РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

На правах рукописи

ГОРИНОВ Сергей Александрович

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДАХ

25.00.20 — «Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

> Научный консультант: академик РАН, д.ф.-м.н., профессор АДУШКИН Виталий Васильевич

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Екатеринбург 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ
ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИИ
ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ
1.1 Эмульсионные взрывчатые вещества. Научно-технические основы создания,
свойства, достоинства, перспективы применения и нерешенные проблемы14
1.2. Анализ современных моделей детонации ЭВВ
1.3. Анализ научно-технических основ выбора промежуточных детонаторов для
инициирования ЭВВ
1.4. Постановка проблемы исследования
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ
ЭВВ49
2.1. Схема детонационного процесса
2.2. Физико-математические основы детонации ЭВВ, сенсибилизированных
газовыми порами. Стационарный режим
2.3. Определение характеристической плотности ЭВВ
2.4. Особенности структуры эмульсии
2.5. Алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ, сенсибилизированных
газовыми порами
Выводы по главе 2
ГЛАВА З. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ95
3.1. Теоретический анализ неустойчивости детонации ЭВВ, сенсибилизированных
газовыми порами
3.2. Экспериментальное подтверждение ячеистой структуры детонационного
фронта в ЭВВ
3.3. Условие возникновения нейтральной устойчивости детонационной волны в
ЭВВ110
3.4. Анализ экспериментальных данных о неустойчивости детонации ЭВВ,
сенсибилизированных газовыми порами

Выводы по главе 3
ГЛАВА 4. ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЭВВ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ
ДЕТОНАТОРАМИ
4.1. Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва
промежуточного детонатора (ПД)
4.2. Инициирование ЭВВ при взрыве удлиненного (линейного) ПД143
4.3.Инициирование ЭВВ системой сближенных сосредоточенных ПД147
4.4. Анализ экспериментальных данных по инициированию ЭВВ различными
ПД
Выводы по главе 4
ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ В
ТЕХНОЛОГИЯХ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ178
5.1. Оценка возможности прохождения детонации по всей длине скважинного
заряда ЭВВ179
5.2. Выбор и промышленное испытание ПД для инициирования скважинного
заряда ЭВВ
5.3. Обоснование параметров эмульсионного УПД
5.4. Влияние рецептурного состава и структуры инициируемых ЭВВ на
параметры эмульсионных ПД199
Выводы по главе 5
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Результаты синхронного термического анализа аммиачной
селитры
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Расчет коэффициентов теплопроводности и теплоемкости
матричной эмульсии
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Зависимость вязкости эмульсии от размера частиц дисперсной
фазы252
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Справки о внедрении в производство результатов и
рекомендаций диссертационной работы259

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть того, что потребляет цивилизация, представляет собой природные или техногенные минераль1но-сырьевые ресурсы, которые перерабатываются в предметы потребления.

В структуре промышленной добычи этих ресурсов значимое место занимают взрывные технологии, среди которых очень широкое распространение получили технологии, связанные с производством промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) на местах использования.

С последней трети прошлого века в странах с достаточно развитой горнодобывающей промышленностью нашли применение эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), отвечающие по своим взрывчато-техническим и эксплуатационным характеристикам требованиям к ПВВ.

Принципиальной физико-химической и рецептурно-технологической особенностью ЭВВ являются особенности его микроструктуры, состоящие в том, что неводоустойчивый окислитель в виде высококонцентрированного раствора переводится в дисперсную фазу эмульсии, а вторую фазу — дисперсионную среду — образует жидкое (иногда расплавленное) гидрофобное горючее.

Такое уникальное агрегатное состояние ЭВВ позволяет разрешить проблему – получение водоустойчивых, способных к длительному хранению, безопасных в обращении (низкая чувствительность к механическим и тепловым воздействиям) рецептур ПВВ, которые обладают достаточно высокой чувствительностью к детонационному импульсу. Разработаны составы ЭВВ, которые могут детонировать в зарядах малого диаметра от штатного капсюлядетонатора [127, 224].

Конкурентными преимуществами ЭВВ перед многочисленными ПВВ других классов (по мнению специалистов взрывного дела [95, 127, 128, 138, 212, 214, 224, 261, 279, 293, 296, 297]) являются их высокие потребительские характеристики, удовлетворяющие самым взыскательным требованиям, что обеспечивает

устойчивый спрос на ЭВВ на рынке современных ПВВ для горнодобывающей промышленности.

В качестве таких преимуществ отметим:

возможность регулирования взрывчато-технических характеристик ЭВВ в широком интервале;

рекордная водоустойчивость ЭВВ, обеспечивающая их сохранность при нахождении в воде (включая проточные воды и воды на больших глубинах);

высокий уровень промышленной безопасности при ведении взрывных работ с применением ЭВВ, связанный с низкой чувствительностью зарядов ЭВВ к удару, трению, наколу, прострелу, нагреванию, открытому огню и т.п., но с избирательной чувствительностью к инициированию от штатного капсюлядетонатора или промежуточного детонатора (ПД);

отсутствие дилатансии, экссудации, пыления и др. при переработке составов и выполнении зарядных работ;

неспособность к накоплению электростатического заряда;

полная механизация процесса заряжания скважин при взрывных работах;

создание сбалансированных по кислороду составов, обеспечивающих низкую токсичность газообразных продуктов детонации при взрыве зарядов ЭВВ;

доступная сырьевая база, позволяющая получать недорогие, но высокоэффективные BB;

возможность применения на открытых и подземных работах, в скважинных, шпуровых и накладных зарядах, при контурном взрывании, сварке и резке металлов, специальных взрывных работах.

Однако анализ имеющегося обширного научного материала [4, 45, 58, 62, 65, 74, 92, 95, 107, 127, 128, 138, 161, 162, 165, 191, 192, 194, 209, 210, 213, 224, 237, 243, 259, 275, 276, 280, 291, 293, 296] показывает, что, несмотря на высокие параметры современных ЭВВ и их востребованность на рынке ПВВ, при применении ЭВВ возникают трудности, связанные, прежде всего, с недостаточно разработанными:

физико-математическими моделями детонации ЭВВ, полностью учитывающими их рецептурно-технологические характеристики: плотность эмульсии, плотность и химический состав ЭВВ, размеры сенсибилизирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии, а также характеристики инициирующего воздействия;

объяснениями причин возникновения срыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации зарядов ЭВВ в вертикальных (наклонных) скважинных зарядах;

обоснованиями параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах, учитывающих рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ;

обоснованиями технологии взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которой происходит детонационное разложение ЭВВ по всей длине заряда.

Принимая во внимание неоспоримое значение решения проблемы всестороннего комплексного обеспечения работ по увеличению добычи полезных ископаемых на объектах горнорудного комплекса страны за счет расширенного крупносерийного производства ЭВВ и их максимального использования при ведении взрывных работ и акцентируя внимание на недостаточном до настоящего времени научно-техническом, технологическом и методологическом обеспечении получения и применения таких ВВ с комплексом заданных параметров их устойчивой детонации в условиях скважинного применения, в России и за рубежом проводится большое количество научно-исследовательских и опытноконструкторских работ, направленных на их решение. Наибольших успехов в создании и использовании ЭВВ добились в Австралии, Швеции, США, Канаде, Испании, Великобритании, Финляндии, Польше, Японии и Китае. В России огромную работу в обосновании выбора рецептур и сырья для производства ЭВВ, разработке технологий производства и применения ЭВВ выполнили сотрудники Государственного научно-исследовательского института «Кристалл», Института проблем комплексного освоения недр РАН, ООО «Восточный научноисследовательский горнорудный институт», Института горного дела Уральского

отделения РАН, Московского государственного горного университета, Горного института Кольского научного центра PAH. Санкт-Петербургского государственного горного университета, научно-производственных предприятий ЗАО «Нитро Сибирь», АО «Азот-Взрыв», ООО «Нитро-Технологии Саяны», НАО «НИПИГОРМАШ» и др. Однако, несмотря на очевидную рассматриваемой проблемы и наличие большого объема теоретических и экспериментальных исследований, до сих пор не разработаны технические и научно-методические основы создания ЭВВ, позволяющие целенаправленно формировать параметры их безотказной работы в процессе ведения взрывных работ на горнодобывающих предприятиях. В этой связи цель диссертационной работы состояла в разработке научно обоснованных положений способов построения взрывобезопасной, экологически практических экономически целесообразной системы технологий обеспечения устойчивой детонации скважинных зарядов ЭВВ, основанной на использовании комплекса современных способов регулирования рецептуры, плотности и структуры ЭВВ и их инициирования в условиях скважинной отбойки горных пород.

Объект исследования — система «эмульсионное взрывчатое вещество - промежуточный детонатор».

Идея работы состоит в том, что устойчивая детонация скважинных зарядов ЭВВ обеспечивается управлением рецептурно-технологическими, энергетическими и микроструктурными характеристиками ЭВВ и параметрами системы «ЭВВ - промежуточный детонатор».

Задачи исследования:

разработка физико-математической модели детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, учитывающей не только рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсибилизирующих пор, но и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметры инициирующего воздействия;

определение закономерностей распространения детонации в скважинных зарядах ЭВВ;

определение условий возникновение срыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации в скважинных зарядах ЭВВ;

экспериментально-теоретическое обоснование параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах ЭВВ, учитывающее рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ;

разработка и обоснование технологий формирования и взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которых детонационная волна проходит по всей длине заряда.

Научная новизна работы

Разработана физико-математическая модель детонации ЭВВ и методика расчета детонационных параметров ЭВВ, впервые учитывающие не только рецептурный ЭВВ, состав, плотность эмульсии, плотность радиус сенсибилизирующих пор, но и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметры инициирующего воздействия, что позволяет осуществлять аналитическую оценку устойчивости распространения детонации в скважинном заряде ЭВВ;

Впервые установлено, что:

детонация в ЭВВ возможна в режиме однородного стационарного фронта детонационной волны или в режиме устойчивого возмущения поверхности фронта детонационной волны, при этом в случае устойчивого возмущения поверхности фронта детонационной волны происходит образование ячеистой структуры детонационного фронта;

потеря устойчивости детонации в скважинном заряде ЭВВ обусловлена процессами, связанными с переходом детонации из режима ячеистой детонации на режим стационарного однородного фронта;

Определено аналитическое выражение, описывающее условия смены режимов распространения детонационной волны в скважинном заряде ЭВВ, что позволяет разрабатывать технологические способы обеспечения прохождения детонации по всей длине заряда;

Впервые получены расчетные зависимости для определения параметров промежуточных детонаторов (ПД) для инициирования ЭВВ, в которых учитываются детонационные и геометрические характеристики ПД и рецептурномикроструктурные параметры ЭВВ;

Предложены технологические способы обеспечения детонации по всей длине скважинного заряда, основанные на создании условий для прохождения детонации по заряду без смены режимов распространения детонационной волны: выбор параметров ПД и места их установки, установка дополнительных ПД /многоточечное инициирование/, изменение начальной плотности, микроструктуры и рецептуры ЭВВ.

Достоверность положений, научных результатов И выводов обеспечивается использованием современных математических моделей и теорий расчета параметров детонационных волн во взрывчатых материалах, согласованных с конструкцией изделий на их основе и условиями их работы при производстве взрывных работ В горнодобывающей промышленности, подтверждается многочисленными экспериментальными данными, полученными автором с помощью стандартных и специальных методов исследования, использованием методов математической статистики обработки результатов испытаний, применением специализированного инструментария и оборудования, достаточным совпадением расчетных и теоретических данных.

На защиту выносятся следующие научные положения:

при аналитической оценке устойчивости распространения детонации в скважинном заряде ЭВВ расчет детонационных параметров ЭВВ необходимо осуществлять, учитывая, как рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсибилизирующих пор, так и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметры инициирующего воздействия;

детонация ЭВВ происходит в режиме однородного стационарного фронта детонационной волны или в режиме устойчивого возмущения поверхности фронта детонационной волны, при этом в случае устойчивого возмущения

поверхности фронта детонационной волны происходит образование ячеистой структуры детонационного фронта;

условием обрыва детонации ЭВВ или ее перехода на низкоскоростные режимы в скважинном заряде ЭВВ служит условие разрушения ячеистой структуры детонационного фронта;

при выборе параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах ЭВВ необходимо учитывать детонационные и геометрические параметры ПД, сжимаемость разрушаемых пород, а также рецептурные и микроструктурные характеристики ЭВВ;

при проектировании и выполнении взрывных работ с применением ЭВВ для обеспечения прохождения детонационной волны по всей длине заряда необходимо учитывать структуру ЭВВ и рассчитывать плотность зарядов таким образом, чтобы в координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ) линия зависимости плотности ЭВВ от радиуса газовых пор для скважинных зарядов не пересекала границу, разделяющую режимы детонации.

Личное участие автора являлось основополагающим на всех стадиях проведения исследований и состояло в определении целей и задач, организации исследований, разработке алгоритмов и схем проведения полигонных и промышленных испытаний ЭВВ. Им разработана физико-математическая

модель детонации ЭВВ и методика расчета их детонационных параметров, учитывающая основные рецептурно-технологические параметры ЭВВ характеристики инициирующего ударно-волнового воздействия, определены условия устойчивого распространения детонации по скважинному заряду ЭВВ, теоретически предсказано и экспериментально доказано существование ячеистой структуры фронта детонационной волны в ЭВВ, разработана методика расчета параметров ПД для инициирования ЭВВ. При непосредственном личном участии анализ обработка полученных автора осуществлен И экспериментальных обоснование результатов, формулировка И выводов, рекомендаций предложений по реализации результатов научных исследований в организациях горнодобывающей промышленности страны.

Практическая значимость результатов работы

Предложены методы расчета плотности, рецептуры, микроструктуры, а также параметров и месторасположения ПД, обеспечивающие прохождение детонации по всей колонке скважинного заряда ЭВВ;

Разработаны рекомендации по применению удлиненных эмульсионных ПД, в которых учитываются рецептурные, микроструктурные характеристики инициируемых ЭВВ, диаметр взрывных скважин и крепость разрушаемых горных пород;

Обосновано и реализовано применение при подземных горных работах ЭВВ с окислительной фазой на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитр, как имеющих меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ с окислительной фазой на основе раствора только аммиачной селитры, что позволяет добиваться большей надежности детонации ЭВВ в скважинах малого диаметра и осуществлять инициирование этих скважинных зарядов ПД меньшей массы.

Реализация результатов работы.

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

в интересах совершенствования технологии и снижения издержек производства при ведении взрывных работ на карьере OAO «Ураласбест»;

при обосновании для НАО «НИПИГОРМАШ» параметров согласованной системы «ЭВВ – эмульсионный ПД», адаптированной для условий применения;

при изготовлении ЭВВ на предприятии по производству ЭВВ (рудник «Удачный» им. Ф.Б. Андреева АК «АЛРОСА» (ПАО)).

Апробация результатов работы. Результаты исследований докладывались на VIII Межгосударственном научном семинаре «Высокоэнергетическая обработка материалов» (28-31 октября 2009 г., г. Днепропетровск, Украина), на Всероссийских научных конференциях «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле» в рамках III (14-16 октября 2009 г.) и IV (12-14 октября 2011 г.) Уральских горнопромышленных форумов (г. Екатеринбург), на

Международных симпозиумах «Неделя горняка - 2009» и «Неделя горняка - 2010» (г. Москва), на VIII (10-16 июня 2012 г., г. Будва, Черногория) и X (4-8 июля 2016 г., г. Санкт-Петербург) Международных коллоквиумах по пульсирующей и непрерывной детонации (ICPCD), на IX Международной конференции по горению и взрыву (COMBEX-2013) (4-8 марта 2013 г., г. Рамзау, Австрия), на XI (3-8 сентября 2012 г., п. Курортное, АР Крым, Украина) и XIII (23-27 июня 2014 г., г. Бургас, Болгария) Международных научно-технических конференциях «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», на XV (6-12 сентября 2015 г., г. Ялта) и XVI (9-16 сентября 2017 г., г. Геленджик) Международных научнопрактических конференциях по взрывному делу, на XI Международном симпозиуме по взрывному разрушению горных пород (FRAGBLAST-11) (24-26 августа 2015 г., г. Сидней, Австралия), на VI Межотраслевой научно-технической конференции «Промышленные (ΠBB): взрывчатые вещества состояние, перспективы разработки и применения» (17-19 мая 2016 г., г. Дзержинск Нижегородской обл.), на технических совещаниях по повышению конкурентной способности продукции ЗАО «НИПИГОРМАШ», повышению эффективности взрывных работ на карьере ОАО «Ураласбест» и других горнодобывающих предприятиях.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации изложены в 28 печатных работах, в том числе в 16 статьях, опубликованных изданиями, включенными в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 263 страницах компьютерного текста, включает 58 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 299 наименований и четыре приложения.

Автор выражает искреннюю благодарность за ценные советы и научнометодическую помощь в процессе работы над диссертацией научному

консультанту д.ф-м.н., проф., академику РАН Адушкину В.В., а также д.т.н. Андрееву В.В., д.ф-м.н., проф. Фролову С.М., д.т.н., проф. Кутузову Б.Н. и д.х.н., проф. Жуковскому В.М. за полезные обсуждения результатов исследований. Глубокая признательность специалистам ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша» к.т.н. Маслову И.Ю. и инж. Брагину П.А., оказавшим помощь при проведении промышленных экспериментов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

1.1. Эмульсионные взрывчатые вещества. Научно-технические основы создания, свойства, достоинства, перспективы применения и нерешенные проблемы.

При промышленной добыче твердых полезных ископаемых, играющих исключительно большое значение в обеспечении жизнедеятельности населения планеты, значимое место занимают взрывные технологии, которым нет альтернативы на ближайшую перспективу. Основой любой взрывной технологии является применяемое взрывчатое вещество (ВВ).

С последней трети прошлого века в странах с достаточно развитой горнодобывающей промышленностью нашли применение эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), отвечающие по своим взрывчато-техническим и эксплуатационным характеристикам комплексу требований к ПВВ. При этом значительная часть данных ПВВ производится на местах их использования.

Согласно современным воззрениям ЭВВ представляют собой сенсибилизированную высококонцентрированную обратную эмульсию (эмульсия типа «вода в масле»), где окислительная фаза является дисперсной фазой, а топливная фаза – дисперсионной средой [95, 127, 196, 224, 261, 264, 265, 274, 279, 282-288, 293, 296,297]. Размер частиц дисперсной фазы (окислителя) составляет несколько микрон, а толщина пленки топливной фазы – доли микрона [95, 127, 224, 293, 296]. Водоустойчивость обратной эмульсии обусловлена ее структурой.

В основе создания эмульсии типа «вода в масле» лежат фундаментальные исследования по вопросам формирования и стабилизации различных структур при смешении взаимно нерастворимых жидкостей [1, 119, 127, 224] и разработки в области технических средств для производства эмульсий [39, 127, 195, 224].

Основными компонентами ЭВВ являются [95, 127, 224, 261, 264, 265, 274, 279, 286, 287, 293, 296, 297]:

окислительная фаза, представленная высококонцентрированным раствором аммиачной селитры (смеси аммиачной и натриевой, аммиачной и кальциевой селитр);

топливная фаза, представленная жидким углеводородным горючим с растворенным в нем поверхностно-активным веществом (ПАВ);

сенсибилизатор;

различные специальные добавки.

Массовая доля топливной фазы в составе эмульсии близка к нулевому кислородному балансу смеси и в зависимости от химического состава окислительной фазы составляет 6-9 % [39, 95, 127, 224].

Высококонцентрированные эмульсии характеризуются значительной поверхностной энергией раздела фаз, поэтому могут быть получены и сохранены только с применением ПАВ (эмульгатора), уменьшающим величину межфазного поверхностного натяжения [1, 39, 95, 119, 127, 128, 138, 196, 224].

При этом эмульгатор увеличивает стабильность эмульсии или посредством создания мономолекулярного слоя из молекул эмульгатора, который препятствует коалесценции (слиянию) смежных частиц дисперсной среды, или посредством повышения вязкости дисперсионной среды [39, 127, 224]. Показано, что обратная эмульсия легко образуется и имеет хорошую устойчивость, если используется эмульгатор с величиной гидрофильно-липофильного баланса (баланс между группами атомов в молекуле эмульгатора, обладающими химическим сродством к воде, и группами атомов, обладающими химическим сродством к маслу) в диапазоне 3-6 [39, 119, 127, 224].

В настоящее время разработаны различные эмульгаторы, позволяющие получать устойчивые микродисперсные системы типа «вода в масле» из высококонцентрированного водного раствора аммиачной селитры (смесей селитр) и жидкого углеводородного горючего [127, 224]. Установлено, что, используя в качестве эмульгатора не индивидуальное ПАВ, а композицию из индивидуальных ПАВ с различными свойствами, вследствие синергетического эффекта удается получить более эффективный эмульгатор [39, 127, 224].

Для ЭВВ характерно однородное распределение компонентов по объему вещества и значительная площадь контакта окислителя с горючим, которая в тысячи раз больше аналогичной величины в смесях «аммиачная селитра - дизельное топливо» (АС-ДТ) [127]. Это обуславливает более высокие детонационные параметры ЭВВ по сравнению со смесями АС-ДТ [127, 224].

Эмульсию получают путем дробления дисперсной среды эмульсии на отдельные частицы посредством создания в смешиваемых средах сдвиговых напряжений. В промышленных условиях это может осуществляться на различных аппаратах эмульгирования – на коллоидной мельнице, на гомогенизаторе или при помощи смесителей лопастного, турбинного и пропеллерного типов [39]. При этом наименее энергозатратным является метод использования смесителей лопастного, турбинного и пропеллерного типов [39], который нашел широкое применение при создании эмульсий для ЭВВ [127, 224]. В этом случае раствор АС (АС и натриевой селитры; АС и кальциевой селитры), нагретый до 60-90°С, диспергируется в жидком углеводородном топливе, содержащем эмульгатор, за счет интенсивного перемешивания.

Размер частиц, на которые дробится дисперсная среда, зависит от аппарата эмульгирования, плотности, вязкости и соотношения объемов дисперсионной и дисперсной фаз, скорости сдвига, продолжительности перемешивания и величины межфазного поверхностного натяжения [39, 127, 224]. При определенной скорости сдвига существует предельный размер частиц, меньше которого дисперсная среда не дробится даже при увеличении продолжительности перемешивания [39]. Чтобы более тонко раздробить частицы дисперсной среды, нужно обеспечить более значительные скорости сдвига, что приводит к увеличению энергетических затрат на эмульгирование. Однако и в этом случае существует предел, определяемый физико-химическими свойствами компонентов топливной фазы (жидким горючим и эмульгатором) и относительным объемом жидкого горючего и (или) относительным объемом эмульгатора в общем объеме эмульсии [39, 119]. Кроме этого, размер дисперсной частицы эмульсии не может быть меньше некоторого критического размера, при котором крупные частицы

эмульсии поглощают образовавшуюся мелкую частицу (явление переконденсации) [127, 224].

Дисперсность эмульсии существенно влияет на стабильность, реологические и электрические свойства эмульсии, а также на чувствительность и детонационные способности ЭВВ, изготовленного на основе этой эмульсии [127, 224]. Согласно экспериментальным данным с уменьшением размера частиц дисперсной фазы:

увеличивается стабильность эмульсии [127, 224, 269, 294, 295];

повышается чувствительность к инициирующему импульсу и скорость детонации ЭВВ [127, 273];

снижается температура кристаллизации эмульсии [127, 294]; возрастает вязкость эмульсии [127, 224].

На стабильность эмульсии также большое влияние оказывает качество окислителя, горючего и эмульгатора [224]. Наличие примесей затрудняет получение эмульсии и делает ее неустойчивой. При этом, чем эффективнее эмульгатор, тем меньше его нужно для получения стабильной эмульсии [127, 169, 224].

Эмульсия приобретает детонационные свойства только в случае ее сенсибилизации [95, 127, 224, 284, 293, 296], что обусловлено невозможностью возбудить в ней детонацию даже под действием чрезвычайно больших ударноволновых нагрузок [5, 202, 205, 275, 276].

В качестве сенсибилизатора эмульсии используются любые введенные в нее включения, способствующие созданию локальных областей сильного разогрева эмульсии («горячих точек»), обуславливающих возникновение детонационных явлений [127, 213, 224].

Это могут быть:

мощные твердые индивидуальные ВВ (ТЭН, тринитротолуол и т.п.) или растворимые в топливной фазе жидкие ВВ (эфиры азотной кислоты, аминонитраты) [39];

газовые микропоры, образованные введением воздушных пузырьков [127, 284, 285] или образованием пор с помощью химических газообразующих веществ [127, 224]. При этом чувствительность ЭВВ можно повысить, добавив в окислительную фазу ЭВВ органические аминонитраты [127, 224] или небольшое количество водорастворимых соединений стронция [286];

микросферы из стекла или синтетического материала [127, 183, 224, 287]; гранулы вспененного полистирола [127, 179];

вспученный порошкообразный перлит или гранулы высокопористых материалов, имеющих преимущественно закрытую пористость [127, 198, 224].

порошок ферросилиция [138, 139, 180];

гранулы пористой аммиачной селитры [127].

Из способов сенсибилизации наибольшее возможных ЭМУЛЬСИИ распространение получили способы, связанные с организацией в эмульсии большей микропор, что объясняется ИЛИ безопасностью, большей экономичностью, или обоими упомянутыми факторами. Экспериментальные [11, 127, 209, 224, 270, 272] и теоретические [74, 165, 192, 237, 259, 280] исследования показывают, что размеры сенсибилизирующих пор влияют на детонационные характеристики ЭВВ. Однако единого взгляда на наиболее эффективный размер пор не существует [127]. С точки зрения [209], оптимальный размер поры составляет около 50 мкм, с позиций работы [224] – эффективность пор возрастает с уменьшением их размера. Надежное управление размерами пор в настоящее время возможно, если поры создаются калиброванными стеклянными или пластиковыми микросферами [127, 209, 224].

Детонационные параметры ЭВВ также зависят от плотности [4, 74, 92, 93, 107, 127, 140, 143, 160, 165, 174, 175, 181, 192, 194, 196, 201, 213, 224, 237, 243, 250, 259, 264, 270, 275, 280, 291, 296]. Управление плотностью ЭВВ осуществляется регулированием величиной вводимого в эмульсию объема сенсибилизирующего агента [127, 224]. При этом относительная плотность ЭВВ (отношение плотности ЭВВ к плотности эмульсии) при определенном диаметре заряда не должна превышать величину, зависящую от критического диаметра

заряда ЭВВ, т.к. в противном случае детонация в ЭВВ не возникает из-за срыва детонации [93]. Например, при диаметре скважинного заряда ЭВВ 200 мм предельная относительная плотность ЭВВ «Сибирит-1200» равна 0,96 [93]. Зависимость скорости детонации ЭВВ от плотности имеет характерную колоколообразную форму: сначала по мере роста плотности скорость детонации растет по линейной зависимости, далее рост скорости детонации снижается, при некоторой плотности ЭВВ скорость детонации достигает наибольшего значения, и при дальнейшем повышении плотности скорость детонации уменьшается. Наконец при достижении плотностью ЭВВ некоторого предельного значения детонация прекращается [74, 127, 165, 191, 192, 224]. При этом при увеличении диаметра заряда ЭВВ величина плотности, при которой скорость детонации достигает наибольшего значения, увеличивается. Также увеличивается и значение этой наибольшей скорости детонации (по сравнению с наибольшей скоростью детонации при меньшем диаметре заряда).

Необходимо отметить, что ЭВВ имеют следующие положительные свойства:

(несенсибилизированная) матричная эмульсия имеет очень низкую чувствительность по отношению к механическим [5, 73, 107, 202, 205, 275] и тепловым [73, 193, 298] воздействиям. Это позволило отнести ее теплоустойчивости, чувствительности к сильному удару и нагреванию в ограниченном объеме к подклассу 5.1 класса 5 ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка» (аналогично классификации ДОПОГ) [66]. Принадлежность матричной эмульсии к подклассу 5.1 класса 5 делает ее пригодной к перевозке в специально оборудованных автомобилях (автоприцепах) по дорогам общего пользования без дорогостоящих специальных мероприятий, выполняемых при перевозке ВВ и ВМ (взрывчатых материалов) [186];

при выполнении зарядных работ отсутствует пыление и электризация ЭВВ [127, 138];

существует возможность создания смесевых и комбинированных взрывчатых составов на основе матричной эмульсии ЭВВ [95, 127, 196, 224];

ЭВВ изготавливаются из нетоксичных и невзрывоопасных материалов [17, 95, 127, 128, 138, 157, 187, 188, 196, 211, 212, 214-218, 224, 260, 261, 264, 265, 274, 279, 281, 284, 287, 288, 293, 296, 297];

существует возможность изменения чувствительности и взрывчатых параметров на основе изменения химического состава, плотности и способов сенсибилизации [95, 127, 179, 180, 183, 198, 224, 284-288, 293, 296];

ЭВВ характеризуются низкой газовой вредностью [35, 130, 211, 248];

благодаря специальным добавкам в окислительную фазу или формированию окислительной фазы на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитр, ЭВВ можно применять при разрушении сульфидных пород и руд [3, 106, 122, 127]

ЭВВ изготавливаются из доступного и недорогого сырья по достаточно простой и недорогой технологии, что делает их одним из самых недорогих промышленных ВВ [127, 224];

ЭВВ можно использовать на открытых, подземных горных работах [127, 224], изготавливать из них промежуточные детонаторы [105, 184, 185], применять при сварке взрывом [197, 251, 291] и других специальных работах.

По консистенции ЭВВ, применяемые в горной промышленности, могут быть твердыми, пастообразными и льющимися в зависимости от их химического состава и типа эмульгатора [39, 127, 196, 224].

Консистенция ЭВВ определяет технологические схемы их производства и применения [94, 99, 127, 128, 139, 196, 224].

