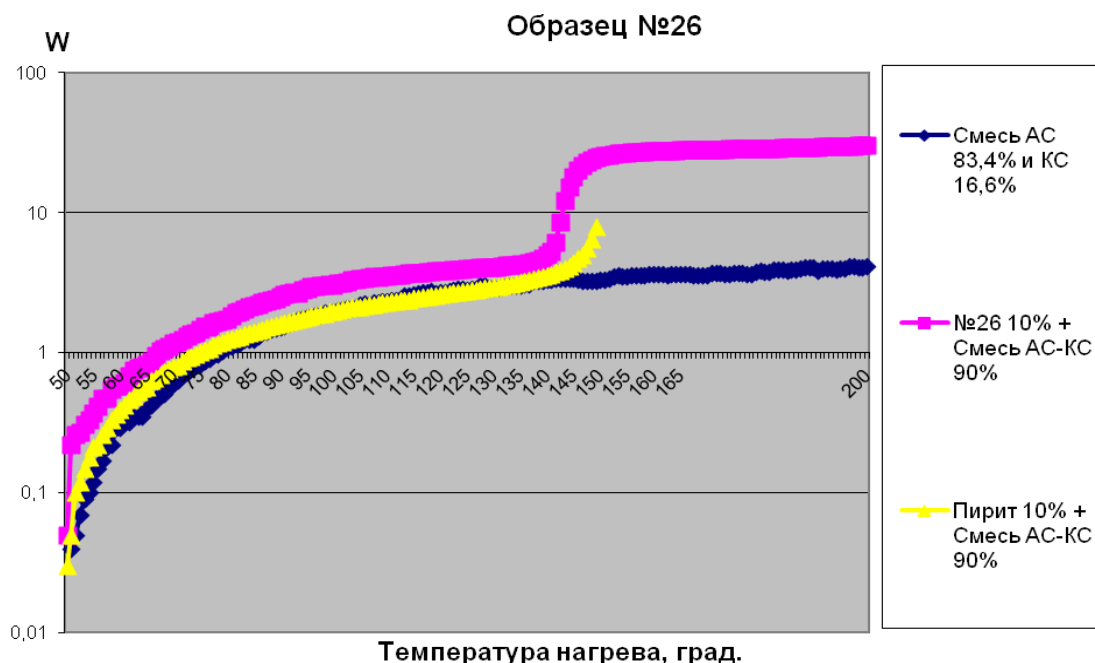


Рисунок А.89 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №26 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

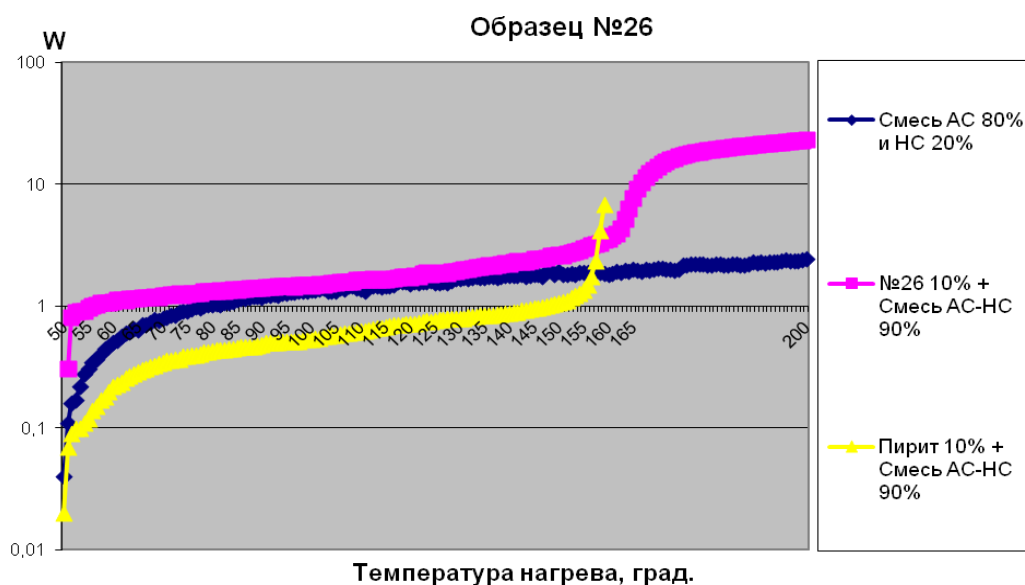


Рисунок А.90 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №26 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

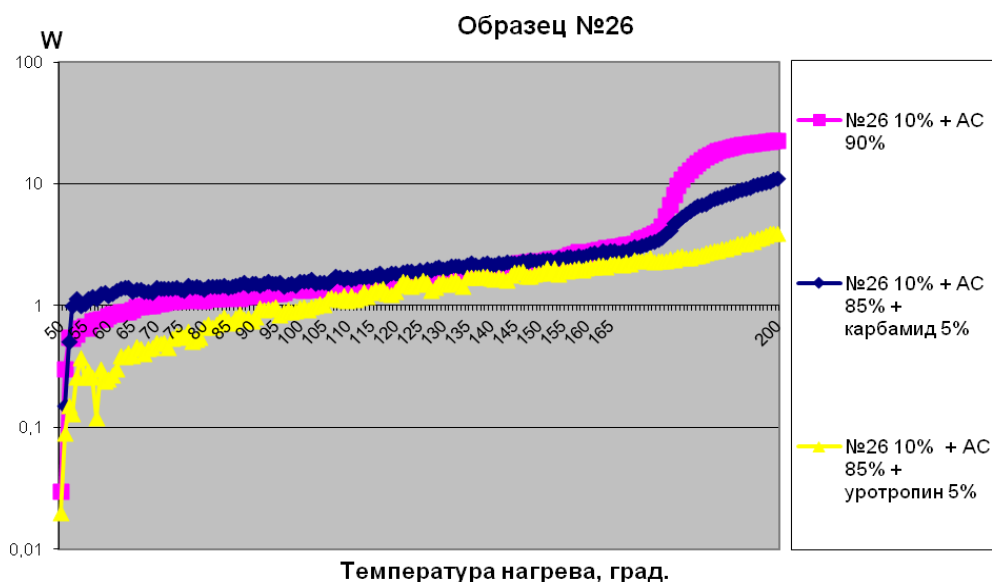


Рисунок А.91 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №26 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №26 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №26 с 85% смеси АС и 5% уротропина

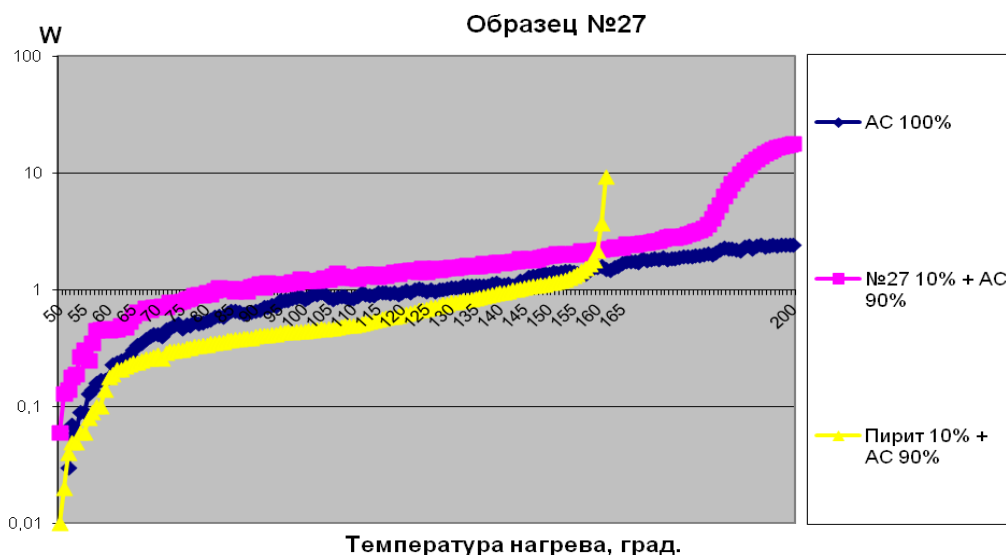


Рисунок А.92 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №27 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90%

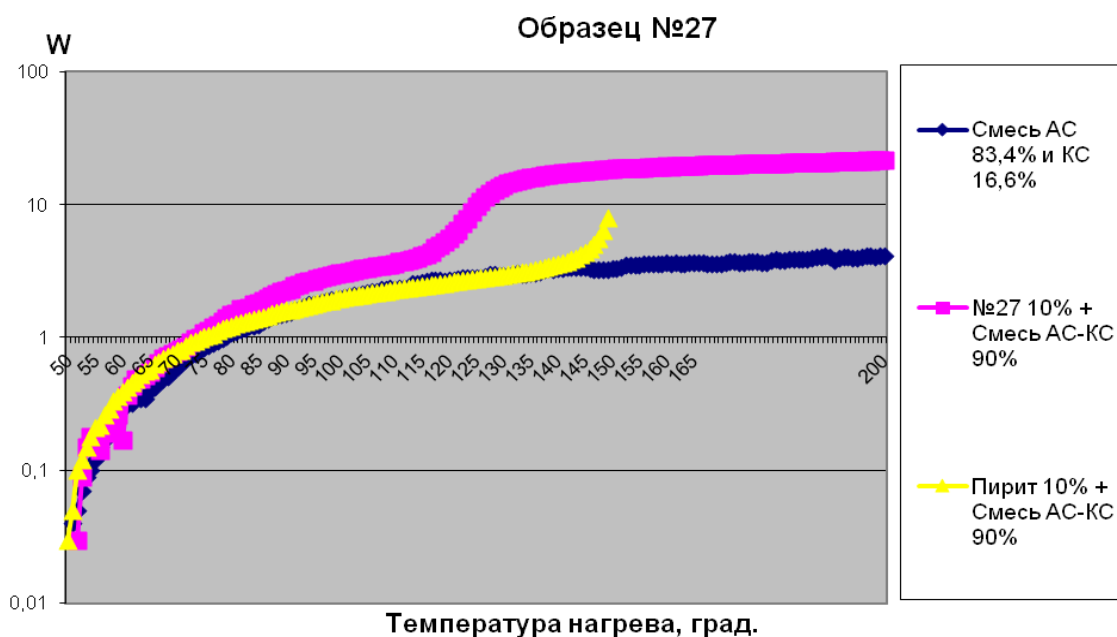


Рисунок А.93 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №27 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

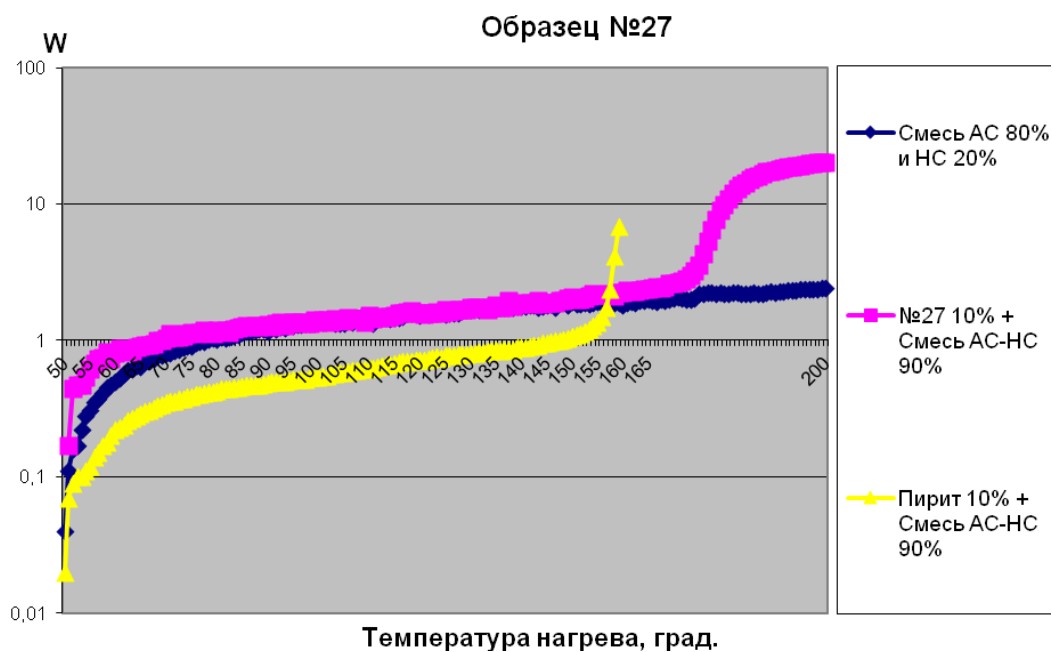


Рисунок А.94 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №27 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

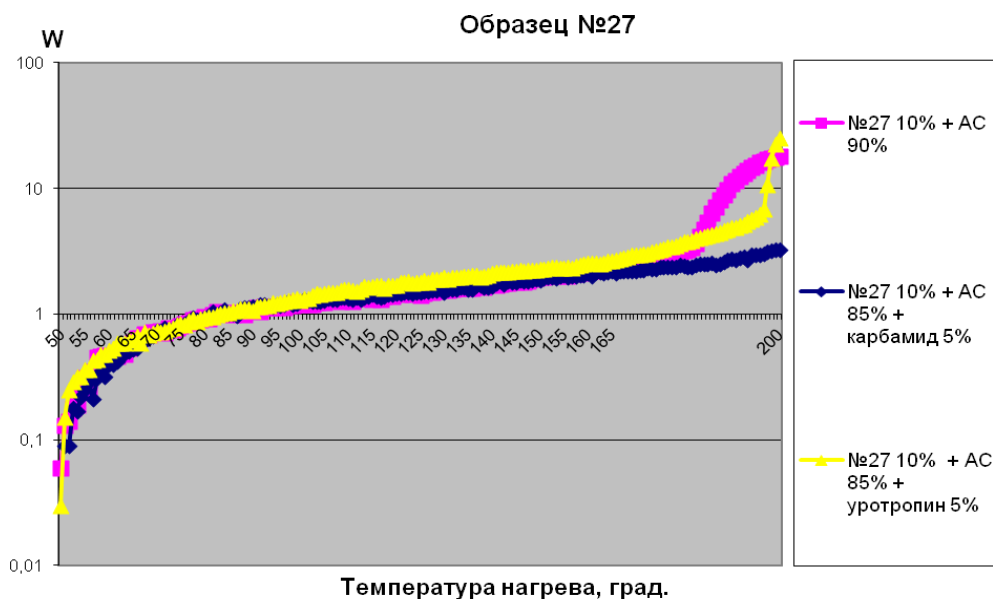


Рисунок А.95 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №27 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №27 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №27 с 85% смеси АС и 5% уротропина

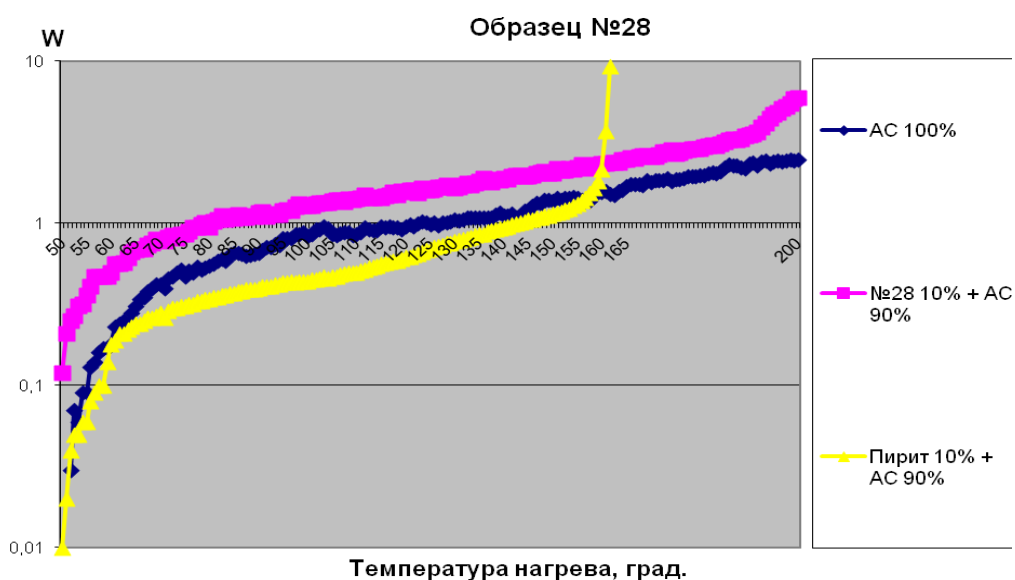


Рисунок А.96 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №28 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