Твердые и пастообразные ЭВВ используются в патронированном виде, поэтому, наряду с технологическими линиями по производству ЭВВ, применяются также технологические линии по патронировке ЭВВ [39, 128, 224].

Льющиеся ЭВВ (льющиеся - по терминологии [127, 128]; по терминологии [196] – наливные ЭВВ; по терминологии [224] –бестарные ЭВВ) производят как в стационарных пунктах, расположенных вблизи потребителей ЭВВ, так и в малогабаритных мобильных модулях вблизи указанных потребителей или с помощью специальных машин непосредственно на месте применения [39, 94, 99,

127, 196, 224]. Данные ЭВВ имеют текучую консистенцию, не упаковываются и, как правило, используются или сразу, или вскоре после их получения. Динамическая вязкость льющихся ЭВВ меньше, чем ЭВВ, применяемых при производстве патронов [39, 128, 196, 224], и при стандартных измерениях не должна превосходить 100-120 Па*с [127, 179], т.к. в противном случае затруднено поступление перекачиваемой эмульсии в рабочую зону насосов. В дальнейшем будем придерживаться терминологии работы [224] и называть данный вид ЭВВ бестарными.

Приведенные положительные качества ЭВВ послужили основанием их широкого распространения при добыче твердых полезных ископаемых во всем мире. Анализ данных [17, 130, 187, 188, 196, 212, 214-218, 260, 261, 264, 265, 279, 281, 293, 296] показывает, что объем ЭВВ, потребляемых мировой горнодобывающей промышленностью, непрерывно растет. В России в 2015 году потребление ЭВВ составило 825 тыс. тонн, при этом основная масса ЭВВ – 685 тыс. тонн - произведена непосредственно на горных предприятиях [216].

По мнению авторов работ [107, 127, 128, 138, 196, 212, 214-218, 224], в настоящее время ЭВВ и гранэмиты (смеси ЭВВ с ANFO /игданитом/ или ПАС /пористой аммиачной селитрой/) являются наиболее перспективными ВВ для взрывной подготовки горной массы к выемке и транспортированию при горнодобычных работах.

Наиболее распространенными являются бестарные ЭВВ, содержащие в своем составе 15-20% масс. долей воды и сенсибилизированные газовыми порами, получаемыми методом химической газогенерации [39, 127, 128, 196, 224]. Согласно [216] объем производства данного вида ЭВВ достиг в России в 2015 году 685 тыс. т, что составляет 83% от объема всех произведенных ЭВВ и 55 % от всего объема потребляемых ПВВ. Ввиду значительного объема потребления бестарных ЭВВ повышение их эффективности имеет огромное государственное значение для решения проблемы повышения экономичности, интенсивности, безопасности горных работ при добыче твердых полезных ископаемых с одновременным снижением экологического вреда, наносимого окружающей среде [127].

Как упоминалось выше, бестарные ЭВВ используются или сразу, или вскоре после их получения, что снижает требования к их физико-химической устойчивости по сравнению с патронированными ЭВВ [127]. Для создания данных ЭВВ используют эмульгаторы в минимальных количествах, чтобы получать приемлемые для практических целей эмульсии. Это объясняется стремлением снизить затраты на производство ЭВВ ввиду дороговизны эмульгаторов.

Приведенный анализ научно-технических основ создания ЭВВ показал, что, несмотря на высокие эксплуатационно-технические параметры современных ЭВВ, им присущи и существенные недостатки, которые в первую очередь связаны ЭВВ отсутствием физико-технических основ создания заданными детонационными параметрами. Действительно, анализ обширного научного материала показал, что детонационные показатели ЭВВ существенным образом зависят от дисперсности окислительной фазы эмульсии, плотности, химического состава и способа сенсибилизации ЭВВ. Однако в настоящее время отсутствуют физико-математические модели детонации ЭВВ, учитывающие весь спектр их рецептурно-технологических особенностей: плотность, химический состав ЭВВ, размеры сенсибилизирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии. Это приводит к тому, что получение ЭВВ с заранее заданными свойствами возможно только экспериментальным путем, который очень трудоемок, дорог и при этом не всегда ведет к успеху.

Таким образом, для повышения эффективности ЭВВ необходимо проанализировать современные модели его детонации.

1.2. Анализ современных моделей детонации ЭВВ

В п.1.1 отмечено, что ЭВВ представляют собой сенсибилизированную эмульсию. Введение сенсибилизатора делает эмульсию неоднородной. Поэтому в основе современных воззрений на механизм детонации ЭВВ лежат представления о механизме детонации неоднородных ВВ, изложенные в работе [28].

Согласно [28], тепловое поле, возникающее при ударном воздействии на неоднородное ВВ, отличается крайней неравномерностью. Вблизи неоднородностей среды наблюдаются значительные скачки температуры – в среде возникают локальные (точечные) очаги разогрева.

Основные пути возникновения данных очагов согласно [28] следующие:

адиабатическое сжатие мельчайших газовых включений (пор);

нагрев за счет трения (частиц BB о частицы BB; частиц BB с твердыми примесями или поверхностями, находящимися в соприкосновении с BB);

вязкий нагрев BB при вытекании из зазора между поверхностями соударяющихся тел.

Согласно [28] последний из указанных путей возникновения очагов разогрева осуществляется только в исключительных случаях, поэтому большее значение приобретают первые два механизма.

Анализируя экспериментальные данные, авторы работы [28] пришли к выводу, что чувствительность к удару жидких, желеобразных или пластичных взрывчатых веществ связана с наличием в ВВ газовых пор. Газ в этих порах нагревается вследствие их адиабатического сжатия при ударе, что является главным источником воспламенения ВВ.

Однако в работе [252] пришли к выводу, что адиабатический разогрев газа является далеко не основной причиной инициирования жидких ВВ. Авторы [252] утверждают, что, как правило, схлопывание сферической поры асимметрично, что приводит к образованию струй и диспергированию поверхности пузырька. Внутри поры происходит возгорание мельчайших брызг, что является преимущественным механизмом детонации. Дополнительно в [252] отмечают, что теплота вязкого трения может привести к детонации и без пор.

В работе [88] весьма подробно рассмотрены возможные механизмы возбуждения детонации жидких ВВ. Выяснено, что теплоты выделяемой при адиабатическом сжатии вследствие существенно разных термических активностей газа внутри поры и вещества ВВ, недостаточно для инициирования ВВ. Одновременно для маловязких ВВ вязкий разогрев на поверхности поры

также не приводит к возбуждению детонации. Поэтому авторы [88] склоняются к точке зрения авторов работы [252], что возникновение взрыва объясняется воспламенением мельчайших капель в поре. При этом масса капель должна составлять величину порядка массы газа в поре.

В работах [277, 278], на основе опытов, приведенных в [255], причина детонации жидких ВВ объясняется на основе образования и действия гидродинамических горячих точек. В указанных работах предложен следующий механизм возникновения детонации: при распространении ударной волны по ВВ неоднородности, имеющиеся в ВВ (поры – твердые включения), обуславливают возникновение областей, в которых плотность энергии и температура почти вдвое превышают свои начальные значения за фронтом волны. Наблюдается ударный BB. разогрев вещества При ЭТОМ данный разогрев имеет чисто гидродинамическую природу и не зависит от температуры и вида газа в поре.

В работе [257] опубликовали результаты опытов по инициированию кристаллов азида свинца, азида серебра, помещенных в воду, с расположением на их поверхности пор газа (воздуха, аргона, гелия, бутана) диаметром 1 - 50 мкм. Авторы [257], анализируя причину инициирования водосодержащих ВВ, пришли к выводу, что ни гидродинамический поток, ни возгорание капелек ВВ в полости поры, ни нагрев ВВ вследствие вязкого трения сами по себе не могут вызвать детонацию. Взрывной процесс происходит вследствие разогрева ВВ при адиабатическом сжатии газовых включений.

На основании опытов, приведенных в [257], автор работ [36] предложил физико-математическую модель возникновения детонации в водосодержащих аммиачно-селитренных ВВ, имеющих газовые поры. В основу модели автор [36] положил следующие утверждения:

1. Схлопывание газовых пор происходит в гидродинамическом режиме, т.к. радиус газовых пор R_{nop} больше критического радиуса Забабахина R_{zab} :

$$R_{nop} >> R_{zab}$$
, где $R_{zab} = 8.4 \frac{\eta}{\rho_{2}} \sqrt{\frac{\rho_{2}}{P_{f}}}$, (1.1)

где η , $\rho_{_{\beta}}$ – динамическая вязкость и плотность матричной эмульсии, $P_{_{f}}$ – величина фронтального давления в детонационной волне [96];

2. Адиабатическое сжатие газовой поры происходит сферически симметрично.

Основываясь на данных положениях и физико-химических свойствах аммиачной селитры, автор [36] показал, что температура воздуха в порах (начальное давление — 10^5 Па) при сжатии их давлением 10 ГПа может достигать $5091^{\rm o}$ К. Воздух при столь высокой температуре способен разогреть вещество ВВ на поверхности поры до $1694^{\rm o}$ К (несмотря на значительную разницу в термической активности газа, заполняющего пору, и вещества ВВ). Время поддержания высокой температуры в уплотненном поре оказалось сравнимым со временем индукции взрывной реакции в водонаполненном взрывчатом веществе. Следовательно, произойдет инициирование детонационного процесса.

Однако применимость предложенной модели к объяснению инициирования ЭВВ у нас вызывает следующие возражения:

- 1. Экспериментальные исследования процесса схлопывания газовой поры в жидкости под действием ударной волны методом скоростной киносъемки показали, что данный процесс происходит асимметрично [253]. Поток втекающей в пору жидкости заполняет ее примерно до половины объема (заполняется полусфера, обращенная выпуклостью к потоку). Далее оставшаяся часть поры распадается на большое количество мельчайших пор. Таким образом, модель равномерного всестороннего сжатия поры внешним давлением, принятая в работе [36], несостоятельна.
- 2. При расчете температуры воздуха в поре исходят из величины мольной теплоемкости $\frac{7}{2}R$ (R универсальная газовая постоянная, Дж/моль*град). Однако при температурах 5000°К происходит диссоциация молекул азота и кислорода [19]. Согласно исследованиям Буркхарда [19], при T=5000 °К воздух состоит из смеси N_2 , O_2 , NO, N, O, теплоемкость которой почти в 1,5 раза выше,

чем принятое при расчетах значение $\frac{7}{2}$ R . Данное обстоятельство приводит к тому, что фактическая температура воздуха внутри поры не превысит 3500° K. Однако возгорания вещества при этой температуре по данным той же работы [36] не происходит ввиду кратковременности ее поддержания. Необходимо отметить, что температура взрыва эмульсии согласно экспериментальным данным работы [202], имеет значение около $3000-3200^{\circ}$ K.

В работе [237] для объяснения образования горячих точек при ударном сжатии ЭВВ, сенсибилизированном стеклянными микросферами, решили воспользоваться результатами работ по возбуждению детонации в пористых прессованных и литых индивидуальных ВВ [14, 238].

В основу модели были положены следующие представления:

Стеклянная оболочка микросферы под действием высокого внешнего давления деформируется вязкопластическим образом, и стекло в вязком режиме втекает в пору, разогреваясь при этом;

Матричная эмульсия, окружающая стеклянную микросферу, поджигается разогретым вследствие вязкопластического деформирования стеклом оболочки.

Основанием вязкого режима втекания материала оболочки в пору с точки зрения указанных авторов служит то обстоятельство, что ввиду значительной вязкости стекла радиус микросфер будет меньше величины $4\frac{\mu_{cm}}{\rho_{cm}}\sqrt{\frac{\rho_{cm}}{P_f}}$, где μ_{cm} , ρ_{cm} — динамическая вязкость и плотность стекла, P_f - давление во фронте детонационной волны [237]. Последняя величина пропорциональна критическому радиусу Забабахина, разделяющего режимы вязкого затекания материала в пору и рэлеевский режим схлопывания поры [96].

Однако данные рассуждения справедливы, если разрушение стеклянной оболочки действительно будет происходить в вязкопластическом режиме. Согласно [242], вязкопластический механизм разрушения будет наблюдаться в случае, если $t_{fr} << T_{rel}$, где t_{fr} — время действия разрушающей нагрузки; T_{rel} — характерное время релаксации напряжений в разрушаемом материале.

В рассматриваемом случае $T_{rel} \sim \frac{\mu_{cm}}{E_{cm}}$ [242]; $t_{fr} \sim \frac{2h_{cm}}{C_{cm}}$ (h_{cm} - толщина стеклянной оболочки; E_{cm} , C_{cm} — модуль упругости стекла и скорость продольных волн в стекле). Принимая $\mu_{cm} = 1,26 \cdot 10^4$ Па*с и $h_{cm} \cong 1,5 \cdot 10^{-6}$ м [237], определяем ($E_{cm} \cong 6,5 \cdot 10^{10}$ Па, $C_{cm} = 5500$ м/с):

$$T_{rel} \sim 2 \cdot 10^{-7} \,\mathrm{c}, \ t_{fr} \sim 5 \cdot 10^{-10} \,\mathrm{c}.$$

Выполняется обратное условие, а именно - $t_{fr} \ll T_{rel}$.

Следовательно, в рассматриваемом случае разрушение стеклянной оболочки осуществляется не вязкопластическим, а хрупким образом. При хрупком разрушении стеклянная оболочка разбивается в отраженной волне напряжений на мельчайшие осколки, которые отбирают тепло у разогревшейся при ударе эмульсии, а не поджигают ее. Это делает неприемлемой предложенную в [237] модель описания возбуждения детонации при ударно-волновом сжатии ЭВВ, содержащем стеклянные микросферы.

Дополнительно необходимо отметить, что экспериментально определенное время формирования «горячей точки» имеет порядок $10^{-8} - 10^{-7}$ с [114], что на один-два порядка меньше, чем время формирования «горячей точки» по механизму [237].

Рассмотрим эмпирико-теоретический подход к описанию детонации эмульсионных ВВ. Для определения верхней границы скорости детонации Дж. Ли и П. Перссон воспользовались уравнением состояния Беккера-Вильсона-Кистяковского (ВWК), а также соотношением между давлением и скоростью детонации в т. Чепмена-Жуге. В результате они рассчитали зависимость идеальной скорости детонации от плотности [275, 276]. Близкую зависимость для идеальной скорости детонации получили и японские исследователи, взяв газовое уравнение состояния Кихара [224]. Аналогичные расчеты по уравнению ВWК для ряда ЭВВ выполнены группой чешских и польских исследователей [140]. При выполнении упомянутых выше расчетов учитывались только начальный химический состав ЭВВ и конечный состав продуктов взрыва.

Структурные особенности ЭВВ, оказывающие существенное влияние на детонационные показатели [127, 209, 224, 270, 271, 273], при данных оценочных расчетах не учитывались.

В работах [74, 165, 192, 259, 280] предложена полуэмпирическая модель детонации ЭВВ. За фронтом проходящей ударной волны происходит разрушение микросфер и формируются «горячие точки» по механизму, изложенному в работе [36]. Инициируется химическая реакция, распространяющаяся радиально от рассматриваемой горячей точки. Скорость химической предполагается постоянной. Сферы выгорания характеризуются предельным Е.И. Забабахина Используя результаты [97] ДЛЯ смесей индивидуальных ВВ и представления, что точка Чепмена-Жуге соответствует моменту выгорания сфер горения (от горячих точек), авторы получили эмпирикотеоретическую зависимость для скорости детонации. Данные представления позволили объяснить снижение скорости детонации при возрастании плотности ВВ выше некоторой характерной для данного состава ВВ плотности. Показано, что скорость детонации зависит от удельной поверхности микросфер. Однако практическое использование аналитических выражений, вытекающих из данной теории, осложнено необходимостью определения экспериментальным путем трех параметров. Последнее весьма трудоемко, дорогостояще, требует наличия полигона, где можно взрывать заряды массой десятки килограммов. Кроме этого, в данной модели не находит отражение влияние дисперсности окислительной фазы на детонационные показатели [127, 224, 273].

Ранее в работе [142] было получено выражение для скорости детонации зарядов индивидуальных жидких ВВ в зависимости от диаметра заряда. При расчете данной скорости также принималась концепция «горячих точек» и радиальное выгорание инициируемого ВВ. Сложности использования формул, предложенных в работе [142], связаны с необходимостью экспериментального определения предельного диаметра заряда и скорости детонации при предельном диаметре, что также трудоемко, дорогостояще, также требует наличия полигона, где можно взрывать заряды массой десятки килограммов.

В работе [191] предложен способ описания процесса детонации ЭВВ, сенсибилизированного микросферами, без стеклянными рассмотрения микроскопического процесса схлопывания пор. Использовался метод исследования формализованных макрокинетических уравнений, в котором текущий состав вещества ЭВВ в зоне реакции характеризовался только координатой реакции (степенью разложения) [26]. Вещество в зоне реакции представлялось двухкомпонентным – непрореагировавшее ЭВВ и продукты детонации. Оказалось, что подбором двух параметров кинетического уравнения удается получить хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений ряда детонационных параметров (скорости детонации, давления в т. Чепмена-Жуге, ширина зоны химической реакции) в зависимости от плотности ЭВВ. Однако при изменении состава окислительной, топливных фаз и применении микросфер, имеющих характеристики, отличные от используемых при опытах MC-B), (стеклянные микросферы следуют заново подбирать параметры кинетического уравнения. В модели [191] не предусмотрено учета зависимости детонационных параметров от размеров микросфер и частиц эмульсии, наблюдаемых при проведении экспериментальных работ [127, 224, 273].

В практике ведения взрывных работ скважинными зарядами ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, отмечено возникновение неожиданных обрывов (или переходов на низкоскоростные режимы) детонации в процессе ее распространения по заряду [24, 174, 175].

В работе [174] описаны эксперименты, зафиксировавшие обрывы высокоскоростных детонационных процессов по время экспериментов с ЭВВ «Фортис-100». Взрывались скважинные заряды диаметром 250 мм. Длина скважин 14 м, длина колонкового заряда — 7 м. Инициирование нижнее. Детонация осуществлялась сдвоенными тротиловыми промежуточными детонаторами ТС-400 (2х0,4 кг). Характерный график, описывающий зависимость расстояния, пройденного детонационной волной от времени, при срыве детонационного процесса показан на рис. 1.1.

На рис.1.2 изображена построенная на основании рис. 1.1 зависимость скорости детонационной волны от пройденного ей расстояния.

Детонационная волна с большой скоростью проходит 4,5 метра (18 калибров заряда). Затем происходит резкий обрыв детонационного процесса.

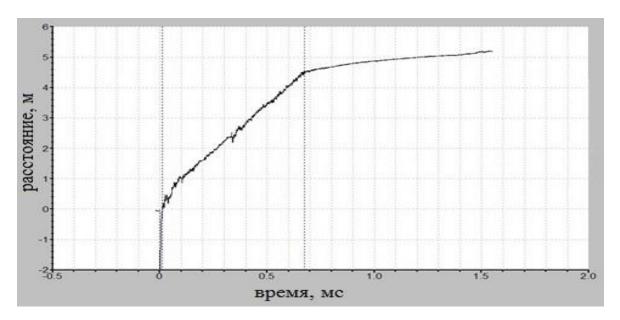


Рис.1.1. Зависимость расстояния, пройденного детонационной волной от времени ([174])

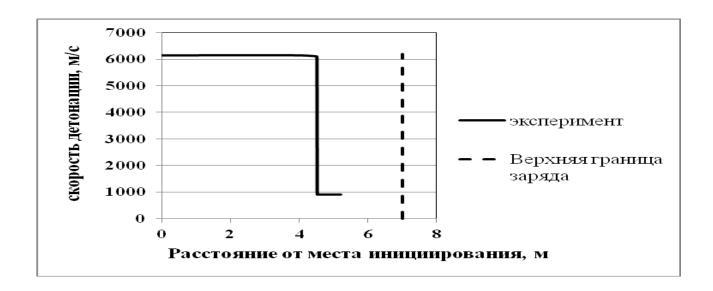


Рис.1.2. Зависимость скорости детонационной волны от места инициирования.

Скачкообразное изменение скорости по длине скважинного заряда при нижнем инициировании смесевого эмульсионного BB Иремекс-560 зафиксировано в работе [24].

В работе [152] отмечается, что в пористых ВВ различной химической природы могут возникать затухающие взрывные процессы. При этом для относительной длины пробега *S* затухающего взрывного процесса в пористых ВВ предложена зависимость

$$\frac{S}{d} = a_{\oplus} + \frac{b_{\oplus}}{\frac{d_{\kappa pum}}{d} - 1} , \qquad (1.2)$$

где a_{\oplus} , b_{\oplus} - эмпирические константы BB.

Возникновение режимов затухания при распространении детонации в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, отмечено в работах [92, 143].

В этих работах для определения относительной длины пробега затухающего взрывного процесса предложена зависимость

$$\frac{S}{d} = \frac{G_*}{1 - \frac{d}{d_{\kappa pum}}},\tag{1.3}$$

где $d_{\kappa pum} = a + b \exp(c_* \rho_{\text{отн}})$, где ρ_{omn} (ρ_{omn} равно отношению плотности ЭВВ к плотности эмульсии). Здесь d, $d_{\kappa pum}$ - диаметр заряда и критический диаметр ЭВВ, соответственно; G_* , a, b, c_* - эмпирические константы ЭВВ.

Общим для работ [92, 143, 152] является, что при объяснении возникновения затухающих режимов детонации авторы исходят из представления, что детонационные процессы в заряде ЭВВ возможны при его диаметре заряда меньше критического.

С нашей точки зрения, данное объяснение нуждается в уточнении.

Во-первых, одна и та же относительная плотность может быть достигнута газовыми порами различных размеров. Однако детонационная способность ЭВВ зависит от размеров пор. При сенсибилизации эмульсии очень мелкими порами (с радиусом меньше R_{zab}) затекание эмульсии в пору будет осуществляться в режиме

вязкопластического течения. Согласно теоретическому анализу, приведенному в работе [237], возгорание втекающей в пору в режиме вязкопластического течения эмульсии происходит за время порядка нескольких микросекунд, однако опыты, в работе [114],представленные свидетельствуют, что «горячая точка» формируется значительно (на за меньшее время один-два порядка). Следовательно, слишком мелкие газовые поры не оказывают сенсибилизирующего действия на эмульсию, и возбуждения ЭВВ не возникает. Для того чтобы для сенсибилизации использовать очень крупные поры, необходимо иметь значительные размеры заряда, т.к. в противном случае эмульсия, заполняющая межпоровое пространство, может не успеть прогореть за время химической реакции. Поэтому в реализуемых на практике размерах заряда ЭВВ их сенсибилизация крупными порами неэффективна [163].

Во-вторых, в работах [92, 143, 152] произошло изменение в понимании критического диаметра, предложенного в работе [236], как диаметра, меньше которого детонация невозможна из-за потери энергии в зоне реакции вследствие боковых волн разряжения, на представление о критическом диаметре как о диаметре, больше которого детонационный процесс становится незатухающим.

Однако это разные понятия, т.к. при распространении детонационной волны в протяженном цилиндрическом заряде ЭВВ, имеющем диаметр, превышающий критический в понимании работы [236], возможно возникновение неустойчивостей данной волны. Данные неустойчивости могут привести к срыву распространения волны, переходу ее распространения на менее скоростной режим или к движению со снижающейся скоростью [70-72, 79, 82, 83, 124, 141]. Поэтому эмпирические зависимости (1.2), (1.3) могут быть отражением возникновения неустойчивости при распространении детонации в ЭВВ.

Эксперименты по измерению скорости детонации в скважинных зарядах показали, что наряду с затухающими детонационными процессами возможны режимы распространения детонации с практически постоянной скоростью по колонке восстающего заряда ЭВВ, сенсибилизированного газовыми порами [137, 160]. Однако данное явление не укладывается в модели, описывающие

распространения детонации в ЭВВ [74, 165, 191, 192, 213, 224, 259, 280], т.к. по мере подъема по колонке заряда отмечается уменьшение плотности ЭВВ [93, 235], что должно повлечь за собой плавное снижение скорости детонации.

В работах [76, 77, 161] экспериментально зафиксирована зависимость скорости детонации в ЭВВ от параметров промежуточного детонатора, что также не находит объяснения в предложенных моделях детонации ЭВВ [74, 165, 191, 192, 213, 224, 259, 280].

Анализируя вышеприведенные факты, приходим к выводу, что в настоящее время отсутствует модель детонации ЭВВ, в которой одновременно:

комплексно учитывается вся совокупность характеристик ЭВВ: плотность ЭВВ, размер газовых пор(микросфер), дисперсность и химический состав эмульсии;

объясняется явление обрыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации в скважинных зарядах;

объясняется влияние параметров промежуточного детонатора на скорость возбуждаемой в ЭВВ детонации.

В конечном итоге, отсутствие модели детонации ЭВВ, учитывающей структуру ЭВВ, выражается в отсутствии разработки научно обоснованных положений и практических способов построения взрывобезопасной, экологически и экономически целесообразной системы технологий обеспечения устойчивой, с заданными параметрами детонации скважинных зарядов ЭВВ, основанной на использовании комплекса современных способов регулирования структуры ЭВВ.

1.3. Анализ научно-технических основ выбора промежуточных детонаторов для инициирования ЭВВ

В промышленности применяются ВВ [181], для возбуждения детонации в которых необходимо использовать специальные средства инициирования: капсюли-детонаторы (КД, ЭД), капсюльные средства неэлектрического взрывания (КСН), оптические системы инициирования (ОПСИН [206]) или промежуточные

шашки-детонаторы (ПД), возбуждаемые КД, ЭД, КСН, ОПСИН или детонирующим шнуром (ДШ). При этом в некоторых случаях в качестве ПД может использоваться ДШ [22].

Это позволяет:

повысить безопасность транспортировки и хранения ВВ, погрузоразгрузочных и взрывных работ;

осуществлять (совместно со средствами взрывания) пространственновременное управление взрывом зарядов ВВ посредством возбуждения в них детонационных процессов в нужный момент времени [147, 151].

Известно, что во взрывчатых веществах под действием разнообразных воздействий внешних ΜΟΓΥΤ возникать различные режимы химических превращений [6, 19, 20, 231]. Данное обстоятельство обусловило обязательное проведение тестовых испытаний ВВ на возбуждение в них взрывчатых процессов при различных типах воздействия: тепловом импульсе, ударе, трении (для первичных ВВ – наколе твердым острием), инерциальных напряжений, инициирующих воздействий со стороны других ВВ [6, 19, 20, 231]. Данные испытания направлены на обеспечение безопасности при транспортировке и хранении ВВ, погрузо-разгрузочных и зарядных работах, а также на проверку восприимчивости ВВ к детонации при инициирующем воздействии со стороны как тестового заряда, так и ударной воздушной волны (проверка передачи детонации через воздушный промежуток). Однако данные тесты далеко не всегда могут служить обоснованием эффективности выбираемого способа и средства инициирования ВВ вследствие редкости совпадения условий, принятых при тестовых испытаниях, и условий, возникающих в практической деятельности [32]. Усиленное внимание К промежуточным детонаторам при производстве промышленных взрывов связано расширенным применением низко чувствительных ВВ. С одной стороны, это свойство делает все работы, связанные с ВВ, более безопасными и позволяет механизировать трудоемкие зарядные работы, с другой – возникают определенные осложнения с инициированием ВВ. В наставлениях по горнорудному делу [219], обобщающих опыт добычи твердых

полезных ископаемых к концу 50-х годов прошлого века, о промежуточных детонаторах упомянуто лишь короткой фразой: «...для детонации чешуйчатого и литого тротила необходимо применение промежуточного детонатора (обычно из порошкообразного или прессованного тротила)» ([219], с. 169). Это объясняется тем, что ассортимент промышленных ВВ в указанное время ограничивался аммонитами, тротилом, оксиликвитами, порохами и нитроглицериновыми ВВ, которые детонируют от капсюлей-детонаторов и детонирующего шнура [219, 220].

Применение простейших (смесь гранулированной аммиачной селитры с жидкими углеводородами) и гранулированных аммиачно-селитренных ВВ стало возможным только с применением промежуточных детонаторов. Длительное время в качестве промежуточных детонаторов применяли шашки ТП200, ТП400, Тет-150, ПТ-300, Т-400Г, ТГ-500 и патроны аммонитов [181, 182]. При этом вопрос недостаточности инициирующего импульса решался простым увеличением числа используемых тротиловых шашек или массой патрона (количеством патронов) аммонита [111-113, 164, 245]. Однако внедрение в практику горнодобывающих работ горячельющихся аммиачно-селитренных ВВ и наливных эмульсионных BB, применяемых при температурах 70-80°C и выше, обусловило разработку и производство как шашек-детонаторов из устойчивых к повышенной температуре взрывчатых веществ (температура плавления тротила – 80,6°C), так и тротиловых шашек в пластмассовых корпусах.

В настоящее время промышленность выпускает десятки наименований шашек-детонаторов, которые имеют различную массу, форму, оболочку и изготавливаются из различных BB.

Анализ ассортимента выпускаемых промышленностью шашек-детонаторов (ПД) показывает, что одновременно cрасширением применения BBгорнодобывающей промышленности водосодержащих происходит расширение использования мощных ПД. В настоящее время в России, наряду с ПД массой до 500 г, производятся шашки-детонаторы увеличенной массы - 850 г и более, для изготовления которых используются высокобризантные составы:

«тротил-гексоген» (ТГФ-850П), «тротил-тэн» (ПТ-П850), «тротил-тетрил» (ТТ-900Л). Кроме этого в пластмассовых корпусах выпускаются также удлиненные тротиловые шашки массой до 2 кг с пентолитовыми («тротил-тэн») вставками (ТлВ-П2-70). В США компания «Trojan Corporation» выпускает для применения в промышленности пентолитовые шашки-детонаторы С-30 массой 0,9 кг [245]. Целесообразность применения мощных ПД для инициирования ЭВВ и

Целесообразность применения мощных ПД для инициирования ЭВВ и гранэмитов подтверждается экспериментальными данными работ [76, 77, 111-113, 162].

В основе современных подходов к аналитическому решению проблемы инициирования детонации в ВВ ударными волнами лежит идея Ю.Б. Харитона о том, что требования к параметрам инициирующего воздействия определяются характеристиками и особенностями протекания детонационного процесса в возбуждаемом ВВ [235].

В работах [7, 14, 15, 18, 26, 28, 32, 79, 88, 115, 142, 155, 167, 173, 207, 222, 240, 247, 252] представлены исследования по выявлению минимальных (критических) параметров ударной волны, вызывающей детонационные процессы в индивидуальных и смесевых конденсированных ВВ. Данные исследования позволили выявить многие особенности развития детонации в гомогенных и гетерогенных ВВ, а также предложить различные критерии, позволяющие осуществлять оценку опасности инициирующего воздействия.

Согласно [40] макроскопические критерии ударно-волновой чувствительности выполняются в случаях, когда в химические превращения ВВ обусловлены их объемным разогревом при ударном сжатии. Данные критерии не могут применяться для оценки чувствительности ВВ в случаях, когда существенными являются локальности разогрева ВВ, размеры и распределения частиц ВВ и неоднородностей по объему ВВ. Поэтому расчет параметров ПД для инициирования аммиачно-селитренных ПВВ по критериям, предложенными для индивидуальных ВВ, не применим. Для оценки параметров ПД для указанных ПВВ предложены следующие подходы:

метод экспериментального подбора [142], когда по схеме «взрыв-отказ» масса ПД подбирается последовательным увеличением ее массы от опыта с отметкой «отказ» к последующему опыту в геометрической прогрессии (например, вдвое шашки серии Р имеют семь номеров и массу 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 г [141]);

метод апробирования шашек-детонаторов и ДШ, выпускаемых промышленностью [22, 68, 69, 77, 125, 226, 248];

инженерный метод расчета параметров ПД [85, 86, 110-113, 234].

Предлагаемые нестандартные инженерные решения для выбора и основания ПД [130]) характеристик (например, всегда требуют индивидуального рассмотрения, что выходит за рамки нашего исследования. Из других упомянутых наиболее предпочтительным подход, методов является предполагающий разработку методики предварительного инженерного расчета параметров ПД, т.к. это, наряду с сокращением временных и материальных затрат на определение параметров ПД, позволяет предварительно оценивать безопасность применения ПД и конструировать новые эффективные ПД.

В настоящее время для расчета параметров промежуточных детонаторов предложены следующие инженерные методики:

энергетическая методика [86]; импульсная методика [85, 110]; метод нестандартных инженерных решений [130]; методика «необходимой мощности» [111-113]; термодинамическая методика [234].

В основу энергетической методики работы [86] положены представления, что энергия инициирующей волны должна быть не меньше, чем минимальная энергия детонационной волны в возбуждаемом ВВ (энергия детонационной волны при критическом диаметре заряда $\mathbf{d}_{\kappa p}$). На основании указанных представлений для минимального диаметра ПД получено выражение

$$\mathbf{d}_{n\pi} = \mathbf{d}_{\kappa p} \left(\frac{\rho_{BB} \mathbf{D}_{\kappa p}^2}{\rho_{n\pi} D_{n\pi}^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \tag{1.4}$$

где $\rho_{{\scriptscriptstyle BB}},~D_{{\scriptscriptstyle {\rm KP}}}$ - плотность инициируемого BB и скорость его детонации при критическом диаметре заряда; $\rho_{{\scriptscriptstyle {\rm ПД}}},~D_{{\scriptscriptstyle {\rm ПД}}}$ - плотность BB в ПД и скорость детонации ВВ ПД.

Выражение (1.4) справедливо при $\frac{h_{_{\Pi\!\Pi}}}{\mathrm{d}_{_{\Pi\!\Pi}}} >$ 2,25, где $h_{_{\Pi\!\Pi}}$ - высота ПД.

При $\frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пд}}} = 1,5$ величину (1.4) необходимо умножить на поправочный коэффициент 1,02.

Согласно [86] экспериментальная проверка энергетической методики на индивидуальных и тонкодисперсных смесевых ВВ показала достаточно точное (не более 14%) совпадение расчетных и опытных данных. Однако для расчета рациональных параметров ПД для возбуждения низко чувствительных ВВ данная методика малопригодна. Действительно, согласно исследованиям [289] при сравнении показателей инициирования скважинного заряда АС-ЛТ цилиндрической пентолитовой шашкой массой 0,56 кг (размеры близкими к оптимальным: длина - 120 мм, диаметр - 57 мм) и конусной пентолитовой шашкой массой 0,45 кг, лучшую возбуждающую способность показала конусная шашка. Расстояние «разгона» детонации при инициировании цилиндрической шашкой – 0,75 м, а при инициировании шашкой конической формы - 0,35 м. Данный опыт не укладывается в энергетический принцип, положенный в основу методики [86].

В основу импульсной методики работы [85] положены следующие представления:

для возбуждения BB необходимо, чтобы импульс, переданный BB от ПД, превышал минимально допустимую для данного BB величину;

изменение параметров детонационной волны ПД при ее переходе в возбуждаемое ВВ можно рассчитывать в акустическом приближении;

расчет активной массы заряда ПД осуществляется по формулам, предложенным в работе [19].

На основании указанных представлений получены следующие выражения для расчета геометрических параметров ПД

а) при
$$\frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пд}}} \ge 2{,}25$$
 $d_{\text{пд}} = d_{\text{кр}} \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{\rho_{\text{пд}} D_{\text{пд}}} \right) \right)^{\frac{1}{2}},$ (1.5)

где $D_{\it BB}$ - скорость детонации в возбуждаемом BB.

б) при
$$\frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пд}}} < 2{,}25$$
 $d_{\text{пд}} = d_{\text{кр}}^{\frac{2}{3}} \left(0{,}375 \left(1 + \frac{\rho_{BB}D_{BB}}{\rho_{\text{пд}}} \right) h_{\text{пд}}^{-1} \left(1 - 0{,}445 \, x + 0{,}0658 \, x^2 \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.6)$ где $x = \frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пл}}}$.

что рациональные геометрические параметры ПД будут достигаться, если $1 \le \frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пд}}} \le 1,5$. В этом случае величина инициирующего импульса будет составлять 80% от максимальной (при $\frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пд}}} = 2,25$), а масса ПД меньше в 2 раза и более, чем в случае $\frac{h_{\text{пд}}}{d_{\text{пд}}} = 2,25$. Кроме этого, при инициировании зарядов с инертными наполнителями (до 15% масс.) массу рациональных ПД необходимо увеличивать на 60-80% по сравнению с массой ПД для инициирования ВВ без примесей [85].

Анализируя выражения (1.5), (1.6), автор работы [85] приходит к выводу,

Импульсная методика показала свою работоспособность при расчете параметров ПД для инициирования зарядов гранулированных ВВ (зерногранулиты 50/50, 80/20, 79/21 и гранулит АС) [84, 85], однако в случае смесевых эмульсионных ВВ не подтверждается зависимость параметров детонации в возбуждаемом ВВ от величины импульса, переданного ВВ при взрыве ПД (см. табл. 1.1). Данное обстоятельство делает невозможным использование импульсной методики, изложенной в работе [85], для расчета параметров ПД для инициирования эмульсионных ВВ.

Табл.1.1 Экспериментальные данные о скорости детонации при инициировании смесевого эмульсионного BB «Эмулит ВЭТ-700» различными ПД и расчетные значения величины импульса $J_{\text{эф}}$, переданного «ВЭТ-700» при взрыве ПД.

Тип ПД	$ ho_{\scriptscriptstyle \Pi \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! $	$D_{\scriptscriptstyle \Pi \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! $	d _{пд} ,	h _{пд} ,	Актив.	Ј _{эфф} ,	$D_{\scriptscriptstyle m BB}$,
	Γ/CM^3	м/с	Мм	Мм	масса, г	кг*м/с	м/с
ТГФ-							
850Э	1,62	7800	79	115	199,3	303,5	4648
Т-1000Л	1,48	6700	68	185	274	369,9	3824
Аммонит							
6ЖВ	1,0	5000	240	25	479,7	795,9	4830
- " -	- "-	- "-	110	120	298,9	500,2	5089
- " -	- " -	- " -	77	240	268,9	460,5	5121
- "-	- " -	- " -	54	480	92,7	159,9	5206

Примечание: экспериментальные данные заимствованы из работы [162]. Масса ПД из аммонита 6ЖВ во всех опытах $m_{\ddot{\imath}\dot{\imath}} - 1$ кг; $\rho_{BB} = 1,26$ г/см³. Расчет величины J_{300} осуществлялся по методике работы [19] с уточнениями, изложенными в [85].

Согласно работам [111-113] при расчете параметров ПД, обеспечивающих возбуждение высокоскоростного детонационного процесса в ANFO, необходимо, чтобы мощность инициирующей детонационной волны N_D не уступала мощности детонационной волны в инициируемом ВВ N_{BB} , а отношение массы ПД к массе возбуждаемого ВВ превосходило показатель $k_{\kappa pum}^*$, функционально зависящий от диаметра скважины $d_{\kappa kB}$.

Мощность инициирующей детонационной волны равна

$$N_D = \frac{m_{n\pi}}{L_{n\pi}} \cdot \frac{D_{n\pi}^2}{n_{n\pi} + 1} \cdot K_{np}, \qquad (1.7)$$

где $m_{nд}$, L_{nd} - масса и длина ПД, соответственно;

 ${
m n}_{_{\Pi\! H}}$ – показатель политропы BB промежуточного детонатора; ${
m K}_{_{\Pi\! p}}$ - коэффициент преломления детонационной волны ПД при инициировании BB

$$K_{np} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_{nx} D_{nx}}{\rho_{pp} D_{pp}}} . {1.8}$$

Мощность детонационной волны в инициируемом ВВ равна

$$N_D = \frac{m_{BB}}{L_{RR}} \cdot \frac{D_{BB}^2}{n_{RR} + 1} , \qquad (1.9)$$

где $_{m_{BB}}$, $_{L_{BB}}$ - масса и длина скважинного заряда инициируемого BB, соответственно; $_{n_{BB}}$ – показатель политропы инициируемого BB.

Требуемое ограничение на мощность ПД:
$$N_D \ge N_{BB}$$
. (1.10)

Исходя из (1.8) - (1.10), в работе [113] сформулирован критерий, связывающий минимальную массу и длину ПД с массой и длиной заряда ВВ, когда обеспечивается стационарная детонация на протяжении всей длины заряда:

$$\frac{\mathbf{m}_{_{\Pi \Lambda}}}{\mathbf{m}_{_{BB}}} \cdot \frac{L_{_{BB}}}{L_{_{\Pi \Lambda}}} \cdot \left(\frac{D_{_{\Pi \Lambda}}}{D_{_{BB}}}\right)^{3} \frac{\mathbf{n}_{_{BB}} + 1}{\mathbf{n}_{_{\Pi \Lambda}} + 1} \cdot \frac{2}{1 + \frac{\rho_{_{\Pi \Lambda}} D_{_{\Pi \Lambda}}}{\rho_{_{BR}} D_{_{BR}}}} = 1 . \tag{1.11}$$

С учетом того, что $\frac{\mathrm{m}_{_{\Pi\!A}}}{\mathrm{m}_{_{\mathrm{BB}}}} = k_{_{\kappa pum}}^{*}$, в работах [111-113] получено следующее

выражение для отношения длины стационарно детонирующего заряда BB к длине ПД, обеспечивающего необходимый режим детонации:

$$\frac{L_{BB}}{L_{n,n}} = \frac{1}{k_{\kappa pum}^*} \cdot \left(\frac{D_{BB}}{D_{n,n}}\right)^3 \frac{n_{n,n} + 1}{n_{BB} + 1} \cdot \frac{1 + \frac{\rho_{n,n} D_{n,n}}{\rho_{BB} D_{BB}}}{2}.$$
 (1.12)

Тогда при инициировании ANFO (ρ_{BB} = 0,9 г/см³, $n_{\Pi Д}$ = 2, D_{BB} = 4100 м/с) тротил-гексогеновым ПД ($\rho_{\Pi Д}$ = 1,62 г/см³, $n_{\Pi Д}$ = 3 , $D_{\Pi Д}$ = 7800 м/с) при

 $k_{\kappa pum}^*=0,\,0187$ получаем - $\frac{L_{{\it BB}}}{L_{{\it Ing}}}=12,\!9$. Следовательно, для инициирования заряда

АNFO плотностью 0,9 г/см³ и длиной 10 м со скоростью 4100 м/с в скважине диаметром 250 мм потребуется тротил-гексогеновый ПД длиной 0,78 м и массой 62 кг, что значительно превосходит экспериментальные данные, приведенные в работах [125, 142].

Применительно к инициированию ЭВВ в [77, 110] рекомендовано значение $k_{\kappa pum}^* = 0,00343$. Тогда для заряда длиной 10 м и диаметром 250 мм при $\rho_{BB} = 1,15$ г/см³, $n_{BB} = 2,7$, $D_{\kappa p} = 4700$ м/с и при использовании тротил-гексогенового ПД, получаем $m_{nд} = 8$ кг. Это значительно превышает экспериментальные данные работ [68, 69, 162].

Таким образом, методика «необходимой мощности», предложенная в работах [111-113], может давать значительно завышенные (в разы) массы сосредоточенных ПД, которые необходимы для инициирования скважинных зарядов как простейших, так и эмульсионных ВВ.

В случае применения линейных ПД в работе [110] предложено их инициирующую способность характеризовать с помощью импульса взрыва - $J_{nд} = m_{nд} D_{nд} . \$ Импульс основного заряда принимается равным - $J_{BB} = m_{BB} D_{BB} .$

Согласно [110] в заряде ВВ устанавливается режим устойчивой детонации $\pi pu \quad \frac{\mathbf{J}_{_{\Pi \Pi}}}{\mathbf{J}_{_{\Pi \Pi}}} \geq k_{_{\kappa pum}}^* \ .$

Тогда минимальный диаметр ПД определяется из уравнения

$$d_{nq} = d_{BB} \left(k_{\kappa pum}^* \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{\rho_{nq} D_{nq}} \right)^{0.5}, \qquad (1.13)$$

где $d_{\it BB}$ - диаметр заряда BB, а длина ПД принимается равной длине заряда.

В работе [22] показано, что скважинные заряды зерногранулита 79/21 (ρ_{BB} = 0,9 г/см³) надежно детонировали в 214-миллиметровых скважинах от 4-х ниток ДШ-А, размещенных по всей длине 12-метрового заряда. При этом авторами [22]

из опытов по инициированию зарядов рассматриваемого ВВ сосредоточенными ПД показано, что масса ПД должна быть в пределах 3-10% от массы заряда.

Расчет по формуле (1.10) дает
$$d_{\text{пд}} = 214 \left(0.03 \cdot \frac{0.9 \cdot 3900}{1.25 \cdot 6500} \right)^{0.5} = 23.4 \text{ мм (} \rho_{\text{пд}} = 1.25 \text{ г/см}^3, \ D_{\text{пл}} = 6500 \text{ м/c}, \ D_{\text{RB}} = 3900 \text{ м/c}).$$

Погонная плотность расчетного линейного ПД будет равна 537 г/п.м. Фактическая погонная плотность 4-х ниток ДШ-A - 50 г/п.м.

Таким образом, расчеты, основанные на критерии $\frac{\mathbf{J}_{\text{пд}}}{\mathbf{J}_{\text{BB}}} \ge k_{\kappa pum}^*$, как и на критерии $N_D \ge N_{BB}$, могут давать сильно завышенные значения параметров ПД.

В работе [234] предлагается повысить эффективность и надежность обратного инициирования скважинных зарядов газифицированных ЭВВ за счет применения удлиненных шашек-детонаторов (УШД). В указанной работе представлена методика расчета геометрических параметров УШД. В основу этой методики положены следующие положения:

А). При определении диаметра УШД полагается, что

деформация ЭВВ, окружающего УШД, под действием расширяющихся продуктов детонации УШД происходит исключительно за счет уменьшения пористости ЭВВ;

уменьшение пористости ЭВВ происходит равномерно во всем объеме ЭВВ между расширяющимися продуктами детонации УШД и стенками скважины;

сжатие газа в порах является адиабатическим процессом;

для обеспечения инициирования ЭВВ температура газа в сжимающихся порах должна достигнуть величины 1700-1800°C;

В). При определении длины УШД полагается, что

процесс сжатия должен охватить все поперечное сечение колонки скважинного заряда;

перед расширяющимися продуктами детонации УШД образуется зона уплотнения, распространяющаяся в ЭВВ со скоростью звука;

сжатие газа в порах ЭВВ до необходимой температуры должно осуществиться до момента завершения детонации УШД.

Однако ряд положений рассматриваемой методики вызывает следующие возражения:

- 1. Зона уплотнения перед расширяющимися продуктами детонации УШД распространяется в ЭВВ вслед за ударной волной, которая имеет сверхзвуковую скорость, а не скорость звука. Скорость распространения ударных волн можно определить, зная ударные адиабаты ЭВВ [4, 104, 153, 204] и детонационные характеристики ВВ, из которого изготовлен УШД [19, 231].
- 2. Определение температуры газа в порах ЭВВ на основе представлений о равномерном уменьшении пористости ЭВВ во всем объеме ЭВВ между расширяющимися продуктами детонации УШД и стенками скважины возможно, если время схлопывания поры будет значительно больше времени распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины.

Сравним время схлопывания газовой поры со временем распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины.

Время распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины равно

$$t_1 = \frac{R_{\text{ckb}} - r_{\text{yill}}}{D_{\text{vii}}} , \qquad (1.14)$$

где $R_{\rm ckb}$, $r_{\rm ymg}$ - радиус скважины и УШД, соответственно; $D_{\rm yg}$ - скорость ударной волны.

Скорость ударной волны и давление во фронте ударной волны можно определить из уравнений ударной адиабаты

$$D_{yx} = A + Bu, \qquad (1.15)$$

$$P_f = \rho_{BB} D_{va} u \,, \tag{1.16}$$

где A, B - параметры ударной адиабаты эмульсии; u - массовая скорость за фронтом ударной волны (для эмульсии с окислительной фазой только из аммиачной селитры – A =1920 м/с; B = 1,98 [104]).

Критический радиус поры в эмульсии R_k , ниже которого происходит ограниченный рост скорости ее схлопывания, находится из выражения (1.1) $(R_{zab}=R_k)$. При характерных значениях параметров (1.4) $\eta\approx 2~\Pi a\cdot c$; $P_f\approx 2~\Gamma\Pi a$; $\rho_{_3}\approx 1350~{\rm kg/m}^3$, $R_k\approx 10~{\rm mkm}$.

Согласно [127, 163, 224] размер газовой поры в ЭВВ колеблется в диапазоне 30-150 мкм. Следовательно, ее схлопывание будет происходить в гидродинамическом режиме. В этом случае время схлопывания t_2 поры радиусом R_o ($R_o > R_k$) будет равно [36]

$$t_2 = 0.915 R_o \sqrt{\frac{\rho_s}{P_f}} \ . \tag{1.13}$$

Подставляя в уравнения (1.9), (1.13) характерные значения параметров: $\mu_{_{9}} \approx 2~\Pi \text{a·c}~;~P_{_{f}} \approx 2~\Gamma \Pi \text{a;}~\rho_{_{9}} \approx ~1350~\text{кг/m}^{3}~, = 1150~\text{кг/m}^{3}; R_{_{o}} = 50~\text{мкм};$ $R_{_{\text{СКВ}}} = 0{,}125~\text{м;}~r_{_{\text{УШД}}} = 0.04~\text{м;}~D_{_{\text{УД}}} = 3000~\text{м/c}.~\text{Определяем}$

$$t_1 = 3 \cdot 10^{-5} \,\mathrm{c}, \qquad t_2 = 4 \cdot 10^{-8} \,\mathrm{c}.$$

Имеем $t_1 \gg t_2$.

Таким образом, схлопывание газовых пор происходит за время значительно меньшее, чем время распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины. Поэтому определение температуры газа в порах ЭВВ на основании принятых в работе [234] квазистатических представлений неверно.

Если встать на позиции представлений, что возгорание эмульсии обусловлено ее нагревом от горячего газа пор, то величины температуры газа в сжимающихся порах 1700-1800°С недостаточно для обеспечения возгорания эмульсии, т.к. термоактивность газа значительно уступает термоактивности вещества эмульсии [36, 252].

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что термодинамическая методика [234] нуждается в переработке.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют корректные методики расчета параметров ПД для инициирования ЭВВ. Выбор ПД для инициирования

ЭВВ возможен только методом экспериментального подбора. Однако ввиду разнообразия возможных геометрических форм ПД, вида ВВ, из которых может быть изготовлен ПД, а также характеристик инициируемого ЭВВ данный метод трудоемок, требует существенных финансовых затрат, а также полигона, где можно взрывать заряды ЭВВ весом десятки килограммов. Организация такого полигона имеет значительные сложности как юридического, так и материальнотехнического характера. Поэтому разработки научно обоснованных положений выбора ПД для инициирования ЭВВ в условиях скважинной отбойки горных пород весьма актуальны и практически значимы.

1.4. Постановка проблемы исследований

Ретроспективный факторный анализ имеющегося обширного научного материала, посвященного научно-техническим основам создания и применения ЭВВ, приведенный в пп. 1.1-1.3, показывает, что ЭВВ имеет исключительно высокие потребительские характеристики, что обеспечивает ЭВВ значительные преимущества на рынке современных ПВВ для горнодобывающей промышленности.

В качестве таких преимуществ необходимо отметить:

возможность регулирования взрывчато-технических характеристик ЭВВ в широком интервале;

рекордную водоустойчивость ЭВВ, обеспечивающую их сохранность при нахождении в воде (включая проточные воды и воды на больших глубинах); высокий уровень промышленной безопасности при ведении взрывных работ с применением ЭВВ, связанный с низкой чувствительностью зарядов ЭВВ к удару, трению, наколу, прострелу, нагреванию, открытому огню и т.п., но с избирательной чувствительностью к инициированию от штатного капсюлядетонатора или промежуточного детонатора (ПД);

отсутствие дилатансии, экссудации, пыления и др. при переработке составов и выполнении зарядных работ;

неспособность к накоплению электростатического заряда;

полную механизацию процесса заряжания скважин при взрывных работах;

создание сбалансированных по кислороду составов, обеспечивающее низкую токсичность газообразных продуктов детонации при взрыве зарядов ЭВВ;

доступную сырьевую базу, позволяющую получать недорогие, но высокоэффективные BB;

возможность применения на открытых и подземных работах, в скважинных, шпуровых и накладных зарядах, при контурном взрывании, сварке и резке металлов, специальных взрывных работах.

Однако анализ научно-технических основ создания ЭВВ показал, несмотря на высокие эксплутационно-технические параметры современных ЭВВ, при их применении возникают трудности, связанные, прежде всего, с недостаточно разработанными:

физико-математической модели детонации ЭВВ, учитывающей их рецептурно-технологические особенности: плотность, химический состав ЭВВ, размеры сенсибилизирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметров инициирующего воздействия;

объяснения причин возникновения срыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации зарядов ЭВВ в вертикальных (наклонных) скважинных зарядах;

обоснования параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах, учитывающие рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ;

обоснования технологии взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которой происходит детонационное разложение ЭВВ на всей длине скважинного заряда.

Ввиду значительного объема потребления ЭВВ повышение их эффективности имеет огромное государственное значение для решения проблемы всестороннего комплексного обеспечения работ по увеличению добычи полезных ископаемых на объектах горнорудного комплекса страны за счет расширенного крупносерийного производства ЭВВ и их максимального использования при

ведении взрывных работ. Поэтому разработка научно обоснованных положений и практических способов построения взрывобезопасной, экологически и экономически целесообразной системы технологий обеспечения устойчивой детонации скважинных зарядов ЭВВ, основанной на использовании современных способов регулирования рецептуры, плотности и структуры ЭВВ и их инициирования в условиях скважинной отбойки горных пород, является решением важной и актуальной научно-технической проблемы.

решения указанной научно-технической проблемы необходимо исследовать систему «эмульсионное взрывчатое вещество - промежуточный детонатор» целью установления закономерностей возникновения распространения детонации в ЭВВ с учетом рецептурно-технологических, энергетических микроструктурных характеристик ЭВВ И И параметров возбуждающего импульса.

В связи с этим возникают следующие задачи исследования:

разработка физико-математической модели детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, учитывающей не только рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсибилизирующих пор, но и размер частиц дисперсной фазы эмульс

ии, а также параметры инициирующего воздействия;

определение закономерностей распространения детонации в скважинных зарядах ЭВВ;

определение условий возникновение срыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации в скважинных зарядах ЭВВ;

экспериментально-теоретическое обоснование параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах ЭВВ, учитывающее рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ;

разработка и обоснование технологий формирования и взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которых детонационная волна проходит по всей длине заряда.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ

Анализ экспериментальных и аналитических исследований детонации ЭВВ, приведенный в первой главе, показывает, что детонационные характеристики данных ВВ зависят от размера газовых включений (микросфер), плотности ЭВВ, дисперсности и химического состава эмульсии, а также от детонационных параметров промежуточного детонатора. Однако до настоящего момента отсутствуют физико-математические модели детонации данных ВВ, позволяющие учитывать в полном объеме указанные параметры.

В настоящей главе представлена физико-математическая модель стационарной детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, в которой при определении детонационных характеристик учитывается зависимость от радиуса газовых включений (микросфер), плотности ЭВВ, а также плотности, дисперсности и химического состава эмульсии.

2.1. Схема детонационного процесса

В основу физико-математического описания детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, положены результаты исследований [45, 48, 58, 62, 65, 150, 267].

ЭВВ являются пористыми телами. Распространение ударных волн в пористых средах имеет свои особенности по сравнению с распространением данных волн в однородных средах. В начальные моменты времени, под действием ударной волны интенсивностью в несколько десятков тысяч атмосфер, в среде, имеющей пористость порядка десятка процентов, происходит изменение плотности среды преимущественно за счет втекания ее в поры. В этот период саму среду можно рассматривать как несжимаемую [67, 88-90, 103, 114, 116-118, 195, 231, 254, 256].

Согласно данным работы [127] величина детонационного давления в ЭВВ, сенсибилизированного газовыми порами, имеет порядок 10 ГПа, а сами ЭВВ имеют пористость 10-25 %. Данное давление не вызывает мгновенного

разложения ЭВВ [5, 114, 202, 205, 275, 276], поэтому до начала разложения данное вещество можно рассматривать, как инертное.

Критический радиус пузырька, ниже которого происходит ограниченный рост скорости его схлопывания, определяется выражением (1.1) и

при характерных значениях параметров $\mu_9 \approx 2~\Pi \text{a·c};~P_f \approx 10~\Gamma \Pi \text{a};~\rho_9 \approx ~1330~\text{кг/м}^3$ равен $R_k \approx 4.6~\text{мкм}.$

Рассмотрим сферическую пору радиусом R_o ($R_o > R_k$), расположенную в эмульсии с характерным размером частицы Δ .

Время охвата детонационной волной поры равно $t_1 = \frac{2R_o}{D_*}$, а время максимального схлопывания определяется выражением (1.13).

При решении задачи о схлопывании поры допустимо использовать представление о симметричном втекании вещества в пору при $t_2 >> t_1$.

Данное условие выполняется при $D_*\sqrt{\frac{\rho_{\tiny 9}}{P_{\tiny f}}}>>2,2$. Согласно [127, 192] $D_*\approx 5000$

м/с, $P_f \approx 10~\Gamma\Pi a; ~\rho_{_9} \approx ~1330~$ кг/м 3 . Тогда $D_*\sqrt{\frac{\rho_{_9}}{P_{_f}}} \approx 1.8$. Следовательно, при рассмотрении схлопывания поры в ЭВВ необходимо учитывать асимметричность

втекания эмульсии в пору.

Данное утверждение экспериментально подтверждено в работе [253]. Кроме этого в работе [114] на основе методики, изложенной в [27], изучались процессы схлопывания стеклянных и полимерных микросфер под действием ударной волны. В результате авторы [114] пришли к выводу, что при уровне фронтального давления в волне больше 5 ГПа схлопывание происходит в гидродинамическом режиме.

Образование струй не происходит из-за особенностей внутренней структуры эмульсии и высокой поперечной (по отношению к направлению движения детонационной волны) скорости набегания $V_{\text{набег}}$ соседних частиц эмульсии друг на друга ($V_{\text{набег}} \approx 2W \frac{\Delta}{R_o}$, где W - массовая скорость за фронтом ударной волны).

Число Вебера We, определяющее процесс слияния капель (частиц эмульсии), при характерных значениях параметров эмульсии ($\Delta \approx 2$ мкм; $\sigma \approx 30 \cdot 10^{-3}$ н/м; $R_o \approx 40$ мкм, начальная массовая скорость вещества эмульсии при втекании в пору ($W \approx 2400$ м/с) $We \approx \frac{4\rho_3 W^2}{\sigma} \frac{\Delta^2}{R_o} \approx 25000 >> 100$. Согласно [12], при данном значении числа Вебера сталкивающиеся частицы не сливаются, а распадаются на мельчайшие отдельные части.

Рассмотрим столкновение образовавшегося осколка частиц эмульсии со стенкой пузырька. Вследствие удара, температура данной частицы поднимется на величину $\Delta T = \frac{1}{c_3} \left(\frac{2W^2}{\psi} - \zeta_1 L_1\right) \approx 107 \, ^{\circ}K$ (где ζ_1 - массовая доля воды; L_1 - удельная теплота парообразования воды; $\psi = 5$ - учитывается присоединенная масса эмульсии в месте удара; c_3 - теплоемкость эмульсии [127]), что недостаточно для инициирования горения ВВ (полагаем, что реакция может начаться при температуре, превышающей температуру, при которой начинается самоподдерживающееся экзотермическое разложение наименее стойкого компонента — аммиачной селитры, равной 520-530°К [127, 225]).