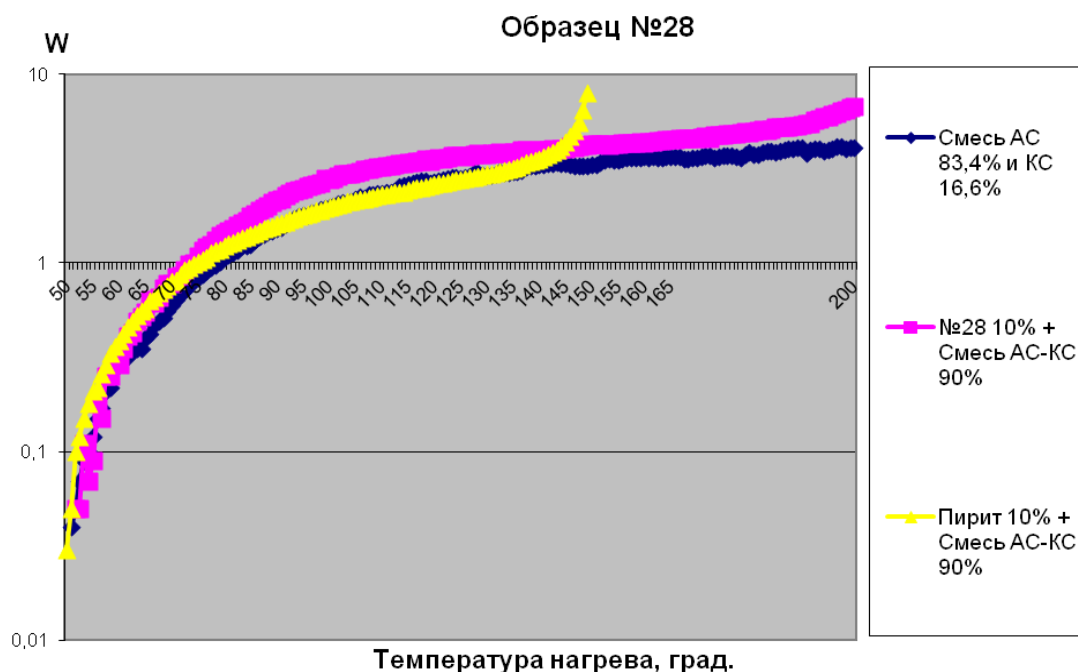


Рисунок А.97 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №28 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

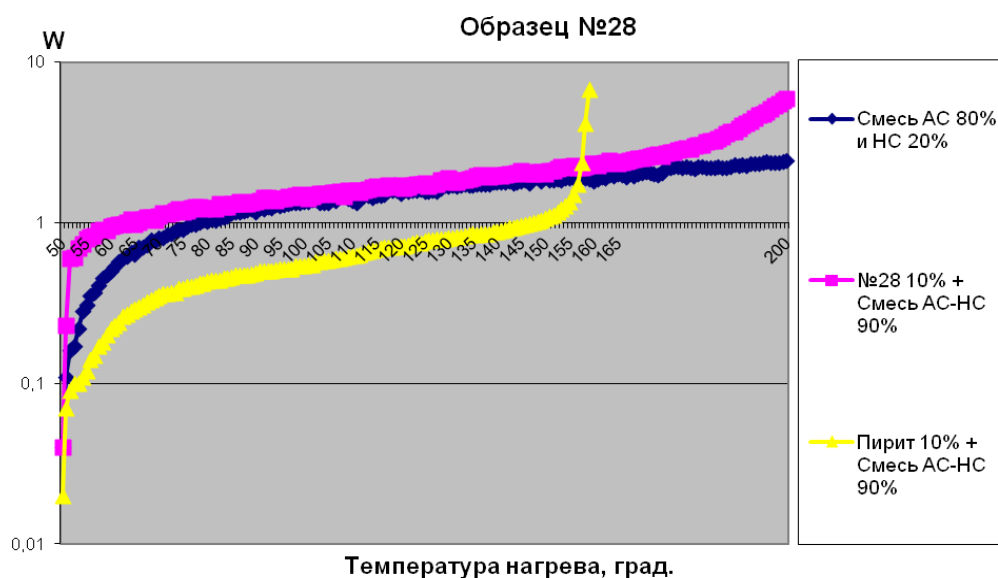


Рисунок А.98 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №28 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

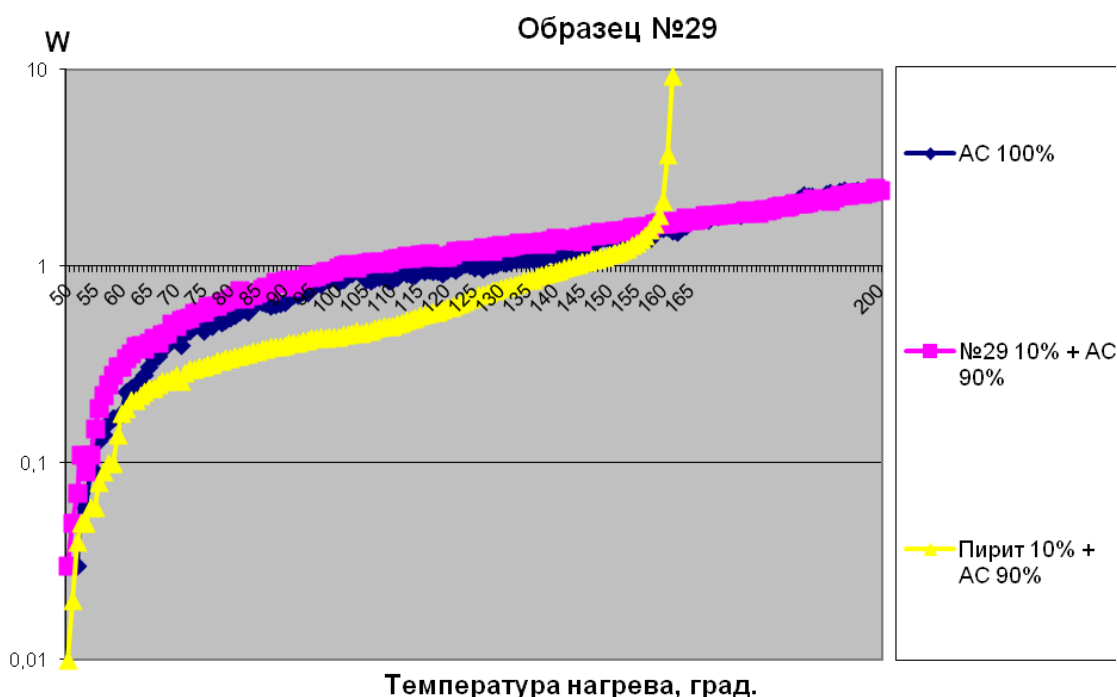


Рисунок А.99 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №29 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

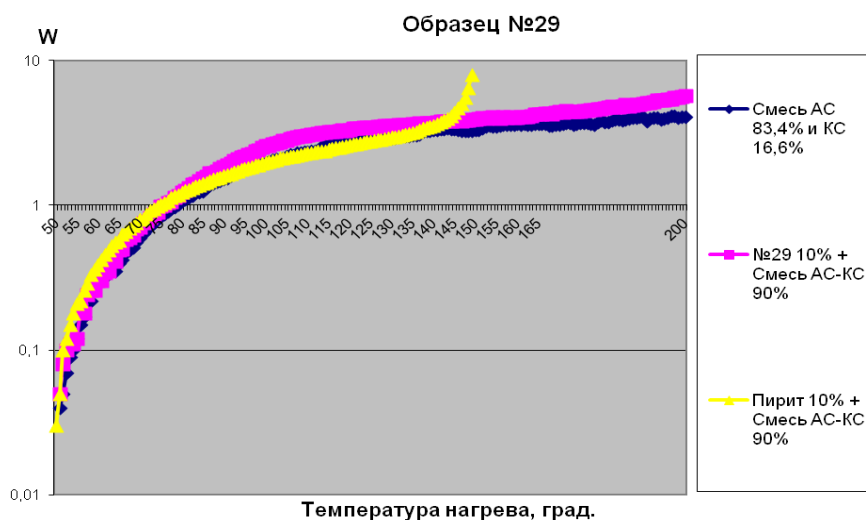


Рисунок А.100 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №29 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

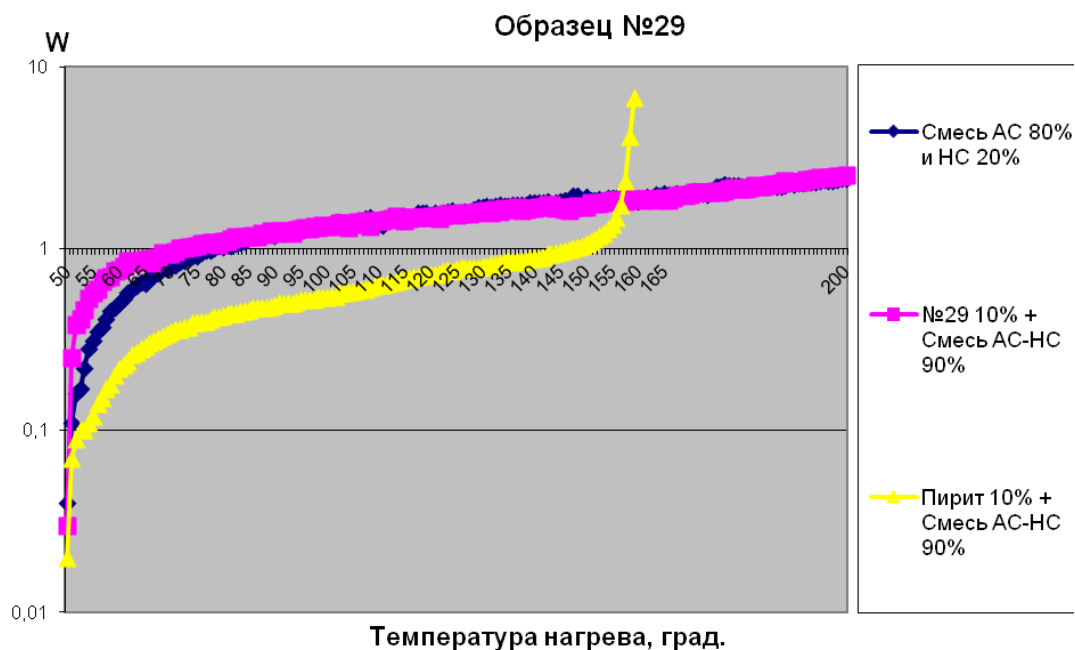


Рисунок А.101 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №29 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

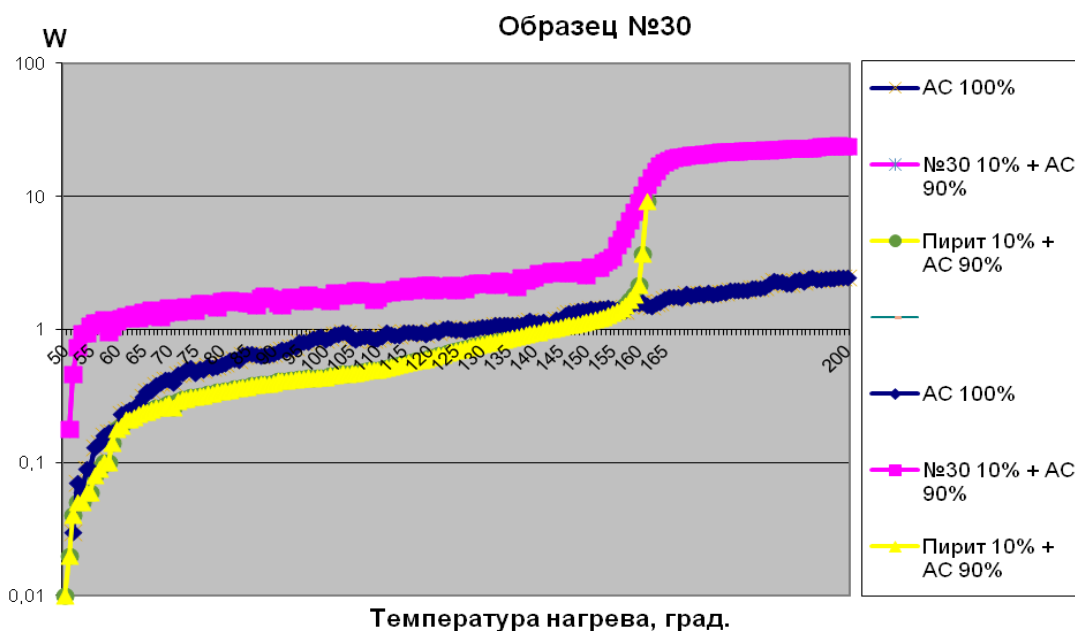


Рисунок А.102 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №30 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

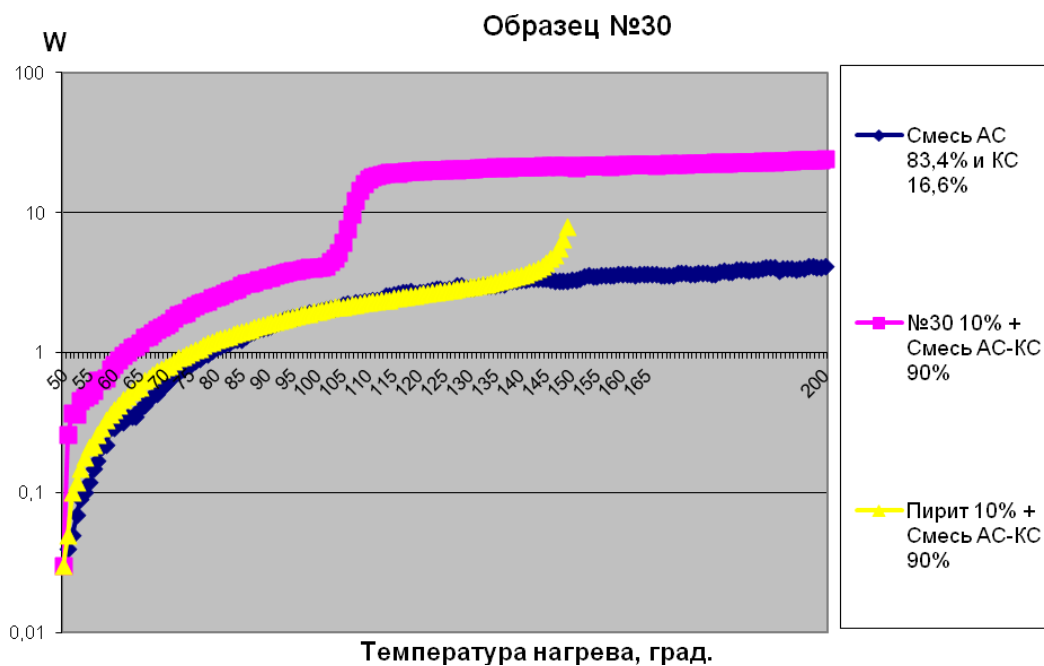


Рисунок А.103 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №30 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