Таким образом, механизм инициирования жидких BB, предложенный в работах [277, 278], не объясняет причину возникновения детонации в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами.

Как показали исследования, представленные ниже, зажигание эмульсии происходит при величине z не менее 0,5 (z - относительное уменьшение объема поры). Температура газов в поре при их адиабатическом сжатии до указанного объема будет равной $T = T_o \left(\frac{1}{z}\right)^{\gamma_n-1} \approx 400^o K$ ($\gamma_n \approx 1,4$ - показатель адиабаты газов, заполняющих пору), что меньше температуры начала автокаталитического разложения аммиачной селитры.

Поэтому участие даже мельчайших диспергированных в полости поры частиц не вызывает возгорания эмульсии ЭВВ при однократном ударном воздействии. Следовательно, механизм возбуждения детонации, описанный в

работах [88, 252] и характерный для индивидуальных жидких ВВ, не способен объяснить возникновение детонации в ЭВВ.

Рассмотрим следующую физическую модель описания детонационного процесса в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами [65, 150, 267].

ЭВВ, сенсибилизированные газовыми порами, являются энергонасыщенными пористыми веществами, имеющими замедленную кинетику воспламенения. Деформирование данных сред ударной волной имеет свои особенности, обусловленные различием в поведении ЭВВ при его деформировании до начала возгорания эмульсии и после возгорания.

На начальном этапе (до воспламенения) эмульсия ведет себя как инертное вещество. Под действием фронтального детонационного давления вещество эмульсии в гидродинамическом режиме втекает в поры. Втекание происходит асимметричным образом. При этом плотность самого вещества эмульсии практически постоянна, а изменение плотности среды определяется уменьшением пористости. Это связано с тем, что сопротивление втеканию эмульсии в поры, обусловленное ее вязкостью и прочностью на сдвиг, чрезвычайно мало по сравнению с давлением во фронте ударной волны и модулем объемного сжатия эмульсии.

В процессе втекания происходит локальный разогрев и последующее возгорание вещества эмульсии. Данный процесс осуществляется за счет совместного действия теплоты внутреннего трения при втекании эмульсии в пору и теплоты сжатых газов поре. После возгорания вещества эмульсии в порах среды возникает противодавление, среда начинает воспринимать нагрузку, как непористое вещество [103]. В среде резко возрастает давление (по закону ударной адиабаты). Одновременно начинает происходить разложение ВВ из центров «горячих точек» в радиальном направлении. После слияния сфер горения происходит расширение газообразных продуктов взрыва, сопровождаемое падением давления и переходом на адиабату расширения газообразных продуктов детонации.

На начальном этапе вследствие асимметричности процесса втекания вещества эмульсии в поры среда приобретает определенную скорость в направлении

распространения детонационной волны. Величина данной скорости определяется инерционными свойствами величиной фронтального среды, давления подхода длительностью промежутка времени фронта между моментом детонационной волны к поре и моментом времени, соответствующему началу разложения. Для ВВ с относительно низкой чувствительностью данное приращение скорости может быть весьма существенным (сотни метров в секунду).

Таким образом, вещество ЭВВ на начальном этапе уплотняется и приобретает некоторую массовую скорость движения В направлении распространения Дальнейшее детонационной волны. возрастание массовой скорости среды происходит после возгорания уплотненной эмульсии и определяется удельным тепловыделением с учетом затрат энергии на сообщение среде массовой скорости на Эти этапе. обстоятельства делают необходимым начальном при детонационных параметров ЭВВ учет массовой скорости U и плотности ρ_{a} вещества ЭВВ в момент начала экзотермического разложения ЭВВ (момент перехода на ударную адиабату). Данные особенности не нашли отражения в схемах описания детонации ЭВВ, предложенных в работах [74, 165, 192, 237], авторы которых при расчете детонационных параметров ЭВВ исходили из концепции сферически симметричного затекания вещества эмульсии в сенсибилизирующую пору. Это обусловило необходимость разработки методики расчета детонационных параметров ЭВВ, учитывающей наряду с дисперсностью эмульсии также указанные особенности детонации ЭВВ.

2.2. Физико-математические основы детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами. Стационарный режим.

Рассмотрим детонацию цилиндрического заряда ЭВВ, имеющего диаметр больше предельного. При этом полагаем, что структура детонационной волны стационарна и однородна по ее площади. В этом случае распределение термодинамических параметров продуктов взрыва в зоне химической реакции будет зависеть только от одной координаты – вдоль ширины зоны реакции [153].

При изложении физико-математических основ детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, исходим из результатов работ [45, 48, 58, 62, 65, 150, 267].

Допустим, что при детонации рассматриваемых BB происходит химическая реакция согласно уравнению (состояние в т. Чемпена-Жуге):

$$\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j \tag{2.1}$$

где A_m - начальные вещества; X_i - газообразные продукты взрыва; Y_i - твердотельные продукты взрыва; a_m, b_i, f_j - мольные коэффициенты.

Предварительно определим значения вспомогательных параметров для дальнейших расчетов.

Масса ВВ вступившего в реакцию равна:

$$G = \sum a_m \mu_{A_m} \,, \tag{2.2}$$

где μ_{A_m} - молекулярная масса продукта A_m .

Количество молей газообразных продуктов взрыва на основании (2.1) равно:

$$\Delta b = \sum b_i \tag{2.3}$$

Удельная теплота взрыва Q_{v} определяется из уравнения Гесса [19]:

$$Q_{V} = \frac{1}{G} \left[\sum b_{i} Q_{P}^{X_{i}} + \sum f_{j} Q_{P}^{Y_{j}} - \sum a_{m} Q_{P}^{A_{m}} + 2,48\Delta b \right], \tag{2.4}$$

где $Q_v^{(3)}$, кДж/моль - стандартная теплота образования вещества \mathfrak{I} ($\mathfrak{I} \to X_i$ и Y_j); G — масса вещества вступившего в реакцию; Δb —количество молей газообразных продуктов взрыва.

В соответствии с [34] среднее значение коволюма взрывных газов равно:

$$\alpha = \frac{1}{G} \left[\sum b_i \alpha_i + \sum f_j \alpha_j \right], \tag{2.5}$$

где $lpha_{i(j)}$ - коволюм i(j) - вещества.

Учитывая, относительно невысокую плотность ЭВВ (практически значимая область плотностей ЭВВ находится в пределах 0,8-1,3 г/см3 [127, 196, 224]),

принимаем в качестве уравнения состояния взрывных газов закон Абеля. При этом в соответствии с предположением работы [34] будем считать, что величина α определяется согласно (2.5), т.е. будем полагать, что коволюм будет определяться больше упаковкой, чем деформацией молекул. Тогда

$$P_{H}\left(V_{H}-\alpha\right)=\frac{RT_{H}}{\overline{\mu}},$$
(2.6)

где $P_{_{\rm H}}$ - начальное давление взрывных газов; $T_{_{\rm H}}$ - начальная температура взрывных газов; $V_{_{\rm H}}$ - начальный удельный объем продуктов взрыва; $\overline{\mu}$ - средняя молекулярная масса газообразных продуктов взрыва; R - универсальная газовая постоянная.

$$\overline{\mu} = G(1 - \sum \beta_j)(\Delta b)^{-1}, \tag{2.7}$$

 β_{j} - массовая доля твердотельного j- вещества

Аппроксимируем кривую Гюгонио P = P(V), описывающую расширение взрывных газов, двухполитропным приближением (предложение Л.Д. Ландау, К.П. Станюковича [19]):

$$P = \begin{cases} P_{H} \left(\frac{V_{H}}{V}\right)^{k} & npu \quad V_{H} \leq V \leq V_{*} \\ P_{H} \left(\frac{V_{H}}{V_{*}}\right)^{k} \left(\frac{V_{*}}{V}\right)^{\gamma} & npu \quad V > V_{*} \end{cases}$$

$$(2.8)$$

где V_* - удельный объем продуктов взрыва в точке сопряжения политропы; k - показатель политропы взрывных газов; показатель адиабаты γ находится из уравнения:

$$\gamma = 1 + \frac{R\Delta b}{\sum b_i C_V^{(X_i)}(T_*)} , \qquad (2.9)$$

где $C_V^{(X_i)}(T_*)$ - мольная теплоемкость X_i - газа при температуре T_* ; T_* - температура взрывных газов в точке сопряжения.

Предварительно оценим значение величины V_* . Для этого, следуя [44, 149], проанализируем данные работы [241] по взрыву тротила плотностью 1,5 г/см³.

Согласно [241] при двухполитропном приближении описания давления во взрывных газах при взрыве тротила плотностью 1,5 г/см³ объем газов в точке сопряжения превышает начальный объем ВВ в 3,572 раза.

Следовательно, удельный объем взрывных газов в точке сопряжения в данном случае равен:

$$V_* = \frac{3,572}{1.5} = 2,3814 \text{ cm}^3/\Gamma.$$

Расчет по методике работы [19] показывает, что при данной плотности тротил разлагается по формуле

$$C_7H_5O_6N_3 = 0,26CO_2 + 4,7CO + 0,78H_2O + 1,72H_2 + 2,04C + 1,5N_2$$

Используя данные работы [34] по величине коволюма продуктов взрыва, находим, что коволюм образовавшихся продуктов взрыва в данном случае равен $\alpha = 0.5412 \, \text{ cm}^3/\Gamma$.

Величина $\frac{V_+}{\alpha} = K_+ = \frac{2,3814}{0,5412} = 4,4$ показывает, во сколько раз в точке сопряжения политропы и адиабаты продуктов взрыва, удельный объем взрывчатых газов превышает их коволюм.

Примем эту величину в качестве критериальной при двухполитропном приближении кривой Гюгонио, т.е. положим, что [44, 149]:

$$K_{\perp} \equiv 4.4. \tag{2.10}$$

Тогда оценка температуры взрывных газов в т. сопряжения не вызывает затруднений. Действительно, т.к. термодинамические характеристики

(P,V,T) удовлетворяют уравнению Абеля и зависимости $PV^k = const$, имеем

$$P_{H}V_{H}^{k} = P_{*}V_{*}^{k} {(2.11)}$$

$$P_{\rm H}(V_{\rm H} - \alpha) = \frac{R}{\mu} \cdot \frac{2kT_B}{k+1}$$
 (2.12)

$$P_*(V_* - \alpha) = \frac{R}{\mu} \cdot T_*, \qquad (2.13)$$

где P_* , T_* - давление и температура взрывных газов в т. сопряжения. При написании (2.12) учтено, что $T_{\scriptscriptstyle H}=\frac{2k}{k+1}T_{\scriptscriptstyle B}$ [19]. (2.14)

На основании (2.8), (2.11) - (2.13), учитывая, что $V_* = K_+ \alpha$ получаем

$$T_{*} = 2T_{B} \left(\frac{k}{k+1}\right)^{k} \cdot \left(\frac{1}{K_{+} \rho_{o}^{2a3} \alpha}\right)^{k-1} \cdot \frac{K_{+} - 1}{K_{+}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{k+1}{k} \rho_{o}^{2a3} \alpha},$$
(2.15)

где $T_{\it B}$ - температура взрыва, которую имели бы продукты детонации при мгновенном выравнивании давления.

$$T_B = \frac{Q_V \overline{\mu}}{C_V^{\Sigma}} + T_o, \qquad (2.16)$$

 Q_V - удельная теплота взрыва; T_o - начальная температура ВВ; C_V^Σ - средняя молярная теплоемкость продуктов взрыва.

Тогда, пренебрегая потерями тепла в процессе непосредственного детонационного разложения ВВ, на основании уравнения теплового баланса имеем следующее равенство:

$$(T_B - T_o)R\left[\sum b_i \overline{c}_V^{(X_i)}(T_B) + 3\sum f_j \xi_j\right] = GQ_V, \qquad (2.17)$$

где ξ_j - количество атомов в твердотельном j- веществе; $\overline{c}_{V}^{(X_i)}(T_B) = \frac{C_{V}^{(X_i)}}{R}$, $C_{V}^{(X_i)}$ - мольная теплоемкость X_i - газа при температуре T_B , определяемая на основании соотношений Эйнштейна-Дебая [19].

Согласно [19]:
$$C_V^{(Z)} = \frac{5}{2}R + R\sum_p \frac{\left(\frac{\Theta_p}{T}\right)^2 e^{\frac{\Theta_p}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_p}{T}} - 1\right)^2}$$
 - для 2—атомных или линейных

многоатомных молекул Z - вещества;

$$C_V^{(Z)}=3R+R\sum_prac{\left(rac{\Theta_p}{T}
ight)^2e^{rac{\Theta_p}{T}}}{\left(e^{rac{\Theta_p}{T}}-1
ight)^2}$$
 - для 3-атомных или многоатомных нелинейных

молекул Z - вещества; $\{\Theta_p\}$ - температура (температуры) Дебая Z – вещества.

Разрешая (2.17) методом итераций, определяем T_B .

Расчеты по вышеприведенным формулам Эйнштейна показывают, что теплоемкость характерных для рассматриваемых ВВ взрывных газов $(N_2,CO,NO,H_2O,CO_2.NO_2)$ при изменении их температуры в диапазоне 1500 - 2200° К изменяется в пределах (среднем) 5 %. Поэтому при вычислении $T_{_H}$ будем полагать, что $C_V(T_{_f}) \approx C_V(T_{_B})$. Введем безразмерный параметр \overline{C} :

$$\bar{c} = \frac{C_V^{\Sigma}}{R} \,. \tag{2.18}$$

Тогда на основании (2.6), (2.7), (2.14), (2.16)-(2.18) получаем следующее уравнение:

$$\frac{Q_{\nu}}{D^2} = \frac{\bar{c}}{2(k+1)} (1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_0^{2a3}) (1 - \sum_{i} \beta_i), \qquad (2.19)$$

где k - показатель политропы взрывных газов; α - среднее значение коволюма продуктов взрыва; β_j - удельная масса j-твердого продукта взрыва; \overline{C} - относительная мольная теплоемкость (2.18); где D - скорость детонации ЭВВ в системе координат, двигающейся со скоростью U в направлении детонации; ρ_0^{zas} - плотность «газовой части» вещества ЭВВ в момент начала экзотермического разложения эмульсии при втекании в пору («газовая часть» - часть вещества эмульсии, из которой образуются газообразные продукты взрыва):

$$\rho_o^{2a3} = \frac{\rho_o \left(1 - \sum_j \beta_j\right)}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} , \qquad (2.20)$$

где ρ_0 — плотность BB в момент начала разложения экзотермического разложения эмульсии при втекании в пору; ρ_i — удельная масса j-твердого продукта взрыва.

Согласно первому закону термодинамики при расширении продуктов взрыва единицы массы ВВ выполняется равенство:

$$\Delta E = Q_V + A_{cov}, \tag{2.21}$$

где ΔE - изменение полной удельной энергии продуктов взрыва при их расширении; Q_V - удельная теплота взрыва; $A_{c m}$ - работа, затраченная на сжатие продуктов взрыва, образующихся при взрывном разложении единицы массы BB.

В случае ЭВВ имеем
$$\Delta E = \Delta U_{men_{i}}^{2a_{3}} + \Delta U_{men_{i}}^{m_{6}} + W_{\kappa uh}^{ra_{3}} + W_{\kappa uh}^{m_{6}},$$
 (2.22)

где ΔU_{menn}^{ca3} , ΔU_{menn}^{me} - изменение тепловой энергии газовых и твердофазных продуктов взрыва, соответственно; $W_{\text{кин}}^{\text{газ}}$, $W_{\text{кин}}^{me}$ - кинетическая энергия, приобретенная газовыми и твердофазными продуктами взрыва, соответственно.

$$A_{c,k} = A_{c,k}^{2a3} + A_{c,k}^{me}, \qquad (2.23)$$

где $A_{c, m}^{cas}$, $A_{c, m}^{me}$ - работа, затраченная на сжатие газообразных и твердофазных продуктов взрыва, образующихся при взрывном разложении единицы массы BB.

Зависимость P = P(V)для газообразных продуктов взрыва задана выражением (2.8).

Зависимость P = P(V)для твердофазных продуктов взрыва описываем уравнением Тэта [19, 231]:

$$P = \frac{\rho_{oj} (c_{oj}^{38})^2}{n_j} \left(\left(\frac{\rho_j}{\rho_{oj}} \right)^{n_j} - 1 \right), \tag{2.24}$$

где ρ_{oj} , ρ_j - начальная и текущая плотности j-твердофазного вещества; c_{oj}^{36} - объемная скорость звука при плотности ρ_{oj} ; n_j - параметр Тэта для j-твердофазного вещества ($j=0,1,2,...N^*$, где N^* - количество твердофазных веществ).

В соответствии с принятой схемой детонации ЭВВ массовая скорость продуктов взрыва за фронтом детонационной волны будет равна [44, 149]

$$W = \frac{D}{k+1} + U, (2.25)$$

а измеряемая скорость детонации - $D_* = D + U$. (2.26)

В случае, если $V_{{\scriptscriptstyle {\it KOHe}}{\scriptscriptstyle {\it V}}{\scriptscriptstyle {\it KOHe}}{\scriptscriptstyle {\it V}}{\scriptscriptstyle {\it K}}}>> V_*$, имеем:

$$\Delta U_{menn}^{2a3} = \frac{P_{H}V_{H}}{k-1} - \frac{P_{*}V_{*}}{k-1} + \frac{P_{*}V_{*}}{\gamma - 1}. \tag{2.27}$$

Учитывая (2.8), на основании (2.23), (2.27), получаем

$$\Delta U_{men\pi}^{2a3} = \frac{D^2}{k+1} \left(\frac{k}{k^2 - 1} + \frac{k - \gamma}{(k-1)(\gamma - 1)} \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \left(\frac{1}{K_+ \rho_o^{2a3} \alpha} \right)^{k-1} \right). \tag{2.28}$$

Для определения теплоемкости твердофазных веществ используем правило Дюлонга-Пти. Тогда

$$\Delta U_{menn}^{mg} = \frac{3R(T_B - T_o)}{G} \sum_j f_j \xi_j.$$
 (2.29)

Учитывая (2.17), (2.19) и (п.2.29), получаем

$$\Delta U_{menn}^{me} = \frac{3Q_V}{\overline{C}\Delta b} \sum_j f_j \xi_j.$$
 (2.30)

Для твердофазных продуктов взрыва имеем

$$W_{\kappa u \mu}^{m 6} = \frac{1}{2} W^{2} \sum_{j} \beta_{j} = \frac{D^{2}}{2(k+1)^{2}} \left(1 + (k+1) \frac{U}{D} \right)^{2} \sum_{j} \beta_{j}.$$
 (2.31)

Удобнее определять величину $A_{c\kappa}^{ras}$ - $W_{\kappa u \mu}^{ras}$. Имеем

$$A_{cx}^{ra3} - W_{kuh}^{ra3} = \frac{P_f}{2} \left(V_{oo}^{ra3} - V_{H} \right), \qquad (2.32)$$

где $P_f = \rho_{oo} D_* W$ - фронтальное детонационное давление; (2.33)

 $V_{oo}^{zax} = \frac{1}{\rho_{oo}^{zas}}$ - начальный удельный объем BB.

Легко видеть, что
$$\rho_{oo}^{za3} = \rho_{oo} \frac{1 - \sum_{j} \beta_{j}}{1 - \rho_{oo} \sum_{j} \frac{\beta_{j}}{\rho_{j}}},$$
 (2.34)

где ρ_{oo} - начальная плотность BB.

На основании (2.32) – (2.34) получаем

$$\mathbf{A}_{\text{CW}}^{\text{Ta3}} - \mathbf{W}_{\text{KUH}}^{\text{Ta3}} = \frac{D^{2}}{2(k+1)^{2}} \cdot \frac{1 - \rho_{oo} \sum_{j} \frac{\beta_{j}}{\rho_{j}}}{1 - \sum_{j} \beta_{j}} \cdot \left(1 + k \left(1 - \frac{\rho_{oo}}{\rho_{o}} \cdot \frac{1 - \rho_{o} \sum_{j} \frac{\beta_{j}}{\rho_{j}}}{1 - \rho_{oo} \sum_{j} \frac{\beta_{j}}{\rho_{j}}}\right)\right) \cdot \left(1 + (k+2)\frac{U}{D} + (k+1)\frac{U^{2}}{D^{2}}\right)$$
(2.35)

Работа по сжатию твердофазных продуктов детонации

$$A_{conc}^{m6} = -\int PdV . ag{2.36}$$

Исходя из (2.24) и (2.36) получаем

$$A_{c,\infty}^{m_{\theta}} = \sum_{j} \frac{\beta_{j} (c_{j}^{3\theta})^{2}}{n_{j}} \left(\frac{1}{n_{j} - 1} \left(\left(\frac{\rho_{j}}{\rho_{oj}} \right)^{n_{j} - 1} - 1 \right) + \frac{\rho_{j}}{\rho_{oj}} - 1 \right). \tag{2.37}$$

Оценим величину $A_{c \infty}^{m e}$ для ЭВВ «Украинит ПП-2». В продуктах взрыва данного ВВ - 10,8% окиси кальция. Принимая P=10 ГПа; $\rho_{CaO}=2500$ кг/м3; $c_{3e}^{CaO}\approx 3500$ м/с; $n_{CaO}=4$, находим:

 $A_{c x c}^{m e} = 170 \ \mathrm{KДж/кг}{<<}2500{-}3000 \mathrm{KДж/кг}$ (теплота взрыва ЭВВ).

Таким образом,
$$A_{c,\kappa}^{ms} \ll Q_V$$
. (2.38)

На основании (2.21), (2.23), (2.26) - (2.28), (2.31), (2.35), пренебрегая сжимаемостью твердофазных продуктов взрыва, получаем уравнение сохранения энергии для продуктов взрыва ЭВВ:

$$\frac{Q_{V}}{D^{2}}(1-\frac{3\sum_{j}f_{j}\xi_{j}}{\bar{c}\Delta b}) = \frac{1}{2(k+1)} \left\{ -\frac{1}{k+1} \left(\frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{k}{k+1} \right)^{k} \left(\frac{1}{K_{+}\alpha\rho_{0}^{2\alpha 3}} \right)^{(k-1)} + \frac{\sum_{j}\beta_{j}}{k+1} \left(1+(k+1)\frac{U}{D} \right)^{2} - \frac{1}{k+1} \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} \right) \left(\frac{1}{1+k} - \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{0}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{0}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{00}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{0}} - \frac{1}{\rho_{00}} \right) \right) \left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_{00}$$

Величина U/D определяется на основе законов сохранения массы и импульса. Пренебрегая начальным давлением в среде по сравнению с детонационным давлением, из законов сохранения массы и импульса получаем [19]

$$W = \sqrt{P_f(V_{oo} - V_{CJ})}, (2.40)$$

где V_{CJ} - удельный объем продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге.

Исходя из (2.39), (2.29), (2.30) и (2.33), получаем

$$\frac{\mathbf{U}}{\mathbf{D}} = \frac{k}{k+1} \cdot \frac{\rho_{CJ}}{\rho_{oo}} - 1, \tag{2.41}$$

где $\rho_{CJ} = V_{CJ}^{-1}$ - плотность продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге.

Плотность продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге равна

$$\rho_{CJ} = \frac{1}{1 - \sum_{j} \beta_{j}}, \qquad (2.42)$$

$$\frac{1}{\rho_{CJ}^{2a3}} + \sum_{j} \frac{\beta_{j}}{\rho_{j}^{CJ}}$$

где ρ_{CJ}^{za3} , $\rho_{\rm j}^{\rm CJ}$ - плотность взрывных газов и твердофазного ј-вещества в точке Чепмена-Жуге, соответственно.

Плотность взрывных газов в точке Чепмена-Жуге равна

$$\rho_{\text{CJ}}^{2a3} = \frac{\mathbf{k} + 1}{\mathbf{k}} \rho_o^{2a3} = \frac{\mathbf{k} + 1}{k} \cdot \frac{\rho_o \left(1 - \sum_j \beta_j \right)}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}, \tag{2.43}$$

В соответствии с (2.24) можно записать, что

$$\rho_i^{\text{CJ}} = \varphi_i \rho_i, \qquad (2.44)$$

где $\varphi_{\rm j} = \left(1 + \frac{n_{j} P_{f}}{\rho_{j} \left(c_{j}^{\,_{36}}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{{\rm n}_{\rm j}}}$ - коэффициент уплотнения твердофазного j-вещества в точке

Чепмена-Жуге.

На основании (2.41) — (2.44) получаем зависимость для определения величины $\frac{\text{U}}{\text{D}}$:

$$\frac{\mathbf{U}}{\mathbf{D}} = \frac{\rho_o}{\rho_{oo}} \cdot \frac{1}{1 + \rho_o \left(\frac{\mathbf{k} + 1}{k} \sum_{j} \frac{\beta_j}{\varphi_j \rho_j} - \sum_{j} \frac{\beta_j}{\rho_j}\right)} - 1.$$
(2.45)

В случае пренебрежения сжимаемостью твердофазных продуктов взрыва $(\phi_{j} \approx 1 \text{ при любых } j)$

$$\frac{U}{D} = \left(\left(\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0} \right) k - \sum_{i} \frac{\beta_i}{\rho_i} \left(\frac{k}{\rho_0} + \sum_{i} \frac{\beta_i}{\rho_i} \right)^{-1} \right). \tag{2.46}$$

На основании (2.19) скорость детонации (без учета скорости сноса U) равна:

$$D^{2} = \frac{2(k+1)Q_{V}}{\overline{C}(1 - \frac{k+1}{k}\alpha\rho_{0}^{2a3})(1 - \sum_{i}\beta_{j})}.$$
 (2.47)

Давление газообразных продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге может быть найдено по формуле

$$P_{H} = \frac{\rho_{o}^{2a3}}{k+1} D^{2} . \tag{2.48}$$

Формула (2.48) позволяет определять начальное детонационное давление, как в случае наличия в ЭВВ инертных добавок из твердых веществ (например – стеклянные микросферы), так и в случае образования твердых инертных веществ в результате химических реакций при взрыве ЭВВ. Сравнение результатов расчета начального детонационного давления по формуле (2.48) и формуле для определения начального детонационного давления при взрыве смесевых ВВ с инертными добавками, предложенной в работе [38], показало, что результаты расчетов отличаются менее, чем на 1%.

В случае ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, ρ_o определяется из уравнения [45, 58, 65]

$$\rho_o = z\rho_{00} + (1 - z)\rho_{00} \tag{2.49}$$

где z - отношение пористости ЭВВ в момент начала взрывного разложения к начальной пористости.

Таким образом, задача определения детонационных параметров ЭВВ будет решена, если будет известна плотность ρ_o , которую в дальнейшем будем наименовать характеристической.

2.3. Определение характеристической плотности ЭВВ

При определении характеристической плотности ЭВВ ρ_o следуем работам [45, 48, 58, 62, 65, 150, 267], принимая, что:

эмульсия почти на 90% внутреннего объема представлена окислительной фазой;

разогрев вещества эмульсии при втекании в поры происходит как за счет вязкого трения, так и под действием тепла разогретых при сжимании газов, заполняющих поры.

В результате разогрева начинается экзотермическое разложение аммиачной селитры (АС), которая является как основным компонентом окислительной фазы, так и наименее стойким к повышению температуры веществом, способным при ЭТОМ К автокаталитическому экзотермическому разложению. Согласно выполненных нами исследований по изучению изменений свойств АС при изменении температуры методом синхронного термического анализа (одновременное выполнение дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа), а также данных, изложенных в работах [127, ACинтенсивное автокаталитическое разложение начинается при достижении температуры селитры 520-530°К.

Результаты синхронного термического анализа представлены в Приложении 1. Начало автокаталитического разложения АС сопровождается выделением тепла и резким возрастанием давления газа в порах.

Учитывая вышесказанное, ρ_o будем определять из условия достижения температуры эмульсии, втекающей в поры, величины $T_{AC}^* = 250^{\circ} \text{C}$ (523°K). При этом в зависимости от структурных особенностей эмульсии существует два варианта развития в ней деформаций.

Первый. Окислительная фаза собой представляет бесструктурную однородную субстанцию - раствор. Тогда деформация эмульсии описывается непрерывного сдвигового деформирования законами вещества. Разогрев втекающего в пору вещества происходит вследствие вязкого трения. При этом происходит объемное нагревание втекающей в пору эмульсии. Распределение температуры внутри втекающей в пору эмульсии будет характеризоваться монотонной функцией.

Второй. Окислительная фаза представляет собой вещество, имеющее внутреннюю структуру. Этот вопрос требует дополнительного обсуждения.

Возможность наличия в окислительной фазе определенной структуры следует из анализа ее образования. Окислительная фаза обычно представляется пресыщенным водным раствором AC (AC + натриевая селитра, AC + кальциевая

селитра), где массовая доля воды составляет 12-20%. Однако диссоциации

селитры (селитр) в этом случае не происходит. Действительно, рассмотрим стандартный раствор аммиачной селитры, применяемый качестве окислительной фазы бестарного ЭВВ. Массовая доля NH_4NO_3 в стандартном растворе составляет 80% [127]: $NH_4NO_3+1,111H_2O$. Соотношение количества молекул $N\!H_4N\!O_3$ и H_2O равно $\frac{N_{N\!H_4N\!O_3}}{N_{H_2O}}=$ 0,9. При данном соотношении диссоциация аммиачной селитры на ионы не протекает (т.к. диссоциация возможна в случае, если координационное число не меньше 4 [168], а в нашем случае оно равно 1,11). Поэтому в окислительной фазе эмульсии следует ожидать значительного количества чрезвычайно мелких кристалликов аммиачной селитры. В этом случае при втекании эмульсии под действием ударной волны в газовую пору может наблюдаться разбитие ее потока на дискретные слои. Деформация вещества эмульсии происходит по локализованным втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных слоев (наблюдается аналогия со сдвиговой деформацией сыпучих сред по механизму, описанному в работе [246]).

Рассмотрим данные вопросы подробнее.

1. При непрерывном сдвиговом деформировании эмульсия моделируется несжимаемой вязкой жидкостью, втекающей в пору. Данная задача в случае определенных допущений имеет точное аналитическое решение.

Рассмотрим находящуюся в жидкости пору радиуса R_o с внутренним давлением газа в поре P_o .

В среде неожиданно возникает давление $P > P_o$. Под действием данного давления жидкость начинает втекать в пору. Рассмотрим предварительно сферически симметричный процесс.

Положим, что выполняются следующие условия:

$$P >> P_o; \ \rho_{zas} << \rho_s; \ \frac{2\sigma}{R} << P; \ \frac{\eta}{\rho R} \sqrt{\frac{\rho_s}{P}} < 0.119,$$
 (2.50)

где ρ_{zas} - плотность газа внутри поры; σ и η - поверхностное натяжение и сдвиговая вязкость эмульсии, соответственно. Последнее условие в (2.50) — это условие (1.1) для реализации гидродинамического режима схлопывания поры.

Введем обозначения:

v(R) - радиальная скорость движения частицы среды на расстоянии R от центра поры;

r - радиус от центра поры до произвольной точки в объеме эмульсии;

 au^{ij} , e_{ij} - компоненты тензора вязких напряжений и скоростей деформации (i,j-индексы координат $\{r, \varphi, \theta\}$);

 $\Delta T_* = T_{AC}^* - T_o$ — необходимое приращение температуры эмульсии до момента начала экзотермического разложения наименее стойкого компонента эмульсии (аммиачной селитры);

 T_{p} - температура на границе эмульсия - газ, заполняющий пору;

z — относительная пористость ЭВВ ($z = \frac{\chi}{\chi_0}$, χ_0 — начальная пористость ЭВВ, χ —

пористость ЭВВ в момент начала экзотермического разложения аммиачной селитры);

 ΔT - изменение температуры эмульсии под действием сил внутреннего трения;

 $\Delta T_{cp} = T_{cp} - T_{o}$ - изменение температуры эмульсии под действием тепла разогретых при сжимании газов, заполняющих поры;

 $T_{\it ep}\,$ - температура границы раздела эмульсия-газ.

Очевидно, что
$$\Delta T_* = \Delta T_{cp} + \Delta T_o. \tag{2.51}$$

Из условия несжимаемости среды
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} + 2\frac{\mathbf{v}}{r} = 0$$
 (2.52)

определяем
$$v(r) = v(R) \frac{R^2}{r^2}$$
. (2.53)

Мощность выделяемого в сферическом слое [R; R+dR] тепла равна [195]

$$\frac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{dt}} = \int_{R}^{R+dR} \tau^{ij} e_{ij} \cdot 4\pi r^2 dr . \tag{2.54}$$

В силу сферической симметрии тензора скоростей деформаций и вязких напряжений имеют диагональный вид, при этом:

$$e_{rr} = \frac{\partial v}{\partial r} ; e_{\varphi\varphi} = e_{\theta\theta} = \frac{v}{r};$$
 (2.55)

$$\tau_{rr} = 2\eta e_{rr}; \ \tau_{\varphi\varphi} = 2\eta e_{\varphi}; \ \tau_{\theta\theta} = 2\eta e_{\theta\theta}.$$
 (2.56)

На основании (2.16) - (2.19) получаем

$$\frac{\mathrm{d}^2 Q}{\mathrm{d}t \mathrm{d}R} = 48\pi \eta v_R^2 , \qquad (2.57)$$

где $v_r = v(R)$.

Выделившееся тепло идет на разогрев эмульсии, т.к. сжатие микропор в сильной ударной волне происходит практически без потерь тепла из-за теплопроводности [195]:

$$dQ = \rho_3 c_3 \Delta T \cdot 4\pi R^2 dR. \qquad (2.58)$$

Исходя из (2.57) и (2.58), получаем /(2.58) дифференцируем по dt используем равенство $v_R = \frac{dR}{dt}$ /

$$v(R) = \frac{\rho_{3}c_{3}\Delta T}{6\eta}R. \qquad (2.59)$$

Согласно [195] при выполнении условий (2.50) скорость схлопывания поры при сферически симметричном втекании вещества определяется уравнением

$$v_{\pi} = \sqrt{\frac{2P}{3\rho_{\text{out}}} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}, \qquad (2.60)$$

 $\Gamma Д e \frac{R^3}{R_o^3} = z.$

На основании (2.59), (2.60) величина z при сферически симметричном втекании вещества в пору (пузырек) определится из уравнения

$$z^{-\frac{5}{3}} - z^{-\frac{2}{3}} = \frac{3\rho_{9}}{2P_{f}} \left(\frac{\rho_{9}c_{9}\Delta TR_{0}}{6\eta}\right)^{2}.$$
 (2.61)

Согласно оценкам, сделанным в п.2.1, и экспериментальным данным, приведенным в работе [253], затекание вещества в поры осуществляется в

асимметричном режиме. Поэтому необходимо учитывать наличие начальной

массовой скорости втекания (скорость движения вещества вслед за фронтом детонационной волны $\frac{D}{k+1}+U$ [44, 149]) и особенности схлопывания пор. Уменьшение геометрических размеров пор происходит в виде «сплющивания» (уменьшаются размеры поры вдоль оси параллельной скорости детонационной волны) [253]. Тогда, полагая, что приращение скорости вещества при втекании будет определяться формулой (2.61), имеем

$$\frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left(\frac{1}{z} - 1\right)} \cong z \left(\frac{\rho_s c_s \Delta T R_0}{6\eta}\right). \tag{2.62}$$

Величина ΔT определяется из уравнения (2.51):

$$\Delta T = T_{AC}^* - T_{zp}, \qquad (2.63)$$

где $T_{AC}^* = 523 \text{ K}$ - температура начала автокаталитической реакции разложения аммиачной селитры.

Согласно [36]
$$T_{zp} = \frac{T_o + k_{\varepsilon} T_u}{1 + k_{\varepsilon}}$$
, (2.64)

где T_u — температура газа на границе раздела эмульсии — газ; k_ε - коэффициент относительной термоактивности в системе «газ-эмульсия».

$$k_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\lambda_1 C_{1V} \rho_1}{\lambda_3 c_3 \rho_3}}, \qquad (2.65)$$

где λ_1, C_{1V} , ρ_1 - коэффициент теплопроводности, средняя теплоемкость и плотность газов в поре (в ударной волне); λ_3 , c_3 , ρ_3 - коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность эмульсии.

Температура газа на границе раздела эмульсии – газ равна [144]

$$T_u = T_o + \frac{v^2}{2C_{vv}}, {2.66}$$

где V - скорость втекания эмульсии в пору.

Величину ρ_1 примем равной [19]

$$\rho_{1} = \rho_{1}^{o} \frac{\gamma_{1} + 1}{\gamma_{1} - 1}, \tag{2.67}$$

 $(\rho_1^o$ - начальная плотность газов в поре).

Коэффициент теплопроводности газов, заполняющих пору, определяем на основании уравнения Сатерленда для вязкости газов и известного соотношения $\lambda = \varepsilon \eta_z C_V \,, \, \text{где} \quad \varepsilon = \frac{1}{4} \bigg(\frac{9C_p}{C_V} - 5 \bigg), \, C_p \, - \, \text{теплоемкость газа при постоянном давлении,}$ $\eta_z \text{--} \, \text{вязкость газа} \, [120]$

$$\lambda_{1}(T_{u}) = \sum_{i} a_{i} \lambda_{i}(T_{o}) \cdot \frac{T_{o} + C_{iS}}{T_{u} + C_{iS}} \cdot \left(\frac{T_{u}}{T_{o}}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1 + \frac{4}{9} \overline{C_{iV}}(T_{u})}{1 + \frac{4}{9} \overline{C_{iV}}(T_{o})}, \qquad (2.68)$$

где i - индекс нумерации газа, входящего в состав газовой смеси, содержащейся в поре; a_i - массовая доля і-газа; $\lambda_i(T_o)$ - коэффициент теплопроводности і-газа при температуре T_o ; C_{iS} - постоянная Сазерленда і-газа; $\overline{C_{iV}}(T)$ - относительная теплоемкость при постоянном объеме і-газа при температуре T.

Значения $\overline{C_V}(T)$ находятся по формулам Эйнштейна [19]. Искомое значение характеристической плотности определится из уравнения (2.49)

2. Режим дискретного сдвигового деформирования вещества .

При втекании эмульсии под действием ударной волны в газовую пору наблюдается разбитие ее потока на дискретные слои. Деформация вещества эмульсии происходит по локализованным слоям втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных слоев. Между берегами слоев возникают значительные силы трения, что обуславливает быстрое нагревание вещества, примыкающего к трущимся поверхностям (происходит «чирканье» мельчайших кристаллов аммиачной селитры друг о друга).

Наблюдается аналогия между представляемым механизмом разогрева вещества эмульсии под действием ударной нагрузки с представлениями о

начальном разогреве твердых индивидуальных ВВ при их ударном инициировании [16, 87].

В этом случае при деформации данной среды в ней не реализуется режим непрерывного сдвигового деформирования вещества, при котором температура втекающей эмульсии является монотонной функцией пространственных координат.

Согласно [33, 158] изменение температуры вещества на поверхности соприкосновения двух трущихся между собой тел из одинакового вещества равно

$$T - T_o = \frac{2q_s}{\lambda_{AC}} \sqrt{\frac{\lambda_{AC}t}{\pi p_{AC}c_{AC}}}, \qquad (2.69)$$

где t - время взаимодействия; ρ_{AC} , λ_{AC} , c_{AC} - плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость аммиачной селитры соответственно; q_s - мощность источника тепла на границе соприкосновения

 $(q_s = \mu_{mp} N_* v_*, \mu_{mp}$ - внутренний коэффициент трения аммиачной селитры, N_* - нормальное давление, v_* - относительная скорость скольжения).

Рассмотрим частицу дисперсной фазы эмульсии, которую пересекает трещина сдвига. Пусть \mathbf{w}_* - массовая скорость данной частицы. Тогда

$$V_* = W_* \frac{\Delta}{R_o} \quad \text{M} \quad N_* = \frac{\rho_{_9} V_*^2}{2} \,.$$
 (2.70)

На основании (2.69) и (2.70) определяем значение времени \mathfrak{t}_* , когда температура поверхности берегов трещины сдвига достигнет величины $T_{\scriptscriptstyle AC}^*$:

$$t_* = \frac{4\pi\lambda_{_{3}}c_{_{9}}(T_{AC}^* - T_{_{zp}})^2}{\mu_{mn}^2\rho_{_{2}}W_*^6} \left(\frac{R_o}{\Delta}\right)^6.$$
 (2.71)

Полагая, что
$$W_* = \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_{\rm f}}{3\rho_{\rm a}} \left(\frac{1}{\rm z} - 1\right)}$$
, из (2.71) получаем

$$t_* = \frac{4\pi \left(T_{AC}^* - T_{zp}\right)^2 \lambda_{AC} c_{AC}}{\mu_{mp}^2 \rho_{AC} \left(\frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_g} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}\right)^6} \left(\frac{R_o}{\Delta}\right)^6.$$
 (2.72)

Учитывая ассиметричность втекания вещества в пору, получаем следующее уравнение, для определения *z*:

$$z \cong 1 - \frac{\frac{D}{k+1} + U + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}}{2R_o} \cdot t_*$$
 (2.73)

Величина ρ_o для ЭВВ вычисляется по формуле (2.49).

Для выбора модели деформирования вещества эмульсии при оценке величины ρ_{\circ} необходимо более детально рассмотреть структуру окислительной фазы эмульсии.

2.4. Особенности структуры эмульсии

При освещении данного вопроса исходим из результатов работ [49, 61, 268].

В предыдущем параграфе представлены две оценки величины ρ_0 , полученные из представлений, что

окислительная фаза представляет собой бесструктурную однородную субстанцию - раствор. В этом случае деформация эмульсии описывается законами непрерывного сдвигового деформирования вещества, а распределение температуры во втекающей в пору эмульсии будет монотонным. Разогрев втекающего в пору вещества происходит вследствие вязкого трения;

окислительная фаза представляет собой вещество, содержащее значительное количество чрезвычайно мелких кристалликов аммиачной селитры. В этом случае при втекании эмульсии в пору может происходить разбитие потока на локализованные слои. Разогрев вещества будет происходить по контакту слоев.

Рассмотрим экспериментальные данные, приведенные в работах [49, 61, 123, 268] и позволяющие сделать предпочтение второй модели окислительной фазы эмульсии.

2.4.1. Результаты турбидиметрических исследований

В работе [123] описан следующий опыт. Исследовалась эмульсия на основе аммиачной и кальциевой селитр. Соотношение компонентов эмульсии следующее: $(NH_4NO_3 - 43,0 \%, Ca(NO_3)_2 - 30,0 \%, H_2O - 18 \%, ДТ - 6,0 \%, эмульгатор – 3,0 %).$

Готовили раствор: навеску эмульсии в количестве 1,1 г вводили в 100 мл ССІ₄, затем полученную смесь разбавляли тем же растворителем еще в 55 раз. Фоновый раствор получали аналогичным образом, используя навеску компонентов масляной фазы в количестве 0,1 г.

Полученный раствор изучали на предмет наличия твердой дисперсной фазы и ее размеров турбидиметрическим методом. Турбидиметрический (от лат. turbidus – мутный) - метод основанный на сравнении интенсивностей света определённой длины волны, проходящего через кювету, содержащую коллоидный раствор, чаще всего через суспензию, образованную частицами вещества, размеры которых определяются с интенсивностью света, проходящего через кювету с фоновым раствором.

В результате измерений было определено, что средний размер частиц, на которые в четыреххлористом углероде распалась эмульсия, составляет 35,2 нм.

2.4.2. Результаты рентгенографических исследований

В работе [127] представлены результаты рентгенографического исследования аммиачной селитры и аммиачно-селитренной эмульсии. На дифрактометре ДРОН-3М изучалась дифракционная картина рассеяния на указанных веществах. Результаты исследований приведены на рис. 2.1.

Для расширения данных по рентгеноструктурному анализу вещества эмульсии нами дополнительно на дифрактометре D8 Discover фирмы "BRURERAXS GbmH" (Германия) изучалась дифракционная картина рассеяния рентгеновского излучения [49, 268]:

сухой аммиачной селитры; охлажденного до 25° С 80% водного раствора аммиачной селитры; аммиачно-селитренной эмульсии.

Результаты исследований приведены на рис. 2.2 и 2.3. На рис. 2.3 красным цветом обозначены данные по сухой аммиачной селите, а зеленым - 80% водного раствора аммиачной селитры.

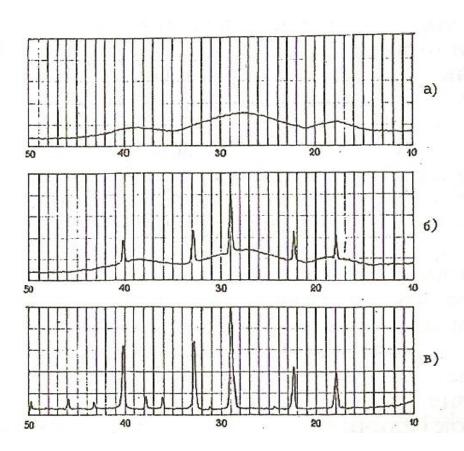


Рис. 2.1. Дифрактограммы эмульсии [127, с. 283]:

- а) Сразу после приготовления;
- б) В процессе старения;
- в) Справочная дифрактограмма аммиачной селитры.

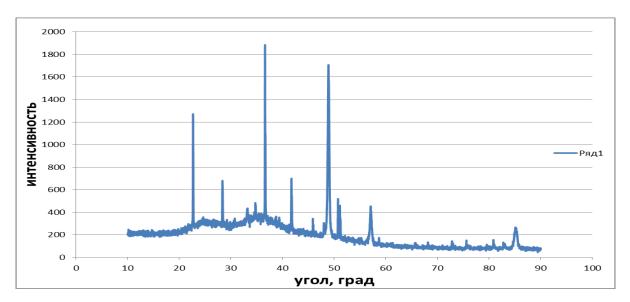


Рис.2.2. Дифрактограмма матричной эмульсии с окислительной фазой на основе аммиачной селитры.

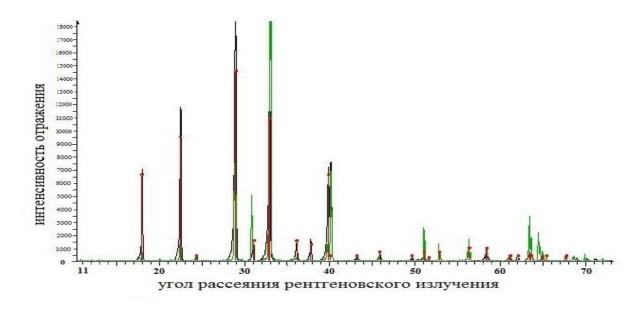


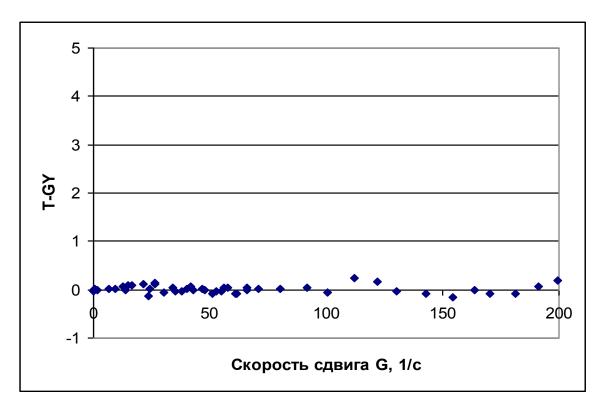
Рис.2.3. Дифрактограмма сухой аммиачной селитры и охлажденного до $25\,^{\circ}\,\mathrm{C}$ 80% водного раствора аммиачной селитры.

На дифрактограммах, представленных на рис. 2.1-2.3, на оси ординат указана интенсивность отражения (рефлекс), а на оси абсцисс — угол рассеяния рентгеновского излучения.

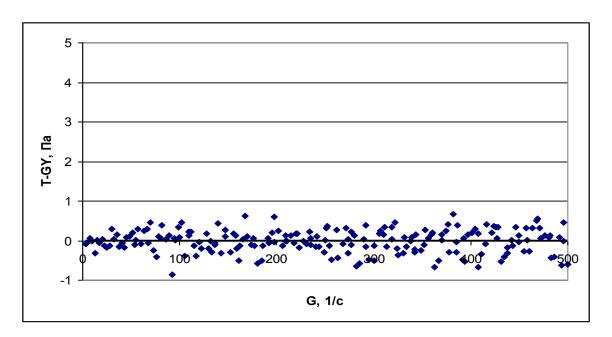
2.4.3. Результаты реологических исследований

Эксперименты [60] проводились с помощью реометра ротационного модели НААКЕ MARS фирмы «Thermo Electron» (Германия), который оборудован рабочими узлами «цилиндр-цилиндр» и «конус-плита», жидкостным термостатом и воздушным безмасляным компрессором. Точность измерений составляет 1 % отн. Реометр позволял изучать поведение эмульсий в диапазоне скоростей сдвига от $2 \cdot 10^{-4} \, \text{ c}^{-1} \,$ до $500 \, \text{ c}^{-1} \,$ при различных температурах образцов.

Ниже представлены характерные зависимости для эмульсии на основе аммиачной селитры $/NH_4NO_3 - 75,44$ %, H_2O - 16,56 %, ДТ - 7 %, эмульгатор -1,0 %, размер частиц эмульсии 3,6 мкм/ (рис. 2.4A, 2.5A) и для эмульсий на основе аммиачной и кальциевой селитр $/NH_4NO_3 - 50$ %, $Ca(NO_3)_2$ - 25 %, H_2O - 16 %, ДТ - 7 %, эмульгатор -1 %, размер частиц эмульсии 8 мкм/ (рис. 2.4Б, 2.5Б).



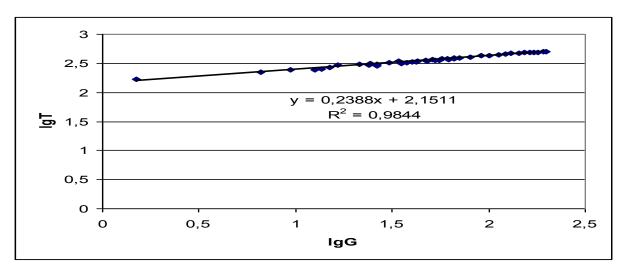
А). Эмульсия на основе аммиачной селитры



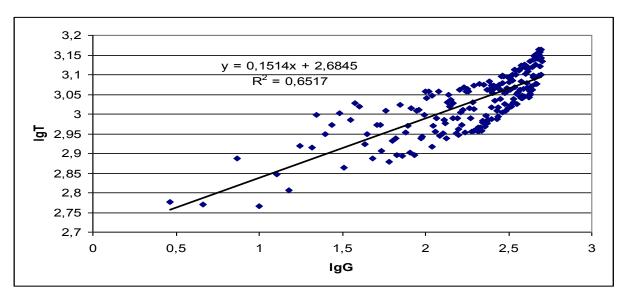
Б). Эмульсия на основе аммиачной и кальциевой селитр

Рис. 2.4. Зависимость разности напряжений сдвига (T) и величины (G·Y) от скорости сдвига (G) при температуре эмульсии $20{,}00 \pm 0{,}25$ °C

На рис. 2.4 представлена зависимость разности напряжений сдвига (T) и вязкости (G·Y) от скорости сдвига (G) (разность T- G·Y равна предельному напряжению сдвига в законе Бингама-Шведова). Y – коэффициент динамической структурной вязкости.



А). Эмульсия на основе аммиачной селитры



Б). Эмульсия на основе аммиачной и кальциевой селитр

Рис. 2.5. Логарифмическая зависимость напряжений сдвига (T) от скорости сдвига (G) при температуре эмульсии $20{,}00 \pm 0{,}25$ °C

На рис. 2.5 представлена логарифмическая зависимость напряжений сдвига (Т) от скорости сдвига (G) (позволяет найти константы в уравнении Оствальда-Рейнера).

2.4.4. Модель структуры окислительной фазы

Представление, что окислительная фаза представляет собой бесструктурную однородную субстанцию, не позволяет объяснить вышеприведенные экспериментальные факты. Необходима модель окислительной фазы, позволяющая объяснить опытные данные.

При построении модели среды исходим из того, как уже отмечалось в п.2.2, что в пресыщенных растворах NH_4NO_3 или смесях растворов NH_4NO_3 с нитратами различных металлов (массовая доля основного окислителя NH_4NO_3 составляет 50-95 %, а другие соли добавляются не более 40 % от его массовой доли), диссоциации селитры (селитр) не происходит.

Рассмотрим следующую модель окислительной фазы ЭВВ (модель вещества эмульсии представлена на рис. 2.6.Б; фотография микроструктуры ЭВВ представлена на рис. 2.6.А) [49, 61, 268].

Среда представляется смесью частиц селитр, поверхность которых покрыта мономолекулярным слоем H_2O .

Определим средний размер данной частицы. Пусть R_{C} - осредненный радиус объема, занимаемого молекулой селитры. Тогда

$$\frac{\overline{\mu}}{\overline{\rho}} = N_A \frac{4}{3} \pi R_C^3, \qquad (2.74)$$

где $\overline{\mu}$ - средняя молекулярная масса; $\overline{\rho}$ - средняя плотность частицы; N_A - число Авогадро.

Объем частицы равен:

$$V_{NK} = \frac{4}{3}\pi n_1 R_C^3 = \frac{4}{3}\pi R_{NK}^3, \qquad (2.75)$$

где n_1 - количество молекул селитры в частице; $R_{\scriptscriptstyle NK}$ - радиус частицы.

Имеем:
$$R_{NK} = (n_1)^{\frac{1}{3}} R_C$$
. (2.76)

Обозначим через R_{H_2O} и n_2 - характерный радиус объема, занимаемого молекулой H_2O в воде, и количество молекул H_2O на поверхности частицы, соответственно.

Исходя из рассматриваемой модели, получаем

$$4\pi R_{NK}^2 = n_2 R_{H,O}^2 \tag{2.77}$$

На основании (2.74), (2.76) и (2.77) имеем

$$n_{1} = \left(4\pi\right)^{3} \left(\frac{N_{C}}{N_{H_{2}O}}\right)^{3} \left(\frac{\overline{\mu}}{\mu_{H_{2}O}} \frac{\rho_{H_{2}O}}{\overline{\rho}}\right)^{2}, \tag{2.78}$$

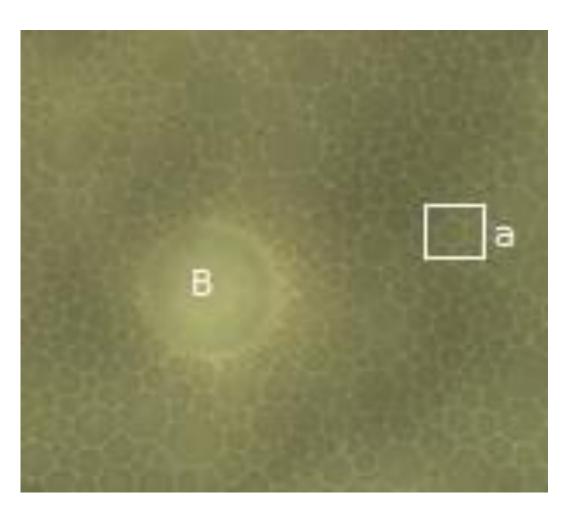
где N_C , N_{H_2O} - число молей селитр и воды в окислительной фазе ЭВВ соответственно; μ_{H_2O} - молекулярная масса воды; ρ_{H_2O} - плотность воды/

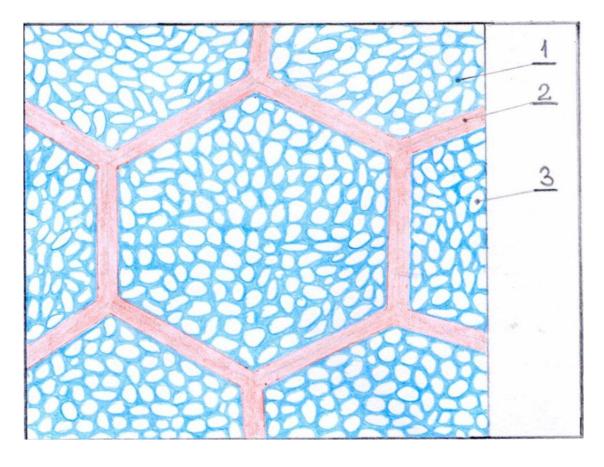
Исходя из (2.74), (2.76) и (2.78) получаем:

$$D_{NK} = 8\pi \left(\frac{N_C}{N_{H_2O}}\right) \left(\frac{\bar{\mu}}{\mu_{H_2O}} \frac{\rho_{H_2O}}{\bar{\rho}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\bar{\mu}}{N_A \bar{\rho}}\right)^{\frac{1}{3}},$$
(2.79)

где $D_{\mathit{NK}} = 2R_{\mathit{NK}}$ - диаметр частицы.

В качестве примера определим размер частицы монораствора аммиачной селитры ($N\!H_4N\!O_3+1,111\,H_2O$): $\frac{N_C}{N_{H_2O}}$ =0,9, $\overline{\mu}$ = 80 г/моль, μ_{H_2O} =18 г/моль,





Б).

Рис. 2.6. Структура ЭВВ. А). Фотография ЭВВ (В – газовая пора; **a** – участок эмульсии, представленный на рис. 2.6.Б). Б). Модель вещества эмульсии (участок **a** из рис. 2.6.А). 1 - прожилки воды; 2 - пленки жидкого углеводородного горючего; 3 - нанокристаллы аммиачной селитры

$$\rho_{H_2O}=1$$
 г/см³; $\overline{\rho}=1,6$ г/см³, $N_{\scriptscriptstyle A}=6,02\cdot10^{23}$ моль¹, из (2.7) получаем

 $D_{NK} \approx 13$ HM.

Проанализируем приведенные экспериментальные данные:

1. Турбидиметрический метод

Проверка корректности оценки размеров нанокристаллов в окислительной фазе ЭВВ по формуле (2.79) осуществлялась на основании сравнения расчетных значений данной величины и экспериментальных данных, представленных в работе [123].

Ввиду возможности образования кристаллогидратов кальциевой селитры были проведены опыты для определения состояния воды в ЭВВ. Для этого использовали метод ИК-спектроскопии. На ИК-Фурье спектрометре NICOLET 6700 фирмы «Тhermo» устанавливали приставку НПВО. Снимали спектр сравнения по воздуху. Затем помещали 0,3 г эмульсии (NH_4NO_3 – 43,0 %, $Ca(NO_3)_2$ -30,0 %, H_2O - 16 %, ДТ - 6,0 %, эмульгатор — 3,0 %) на кристалл приставки НПВО и с помощью пресса приставки прижимали образец плотно к кристаллу. Характерный ИК-спектр эмульсии представлен на рис. 2.7. Условия съемки исследуемых образцов и образца сравнения: диапазон сканирования 3700-3000 см⁻¹, разрешение 2 см⁻¹, число сканов 128.