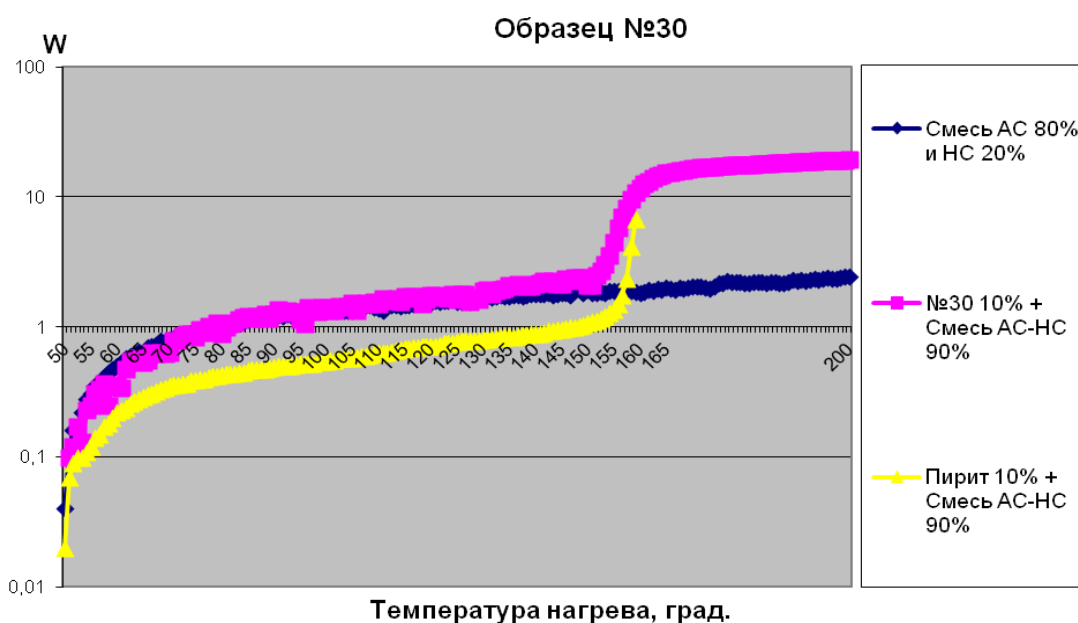


Рисунок А.104 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №30 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

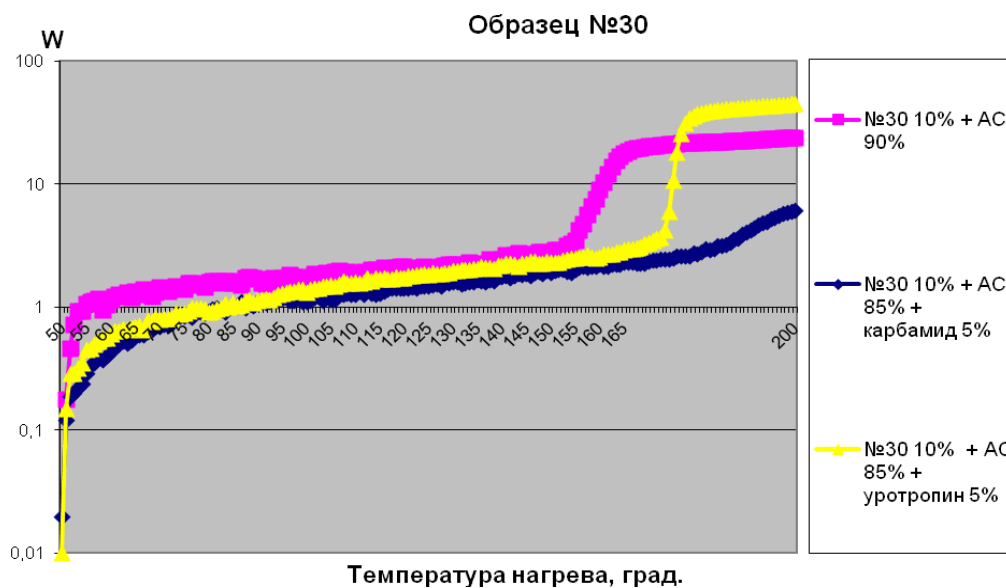


Рисунок А.105 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №30 с 90% смеси AC; смесь 10% образца №30 с 85% смеси AC и 5% карбамида; смесь 10% образца №30 с 85% смеси AC и 5% уротропина

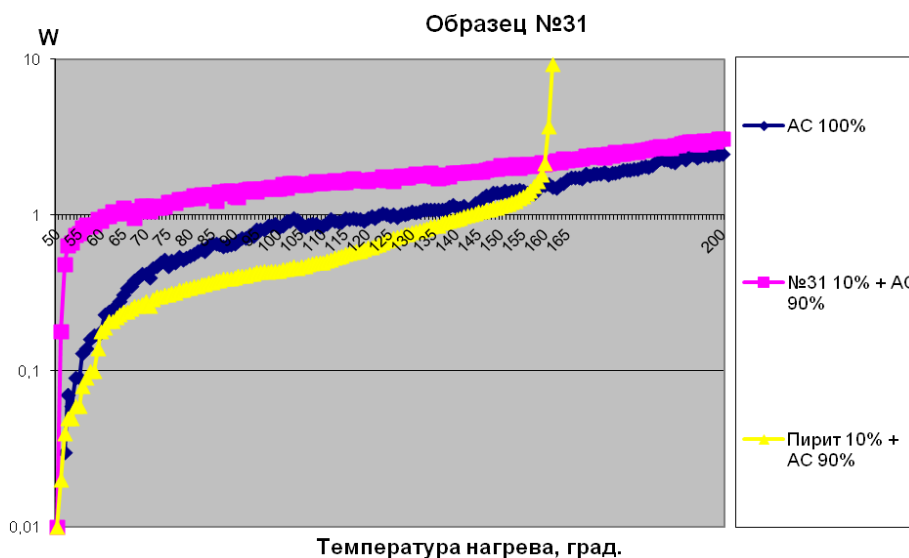


Рисунок А.106 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: AC – 100%; смесь 10% образца №31 с 90% AC; смесь 10% пирита с 90% AC

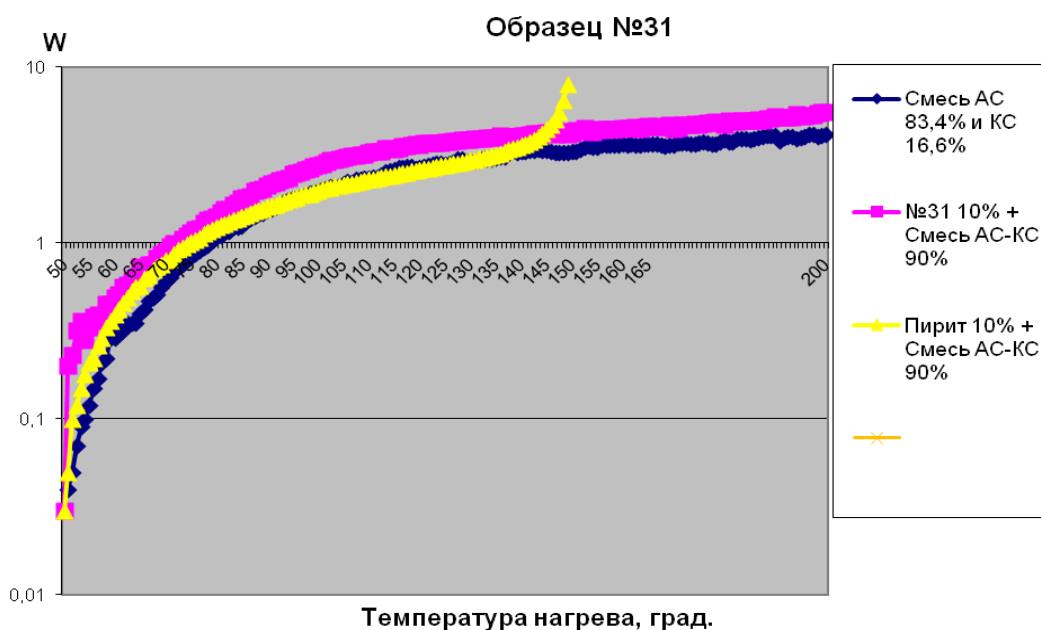


Рисунок А.107 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №31 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

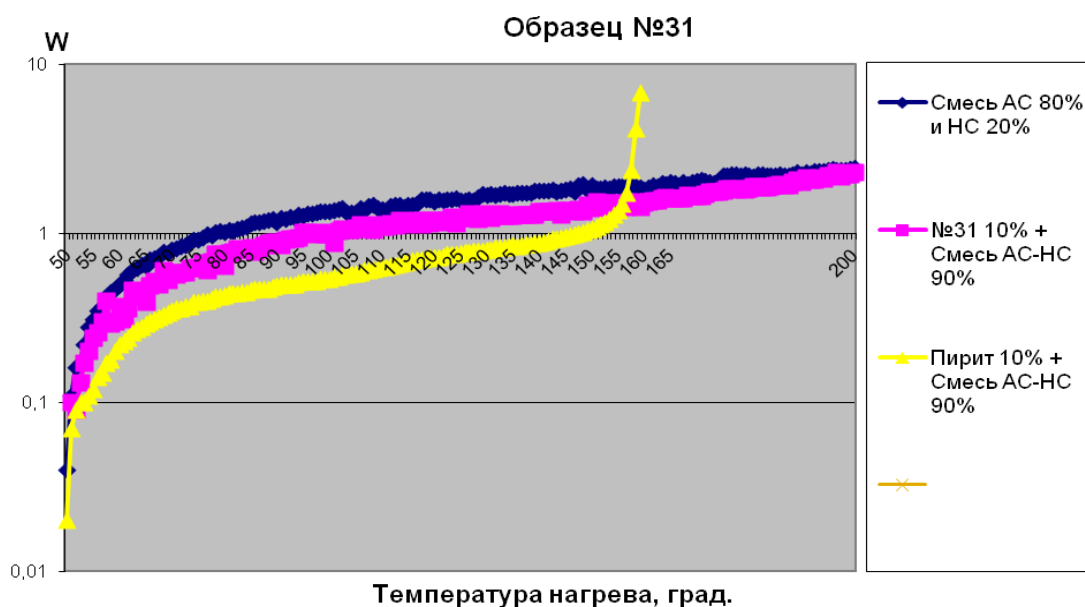


Рисунок А.108 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №31 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

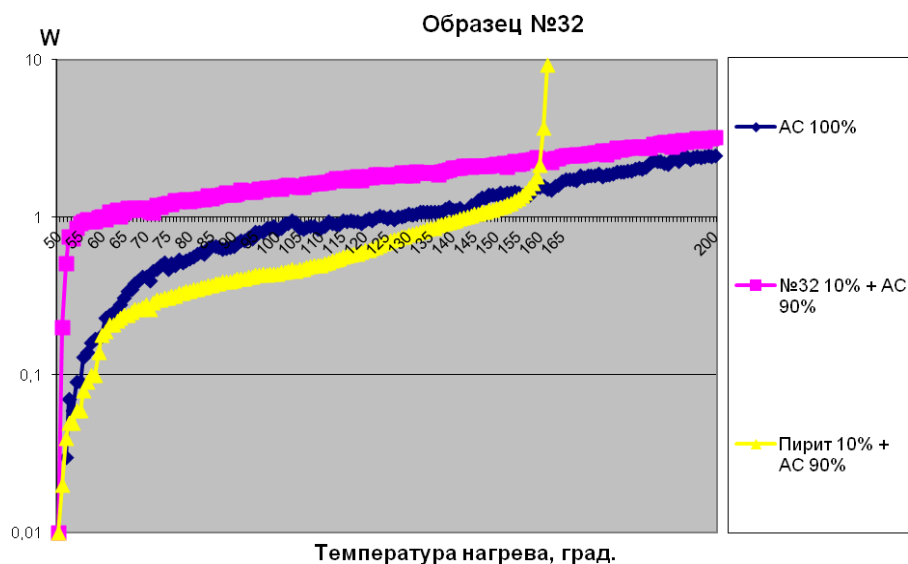


Рисунок А.109 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №32 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

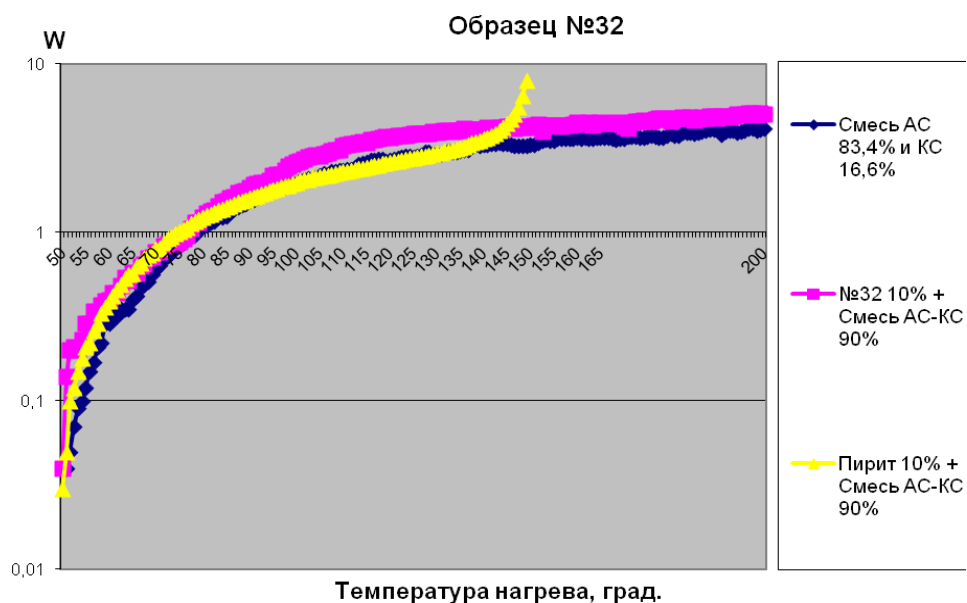


Рисунок А.110 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №32 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

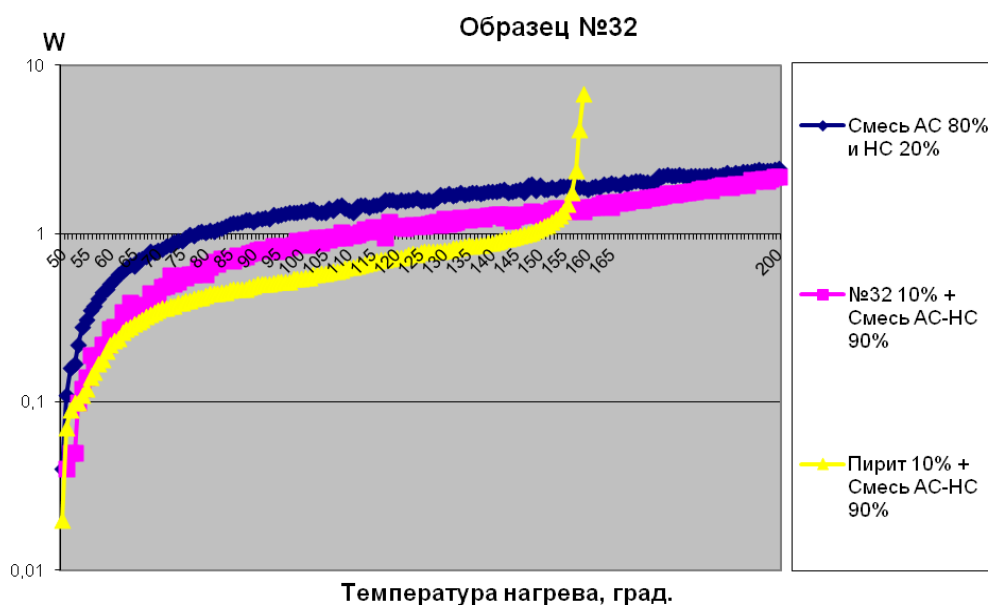


Рисунок А.111 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №32 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