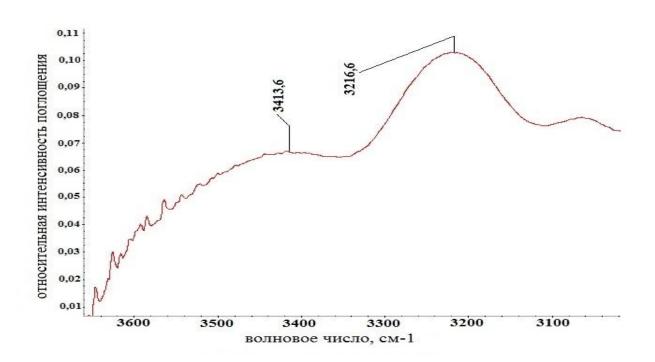


Рис. 2.7. Спектр НПВО в диапазоне частот (3700-3000) см⁻¹ образца эмульсии $(NH_4NO_3 - 43.0\%, Ca(NO_3)_2 - 30.0\%, H_2O_- 16\%, ДТ_- 6.0\%, эмульгатор-3.0\%). Ось абсцисс — волновое число, см⁻¹; ось ординат — оптическая плотность (безразмерная величина).$

Анализ рис.2.7 указывает на смещение валентных симметричных и антисимметричных колебаний молекул чистой жидкой воды (3600 см⁻¹ и 3450см⁻¹

¹) [138] в область меньших частот. Происходит значительное смещение характерных частот до 3413,6 см⁻¹ и 3216,6 см⁻¹. В связи с тем что среднее координационное число в данной системе равно 1,23 < 4, то гидратация селитр не происходит. Поэтому смещение полос поглощения воды можно объяснить только образованием гидратов кальциевой селитры: $Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ и $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$. Образование гидратов в пресыщенных растворах кальциевой селитры также показано в работе [171].

Изучение данной эмульсии методом ИК-спектроскопии показало наличие гидратов $Ca(NO_3)_2 \cdot nH_2O$. Положим, что 50% кальциевой селитры образует $Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$, а 50% - $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$. Тогда для рассматриваемой окислительной фазы имеем: $\overline{\mu} = 115$ г/моль; $\overline{\rho} = 1,8$ г/см³; $\frac{N_C}{N_{H,O}} = 2,11$.

Расчет средних размеров частиц окислительной фазы рассматриваемой эмульсии по уравнению (2.79) дает следующее значение — 36,2 нм, а результаты измерений — 35,2 нм. Наблюдается согласие расчетного и измеренного размера частиц [123] окислительной фазы эмульсии, что подтверждает корректность предлагаемой модели окислительной фазы ЭВВ для объяснения результатов работы [123].

2. Рентгенографический метод

Сравнение дифрактограмм свежеприготовленной эмульсии и хранившейся эмульсии (рис. 2.1.а, рис. 2.1.б) с дифрактограммой поликристаллической аммиачной селитрой (рис. 2.1в) ясно показывает, что максимумы наблюдаемых гало свежеприготовленной эмульсии соответствуют характерным углам отражения поликристаллической аммиачной селитры (рис. 2.1.в). Представление, что пресыщенный раствор является однородной субстанцией, не позволяет объяснить вышеприведенные экспериментальные факты. Это обстоятельство и амплитуда данных максимумов свидетельствуют о том, что окислительная фаза эмульсии содержит значительное количество частиц селитры, находящихся на фазе формирования кристаллической структуры. На данной фазе формирования

различные дислокации оказывают влияние на эффективную величину межплоскостных расстояний [230], что и объясняет само формирования гало вблизи характерных углов отражения.

Таким образом, для объяснения дифрактограмм ЭВВ необходимо положить, что размеры зарождающихся кристалликов селитры в окислительной фазе ЭВВ должны быть достаточно велики, чтобы начала проявляться кристаллическая природа данных частиц, но в то же время размер данных образований не может быть сколько-нибудь значительным ввиду проявления дефектов зарождения кристалла. Выполнение данных условий возможно, если размеры данных зарождающихся кристаллов селитры будут порядка 10-50 размеров молекулы аммиачной селитры, т.е. порядка десяти-тридцати нанометров.

Результаты представленных выше экспериментальных данных свидетельствуют о наличии в окислительной фазе значительного количества кристаллических зародышей аммиачной селитры (селитр) размером порядка десяти нанометров.

Это утверждение согласуется с нашими рентгенографическими исследованиями, выполненными на дифрактометре D8 Discover производства фирмы "BRUKERAXS GmbH" (Германия) [268], представленными на рис. 2.2 и 2.3, при изучении высококонцентрированного раствора аммиачной селитры и эмульсии, с окислительной фазой на основе аммиачной селитры.

3. Метод ротационной вискозиметрии

Анализ реологических свойств изучаемых систем показывает, что при деформировании эмульсий выполняется закономерность

$$T - GY = 0, (2.80)$$

а реологические свойства описываются законом:

$$T = a_* G^{p_*}, (2.81)$$

где $\,a_*\,$ и $\,p_*\,$ - параметры рассматриваемой системы (при этом $\,p_*<1$).

Зависимость (2.81) при $p_* < 1$ отражает подчинение реологических свойств эмульсий закону Оствальда-Рейнера для псевдопластических жидкостей.

Известно [156], что данным законом описывается поведение высококонцентрированных суспензий асимметричных частиц.

Рассматриваемая модель окислительной фазы ЭВВ предполагает, что окислительная фаза является высококонцентрированной суспензией зародышей кристаллов селитры (селитр). При этом зародыши кристаллов аммиачной селитры как раз образуют игольчатые кристаллы. Реологическое поведение высококонцентрированных суспензий асимметричных частиц описывается законом Оствальда-Рейнера, что согласуется с проведенными исследованиями.

Таким образом, экспериментальные данные по изучению структуры ЭВВ турбидиметрическим окислительной фазы И рентгенографическим методами, объясняются представлениями, что окислительная фаза эмульсии ВВ состоит из твердофазных зародышей кристаллов селитры (селитр), покрытых пленками Дополнительным воды. косвенным подтверждением непротиворечивости данных представлений являются результаты ротационной вискозиметрии.

Оценим характер зависимости скорости детонации ЭВВ, сенсибилизированного газовыми порами, от размеров частиц эмульсии для различных моделей определения величины характеристической плотности.

На рис.2.8 представлены зависимости скорости детонации от размеров частиц эмульсии для ЭВВ, сенсибилизированного газовыми порами диаметром 80 мкм и имеющего следующий химический состав: NH_4NO_3 - 51%; $Ca(NO_3)_2$ - 25%; H_2O –16%; топливная фаза (общая) – 8%. Плотность матричной эмульсии – 1,48 г/см³. Плотность ЭВВ – 1,18 г/см³.

Химическая реакция взрывчатого превращения рассчитывалась в соответствии с принципом Бринкли-Вильсона [19]. Расчет теплофизических параметров эмульсии определялся на основании работы [62]. Подробно методика расчета теплофизических параметров приведена в Приложении 2.

В первой модели вязкость эмульсии в уравнении (2.62) рассчитывалась по уравнению

$$\eta = 6.5 - 0.6\Delta \quad (\Pi a * c).$$
 (2.82)

Для вывода уравнения (2.82) были выполнены вискозиметрические и микроскопические исследования для эмульсии указанного химического состава при различных размерах частиц дисперсной фазы эмульсии. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии регулировался содержанием эмульгатора и определялся микроскопическим методом. Результаты указанных исследований приведены в Приложении 3.

Зависимости скорости детонации от размеров частиц эмульсии рассчитаны по моделям:

непрерывных сдвиговых деформаций – (кривая 1); дискретных сдвиговых деформаций - (кривая 2).

Для сравнения на рис .2.8 представлено решение для вязкой несжимаемой жидкости при сферически симметричном втекании вещества в пору – кривая 3.

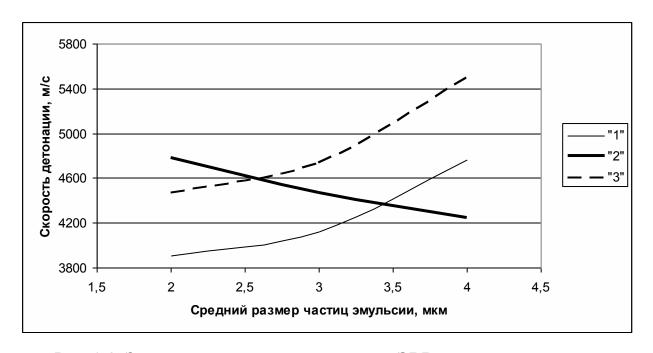


Рис. 2.8. Зависимости скорости детонации ЭВВ от размеров частиц эмульсии при различных моделях деформации вещества эмульсии

Анализ графиков, представленных на рис. 2.8, показывает, что в случае представления эмульсии вязкой несжимаемой жидкостью скорость детонации с увеличением размеров частиц эмульсии возрастает. Однако это противоречит экспериментальным данным, приведенным в работах [127, 159, 273], согласно которым при увеличении размеров частиц эмульсии (при неизменных прочих параметрах) скорость детонации снижается.

В то же время модель дискретных сдвиговых деформаций (кривая 2) дает зависимость, согласующуюся с указанными экспериментальными данными. Это служит дополнительным подтверждением корректности модели среды ЭВВ, изложенной в п. 2.4.

Необходимо отметить, что изучение процессов формирования условий возникновения детонации в твердых индивидуальных ВВ показало, что при ударном нагружении образца ВВ непрерывная сетка линий скольжения в образце перестраивается в локализованные полосы «адиабатического» сдвига [16, 87]. В результате инициирование ВВ происходит из-за трибомеханического разогрева поверхностей скольжения.

Таким образом, в расчетной модели детонации ЭВВ необходимо исходить из концепции, что при заполнении эмульсией газовой поры в режиме гидродинамического течения наблюдается дискретное сдвиговое деформирование вещества эмульсии в соответствии с механизмом, описанным в работе [246].

2.5. Алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами

На основании решений, приведенных в п. 2.2-2.4 и в приложениях 1, 2, предлагается следующий алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ для зарядов, имеющих диаметр больше предельного:

Задаемся уравнением химической реакции при взрывном разложении ЭВВ - $\sum a_{\scriptscriptstyle m} A_{\scriptscriptstyle m} = \sum b_{\scriptscriptstyle i} X_{\scriptscriptstyle i} + \sum f_{\scriptscriptstyle j} Y_{\scriptscriptstyle j} \; , ;$

Находим массу ВВ - $G = \sum a_m \mu_{A_m}$ и объем газообразных продуктов взрыва - $\Delta b = \sum b_i$;

Определяем теплоту взрыва - $Q_V = \frac{1}{G} \Big[\sum b_i Q_P^{X_i} + \sum f_j Q_P^{Y_j} - \sum a_m Q_p^{A_m} + 2,48\Delta b \Big];$

Находим удельный коволюм продуктов взрыва - $\alpha = \frac{1}{G} \Big[\sum b_i \alpha_i + \sum f_j \alpha_j \Big]$.

Используя метод итераций, решаем представленную ниже систему 9 уравнений (2.83) -(2.91) с 9-ю неизвестными (k, ρ_o^{zas} , ρ_o , z, D, $\frac{U}{D}$, T_B , T_{ep} , ΔT):

a)
$$T_B = T_o + \frac{GQ_V}{R\left(\sum_{c_V}^{-(X_i)} (T_B) + 3\sum_{c_j} f_j \xi_j\right)},$$
 (2.83)

где
$$\overline{c}_{V}^{(X_{i})}\left(T_{B}\right) = \frac{C_{V}^{(X_{i})}}{R}$$
: $C_{V}^{(Z)} = \frac{5}{2}R + R\sum_{p} \frac{\left(\frac{\Theta_{p}}{T}\right)^{2}e^{\frac{\Theta_{p}}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_{p}}{T}} - 1\right)^{2}}$ - для 2—атомных или линейных

многоатомных молекул Z - вещества;
$$C_{V}^{(Z)}=3R+R\sum_{p}\frac{\left(\frac{\Theta_{p}}{T}\right)^{2}e^{\frac{\Theta_{p}}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_{p}}{T}}-1\right)^{2}}$$
 - для 3-атомных

или многоатомных нелинейных молекул Z - вещества; $\{\Theta_p\}$ - температура (температуры) Дебая Z – вещества;

$$\gamma = 1 + \frac{R\Delta b}{\sum b_i C_V^{(X_i)} (T_*)}, \text{ где } T_* = 2T_B \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \cdot \left(\frac{1}{K_+ \rho_o^{2a3} \alpha}\right)^{k-1} \cdot \frac{K_+ - 1}{K_+} \cdot \frac{1}{1 - \frac{k+1}{k} \rho_o^{2a3} \alpha}.$$

$$\frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{k}{k+1}\right)^{k} \left(\frac{1}{K_{+}\alpha\rho_{o}^{2a3}}\right)^{k-1} + \frac{\sum_{j}\beta_{j}}{k+1} \left(1 + (k+1)\frac{U}{D}\right)^{2} - \frac{1}{k+1} \left(k \cdot \frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_{o}} - \frac{1}{\rho_{o}} + (k+2 + (k+1)\frac{U}{D})\left(1 + k \cdot \frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_{o}} - \frac{1}{\rho_{o}}\right) \frac{U}{D}\right) - \frac{1}{k+1} \cdot \frac{\sum_{j}\beta_{j} - \rho_{oo}\sum_{j}\frac{\beta_{j}}{\rho_{j}}}{1 - \sum_{j}\beta_{j}} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_{o}}}{\frac{1}{\rho_{oo}} - \sum_{j}\frac{\beta_{j}}{\rho_{j}}}\right) \left(1 + \left(k + 2 + (k+1)\frac{U}{D}\right)\frac{U}{D}\right) =$$

$$(2.84)$$

$$= \overline{C} \left(1 - \sum_{j} \beta_{j} \right) \left(1 - \frac{3 \sum_{j} f_{j} \xi_{j}}{\overline{C} \Delta b} \right) \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_{o}^{2a3} \right)$$

c)
$$\rho_o^{zas} = \rho_o \frac{1 - \sum_j \beta_j}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}};$$
 (2.85)

d)
$$\rho_0 = \rho_{oo} z + \rho_9 (1 - z);$$
 (2.86)

e)
$$D^{2} = \frac{2(k+1)Q_{V}}{\overline{C}\left(1 - \sum_{j} \beta_{j}\right) \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_{o}^{2a3}\right)};$$
 (2.87)

f)
$$\frac{U}{D} = \frac{\rho_o}{\rho_{oo}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\rho_o}{k} \sum_{j} \frac{\beta_j}{\rho_j}} -1;$$
 (2.88)

g)
$$\Delta T = T_{AC}^* - T_{zp}$$
; (2.89)

h)
$$T_{zp} = \frac{T_o + k_{\varepsilon} T_u}{1 + k}$$
, (2.90)

где
$$k_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\lambda_{\rm I} C_{\rm IV} \rho_{\rm I}}{\lambda_{\rm o} c_{\rm o} \rho_{\rm o}}}$$
 , $T_u = T_o + \frac{v^2}{2C_{\rm IV}}$,

$$\rho_{1} = \rho_{1}^{o} \frac{\gamma_{1} + 1}{\gamma_{1} - 1}, \quad \lambda_{1}(T_{u}) = \sum_{i} a_{i} \lambda_{i}(T_{o}) \cdot \frac{T_{o} + C_{iS}}{T_{u} + C_{iS}} \cdot \left(\frac{T_{u}}{T_{o}}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1 + \frac{4}{9} \overline{C_{iV}}(T_{u})}{1 + \frac{4}{9} \overline{C_{iV}}(T_{o})},$$

$$v = \frac{D}{k + 1} + U + \sqrt{\frac{2P_{f}}{3\rho} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}$$

$$c_{3} = \sum_{i=1}^{i=4} \alpha_{i} c_{i}, \ \lambda_{3} = \frac{1}{\left(1 + \sum_{i=1}^{i=4} \delta_{i}\right)} \left(\frac{1 + 2\sum_{i=2}^{I=4} \delta_{I}}{\frac{1}{k_{i}} + 2\sum_{i=2}^{i=4} \delta_{i}} + 4(k_{2} \delta_{2} + k_{3} \delta_{3}(1 + \delta_{2}) + k_{4} \delta_{4}(1 + \delta_{2} + \delta_{3}))\right);$$

i)
$$z \approx 1 - \frac{\frac{D}{k+1} + U + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}}{2R_o} \cdot t_*,$$
 (2.91)

где
$$t_* = \frac{4\pi \left(T_{AC}^* - T_{zp}\right)^2 \lambda_{AC} c_{AC}}{\mu_{mp}^2 \rho_{AC} \left(\frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}\right)^6} \left(\frac{R_o}{\Delta}\right)^6, \ P_f = \rho_{oo} \left(D + U \right) \left(\frac{D}{k+1} + U\right).$$

Для проверки корректности предлагаемой методики расчетов детонационных параметров ЭВВ были проведены испытания эмульсионного ВВ Украинит-ПП-2, который представляет собой газонаполненную эмульсию на основе кальциевой и аммиачной селитр, на полигоне «Запорожвзрывпрома» и карьерах Ингулецкого ГОКа [58].

Результаты предварительных микроскопических исследований показали, что средний размер частиц эмульсии составляет 3 мкм.

Химический состав Украинит-ПП-2: $NH_4NO_3=44,0$ %, $Ca(NO_3)_2=32\%$, $H_2O=16,0$ %, топливная фаза - 8,0 %.

Результаты полигонных испытаний показали, что в пластиковых трубах диаметром 100 мм при плотности ЭВВ 1,26 г/см³ измеренная скорость детонации по методике, аналогичной описанным в работах [137, 160], составила 5110 м/с.

Результаты расчетов показывают, что достижимая скорость детонации при среднем радиусе пор 50-70 мкм и среднем размере частиц дисперсной фазы эмульсии 4 мкм составляет 5080-5270 м/с.

При испытании в скважинах диаметром 250 мм фиксируемые параметры: при плотностях ВВ 1,15 г/см³ – 5107 м/с, при 1,21 г/см³ – 5211 м/с. Дисперсность газовых включении в объеме эмульсии составляла $\approx 100\text{-}150$ мкм.

По результатам расчетов при данном среднем диаметре «пор» соответствующие параметры равны 5260 и 5300 м/с.

Значения измеренных скоростей детонации при полигонных испытаниях (диаметр заряда 100 мм) и взрыве скважинных 250-миллиметровых зарядов практически совпадают, что свидетельствует о том, что диаметр 250 мм больше предельного.

Относительные отклонения расчетных параметров от экспериментальных не превосходят 3 %, что находится в пределах погрешности измерений скорости детонации современными приборами [137, 160].

Дополнительно в качестве обсуждения результатов определим детонационные параметры ЭВВ исследуемые в работе [140], состав которых приведен в таблице 2.1. Расчетные и экспериментальные данные по скорости детонации представлены в таблице 2.2.

Химические реакции рассчитывалась по методу Бринкли-Вильсона [19].

В качестве сенсибилизации использовались стеклянные, заполненные воздухом, микросферы диаметром 80 мкм в количестве 3 % от веса эмульсии (сверх 100 %).

Средние значения расчетной скорости детонации по предложенной методике составляют: $D_{AN} = 5343 \text{ м/c}; \ D_{AN-CaN} = 5240 \text{ м/c}; \ D_{AN-NaN} = 5088 \text{ м/c}.$

Относительные отклонения расчетных параметров от экспериментальных не превосходят 2,7 %.

Таким образом, также наблюдается согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Таблица 2.1. Составы ЭВВ [140]

	Массовое содержание компонентов, %									
ВВ	NH ₄ NO ₃	H_2O	Эмуль-	Минер.	Полибу-	$Ca(NO_3)_2$ $\cdot 4H_2O$	NaNO ₃			
	(AN)	2	гатор	Масло	тадиен	(CaN)	(NaN)			
AN	82,0	12,0	2,2	3,3	0,5	-	-			
AN-	65,6	13,0	2,0	3,6	0,8	15,0	_			
CaN	03,0	13,0	2,0	3,0	0,0	13,0				
AN-	65,7	13,0	2,0	3,6	0,7	_	15,0			
NaN	05,7	13,0	2,0	3,0	0,7		15,0			

Таблица 2.2. Расчетные (D_*) и экспериментальные [140] значения скорости детонации

BB	Начальная плотность ρ_{oo} , кг/м 3	$D_{ m exp}$, ${ m M/c}$	D_{ideal} , м/с по ВWK	Главе 2)	женной модо тиц эмульси 2,0	
AN	1062	5490	5973	5662	5318	5048
AN-CaN	1065	5095	5680	5602	5212	4908
AN-NaN	1079	5040	5584	5397	5066	4802

Выводы по главе 2

Разработана физическо-математическая модель стационарной детонации зарядов ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, с диаметром заряда больше предельного.

Согласно модели, в начальный период под действием детонационной волны вешества ЭВВ В происходит втекание гидродинамическом режиме сенсибилизирующие газовые поры. В процессе втекания происходит локальный разогрев и последующее возгорание вещества эмульсии, что приводит к развитию детонационного процесса. Процесс втекания вещества в пору происходит асимметрично, поэтому среда до начала химических реакций приобретает определенную скорость в направлении распространения детонационной волны. Процессы взрывчатого разложения начинаются и происходят уже в движущейся среде. Величина данной скорости определяется инерционными свойствами среды, фронтальным детонационным давлением и величиной промежутка времени между моментом подхода фронта детонационной волны к поре и моментом времени, соответствующим началу разложения. Для ВВ с относительно низкой приращение скорости чувствительностью данное может быть весьма существенным (сотни метров в секунду). При этом возгорание вещества под действием ударной волны в рассматриваемых ВВ осуществляется за счет совместного действия теплоты внутреннего трения при втекании эмульсии в пору и теплоты сжатых газов поры. Вещество ЭВВ, наряду с приобретением некоторой скорости движения в направлении распространения детонационной волны, перед началом экзотермического распада уплотняется. На осуществление данного процесса расходуется часть выделяемой при взрыве энергии, а детонационному превращению подвергается уплотненное и двигающееся в направлении детонации вещество ЭВВ.

На основе анализа имеющихся турбидиметрических и рентгенографических исследований структуры ЭМУЛЬСИИ ЭВВ, a также выполненных рентгенографических и реологических исследований указанного вещества показано, что при расчете условий возгорания ЭМУЛЬСИИ корректно представление, что окислительная фаза эмульсии ВВ состоит из твердофазных зародышей кристаллов селитры (селитр), покрытых пленками воды. Данное обстоятельство приводит к тому, что при втекании эмульсии под действием ударной волны в газовую пору будет наблюдаться разбитие ее потока на дискретные слои. Деформация вещества эмульсии будет происходить по локализованным слоям втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных слоев.

На основании предложенной модели разработана физико-математическая методика расчета детонационных параметров ЭВВ, позволяющая осуществлять расчет всех основных детонационных параметров данных ЭВВ с учетом их рецептурно-технологических характеристик: плотности эмульсии, плотности и химического состава ЭВВ, размеров сенсибилизирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии.

Сравнение экспериментальных данных по скорости детонации ЭВВ, имеющих различные плотности, химический состав и структуру, с расчетными значениями данной величины, полученными на основе разработанной физикоматематической модели, показало, что они находятся в удовлетворительном согласии.

ГЛАВА 3. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ

В гл. 2 представлена физико-математическая модель описания стационарной детонации однородных бестарных ЭВВ. Однако в практике ведения взрывных работ с использованием бестарных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, приходится практически постоянно иметь дело с отклонениями от условий однородности ЭВВ и стационарности процесса детонации:

при взрывании вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ наблюдается неоднородность ЭВВ в направлении распространения детонации, обусловленная изменением плотности ЭВВ, т.к. размеры газовых пор зависят от гидростатического давления в ЭВВ [93, 235];

возникают режимы распространения детонации со скачкообразным изменением скорости, свидетельствующие о проявлении нестационарности детонационных процессов [24, 55, 64, 174, 175].

Наряду со скачкообразным изменением скорости детонации при взрывании вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ имеются многочисленные измерения в промышленных условиях скорости детонации бестарных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, ПО длине вертикального (крутонаклонного) скважинного заряда, которые свидетельствуют о прохождении детонации по всей длине заряда с практически постоянной скоростью. Для иллюстрации сказанного на рис. 3.1 представлена запись зависимости расстояния, пройденного детонационной волной, от времени, выполненная авторами [175] при проведении исследовательских работ на карьере «Хайбулинский» (000)«Башкирская медь»).

Длина скважины — 16 м. Применяемое ЭВВ — Фортис-100 (NH_4NO_3 — 75,2 % + H_2O – 18,8 % + 6 % топлив. фаза).

Длина заряда — 10,1 м. Средняя плотность ЭВВ— 1,10 г/см³. Плотность эмульсии ЭВВ — 1,33 г/см³. Диаметр скважины — 216 мм.

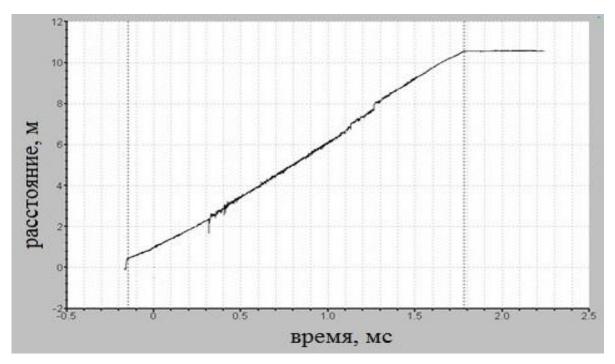


Рис. 3.1. Зависимость расстояния, пройденного детонационной волной от времени (карьер «Хайбулинский») [175]

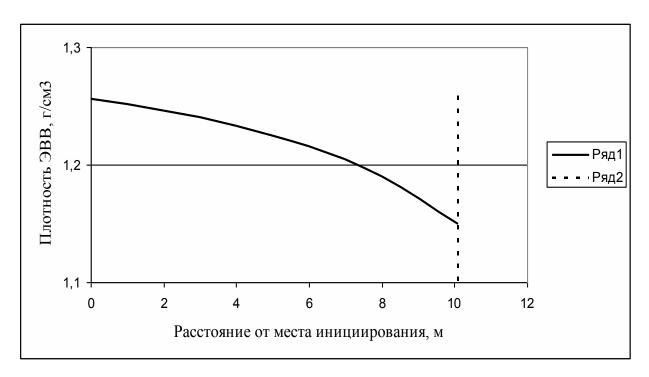


Рис. 3.2. Плотность ЭВВ в зависимости от удаления от места инициирования (---- - верхняя граница скважинного заряда). Зависимость построена на основании методики, изложенной в работе [235]

Конструкция заряда – колонковая. Инициирование – нижнее, шашкой ПДП-600. Коэффициент крепости горных пород по Протодьяконову f = 8. Уровень воды в скважине на 4 м выше верхней границы заряда.

Согласно [93, 161, 235] в вертикальных (наклонных) скважинах при применении бестарных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, наблюдается уплотнение ЭВВ под действием гидростатического давления. На рис. 3.2 представлена зависимость изменения плотности ЭВВ «Фортис-100» от удаления от места инициирования заряда для опыта, описываемого выше.

Расчеты показали, что плотность ЭВВ в нижней части заряда равна 1,26 $\Gamma/\text{см}^3$, а в верхней части – 1,16 $\Gamma/\text{см}^3$. Плотность в нижней части заряда ниже критического значения плотности согласно [92] (1,28 /см³ - для ЭВВ с эмульсией 1.33 Γ/cm^3), плотностью выше которой возбуждение детонации трудноосуществимо. Разница в плотности ЭВВ по длине заряда составляет 0,1 г/см³. Согласно [127, 224] вследствие разности плотностей ЭВВ скорость детонации в верхней части заряда должна быть почти на 500 м/с меньше, чем в нижней части. Однако этого не наблюдается. Следовательно, детонационный процесс в ЭВВ переменной плотности, имеющий представленный на рис. 3.1 характер изменения скорости детонации по длине заряда, происходит в нестационарном режиме.

3.1. Теоретический анализ неустойчивости детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами

Материалы данного параграфа основываются на результатах работ [50, 56, 266].

Согласно модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга химическая реакция инициируется одновременно по всему фронту детонационной волны, а вещество ВВ до ударного перехода не разлагается и сохраняет свою природу [100, 262, 299]. Структура детонационной волны в этом случае однородна и стационарна по всей ее площади.

Однако экспериментальные исследования показывают, что фактическая структура детонационной волны в гетерогенных ВВ является нестационарной и существенно трехмерной [70-72, 79, 80, 82, 83, 124, 141, 142].

Данное обстоятельство обуславливает возникновение неустойчивых и пульсирующих режимов детонации в смесевых (смесь твердых порошков типа "ВВ+ВВ", "ВВ+ инертное вещество", "аммиачная селитра + жидкое горючее", "ВВ+ вода (раствор селитр") [70-72, 141], индивидуальных жидких ВВ [79, 80, 82, 83] и даже в плотных смесевых сплавах индивидуальных взрывчатых веществ [124]. Прорыв струй как в зону реакции, так и вперед детонационного фронта при детонации гранулированных ВВ отмечено в работе [142].

В работах [129, 250] изучалась зона реакции ЭВВ с регистрацией профилей массовой скорости с помощью лазерного допплеровского интерферометра VISAR и рентгеновской томографией плотности вещества в зоне реакции с помощью синхротронного излучения от электронного ускорителя ВЭП-3. Анализ экспериментальных данных, полученных при данных исследованиях, а также теоретические представления работ [74, 142, 165, 192] показывают, что для детонационной волны в ЭВВ корректно следующее представление о зоне реакции - зона реакции имеет двухслойную структуру [150]:

головная часть - зона сжатия, представленная конденсированным веществом, в расширяющихся из-за горения порах которого происходит разложение ЭВВ;

газовая часть - зона, представленная сильно уплотненным газовым телом, в котором происходит догорание ЭВВ.