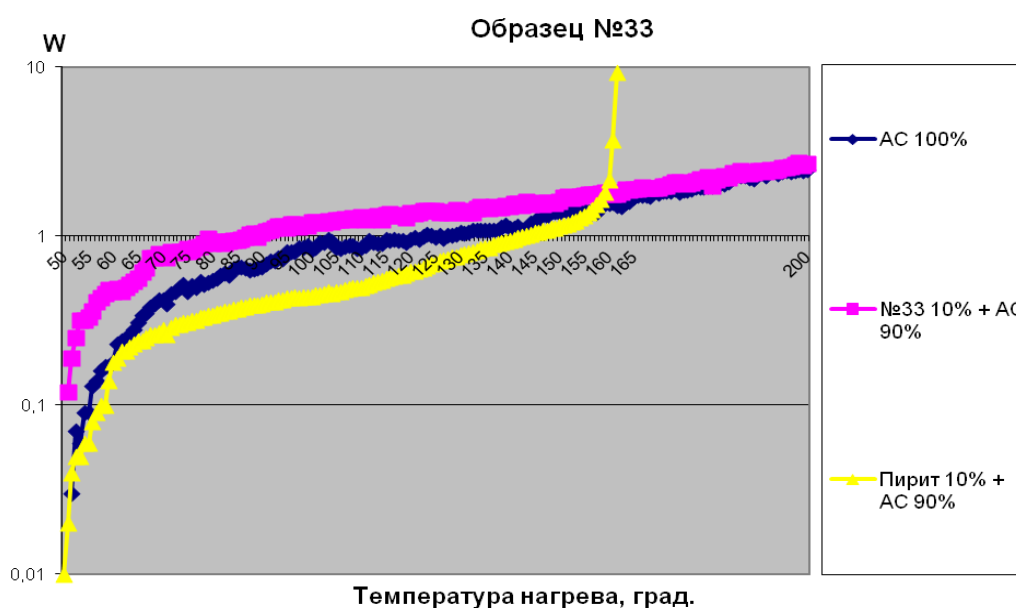


Рисунок А.112 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №33 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

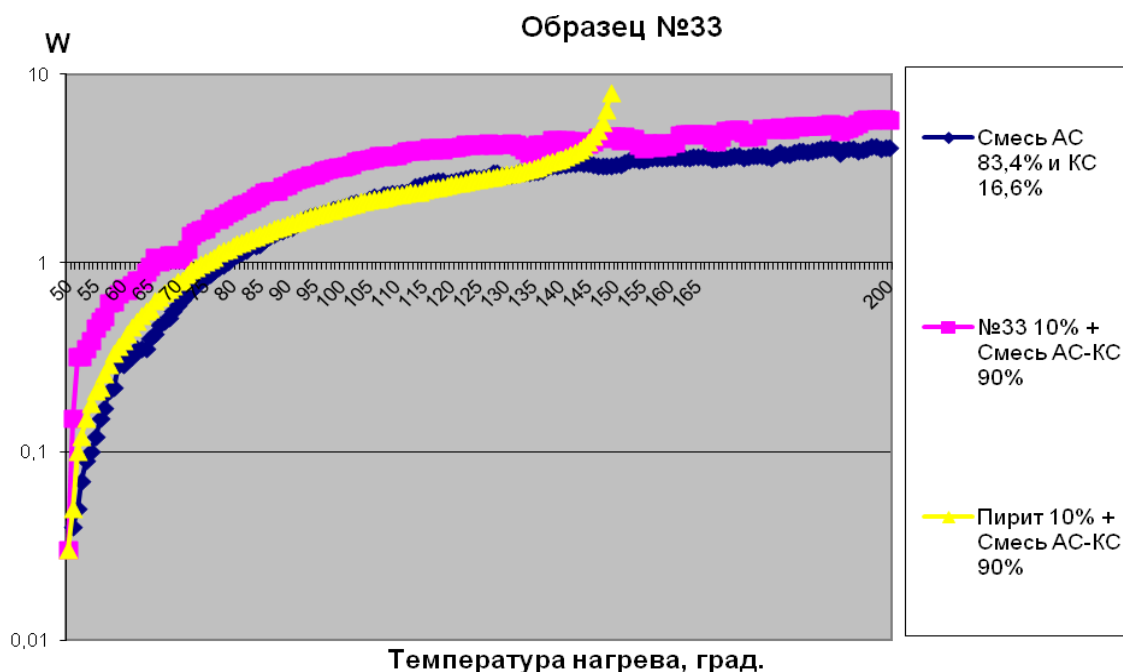


Рисунок А.113 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №33 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

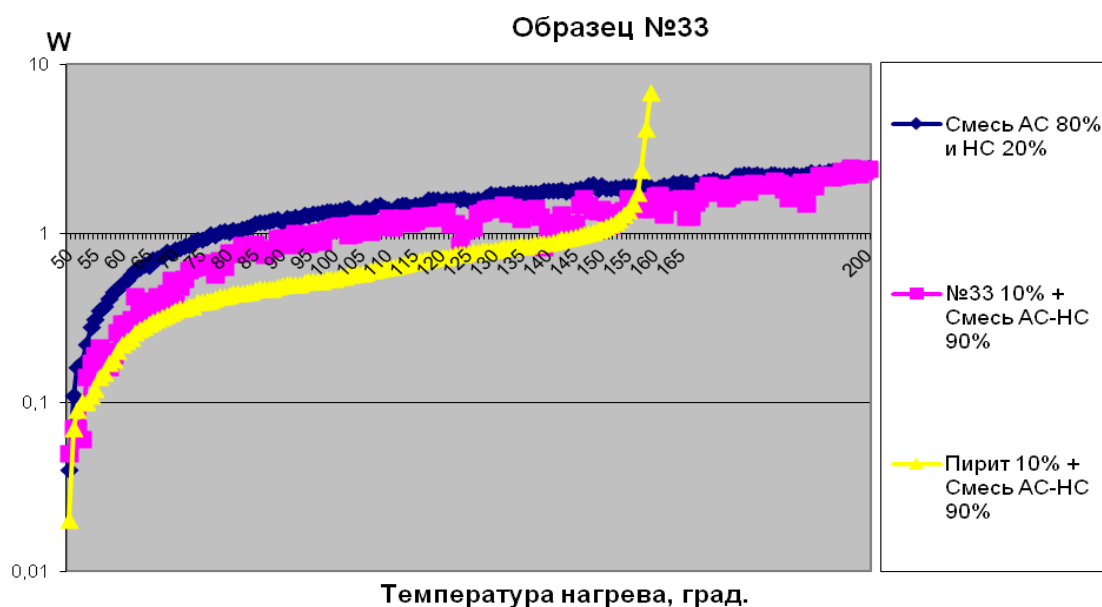


Рисунок А.114 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №33 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

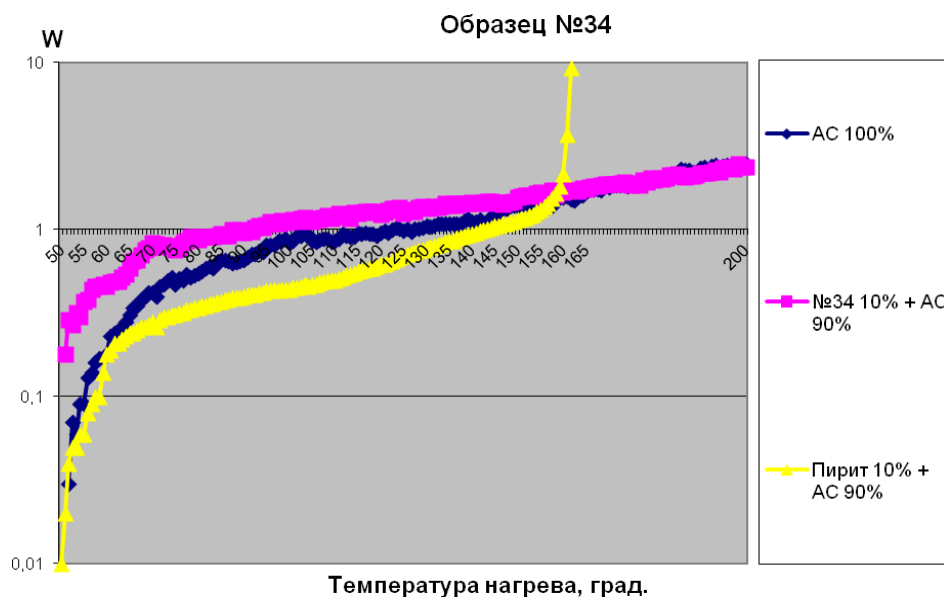


Рисунок А.115 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №34 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

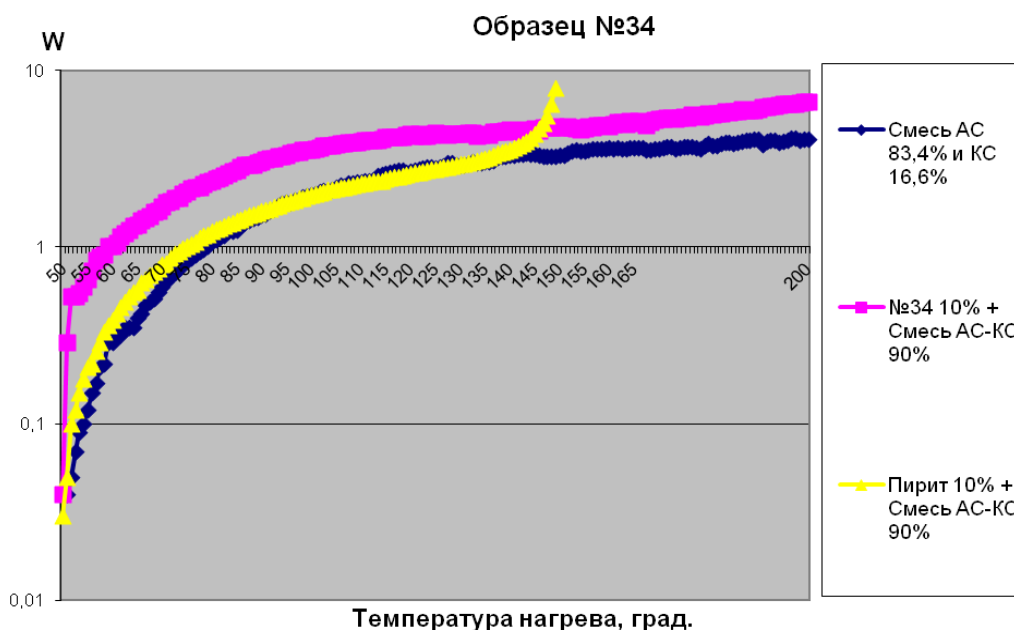


Рисунок А.116 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №34 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

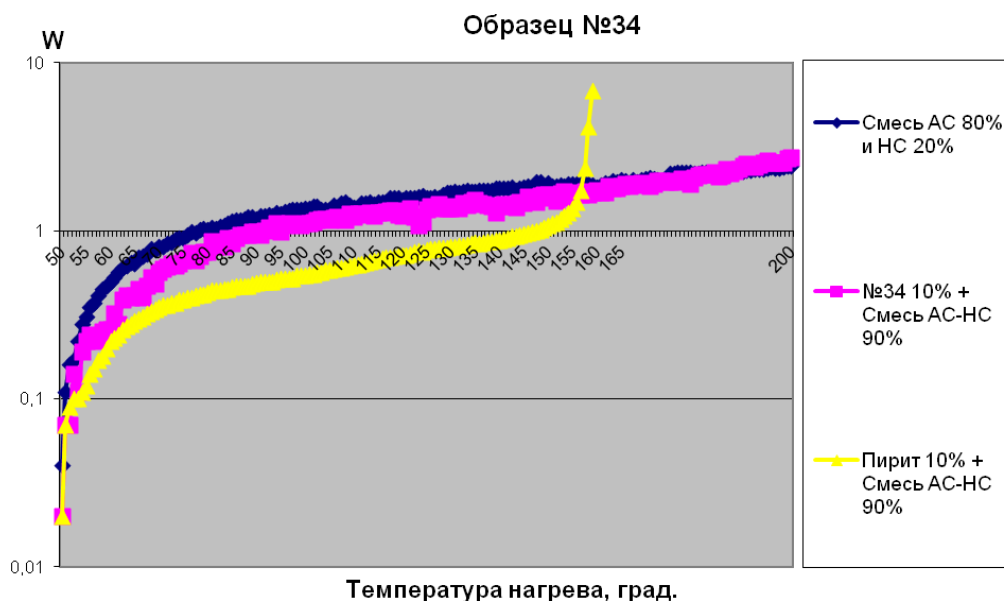


Рисунок А.117 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №34 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

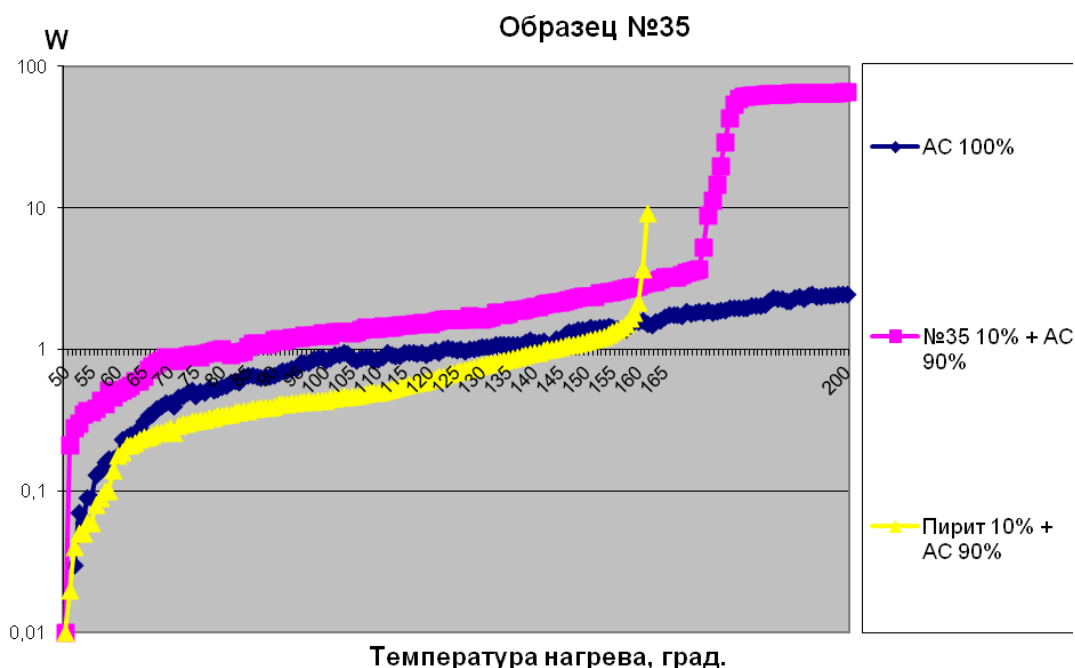


Рисунок А.118 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №35 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

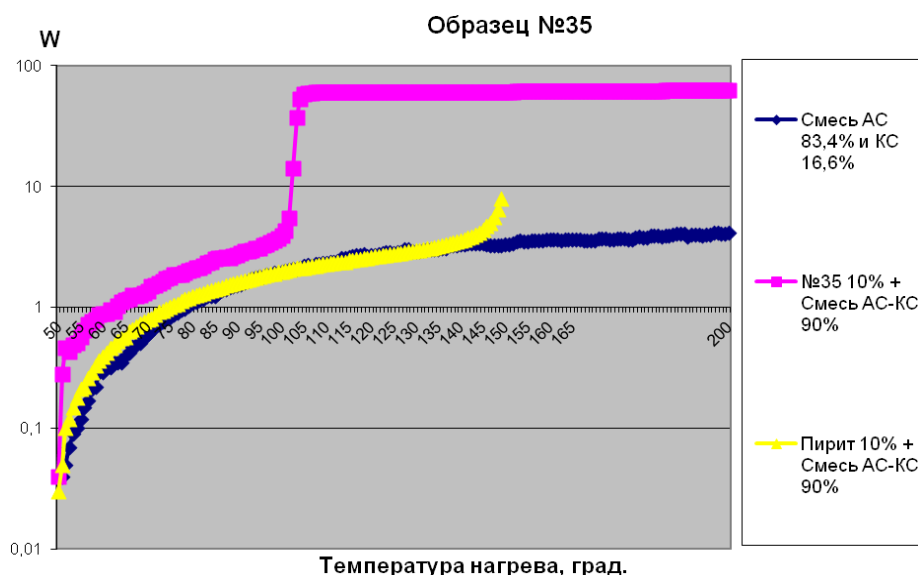


Рисунок А.119 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №35 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

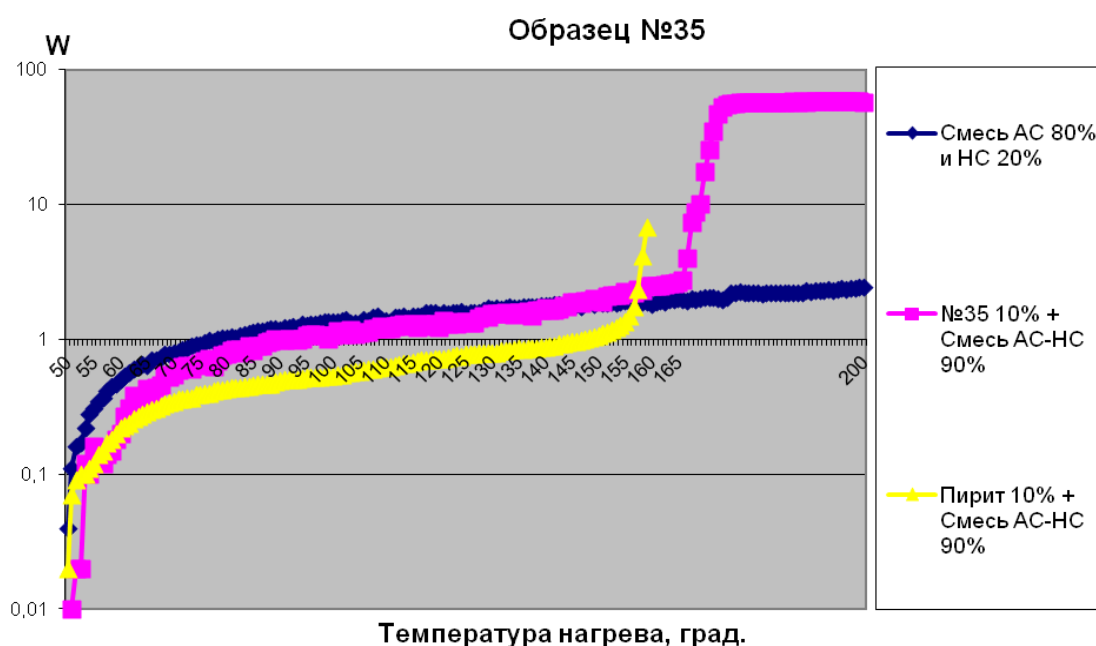


Рисунок А.120 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №35 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

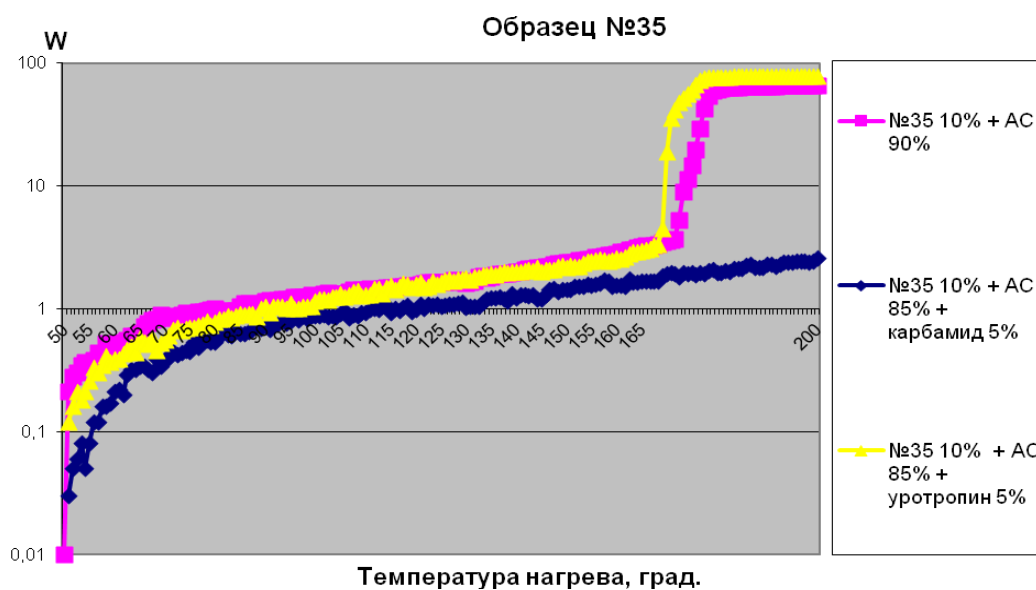


Рисунок А.121 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №35 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №35 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №35 с 85% смеси АС и 5% уротропина

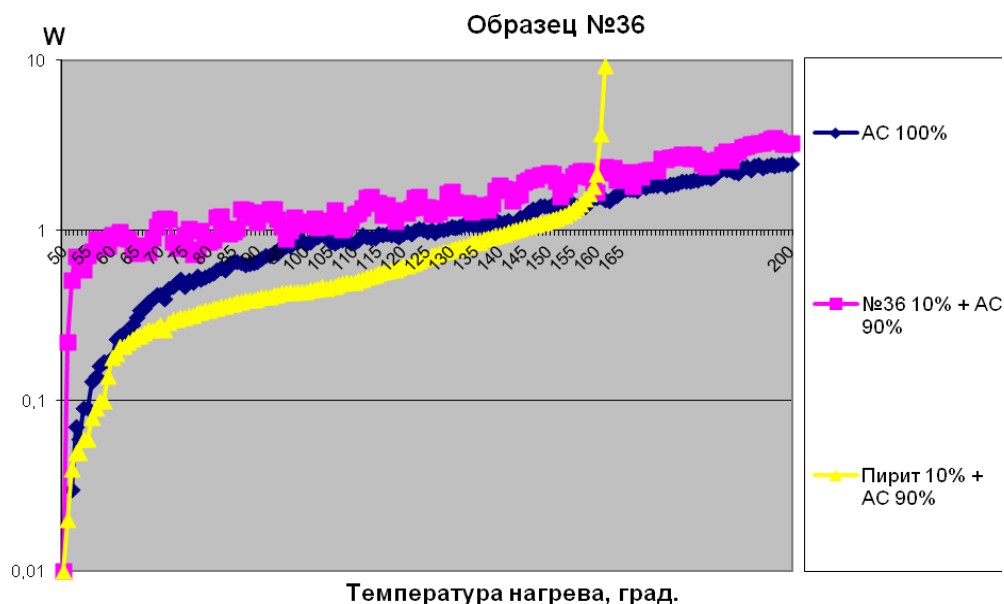


Рисунок А.122 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №36 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

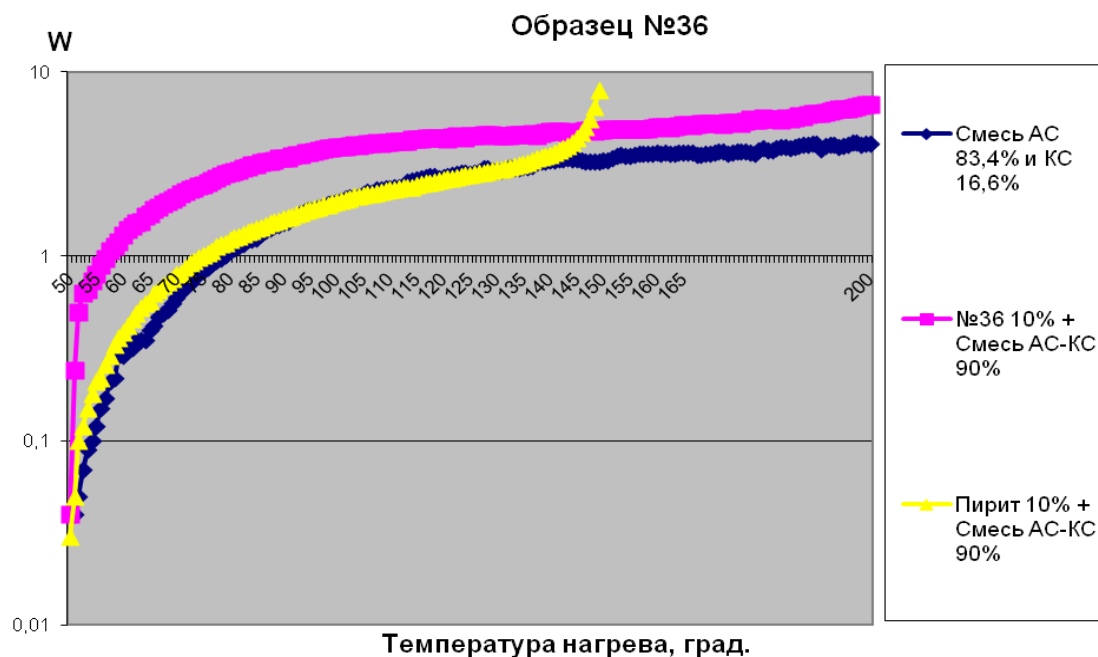


Рисунок А.123 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №36 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

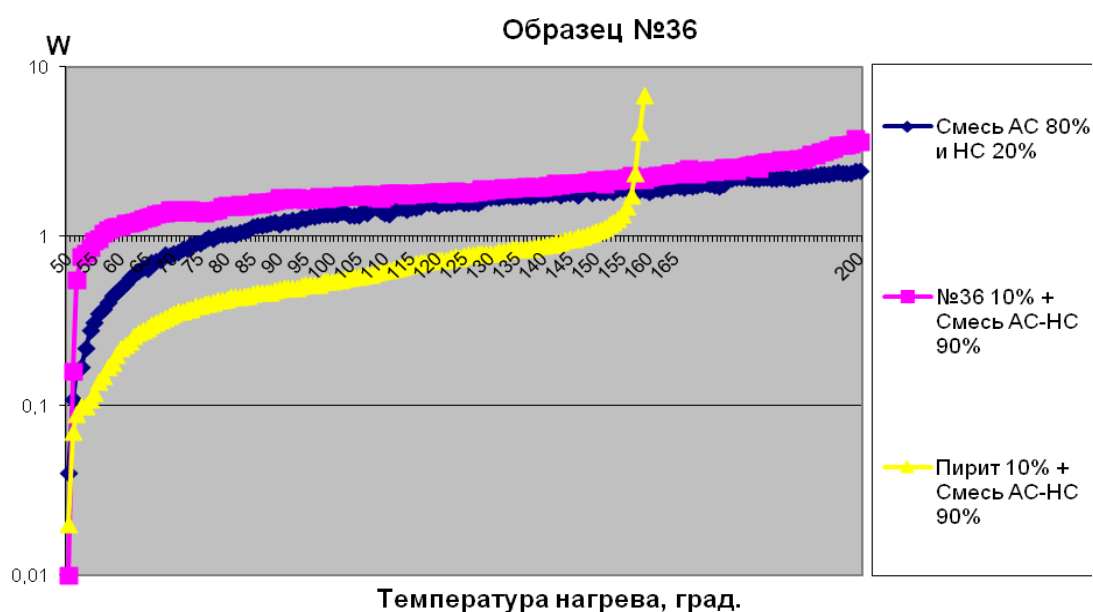


Рисунок А.124 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №36 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

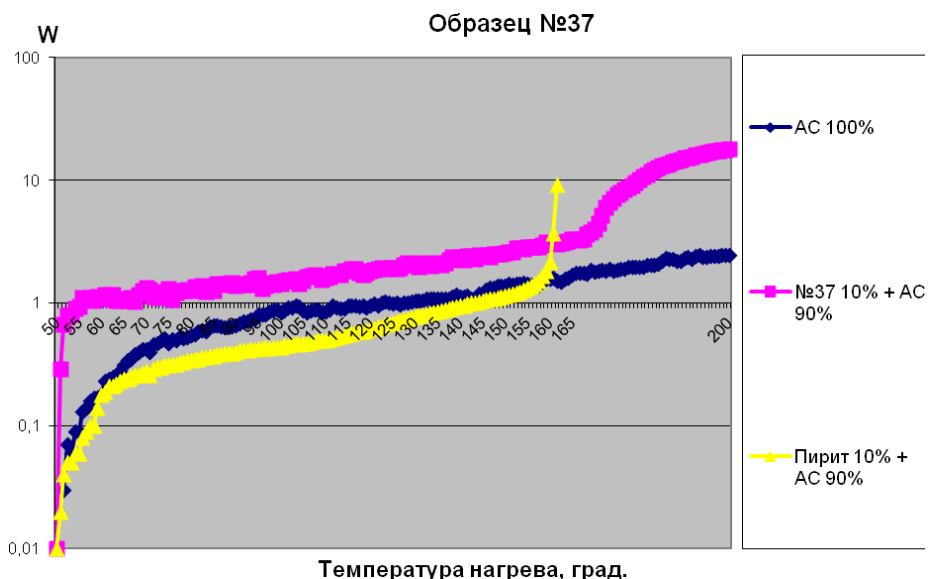


Рисунок А.125 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №37 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

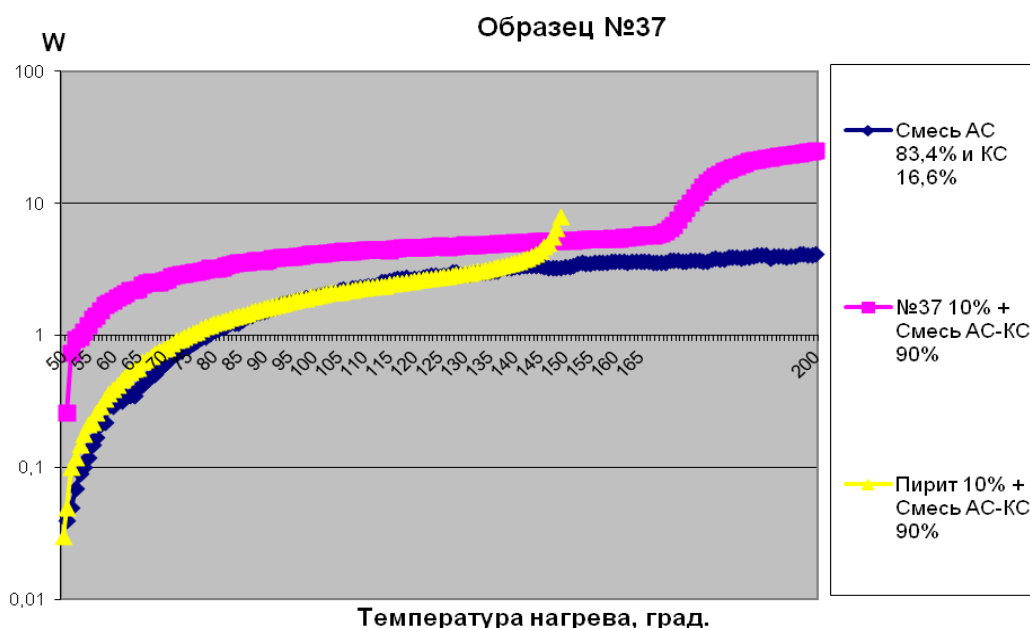


Рисунок А.126 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №37 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