При распространении детонационной волны в ЭВВ возможны следующие проявления неустойчивости во фронте детонационной волны, представленном внешней поверхностью зоны сжатия:

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально возрастающие со временем возмущения, обуславливающие разрыв детонационной волны на неограниченно возрастающие струи;

на поверхности зоны сжатия возникают устойчивые возмущения (состояние нейтральной устойчивости);

Возмущения, возникающие на поверхности зоны сжатия, являются экспоненциально угасающими со временем (состояние абсолютной устойчивости).

В работах [91, 132] получены критерии неустойчивостей при распространении ударных волн в произвольных средах. При определении данных критериев использовались только требование эволюционности ударных волн и условия непрерывности потоков плотностей массы, энергии и импульса [154]. Указанные условия непрерывности выполняются и на детонационной волне в ЭВВ. Следовательно, критерии Дьякова-Конторовича [91, 132] применимы к описанию неустойчивости фронта детонационной волны в ЭВВ.

Введем обозначения:

j - плотность потока массы; v, c - скорость распространения детонационной волны относительно движущегося вещества и скорость звука в веществе на границе «зона сжатия — газовая зона»; D_* - скорость распространения детонационной волны.

В соответствии с [91, 132, 154] имеем следующие условия неустойчивости зоны сжатия:

1). При
$$j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < -1$$
 (3.1)

или
$$j^2 \frac{dV_f}{dP_f} > 1 + 2\frac{v}{c}$$
 (3.2)

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально возрастающие со временем возмущения. Происходит разрыв детонационной волны на неограниченно возрастающие струи.

2). При
$$\frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD_*}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} < j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < 1 + 2\frac{v}{c}$$

$$(3.3)$$

на поверхности зоны сжатия возникают устойчивые возмущения /нейтральная устойчивость /.

3). При
$$-1 < j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < \frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD_*}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}}$$
 (3.4)

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально угасающие со временем возмущения, и процесс распространения детонации описывается одномерной теорией Зельдовича-Неймана-Деринга (абсолютная устойчивость) [100, 262, 299].

При выполнении оценочных расчетов исходим из следующих положений: скорость ударной волны равна

$$D_{v} = A + BW, \qquad (3.5)$$

где А, В – параметры ударной адиабаты в линейной форме;

W – массовая скорость за фронтом ударной волны;

поведение неразложившегося вещества в зоне сжатия удовлетворяет закону Тэта [19, 231]

$$P = \frac{k_*}{n} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right] + P_a, \tag{3.6}$$

где Р – давление в веществе;

 k_* - модуль объемного сжатия при $V=V_0$ (V_{oo} - начальный удельный объем /т. О на рис. 3.3/, V_o , V_f - удельные объемы в момент начала экзотермической реакции в поре и в момент наибольшего сжатия, соответственно /т. A(A1), C(C1)/ на рис. 3.3), P_a - давление в веществе при $V=V_0$; V - удельный объем; n - степенной параметр Тэта.

Поведение разложившегося вещества ВВ (взрывных газов), заполняющего расширяющиеся поры в момент их слияния (момент распада зоны сжатия детонационной волны) будем описывать законом Абеля [19, 34].

Согласно оценкам, в рассматриваемом случае справедливо соотношение

$$P_f \gg P_a. \tag{3.7}$$

Тогда на основании (3.6) определяем
$$\frac{dV_f}{dP_f} = -\frac{V_f}{nP_f + k_*}$$
, (3.8)

где
$$k_* \approx \frac{A^2}{V_o}$$
. (3.9)

Невыполнимость условий (3.1) и (3.2) следует из простых соображений.

Действительно, согласно (3.8) $\frac{dV_f}{dP_f}$ <0, следовательно, условие (3.2) не выполняется.

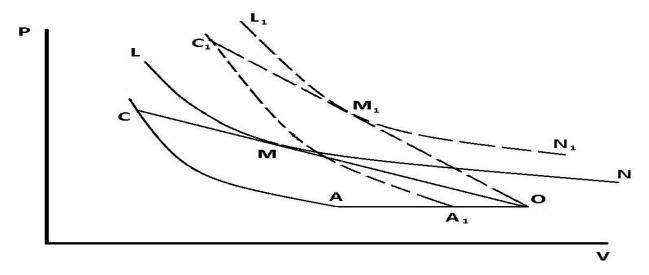


Рис. 3.3. P-V- диаграмма ЭВВ, сенсибилизированного газовыми порами.

Тогда, учитывая, что
$$j = \frac{D_*}{V_{oo}} = \frac{D_* - W^{\cdot}}{V_*}$$
, (3.10)

где W' - массовая скорость в т. V_* , а $P_f = \frac{D_*W^*}{V_{oo}}$, на основании (3.1), (3.8) будем

иметь следующее неравенство:
$$\left(\frac{D_*}{W} - 1\right) \frac{1}{V_*} > \frac{n}{V_f} \left(1 + \frac{k_*}{nP_f}\right)$$
. (3.11)

Однако данное неравенство не выполняется.

Действительно, имеем:
$$\frac{D_*}{W^*} - 1 < k$$
 [44]; $\frac{1}{V_*} < \frac{1}{V_f}$ [19, 231]; $n > k$ [172]. (3.12)

На основании (3.12) имеем
$$\frac{n}{V_f} \left(1 + \frac{k}{nP_f} \right) > \frac{n}{V_f} > \frac{k}{V_*} > \left(\frac{D_*}{W_+} - 1 \right) \frac{1}{V_*}$$
.

Таким образом, неравенство (3.11) не выполняется. Это свидетельствует о том, что предположение о выполнении (3.1) для ЭВВ неверно.

Следовательно, в ЭВВ разрыва детонационной волны на неограниченно возрастающие струи не происходит.

Реализуются только режимы детонации, когда на поверхности зоны сжатия возникают или устойчивые возмущения, или экспоненциально угасающие со временем возмущения. В случае угасающих со временем возмущений будет наблюдаться стационарная детонация с гладким детонационным фронтом.

Данный вывод согласуется с исследованиями [13] и [133, 134].

В работе [13] авторы на основе теоретического анализа устойчивости детонационных волн в конденсированных ВВ на примере литого тротила показали, что в этом случае неограниченно возрастающих деформаций детонационного фронта не происходит.

В работах [133, 134] доказывается, что при распространении ударных волн в вандерваальсовском газе разрыва фронта ударной волны не происходит, а возможны только абсолютно устойчивые или нейтрально устойчивые режимы распространения данных волн. К числу сред, которых возможно распространение ударной волны в режиме нейтральной устойчивости, относятся жидкости, находящиеся в области фазового перехода «жидкость-газ» [133]. При прохождении ударной волны через данную среду происходит переход ее (полностью или частично) в газообразное состояние. Во многом подобный происходит при прохождении детонационной волны сенсибилизированному газовыми порами, когда ударная волна инициирует в «горячих точках» распад конденсированного вещества ЭВВ на газообразные продукты. Однако у данных процессов есть различие:

в первом случае среда, испаряясь, поглощает энергию ударной волны; во втором – при распаде среды на газы происходит выделение энергии.

Согласно исследованиям [177, 263] при выполнении условия $\frac{dV_f}{dP_f}$ <0

протекание химической реакции за фронтом детонационной волны не влияет на устойчивость этой волны. Устойчивость детонационной волны будет определяться устойчивостью ее фронта, представляющего из себя фронт ударной

волны, распространяющейся по ВВ. Следовательно ЭВВ, сенсибилизированные газовыми порами, относятся к средам, в которых возможно распространение ударной волны в режиме нейтральной устойчивости. Однако нейтральная устойчивость может реализовываться в случае, если изохорная теплоемкость вещества превышает 5R [134]. В зоне сжатия, являющейся головной частью детонационной волны В ЭВВ, вещество представляет собой смесь неразложившейся эмульсии и продуктов детонации. Наличие конденсированной фазы обуславливает то, что даже минимальное значение изохорной теплоемкости данной смеси, достигаемое в момент соприкосновения сфер горения от смежных «горячих» точек, будет удовлетворять указанному условию 12R > 5R.

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (гофрировки) детонационного фронта в областях выпуклости детонационной волны (по направлению к зоне реакции) возникают зоны повышенного давления [154, 170]. Это обусловлено тем обстоятельством, что продукты детонации, двигаясь вглубь данной области, будут находиться в стесненных условиях, и их сжатие будет передаваться фронту волны (аналогично случаям, рассмотренным в работах [2, 101, 228]). Кроме этого, в случае нейтральной устойчивости будет наблюдаться косое отражение звуковых волн, спонтанно испускаемых детонационным фронтом, от поверхности разрыва [91, Таким образом, при данном режиме происходит концентрация энергии реакции в указанных областях, что создает высокую энергетическую плотность в этих частях зоны реакции и снижает в других. В итоге данные процессы обуславливают возникновение поперечных ударных волн, приводящих к формированию многофронтового (ячеистого) режима детонации. Данный вывод подтверждается численными экспериментами, выполненными в работе [135]. Многомерные 2D и 3D расчеты показали, что при распространении в вязком газе периодическим возмущением фронте ударной \mathbf{c} фронта «формируется "ячеистая" структура с конечной по величине амплитудой возмущений, не убывающей и не растущей во времени» [135].

Необходимо отметить, что возникновение данного режима детонации порождает автоколебательные процессы, вызываемые перераспределением тепловой и кинетической энергии взрывных газов в зоне химической реакции ЭВВ. В случаях, когда в кинетическую энергию взрывных газов переходит слишком большое количество внутренней энергии, фронт детонационной волны начинает отрываться от газовой зоны реакции. Однако это одновременно снижает давление во взрывных газах в зоне реакции, что приводит к торможению детонационного фронта. Торможение же приводит к росту теплового давления в газах, которое снова способствует ускорению детонационного фронта и т.д. Рост амплитуды данных пульсаций с неизбежностью приводит к ликвидации рассматриваемого режима детонации.

При разрушении ячеистой структуры фронта ликвидируются поперечные детонации, что приводит к снижению температуры в зоне реакции и замедлению химических процессов. Это обуславливает резкое возрастание критического диаметра, экспериментально зафиксированное в исследованиях [153]. В результате возникают явления перехода детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонации.

Необходимо отметить, что возникновение автоколебательных процессов при распространении детонации в порошковых гетерогенных ВВ, содержащих индивидуальное ВВ, и игданитах, а также их роль в устойчивости детонационной волны для указанных гетерогенных ВВ впервые отмечена в работах [71, 72, 141].

Однако приведенные рассуждения о влиянии ячеистой структуры фронта детонационной волны на устойчивость ее распространения нуждаются в экспериментальном подтверждении существования этой структуры при детонации ЭВВ.

Следующий параграф посвящен экспериментальному доказательству, что при детонации ЭВВ в зоне реакции формируются ячеистые структуры.

3.2. Экспериментальное подтверждение ячеистой структуры детонационного фронта в ЭВВ

Многофронтовую (ячеистую) структуру зоны химических реакции в ЭВВ удалось зафиксировать в ходе специальных опытов [55, 64].

Были выполнены опытные взрывы цилиндрических зарядов ЭВВ с использованием эмульсий, изготовленных с окислительной фазой как на монорастворе аммиачной селитры, так и на бинарных растворах селитр (АС + кальциевая селитра; АС + натриевая селитра). В опытах осуществлялась:

фиксация отпечатков воздействия взрывных газов при истечении с боковой поверхности заряда на свинцовой пластине;

фиксация пульсаций детонационного давления в центральной области заряда при помощи медной трубки, размещенной по оси заряда.

ЭВВ инициировалась от промежуточного детонатора, состоящего из патрона Аммонита 6ЖВ-32 (250 гр., 32 мм диам.) и детонирующего шнура ДШЭ-12. Используемое ЭВВ - смесь эмульсии с пенополистиролом в объемном соотношении. На рис. 3.4 - 3.11 приведены характерные результаты опытов. Показано воздействие на свинцовую пластину (рис. 3.5) взрывных газов при взрыве заряда ЭВВ (плотность – 1,02 г/см³, длина – 1000 мм, диаметр – 90 мм) с окислительной фазой на основе АС.

На рис. 3.4 приведена зависимость длины пробега детонационной волны от времени. Запись сделана на приборе Handi Trap.

На рис. 3.6, 3.7 показано взаиморасположение цилиндрического заряда ЭВВ и свинцовой пластинки.

На рис. 3.8 и рис.3.9 представлены имеющие регулярный характер отпечатки на свинцовой пластине от воздействия на нее взрывных газов при истечении с боковой поверхности заряда, а на рис. 3.11 показана регулярная деформация медной трубки, помещенной перед взрывом вдоль оси цилиндрического заряда (рис. 3.10).

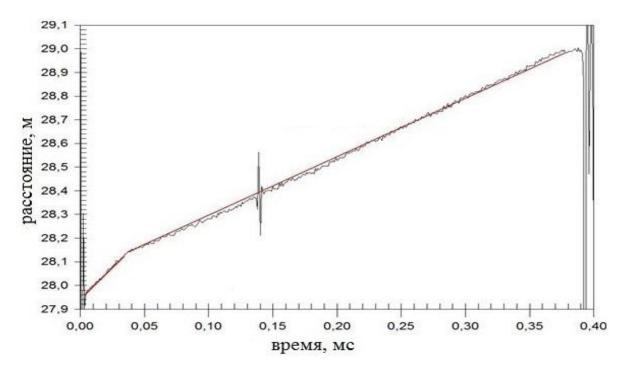


Рис. 3.4. Зависимость длины пробега детонационной волны от времени (первое значение скорости (на участке 20 см) - патрон Аммонита 6ЖВ, второе значение скорости (на участке 85 см) – ЭВВ)



Рис. 3.5. Свинцовая пластина (длина x ширина x толщина - 220 x 150 x 12 мм) зафиксированная скобами на песчаной подушке



Рис. 3.6. Расположение заряда ВВ относительно пластины-свидетеля



Рис. 3.7. Расположение заряда ВВ с пластиной-свидетелем в плане



Рис. 3.8. Общий вид пластины после взрыва



Рис. 3.9. Пластина-свидетель после взрыва. Красным цветом отмечены бороздки



Рис. 3.10. Медная трубка в заряде ВВ. Показан момент вставки ее снизу заряда ВВ



Рис. 3.11. Медная трубка до и после взрыва

Анализ результатов опытов показывает, что детонация в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ), сенсибилизированных газовыми порами, проходит с образованием ячеистой структуры фронта детонационной волны.

Согласно данным работ [71, 72, 141], при распространении в гетерогенных ВВ детонации с ячеистой структурой фронта волны могут возникать прогрессирующие пульсации давления и температуры продуктов взрыва в детонационном фронте, обуславливающие переход детонации в ЭВВ на низкоскоростные режимы или даже обрыв процесса.

3.3. Условие возникновения нейтральной устойчивости детонационной волны в ЭВВ

При рассмотрении обозначенного вопроса следуем работам [55-57, 59].

Согласно [32] при детонации ВВ, в отличие от других режимов химического превращения этого вещества, полная энергия вещества в зоне реакции превышает энергию этого превращения.

В точке окончания реакции полная удельная энергия продуктов взрыва будет равна

$$\varepsilon = Q_v + P_{c,r} (V_{oo} - V_{c,r}), \tag{3.13}$$

где $P_{c,r}$, $V_{c,r}$ - давление и удельный объем продуктов взрыва в момент окончания химической реакции (точка ($P_{c,r}$, $V_{c,r}$) лежит на адиабате продуктов детонации, построенной в PV - координатах).

При этом общем случае $P_{c,r} \neq P_*, V_{c,r} \neq V_*$ [19, 32, 231].

В случае плоского детонационного фронта выделение энергии происходит только в прямой волне падения на детонационный фронт (в системе координат, связанной с фронтом волны). При этом, в случае стационарной самоподдерживающей детонации, выполняется условие $P_{c,r} = P_*, \ V_{c,r} = V_*$ [19, 231]. Распространение детонационной волны с параметрами $P_{c,r} > P_*, \ V_{c,r} < V_*$

(пересжатая детонация) возможно только при наличии поршня, подпирающего зону реакции и перемещающегося вслед за зоной реакции со скоростью детонационной волны [19, 154].

Согласно п.3.2 при распространении детонационной волны в ЭВВ в режиме нейтральной устойчивости детонационного фронта образуется ячеистая структура детонационного фронта с конечной по величине амплитудой возмущений, не убывающей и не растущей во времени. Следовательно, если при формировании детонационной волны в ЭВВ в зону реакции поступит энергия больше необходимой по условию Чепмена-Жуге, то ее плотность будет поддерживаться особенностью прохождения реакций в ячеистом фронте, созданном на базе нейтральной устойчивости детонационного фронта. В этих условиях поперечные детонации, свойственные ячеистой структуре, проходят в пересжатом режиме и создают более высокие давление и температуру в зоне реакции по сравнению с плоской детонационной волной. Это в свою очередь создает условия для увеличения скорости реакций (соответственно, уменьшения ширины зоны реакции и снижения критического и предельного диаметра) и увеличения скорости детонации. Детонация ЭВВ будет проходить в пересжатом (по сравнению с плоским фронтом) режиме.

Таким образом, в случае нейтральной устойчивости детонационного фронта детонационная волна в ЭВВ приобретает особое свойство по сравнению с плоской волной в индивидуальных ВВ. В индивидуальных ВВ амплитуда и скорость детонационной волны определяются плотностью удельной химической энергией вещества ВВ. В ЭВВ на детонационную волну влияют не только плотность и химическая энергия ЭВВ, но и состояние продуктов детонации за фронтом волны.

Представим уравнение (3.13) в следующем виде

$$Q_{v} + P_{c,r}(V_{oo} - V_{c,r}) = k_{n}Q_{v} + P_{*}(V_{oo} - V_{*}),$$
(3.14)

где k_n - коэффициент пересжатости, показывающий относительное (относительно Q_v) возрастание работы сил ударного сжатия вещества ЭВВ и кинетической

энергии продуктов взрыва по отношению к аналогичным параметрам при детонации с плоским фронтом в режиме Чепмена-Жуге.

Из (3.14) и политропической зависимости между давлением во взрывных газах и их удельным объемом, имеем

$$k_n \approx 1 + \frac{P_*}{\rho_{oo}Q_v} \left(\frac{P_{c.r}}{P_*} \left(1 - \frac{k}{k+1} \left(\frac{P_*}{P_{c.r}} \right)^{\frac{1}{k}} \right) - \frac{1}{k+1} \right).$$
 (3.15)

Фактически рассматривается усреднение по объему образующихся детонационных ячеек, прилегающих к поверхности детонационной волны, а не по плоскому сечению, перпендикулярному распространению детонационной волны, как в [229], где рассмотрено усреднение параметров продуктов детонации в порошкообразных и гранулированных ВВ.

На основании (3.14) и (3.15) находим выражение для определения коэффициента увеличения полной удельной внутренней энергии вещества $k_{\text{ви.энерг.}}$ в зоне реакции при пересжатии детонации:

$$k_{\text{GH.3HeP2.}} = \frac{k_n Q_v + P_* (V_{oo} - V_*)}{Q_v + P_* (V_{oo} - V_*)} = 1 + \frac{k_n - 1}{1 + \frac{P_*}{(k+1)\rho_{oo} Q_v}}.$$
 (3.16)

Расчет параметров детонации ЭВВ в пересжатом режиме можно вести по методике, изложенной в гл.2, если вместо Q_{ν} использовать величину

$$Q_{\vartheta\phi\phi} = k_n Q_{\nu}, \tag{3.17},$$

что является отражением неравномерности давления и температуры в зоне химической реакции при ячеистой детонации.

Процесс детонации в этом случае на P-V-диаграмме будет описываться штриховыми линиями (рис. 3.3). Анализ рис. 3.3 показывает, что чем выше давление в падающей ударной волне, тем меньше достигаемая плотность ЭВВ. Это полностью согласуется с выводом работы [98] о нагружении пористых тел ударными волнами (при высокой пористости тел их разогрев при ударном сжатии может быть настолько большим, что чем больше давление в ударной волне, тем меньше достигаемая плотность при ударном сжатии).

Согласно (3.8) в случае ЭВВ $\frac{dV_f}{dP_f} < 0$, поэтому условие $j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < 1 + 2\frac{v}{c}$

выполняется всегда. Тогда, в соответствии с (3.5), для формирования детонационного фронта с нейтральной устойчивостью необходимо выполнение

условия

$$j^{2} \frac{dV_{f}}{dP_{f}} < \frac{1 - \frac{v^{2}}{c^{2}} - \frac{vD_{*}}{c^{2}}}{1 - \frac{v^{2}}{c^{2}} + \frac{vD_{*}}{c^{2}}}.$$
(3.18)

На основании (3.10) и (3.12) неравенство (3.18) можно переписать в виде

$$\frac{\frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2} - 1}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} - \frac{D_*^2}{V_{oo}^2} \frac{V_f}{nP_f + k_*} > 0.$$

Введем в рассмотрение коэффициент гофрировки

$$k_{zo\phi p} = \frac{\frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2} - 1}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} - \frac{D_*^2}{V_{oo}^2} \frac{V_f}{nP_f + k_*},$$
(3.19)

Если ввести в рассмотрение число $n_* = \frac{D_*}{W^{/}} - 1$ (показатель политропы продуктов взрыва при однополитропном приближении [19, 231]), то условие (3.19) запишется в виде неравенства

$$k_{zo\phi p} = \frac{\left(1 + \frac{V_f}{V_{00}}\right) \frac{V_f}{V_{00}} \left(\frac{D_*}{c}\right)^2 - 1}{\left(1 - \frac{V_f}{V_{00}}\right) \frac{V_f}{V_{00}} \left(\frac{D_*}{c}\right)^2 + 1} - \frac{V_0 - V_f}{V_0 + V_f} \left(\frac{V_0}{V_f} \left(n_* + 1\right) - 1\right) > 0.$$
 (3.20)

Из вышесказанного ясно, если $k_{zo\phi p} > 0$, то возникает нейтральная устойчивость детонационного фронта, при которой возможно распространение волны в пересжатом режиме; если $k_{zo\phi p} < 0$, то нейтральная устойчивость становится невозможной, детонация возможна только с плоским фронтом в устойчивом режиме. Пересжатия детонации не происходит.

На рис. 3.12 приведены зависимости скорости детонации в ЭВВ (NH_4NO_3 - 75 %, H_2O - 19 %, топлив. фаза – 6 %) при различных k_n при нижнем инициировании 12-метрового скважинного заряда (величина частиц дисперсной фазы эмульсии – 2,5 мкм, радиус газовых пор при внешнем давлении 1 атм - 50 мкм, плотность при атмосферном давлении – 1,07 г/см³).

Сравнение зависимостей скорости детонации, приведенных на рис.3.12, с экспериментальными данными, представленными на рис.3.16, показывает их качественное совпадение.

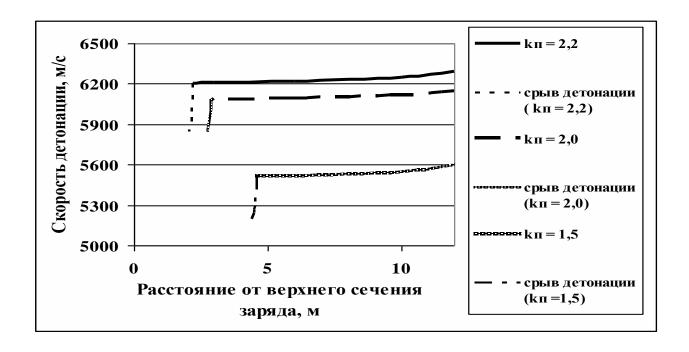


Рис. 3.12. Зависимость скорости детонации по длине скважинного заряда при нижнем инициировании при различных значениях k_n (x = 0 – верх заряда; x=12 – точка инициирования)

Это свидетельствует о корректности наших представлений о закономерностях распространения детонационных волн в ЭВВ.

Срыв детонации объясняется изменением структуры ЭВВ (укрупнение газовых пор) по мере продвижения детонационной волны вверх по заряду.

Аналитически это проявляется в переходе в зону $k_{zo\phi p} < 0$. Укрупнение газовых пор приводит не только к изменениям в структуре ЭВВ, но и к изменениям их плотности.

Область допустимых значений начальной плотности ЭВВ, при которых детонация происходит в режиме нейтральной устойчивости (высокоскоростном режиме), имеет следующие границы: сверху область ограничена прямой «максимально допустимой плотности» [93], слева — величиной минимально возможного радиуса поры (1.1), снизу — кривой «граничной плотности». Положение нижней границы соответствует таким плотностям ЭВВ, меньше которых возможно распространение только абсолютно устойчивого процесса.

На рис. 3.13, 3.14 представлены области, где детонационный процесс проходит в режиме нейтральной устойчивости и в режиме абсолютной устойчивости (рассматриваются заряды без забойки, в том числе - водяной).

Рис. 3.13 соответствует эмульсии, имеющей следующий химический состав: NH_4NO_3 - 75 %, H_2O - 18 %, топлив. фаза – 7 %. Размер частиц эмульсии – 2 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см³.

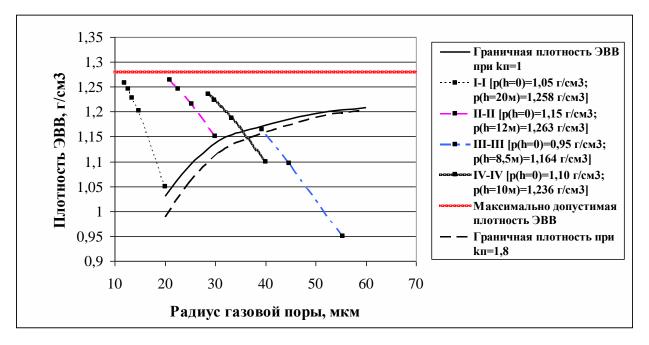


Рис. 3.13. Зависимость граничной плотности ЭВВ состава 1 от радиуса газовых пор при размере частиц эмульсии 2 мкм

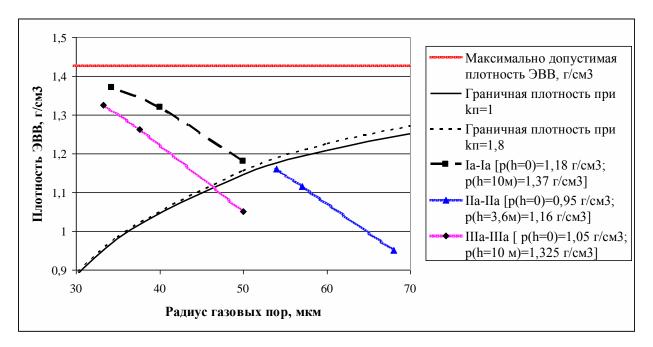


Рис. 3.14. Зависимость граничной плотности ЭВВ состава 2 от радиуса газовых пор при размере частиц эмульсии 3,5 мкм

Рис. 3.14 соответствует эмульсии, имеющий следующий химический состав: NH_4NO_3 - 45,45 %, $Ca(NO_3)_2$ - 30 %, H_2O - 16 %, топлив. фаза - 8,55%. Размер частиц эмульсии — 3,5 мкм, плотность матричной эмульсии — 1,487 г/см³.

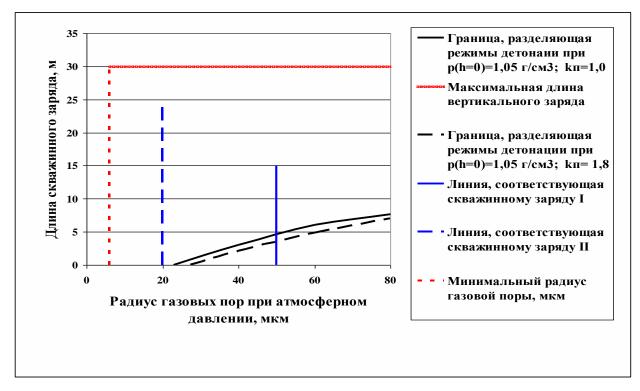
На рис. 3.13 нанесены отрезки линий (с I-I по IV), а на рис. 3.14 – отрезки Ia-Ia, IIa-IIa, IIIa-IIIa, соответствующие зависимостям плотности ЭВВ от размера газовых пор в вертикальных скважинных зарядах, характеристики которых указаны на рисунках. Здесь h - расстояние от верхнего сечения до текущего сечения заряда.

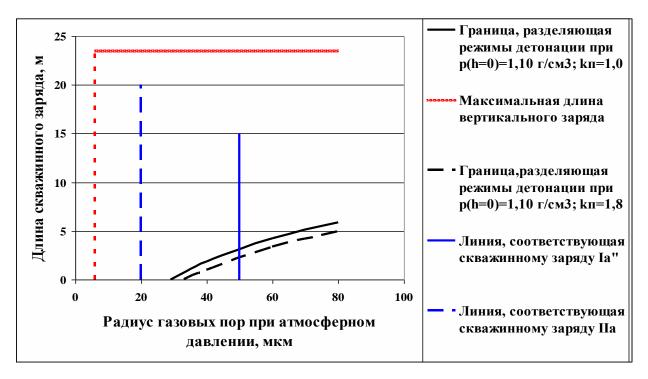
Детонация скважинных зарядов I-I, II-II (рис. 3.13), Ia-Ia (рис. 3.14) при нижнем инициировании проходит в высокоскоростном режиме без «срывов» процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области нейтральной устойчивости.

Детонация скважинных зарядов III-III (рис. 3.13), IIa-IIa (рис. 3.14) при нижнем инициировании проходит в режиме абсолютной устойчивости процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области абсолютной устойчивости.