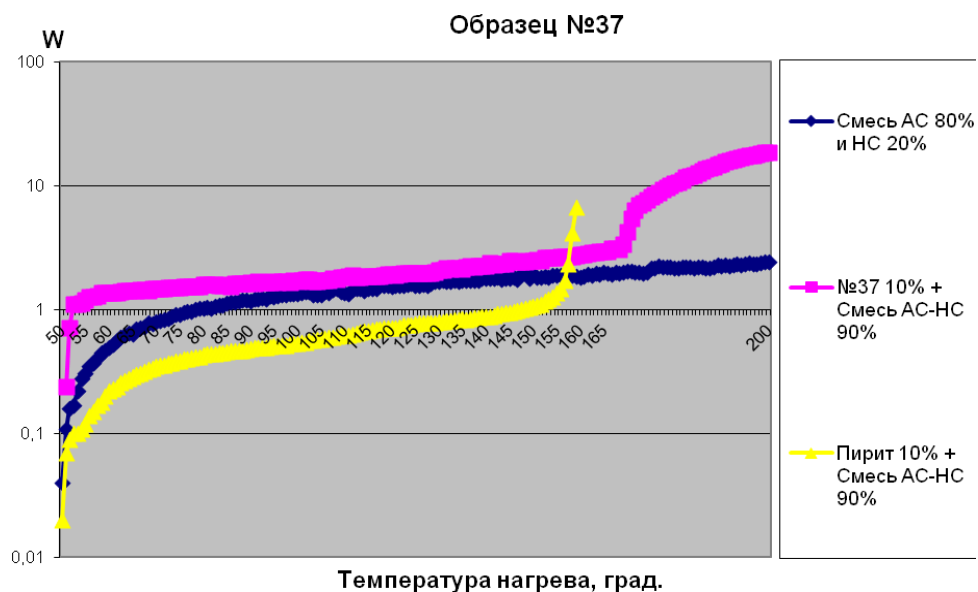


Рисунок А.127 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №37 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

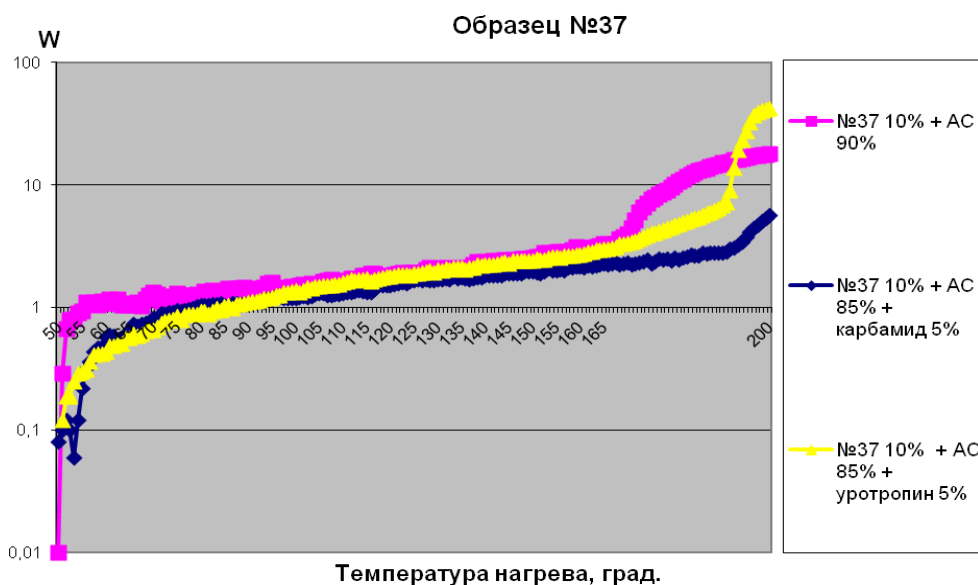


Рисунок А.128 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №37 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №37 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №37 с 85% смеси АС и 5% уротропина

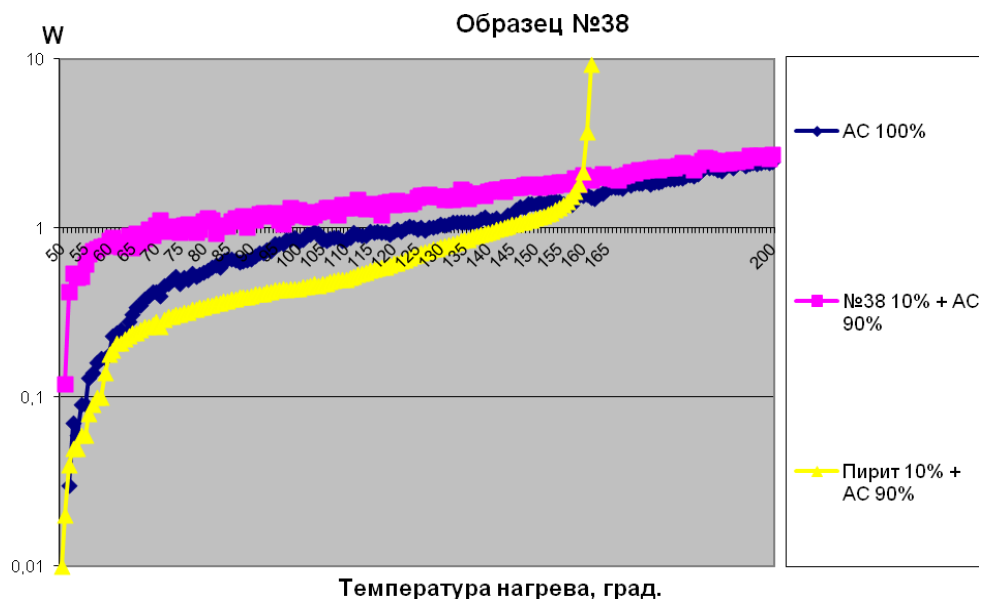


Рисунок А.129 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №38 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

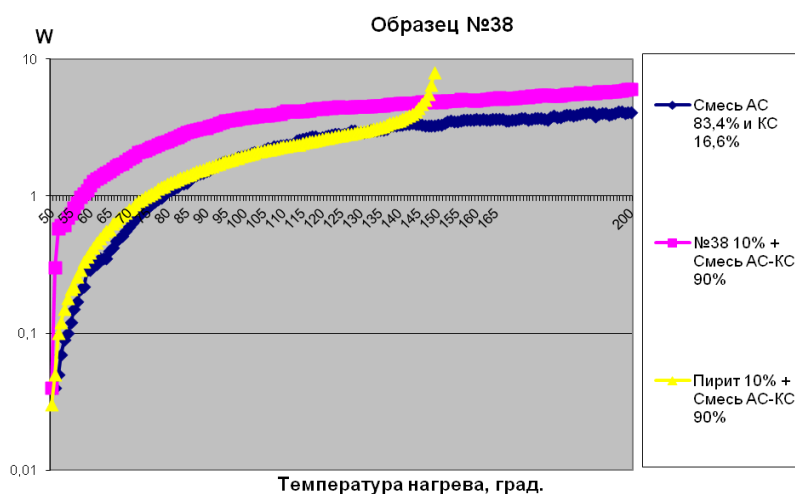


Рисунок А.130 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №38 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

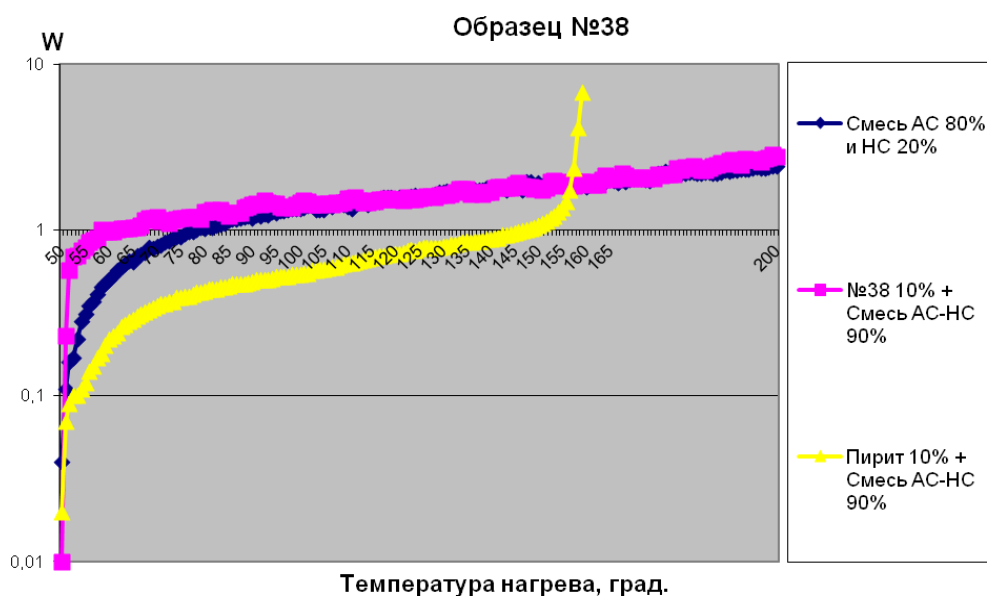


Рисунок А.131 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №38 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

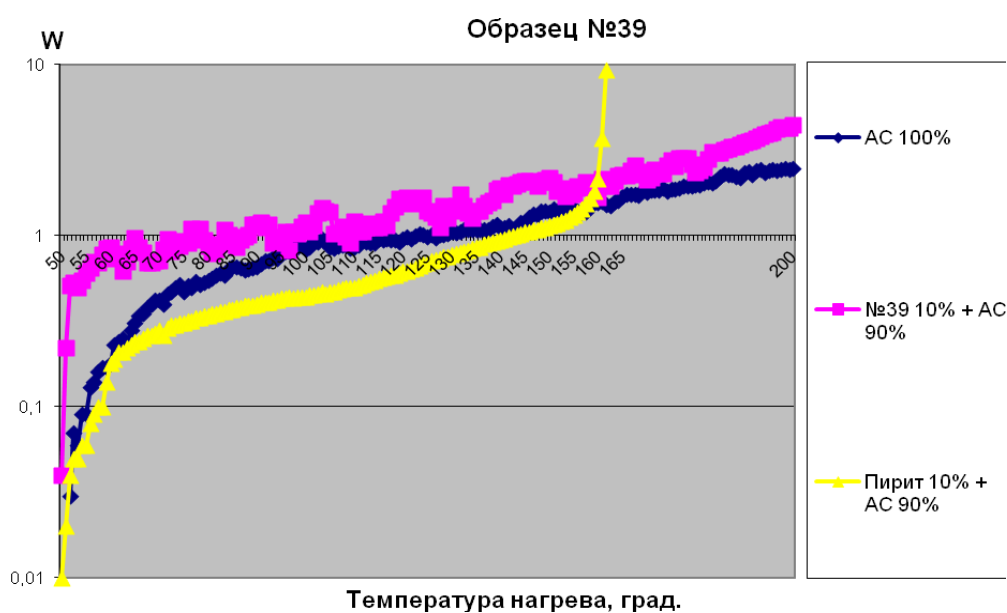


Рисунок А.132 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №39 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

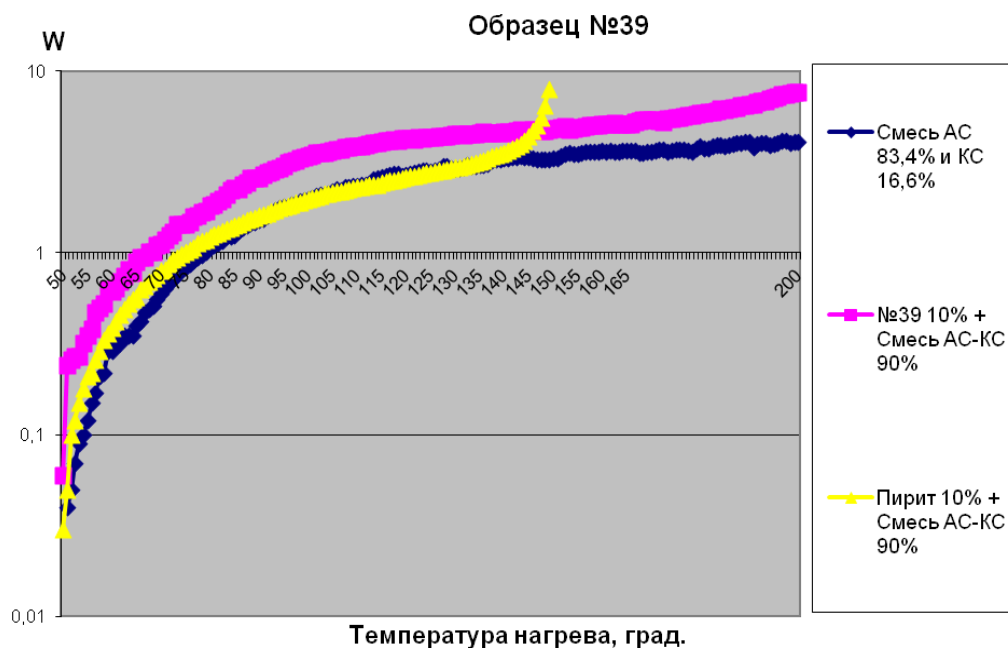


Рисунок А.133 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №39 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

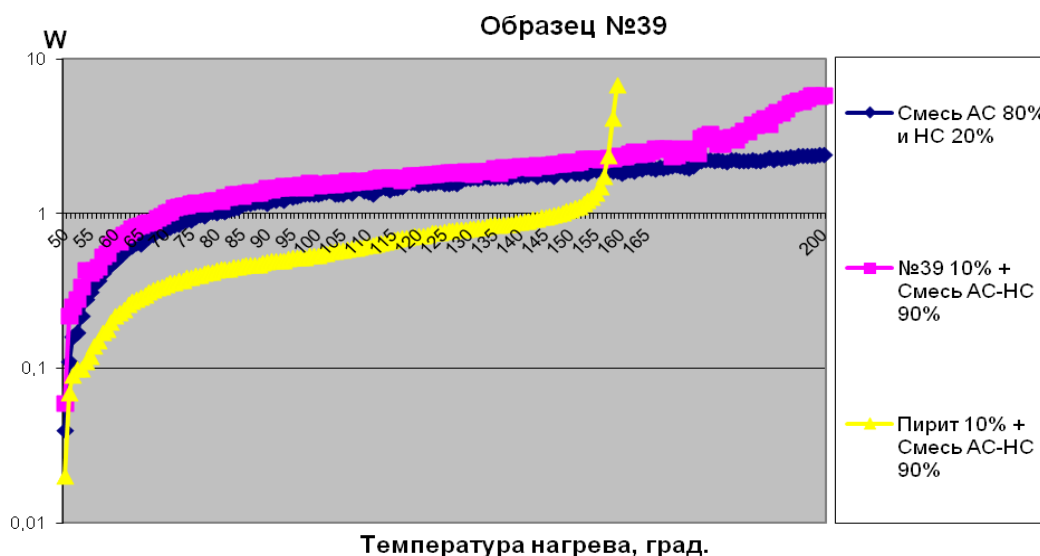


Рисунок А.134 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №39 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

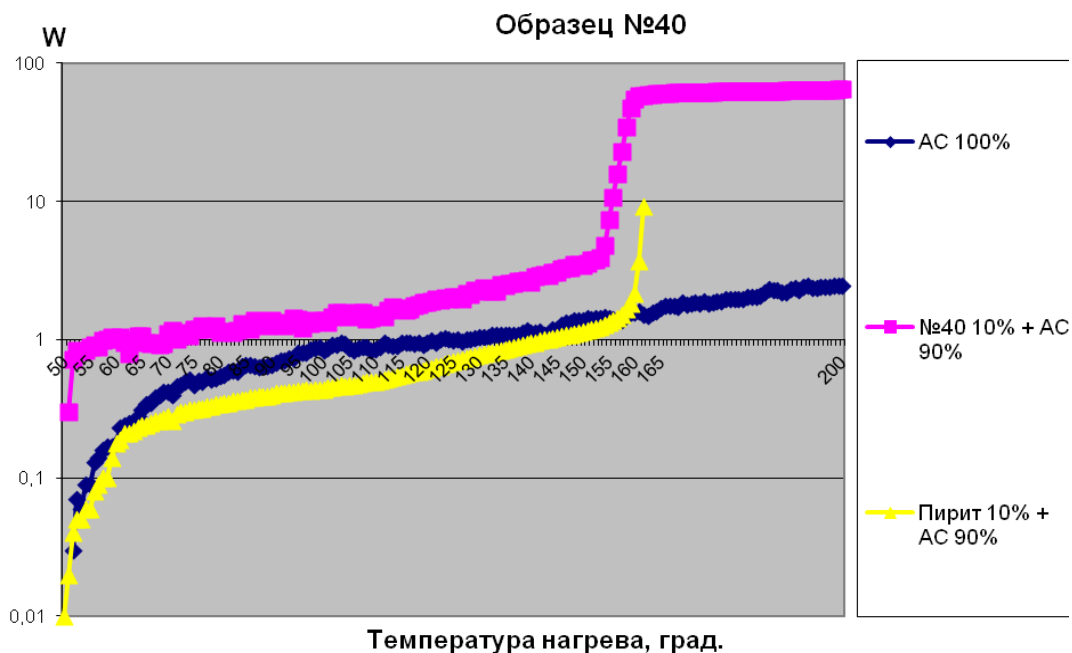


Рисунок А.135 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №40 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

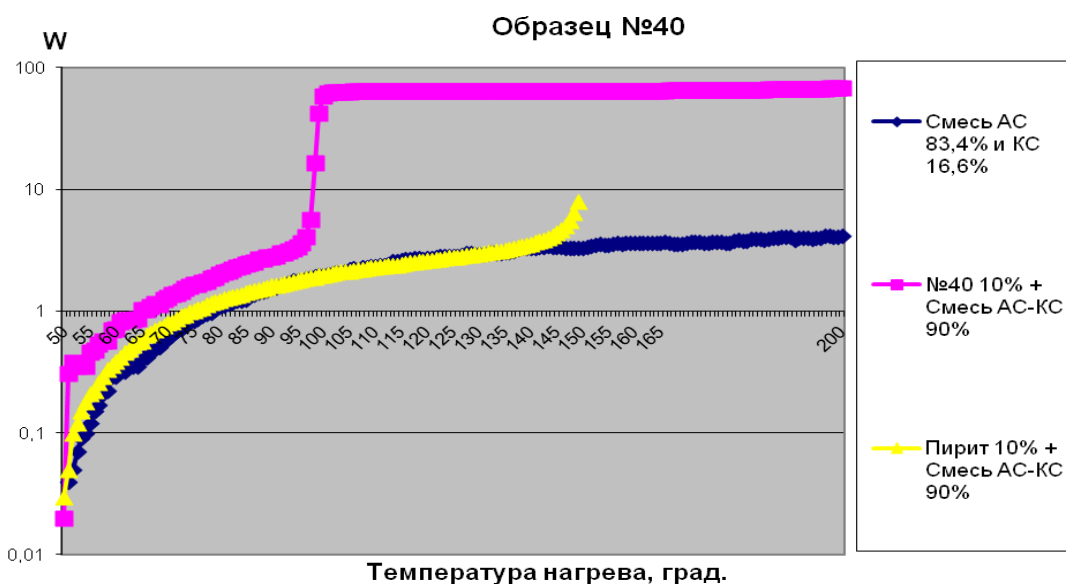


Рисунок А.136 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №40 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

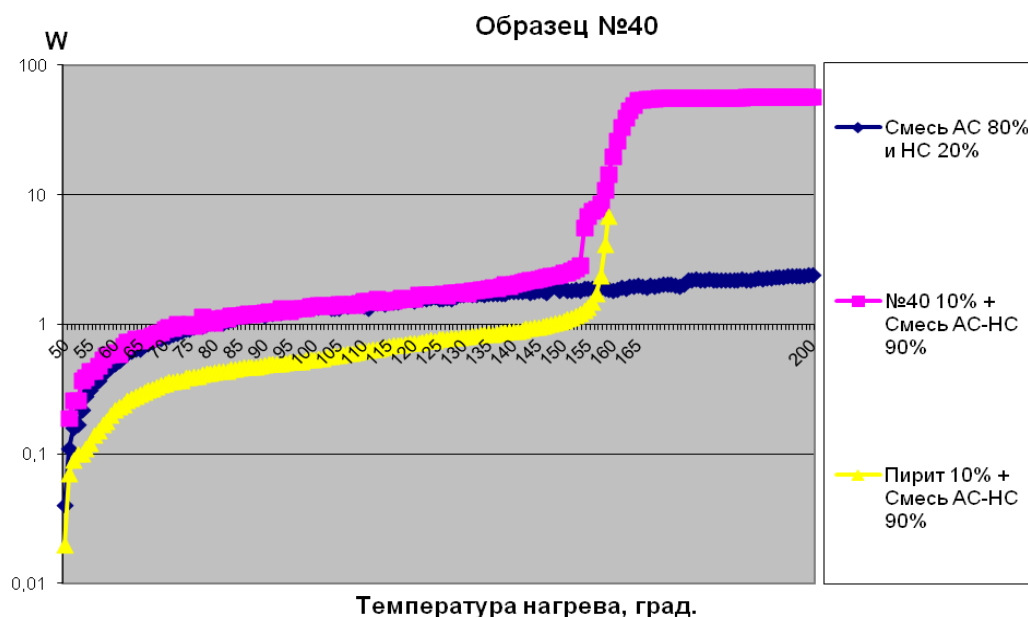


Рисунок А.137 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №40 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

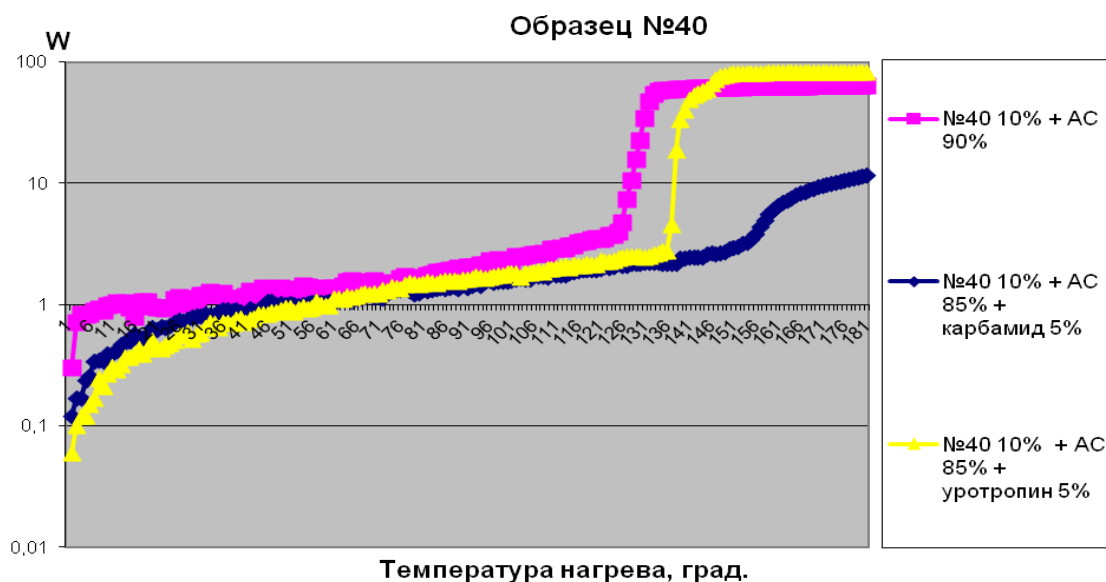


Рисунок А.138 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: смесь 10% образца №40 с 90% смеси АС; смесь 10% образца №40 с 85% смеси АС и 5% карбамида; смесь 10% образца №40 с 85% смеси АС и 5% уротропина

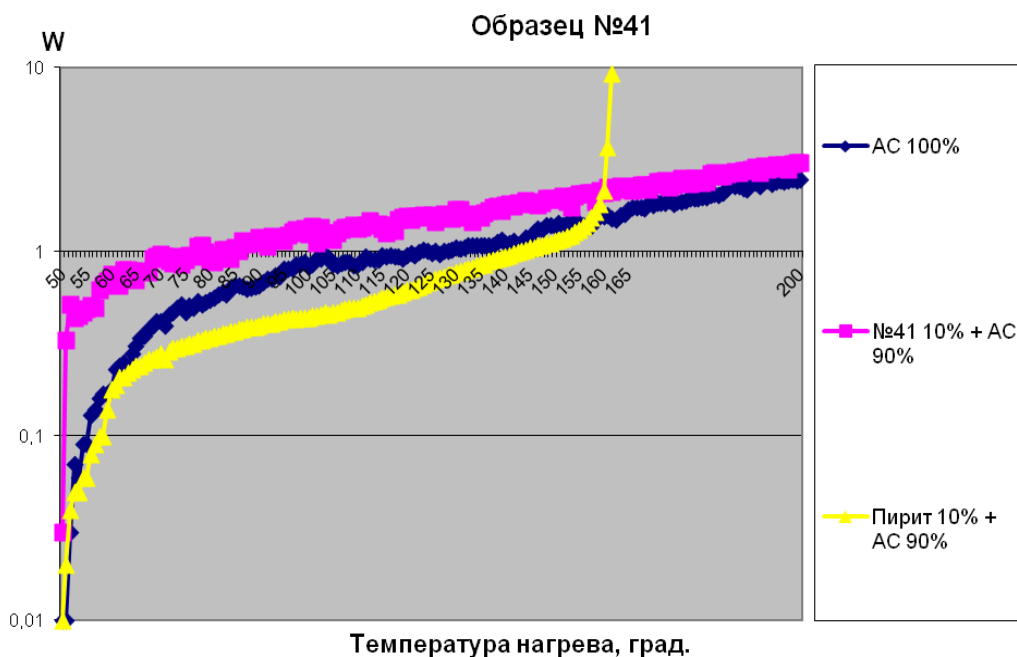


Рисунок А.139 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №41 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

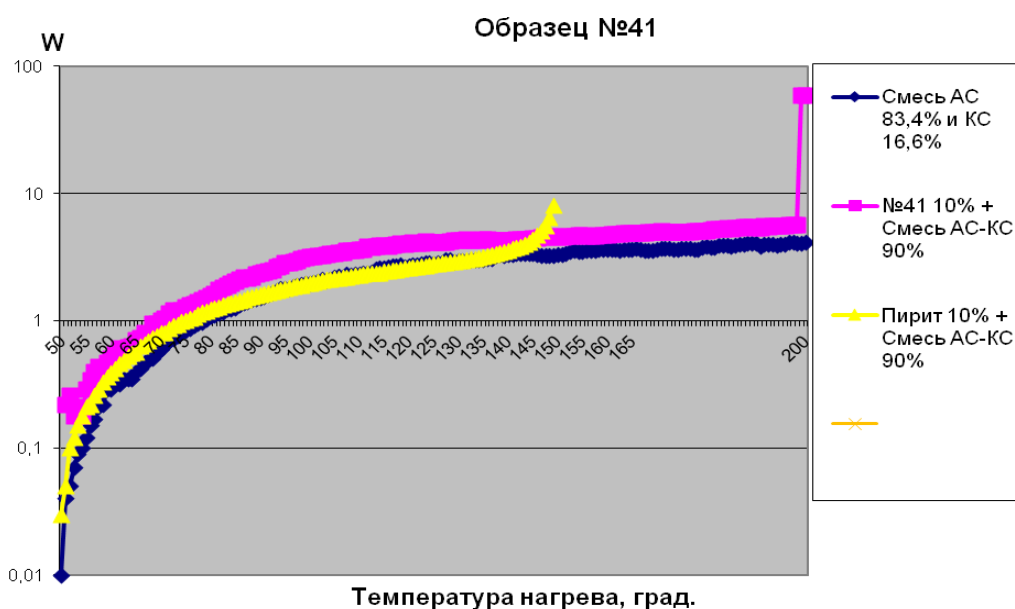


Рисунок А.140 – Потеря массы исследуемого образца (W, % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №41 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

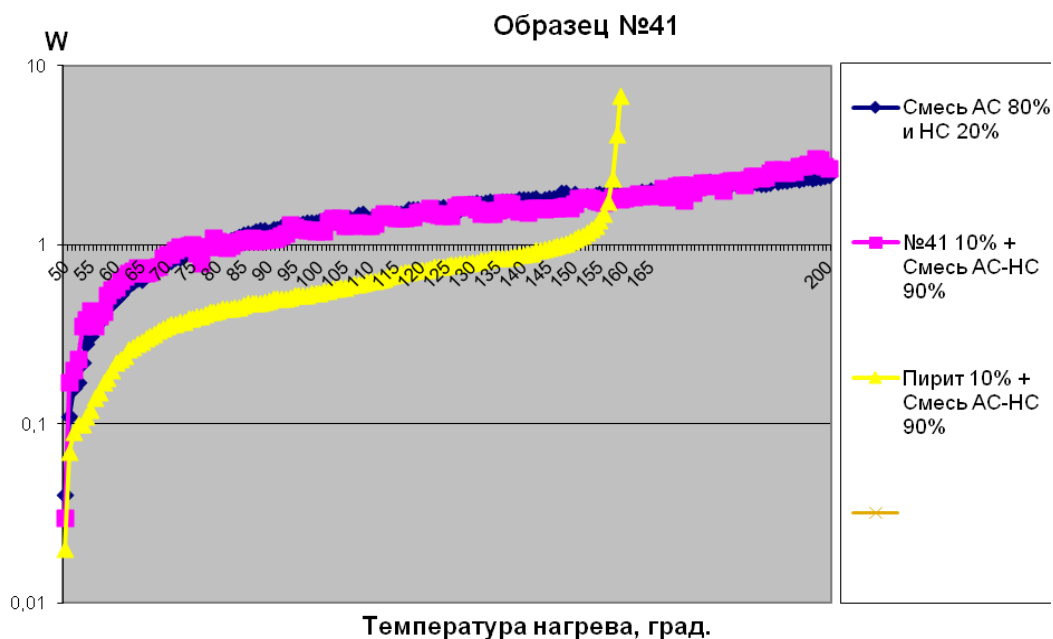


Рисунок А.141 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №41 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

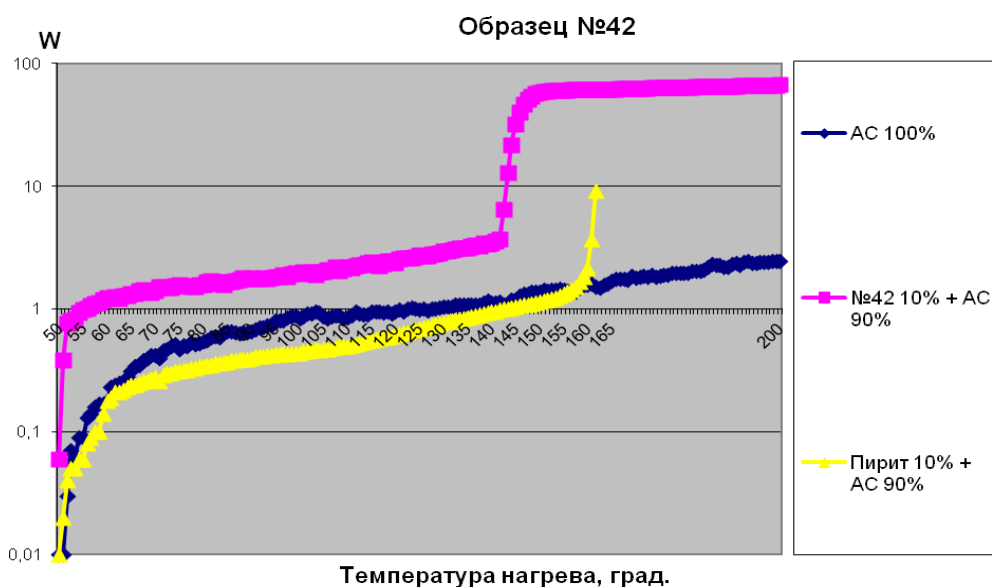


Рисунок А.142 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: АС – 100%; смесь 10% образца №42 с 90% АС; смесь 10% пирита с 90% АС

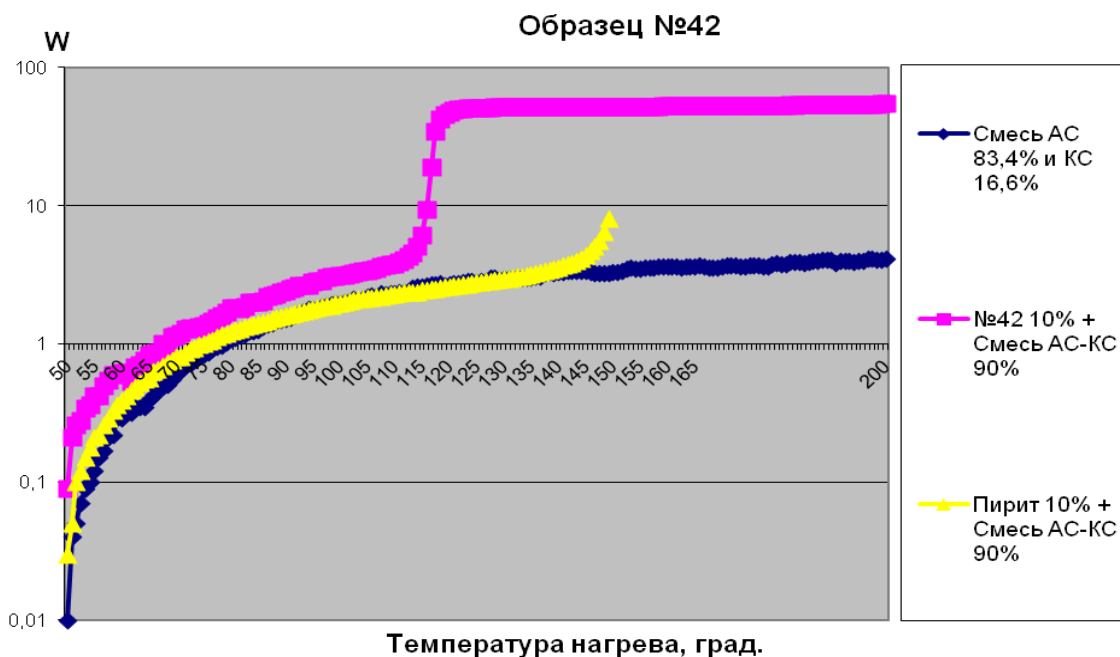


Рисунок А.143 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 10 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с КС; смесь 10% образца №42 с 90% смеси АС с КС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с КС

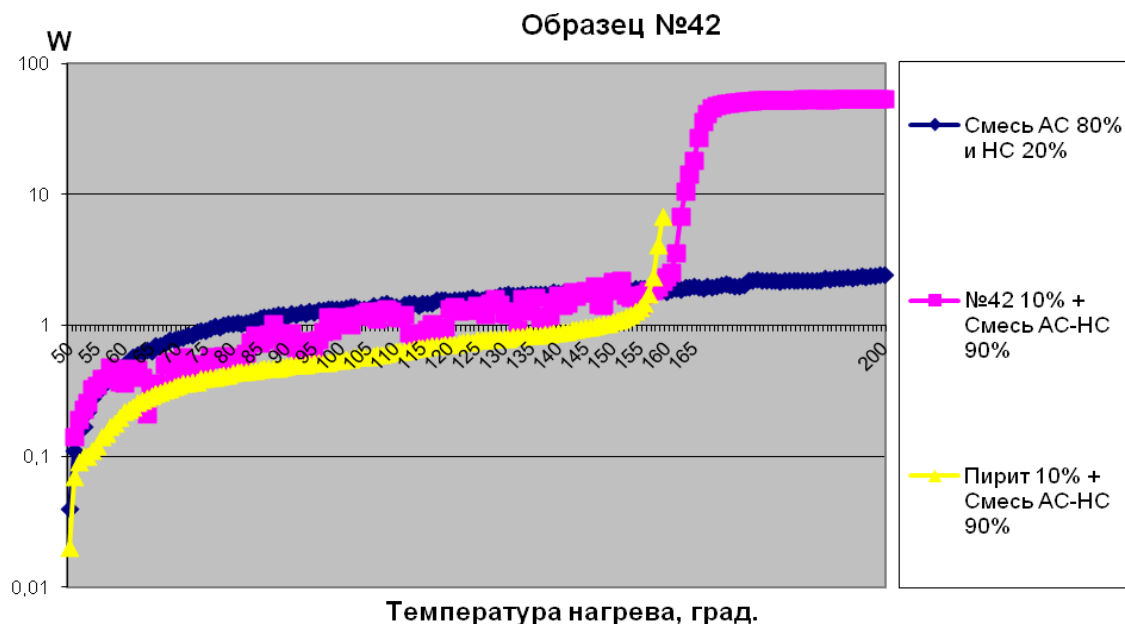


Рисунок А.144 – Потеря массы исследуемого образца (W , % – в логарифмических координатах) при скорости его нагрева 11 градусов Цельсия в минуту. Исследуемые образцы: Смесь АС с НС; смесь 10% образца №42 с 90% смеси АС с НС; смесь 10% пирита с 90% смеси АС с НС

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б Копии документов о внедрении в производство
результатов и рекомендаций диссертационной работы**

№ 04-13/2035 от 05.08.2025г.
На ОТ

В диссертационный совет 24.2.491.02
283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58
Донецкий национальный технический
университет



Публичное акционерное общество
«Уральский асбестовый
горно-обогатительный комбинат»
(ПАО «Ураласбест»)
ОГРН 1026600626777
Россия, 624261
Свердловская область
г. Асбест, ул. Уральская, д. 66
Телефон: +7 (34365) 41-009
E-mail: office@uralasbest.ru
Сайт: www.uralasbest.ru

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты и рекомендации диссертационной работы Маслова Ильи Юрьевича на тему «Физико-технологические и технологические основы эффективного и безопасного применения эмульсионных взрывчатых веществ при добыче сульфидных руд и выполнении щадящего взрывания» (по специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины (технические науки)- на соискание ученой степени доктора технических наук) обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы на карьере ПАО «Ураласбест» при зарядании нисходящих обводненных скважин низкоплотными ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Важной проблемой для ПАО «Ураласбест» является снижение выхода мелких фракций при ведении взрывных работ. Для выполнения этого необходимо снижать бризантное действие заряда. Одним из перспективных направлений в достижении данного требования является применение низкоплотных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ),



Сертификат РОСС RU.ФК11.К00896
ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ Р ИСО 14001-2016

сенсibilизированных гранулами пенополистирола. Однако сдерживающим фактором применения данных ЭВВ является отсутствие эффективной технологии зарядки такого ЭВВ в обводненные скважины и удержание такого ЭВВ в скважинах от всплытия.

В диссертационной работе Маслова Ильи Юрьевича разработаны технологии зарядания низкоплотного ЭВВ в обводненные скважины с использованием рукавов-оболочек и специальных методов удержания заряда (методы «прилипания» и клиновой системы якорения рукавов-оболочек зарядов). Данные технологии прошли успешную проверку в производственных условиях и рекомендованы к применению, что подтверждает практическую полезность и актуальность рекомендаций диссертационной работы Маслова И.Ю.

Технический директор

Салахиев Р.Г.





ООО «УралВзрывТехнологии»

ОГРН 1067746409312 ИНН 7743588995 КПП 771401001

Головной: 125284 г. Москва, ул. Шоссе Хорошёвское, дом 32А, этаж 4, пом. XV, ком. 7,8

офис: тел.: +7 (495) 723 75 93 / e-mail: info@u-b-t.ru

Филиал: 624334, РФ, Свердловская обл., г. Красноуральск, ул. Кирова, д. 2

Красноуральск: тел.: 8 (34343) 2 05 15 / e-mail: fk@u-b-t.ru

Филиал: 462633, Оренбургская обл., г. Гай, ул. Промышленная, д. 1, а/я 65

Гай: тел.: 8 (35362) 3 06 84 / e-mail: fg@u-b-t.ru

**Донецкий национальный технический
университет
Российская Федерация, 283001, Донецкая
Народная Республика,
г. Донецк, ул. Артёма, 58
В диссертационный совет 24.2.491.02**

Исх. №_0710-03_ от «_07_»_октября_ 2025 г.

Справка о внедрении

Подтверждаем: результаты и рекомендации, изложенные в диссертационной работе Маслова Ильи Юрьевича на тему «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) - на соискание ученой степени доктора технических наук) - актуальны, представляют практический интерес и используются ООО «УралВзрывТехнологии» при ведении взрывных работ на рудниках предприятий-партнеров:

- при обосновании вида и концентраций ингибиторов, вводимых в эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), применяемые для отбойки сульфидсодержащих горных пород, с целью предотвращения экзотермического взаимодействия ЭВВ с сульфидными минералами;

- при зарядании ЭВВ восстающих скважин при подземной добыче на рудниках;

- при зарядании нисходящих обводненных скважин низкоплотными ЭВВ, сенсibilизированных гранулами пенополистирола.

Ряд рудников предприятий-партнеров ООО «УралВзрывТехнологии» разрабатывают руды цветных металлов, представленных сульфидсодержащими горными породами (Гайский ГОК, Учалинский ГОК). Ведение взрывных работ на данных рудниках осложнено опасностью возникновения экзотермического взаимодействия аммиачно-селитренных ВВ с сульфидсодержащими породами, которое в ряде случаев приводило к тяжелым авариям. С целью предотвращения данного опасного взаимодействия, в ВВ вводятся ингибиторы – вещества, замедляющие или



ООО «УралВзрывТехнологии»
ОГРН 1067746409312 ИНН 7743588995 КПП 771401001

Головной: 125284 г. Москва, ул. Шоссе Хорошевское, дом 32А, этаж 4, пом. XV, ком. 7,8
офис: тел.: +7 (495) 723 75 93 / e-mail: info@u-b-t.ru
Филиал: 624334, РФ, Свердловская обл., г. Красноуральск, ул. Кирова, д. 2
Красноуральска: тел.: 8 (34343) 2 05 15 / e-mail: fb@u-b-t.ru
Филиал: 462633, Оренбургская обл., г. Гай, ул. Промышленная, д. 1, а/я 65
Гай: тел.: 8 (35362) 3 06 84 / e-mail: fg@u-b-t.ru

блокирующие развитие негативных химических процессов. Однако при введении в ВВ ингибиторов снижаются их взрывчатые способности. Особенно это проявляется при использовании ЭВВ.

Для обеспечения безопасности при наименьшей потере взрывчатых характеристик, расчет концентрации ингибиторов, вводимых в ЭВВ, осуществлялся по методике, предложенной в докторской диссертации Маслова Ильи Юрьевича. Опасных проявлений при использовании данных ЭВВ не отмечено.

Одновременно, при зарядании восстающих скважин ЭВВ с целью предотвращения потерь ВВ из-за его растекания по трещинам, пересеченным скважиной, а также для недопущения потенциально опасного контакта ЭВВ с сульфидными рудами, использовались кососимметрические рукава-оболочки из полиамидных тканей.

Конструкция рукавов-оболочек, применяемой при зарядании восстающих скважин ЭВВ, предложена в докторской диссертации Маслова Ильи Юрьевича. Технология зарядания восстающих скважин ЭВВ с использованием кососимметрических рукавов-оболочек показала работоспособность.

Важной проблемой для рудников предприятий-партнеров ООО «УралВзрывТехнологии» является снижение выхода мелких фракций при ведении взрывных работ. Для выполнения этого необходимо регулировать бризантное действие заряда в зависимости от крепости взрываеваемых горных пород. Одним из перспективных направлений в достижении данного результата является применение низкоплотных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), в частности - сенсibilизированных гранулами пенополистирола. Сдерживающим фактором применения вышеуказанных ЭВВ являлось отсутствие эффективной технологии зарядания низкоплотных ЭВВ в обводненные скважины (нисходящие, восходящие).

В диссертационной работе Маслова Ильи Юрьевича представлены результаты разработанной им технологии зарядания низкоплотного ЭВВ в обводненные скважины с использованием рукавов-оболочек специальной конструкции, реализующих методы удержания заряда (методы «прилипания», якорения оболочек зарядов ЭВВ в заряжаемых нисходящих и восходящих скважинах). Данные технологии опробованы, прошли успешную проверку в производственных условиях и рекомендованы к практическому применению в производственных условиях.

Таким образом, практическая полезность и актуальность рекомендаций диссертационной работы Маслова И.Ю. подтверждается успешным внедрением:

- рекомендаций по обоснованию вида и концентраций ингибиторов, вводимых в эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), применяемые для отбойки



ООО «УралВзрывТехнологии»

ОГРН 1067746409312 ИНН 7743588995 КПП 771401001

Головной: 125284 г. Москва, ул. Шоссе Хорошёвское, дом 32А, этаж 4, пом. XV, ком. 7,8
офис: тел.: +7 (495) 723 75 93 / e-mail: info@u-b-t.ru
Филиал: 624334, РФ, Свердловская обл., г. Красноуральск, ул. Кирова, д. 2
Красноуральск: тел.: 8 (34343) 2 05 15 / e-mail: fk@u-b-t.ru
Филиал: 462633, Оренбургская обл., г. Гай, ул. Промышленная, д. 1, а/я 65
Гай: тел.: 8 (35362) 3 06 84 / e-mail: fg@u-b-t.ru

сульфидсодержащих горных пород, с целью предотвращения экзотермического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами;

- технологии заряжания ЭВВ с использованием кососимметричных рукавов-оболочек при зарядании восстающих скважин на подземных горных работах;

- технологии заряжания низкоплотного ЭВВ в обводненные скважины с использованием рукавов-оболочек и специальных методов удержания заряда.

Генеральный директор

ООО «УралВзрывТехнологии»

к.т.н. Оверченко Михаил Николаевич