Детонация скважинных зарядов IV-IV (рис. 3.13), IIIa-IIIa (рис. 3.14) при нижнем инициировании начинает проходить в высокоскоростном режиме, но при пересечении линии граничной плотности состояние нейтральной устойчивости детонационного фронта пропадает. Происходит разрушение ячеистого режима детонации, что приводит к ликвидации пересжатого режима детонации. В соответствии с зависимостью (3.15) происходит снижение энергетической плотности полной внутренней энергии в зоне реакции ($k_n \rightarrow 1$), приводящее к падению температуры в зоне реакции и замедлению химических реакций. Это приводит к резкому возрастанию предельного и критического диаметров. В результате наблюдается быстрое снижение скорости детонации вплоть до полной остановки детонационного процесса.

Для большей наглядности на рис. 3.15(A, Б) представлены зависимости удаления границы, разделяющей режимы распространения детонационной волны, от верхнего сечения вертикального скважинного заряда ЭВВ при нижнем инициировании данного заряда от радиуса газовых пор при атмосферном давлении при различных начальных плотностях ЭВВ.





Б).

Рис. 3.15. Зависимости удаления границы, разделяющей режимы распространения детонационной волны, от верхнего сечения вертикального скважинного заряда ЭВВ от радиуса газовых пор при атмосферном давлении при различной начальной плотности ЭВВ (нижнее инициирование).

На рис. 3.15 длина отрезка на линии, соответствующей скважинному заряду, между осью абсцисс и точкой пересечения этой линией с линией границы, разделяющей режимы детонации, соответствует длине в верхней части заряда, на которой наблюдается «срыв» детонации. Представлены вертикальные скважинные заряды ЭВВ, имеющие следующие длины и плотности при атмосферном давлении:

заряд I — длина 15 м, плотность 1,05 г/см³; заряд II — длина 25 м, плотность - 1,05 г/см³; заряд Ia — длина 15 м, плотность - 1,10 г/см³; заряд IIa — длина 20 м, плотность - 1,10 г/см³.

При распространении детонации в обратном направлении (в направлении уменьшения радиуса газовых пор) гидродинамических ограничений на устойчивость детонационной волны не возникает. Это объясняется тем, что в этом случае наблюдается обратная картина: плотность внутренней энергии в зоне

реакции возрастает (вследствие увеличения плотности ЭВВ), а для распространения детонации не требуется увеличения кинетической энергии взрывных газов в спутном потоке за фронтом детонационной волны. Поэтому падения теплового давления во взрывных газах за фронтом детонационной волны не наблюдается. Детонация будет распространяться до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3.12, показывает, что скорость распространения детонации в ЭВВ при прочих равных условиях связана с начальной величиной полной удельной энергии продуктов взрыва, которая помимо теплоты взрыва зависит от инициирующего воздействия. Более сильный и продолжительный инициирующий импульс создает более высокое значение плотности энергии в зоне реакции детонационной волны по сравнению с менее сильным и менее продолжительным воздействием (т.е. будут реализовываться режимы с более высоким значением коэффициента пересжатости детонации).

Влияние инициирующего воздействия на параметры детонации ЭВВ будет рассмотрено в следующей главе.

3.4. Анализ экспериментальных данных о неустойчивости детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами

работе [174] зафиксировавшие описаны эксперименты, обрывы высокоскоростных детонационных процессов по время экспериментов с ЭВВ «Фортис-100». Взрывались скважинные заряды диаметром 250 мм. Длина скважин 12-14 м, длина колонкового заряда – 6-9 м. Инициирование нижнее. Детонация осуществлялась сдвоенными тротиловыми промежуточными детонаторами ТС-400 (2х0,4 кг). Характерный график, описывающий изменение скорости детонации в зависимости от удаления от точки инициирования, приведен на рис. 3.16.

Возбужденная промежуточным детонатором высокоскоростная детонация, пройдя некоторую часть заряда (16-20 калибров), прекращалась, а оставшаяся часть заряда выгорала.

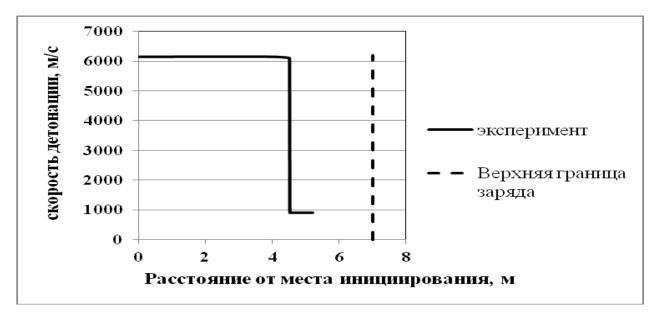


Рис. 3.16. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования (Сибай).

Авторы работы [174] пришли к выводу, что в описываемых опытах не детонировало примерно 30% от общей массы использованных зарядов.

Обрывы детонации происходили при использовании как усиленных обрезками ДШ сдвоенных боевиков ТС-400 (2х0,4кг тротила), так и просто сдвоенными боевиками ТС-400. При этом обрывы происходили в областях, где скорость детонации уже стабильна и высока (около 6000м/с), что свидетельствовало о том, что инициирующая способность всех примененных комбинаций промежуточных детонаторов достаточна, и ее недостаток не является причиной обрывов.

С аналогичными явлениями автор этой работы столкнулся при изучении влияния способов инициирования ЭВВ на карьере Асбестовского ГОКа [64].

Взрывались скважинные заряды Порэмита-1A диаметром 250 мм. Длина скважин 16-17 м, длина колонкового заряда — 10-12 м. Инициирование нижнее. Детонация осуществлялась различными промежуточными детонаторами: из

одной шашки ПТП-750 (0,75 кг); сдвоенными шашками ПТП-750; сдвоенными шашкой ПТП-750 и Т-500.

Характерный график, описывающий изменение скорости детонации в зависимости от удаления от точки инициирования, приведен на рис. 3.17 (ПД из одной шашки ПТП-750). Химический состав эмульсии ЭВВ: NH_4NO_3 - 75 %, H_2O - 18 %, топлив. фаза – 7 %. Длина скважины - 17 м, длина колонкового заряда — 12 м. Используемая аппаратура: прибор VOD Mate, непрерывно измеряющий величину сопротивления электрической цепи проводника-датчика. Принятые обозначения на рис. 3.17-3.19: сплошная линия — экспериментальное значение скорости детонации, штриховая линия — верхняя граница заряда.

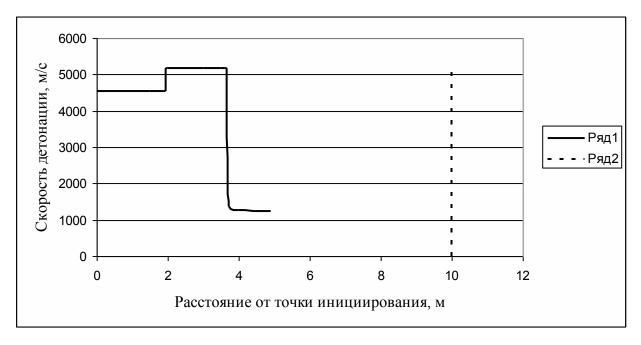


Рис. 3.17. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования (промежуточный детонатор – 1 шт. ПТП-750) /Acбест/

Скачкообразное изменение скорости по длине скважинного заряда при нижнем инициировании смесевого эмульсионного ВВ Иремекс-560 зафиксировано в работе [24]. Опыты проводились на карьере Айхальского ГОКа. Авторы [24] пришли к выводу, что практически 10-15% не участвует в реакции взрывчатого разложения.

На рис. 3.18 представлен график зависимости скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования, построенный на основании данных работы [24].

Явление обрыва идущего с большой скоростью детонационного процесса в ЭВВ наблюдается при различном химическом составе ВВ.

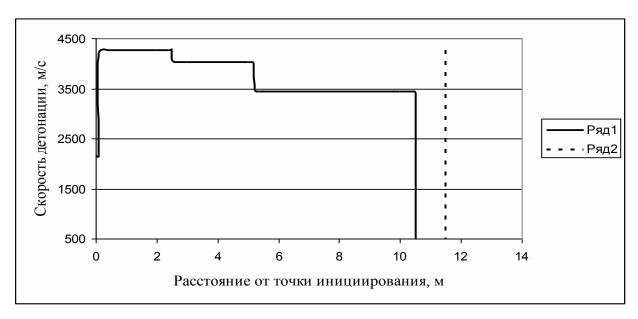


Рис. 3.18. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования (по данным [24])

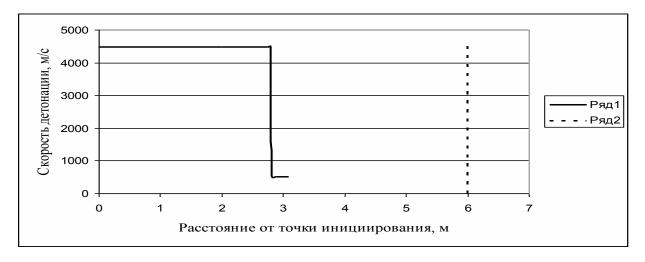


Рис. 3.19. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования [265]

На рис. 3.19 представлен график зависимости скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования для ЭВВ, имеющий химический состав – NH_4NO_3 - 43 %, $Ca(NO_3)_2$ - 32 %, H_2O - 16 %, топлив. фазы - 9% [265].

Объяснение экспериментальных данных недостаточным по амплитуде и продолжительности возбуждающим импульсом не состоятельны, т.к. обрывается высокоскоростная детонация, прошедшая расстояние в несколько десятков калибров.

Объяснение экспериментальных данных исходя из нарушений технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, также не способно объяснить рассматриваемое явление, т.к. данное явление наблюдается у разных исследователей, в разное время, при разных технологиях производства, зарядки и т.д.

Не объясняет явление и предположение о нарушении кабелей для замера, т.к. в работе [24] осуществлялись замеры при взрыве одиночных скважин, когда подбой кабеля исключен.

Не объясняет явление и предположение, что в ЭВВ попадают инородные предметы (буровая мелочь, осыпание стенок скважины, водяная пробка) [92], т.к. взрывание зарядов, описанное в [266], осуществлялось в защитном рукаве.

Не объясняет явление и предположение, что на ЭВВ в скважине могут оказывать опережающие детонационную волну воздействия стенки скважин, деформирующихся под воздействием взрывного импульса.

Действительно, при распространении возмущения по стенке скважины возможно существование трех типов поверхностных волн: Рэлея, Лэмба-Стоунли и Лява [232].

Далее приняты следующие обозначения: v_p , v_s -скорости распространения продольных и поперечных волн в среде, соответственно; v_l — скорость распространения волны во внутрискважинной жидкости (в нашем случае v_l = D_*).

Волна Рэлея обладает вертикальной поляризацией (вектор колебательного смещения частиц среды в волне перпендикулярен стенке скважины). Скорость распространения v_R волны Рэлея определяется преимущественно скоростью поперечной волны в твердом теле ($v_R = \zeta \cdot v_s$, где $0.87 \le \zeta \le 0.955$) [242].

Волна Лэмба-Стоунли также является волной с вертикальной поляризацией, но имеет иную по сравнению с волной Рэлея форму колебаний. Она состоит из слабо неоднородной волны в жидкости, амплитуды которой медленно убывают при удалении от границы, и двух (продольной и поперечной) сильно неоднородных волн в твёрдом теле. По этой причине энергия волны и движение частиц локализованы в основном в жидкости. Скорость волны меньше скоростей распространения упругих волн в обеих средах, то есть $v_{st} < v_s < v_p$, $v_{st} < v_l$.

Волна Лява с горизонтальной поляризацией распространяется вдоль границы твёрдого полупространства с твердым слоем (аналог - обсаженная скважина с хорошо зацементированной колонной). Она представляет собой чисто сдвиговую волну и обладает дисперсией скорости. Если толщина слоя стремится к нулю, скорость волны стремится к скорости v_s поперечной волны в неограниченном пространстве, а волна преобразуется в обычную объемную поперечную волну.

Скорость поперечных волн в горных породах, как правило, не превышает 3500-4000 м/с [131, 190], что ниже скорости детонации ЭВВ в рассмотренных опытах. Поэтому поверхностные волны не могли оказать влияние на ЭВВ перед детонационной волной, т.е. не могли оказать влияние на ход детонационных процессов.

Анализ представленных экспериментальных исследований показывает, что детонация вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, происходит в нестационарном режиме. При этом независимо от химической природы их окислительной фазы в них могут возникать скачкообразные переходы высокоскоростной детонации на

низкоскоростные режимы или даже обрывы детонационного процесса на расстояниях 15-20 и более калибров заряда от места инициирования.

Данные явления не могут быть объяснены недостаточной инициирующей способностью промежуточных детонаторов, нарушением технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, нарушением измерительных кабелей приборов для замера скорости детонации ЭВВ и попаданием инородных тел в ЭВВ, а также опережающим детонацию воздействием со стороны массива горных пород на ВВ.

Однако данные явления, как показано в пп.3.1-3.3 объясняются возникновением неустойчивостей детонационного фронта в ЭВВ [43, 50, 55, 56, 64, 266].

Выводы по главе 3

Анализ экспериментальных исследований показывает, что при детонации эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), сенсибилизированных газовыми порами, независимо от химической природы их окислительной фазы и размеров частиц эмульсии могут возникать скачкообразные переходы на низкоскоростные режимы детонации или даже обрывы детонационного процесса на расстояниях 15-20 и более калибров заряда от места инициирования. При этом обрывы (или переходы на низкоскоростные режимы) детонации происходят в областях, где скорость детонации стабильна и высока (до 5500-6000 м/с).

Данные явления не могут быть объяснены недостаточной инициирующей способностью промежуточных детонаторов, нарушением технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, нарушением измерительных кабелей приборов для замера скорости детонации ЭВВ.

Однако данные явления могут быть объяснены потерей устойчивости при распространении детонационной волны в заряде ЭВВ.

Исследования показали, что в ЭВВ реализуются только следующие режимы детонации:

нейтрально устойчивый режим (на поверхности детонационной волны возникают устойчивые возмущения);

абсолютно устойчивый режим (возмущения на поверхности детонационной волны экспоненциально угасают во времени).

Режим разрыва детонационной волны на неограниченно возрастающие струи не реализуется.

В случае угасающих со временем возмущений детонационного фронта будет наблюдаться стационарная детонация, описываемая теорией Зельдовича-Нейманна-Деринга (детонация с гладким фронтом).

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (нейтральная устойчивость) формируется ячеистая структура детонационного фронта. Детонация при этом проходит в пересжатом режиме.

Предложен критерий, позволяющий определить момент перехода на низкоскоростной режим детонации (или обрыв).

Получены поправки к модели детонации, описанной в гл.2, позволяющие рассчитывать пересжатые режимы детонации.

Показано, что положение линии, разграничивающей режимы нейтральной и абсолютной устойчивостей на координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ), определяется структурой, плотностью, химическим составом ЭВВ и степенью пересжатости детонации.

При проектировании и выполнении взрывных работ с применением ЭВВ для обеспечения прохождения детонационной волны по всей длине заряда необходимо учитывать структуру ЭВВ и рассчитывать плотность зарядов таким образом, чтобы в координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ) линия зависимости плотности ЭВВ от радиуса газовых пор для скважинных зарядов не пересекала границу, разделяющую режимы детонации.

Режим детонации с нейтрально устойчивым фронтом является недостаточно устойчивым к изменениям в структуре и плотности ЭВВ вдоль вертикального (наклонного) заряда, поэтому при распространении детонационной волны в таком

заряде ЭВВ возможен выход детонации из режима пересжатия, что обуславливает переход детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв процесса.

При распространении детонации в обратном направлении (в направлении уменьшения радиуса газовых пор) гидродинамических ограничений на устойчивость детонационной волны не возникает. Детонация в этом случае будет распространяться до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую.

ГЛАВА 4. ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЭВВ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ДЕТОНАТОРАМИ

В основе современных подходов к аналитическому решению проблемы инициирования детонации в ВВ ударными волнами лежит идея Ю.Б. Харитона о том, что требования к параметрам инициирующего воздействия определяются характеристиками и особенностями протекания детонационного процесса в возбуждаемом ВВ [236].

Согласно исследованиям [8-10, 207, 208] на параметры ударно-волнового воздействия для возбуждения детонации в гетерогенных ВВ влияет не только максимальная амплитуда импульса, но и спад давления за фронтом ударной волны, а также структура поверхности инициирующей ударной волны.

ЭВВ относятся к классу гетерогенных ВВ, поэтому при оценке возбуждающего действия ПД необходимо учитывать помимо величины фронтального давления также характер падения давления в ЭВВ в зафронтовой области и структуру фронта инициирующей ударной волны.

Последнее обстоятельство делает необходимым отдельное рассмотрение инициирующего воздействия на ЭВВ ПД, изготовленных из индивидуальных ВВ (смеси индивидуальных ВВ) и ПД из промышленных капсюлечувствительных смесевых аммиачно-селитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ).

Действительно, детонационные процессы в индивидуальных ВВ (смеси индивидуальных ВВ) при высокой плотности этих ВВ и достаточно большом диаметре проходят в режиме, близком к идеальному [19, 231]. Поэтому при взрыве ПД из данных ВВ в ЭВВ вводится ударная волна с гладкой поверхностью (плоской, цилиндрической, сферической и т.п. – в зависимости от геометрии ПД). Детонация же заряда аммонита или ЭВВ происходит преимущественно в режиме [50, 55. 56. детонационного фронта 70-72, 83. пульсирующего Следовательно, при взрыве ПД из данных ВВ в ЭВВ вводится ударная волна, осуществляющая его инициирование из многочисленных вершин пульсирующего фронта ударной волны (многоточечное инициирование) [207]. В этом случае детонация устанавливается в результате взаимодействия ударных волн, испускаемых пульсирующей границей «продукты детонации ПД - ЭВВ».

Согласно [40] макроскопические критерии ударно-волновой чувствительности выполняются в случаях, когда химические превращения в ВВ обусловлены его однородным разогревом при ударном сжатии. Данные критерии не могут применяться для оценки чувствительности ВВ в случаях, когда существенными являются локальности разогрева ВВ, размеры и распределения частиц ВВ и неоднородностей по объему ВВ [40]. Поэтому расчет параметров ПД для инициирования ЭВВ осуществлялся из выполнения условия, априори учитывающего природу вещества ВВ, [18]: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления P_f необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее $d_{npeo}(P_f)$, в течение времени $t(P_f)$ поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке $-P_{\scriptscriptstyle f}$ ($d_{\scriptscriptstyle nDed}(P_{\scriptscriptstyle f})$, $t(P_{\scriptscriptstyle f})$ предельный диаметр заряда и время химической реакции при фронтальном давлении P_f).

4.1. Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД

А). Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва промежуточного детонатора (ПД), изготовленного из индивидуального ВВ (смеси индивидуальных ВВ)

При освещении данного случая исходим из результатов работы [148].

При оценке инициирующего воздействия данного ПД полагаем, что при его взрыве в инициируемом ВВ возбуждается плоская ударная волна.

Рассмотрим боевик длиной l, диаметром d, помещенный в ЭВВ. Длину капсюля детонатора обозначим через l.

BB боевика характеризуется следующими параметрами: ρ_{δ} , D_{δ} , k_{δ} - плотность, скорость детонации и коэффициент политропы BB боевика, соответственно.

ЭВВ характеризуется: ρ_{oo} - плотностью, R_o - радиусом поры, Δ - размером частицы эмульсии и ударной адиабатой $D_y = A + BW_y$, где A, B - параметры ударной адиабаты инициируемого ВВ, D_y - скорость ударной волны, W_y - массовая скорость.

Расстояние от точки инициирования ВВ боевика капсюлем-детонатором до его торцов равны: $L_o = L - l$ и l соответственно.

Обозначим $L_* = \max\{L-l;l\}$. Рассмотрим торцевую часть ПД, удаленную на расстояние L_* от места инициирования ПД капсюлем-детонатором в момент выхода на нее детонационной волны при взрывчатом разложении ПД. Введем линейную систему координат «Oy» с осью y в направлении детонационной волны. Начало данной системы координат совместим с границей «торец ПД-ЭВВ».

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальные давление P_{yo} и скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ» W_{yo} можно найти из решения [19, 231]:

$$W_{yo} = \frac{D_{\delta}}{k_{\delta} + 1} \left\{ 1 + \frac{2k_{\delta}}{k_{\delta} - 1} \left[1 - \left(\frac{P_{yo}}{\rho_{\delta} D_{\delta}^{2}} (k_{\delta} + 1) \right)^{\frac{k_{\delta} - 1}{2k_{\delta}}} \right] \right\}. \tag{4.1}$$

где P_{yo} - давление во фронте ударной волны в ЭВВ:

$$P_{yo} = \rho_{oo} W_{yo} \left(A + B W_{yo} \right), \tag{4.2}$$

Исходя из (4.1) и (4.2) можно определить начальное значение W_{yo} :

$$\frac{3k_{\delta} - 1}{k_{\delta}^{2} - 1} D_{\delta} = \frac{2k_{\delta} D_{\delta}}{k_{\delta}^{2} - 1} \left[\frac{\left(k_{\delta} + 1\right) \rho_{oo}}{\rho_{\delta}} \frac{\left(A + BW_{yo}\right) W_{yo}}{D_{\delta}^{2}} \right]^{\frac{k_{\delta} - 1}{2k_{\delta}}} + W_{yo}. \tag{4.3}$$

Однако возбуждение процесса детонации в ЭВВ не является мгновенным. Для возбуждения данного процесса вещество ЭВВ необходимо сжать, обеспечить его возгорание и прогорание между «горячими» точками [74, 149, 165, 192]. Данный процесс происходит за определенное время τ_* , которое определяется особенностями инициируемого ЭВВ. За данное время граница раздела «продукты детонации — ЭВВ» смещается на расстояние x_* , а вглубь продуктов детонации проникает возникающая в них волна разряжения на глубину y_* .

Предварительно оценим величину τ_* :

$$\tau_* = \tau_o + t_o \,, \tag{4.4}$$

 t_o - время возгорания; τ_o - время прогорания ЭВВ между сенсибилизирующими порами.

Согласно (2.72)

$$t_{o} = \frac{4\pi \left(T_{AC}^{*} - T_{rp}\right)^{2} \lambda_{c} C_{c}}{\mu_{mp}^{2} \rho_{c} \left(\frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_{f}}{3\rho_{g}} \left(\frac{1}{z} - 1\right)}\right)^{6}} \left(\frac{R_{o}}{\Delta}\right)^{6}.$$
 (4.5)

Время прогорания межпорового пространства равно

$$\tau_o = \frac{R_o}{V_{cop}} \left(\left(\frac{\pi}{6\chi_s^o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right), \tag{4.6}$$

где $V_{\it гор}$ - скорость прогорания межпорового пространства эмульсии.

Величина $V_{\it zop}$ определяется на основании теории горения Зельдовича-Беляева [21, 102].

Принимая порядок реакции горения ЭВВ равным двум [73], имеем:

$$V_{\tilde{a}\tilde{t}\tilde{o}} = \frac{1}{\rho_f} \sqrt{\frac{2K_m}{Q_z} \left(\frac{RT_n^2}{E_A}\right)^3 \frac{3!}{(T_n - T_o)^2} \frac{M}{N_A} Z \exp\left(-\frac{E_A}{RT_n}\right)},$$
(4.7)

где ρ_f - плотность ЭВВ в зоне сжатия в момент прогорания;

 $E_{\scriptscriptstyle A}$ - энергия активации аммиачной селитры; $N_{\scriptscriptstyle A}$ - число Авогадро;

 T_{n} - температура в зоне сжатия в момент прогорания;

M - средний молекулярный вес продуктов детонации ЭВВ; K_m - коэффициент теплопроводности первичных продуктов детонации ЭВВ (определяется для температуры T_n с учетом поправок Сезерланда); $Q_z = \frac{P_f}{2} \left(\frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_f} \right) + Q_v^{\circ}$, где ρ_o - плотность ЭВВ в момент начала термического разложения;

 Q_V° - теплота разложения ЭВВ до первичных продуктов (распад по схеме Баума [19] на H_2O , CO, NO, N_2 , C);

Z - предэкспоненциальный множитель (рассчитывается по методике работы [21]).

Расчеты по формулам (4.6) и (4.7) показывают, что при характерных значениях параметров структуры ЭВВ ($R_o \approx 50$ мкм, $\Delta \approx 5$ мкм), $\rho_{_9} \approx 1,4$ г/см³, $P_{_f} \approx 10$ ГПа, $\chi_{_9}^o \approx 0,2$, $t_o \sim 10^{-8}$ с, $\tau_o \sim 10^{-6}c$. Следовательно, $\tau_* \approx \tau_o$.

Оценим величину давления в продуктах детонации ПД и скорость смещения границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» в момент τ_* . На основании [19] можно показать, что начальные распределения плотности $\rho(y)$ и давления P(y) в продуктах взрыва ПД в момент τ_* в области, не охваченной боковой волной разряжения, будут описываться следующими уравнениями:

$$\rho(y) = \rho_{E} \frac{k_{E} + 1}{k_{E}} \left(1 + \frac{k_{E} - 1}{k_{E}} \frac{y}{L_{*}} \right)^{\frac{2}{k_{E} - 1}}, \tag{4.8}$$

$$P(y) = P_{H} \left(1 + \frac{k_{E} - 1}{k_{E}} \frac{y}{L_{*}} \right)^{\frac{2k_{E}}{k_{E} - 1}}, \tag{4.9}$$

при $-\bigg(\min\Big\{2d;\frac{L_*}{2}\Big\}\bigg) \le y \le 0$, где y - текущая координата рассматриваемого сечения в продуктах взрыва ПД; $P_{_{\!\!H}}^{\delta}=\frac{\rho_{_{\!\!\!\delta}}D_{_{\!\!\!\delta}}^2}{k_{_{\!\!\!\delta}}+1}$ - давление в точке Чепмена-Жуге в продуктах взрыва ПД.

Величина проникновения волны разряжения в глубь продуктов детонации ПД равна:

$$y_* \approx \int_{0}^{\tau} (c(y) - U(y)) dt$$
, (4.10)

где $c(y) = D_{\tilde{\sigma}} \frac{k_{\tilde{\sigma}}}{k_{\tilde{\sigma}}+1} \left(1 + \frac{k_{\tilde{\sigma}}-1}{k_{\tilde{\sigma}}} \frac{y}{L_*}\right)$ - скорость звука в продуктах детонации ПД в сечении y, U(y) - массовая скорость продуктов взрыва ПД в момент τ_* в сечении y.

Расчеты на основании (4.6) и (4.10) показали, что

$$y_* \approx D_6 \left(\frac{k_6 - 1}{k_6 + 1} \right) \frac{R_o}{V_{cop}} \left(\left(\frac{\pi}{6 \chi_9^o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right). \tag{4.11}$$

Величину смещения x_* границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» определим из уравнения

$$x_* \approx \frac{1}{2} (W_{yo} + W_1) \tau_*,$$
 (4.12)

где $W_{\!\scriptscriptstyle 1}$ - скорости смещения границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» в момент времени τ_* .

Оценим величину W_1 из закона сохранения энергии. Рассмотрим трубку тока с единичным сечением. Тогда

$$E_T^{(o)} + E_k^{(o)} = E_T^{(1)} + E_k^{(1)} + E_k^{(2)} + A, (4.13)$$

где $E_T^{(o)}$, $E_k^{(o)}$ - начальные тепловая и кинетическая энергии продуктов взрыва ПД в области $(-y_*;0)$ в момент времени $\tau=0$ соответственно; $E_T^{(1)}$, $E_k^{(1)}$ - тепловая и кинетическая энергии продуктов взрыва ПД в области $(-y_*;x_*)$ в момент времени $\tau=\tau_*$, соответственно; $E_k^{(2)}$ - кинетическая энергия вещества ВВ, находящегося в зоне сжатия в момент $\tau=\tau_*$; A - работа на ударное сжатие вещества ЭВВ.

При $\frac{y_*}{L_*} \le 0,25$ изменение плотности в продуктах взрыва ПД в сечении $y > -y_*$ на момент прихода волны разряжения незначительно, поэтому имеем:

$$E_{T}^{(o)} \approx \frac{1}{k_{\mathcal{B}} - 1} \int_{0}^{-y} P_{\mathcal{H}} \left(1 + \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{y}{L_{*}} \right)^{\frac{2k_{\delta}}{k_{\delta} - 1}} dy = \frac{k_{\delta}}{(k_{\delta} - 1)(3k_{\delta} - 1)} P_{\mathcal{H}} L_{*} \left(1 - \left(1 - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{y}{L_{*}} \right)^{\frac{3k_{\delta} - 1}{k_{\delta} - 1}} \right). \tag{4.14}$$

$$E_{K}^{(o)} = \frac{1}{2} \int_{0}^{-y} \rho(y) U^{2}(y) dy \approx \frac{P_{\mathcal{H}}}{2k_{\delta}} y_{*} \left(1 - \frac{2k_{\delta} + 1}{k_{\delta}} \frac{y_{*}}{L_{*}} \right). \tag{4.15}$$

Учитывая, что в области действия волн разряжения $(-y_*; x_*)$ давление в продуктах взрыва ПД слабо зависит от координаты у [19], определяем:

$$E_T^{(1)} = \frac{P_{_H}^{(1)}(y_* + x_*)}{k_{_{\circ}} - 1}, \tag{4.16}$$

где $P_{_{\!\!H}}^{(1)}$ - давление продуктов взрыва ПД в области $\left(-y_{_{\!\!R}};x_{_{\!\!R}}\right)$ в момент времени $au= au_{_{\!\!R}}$.

$$P_{\scriptscriptstyle H}^{(1)} = P_{\scriptscriptstyle H} \left(\frac{\overline{\rho} k_{\scriptscriptstyle \delta}}{(k_{\scriptscriptstyle \delta} + 1) \rho_{\scriptscriptstyle \delta}} \right)^{k_{\scriptscriptstyle \delta}}. \tag{4.17}$$

где $\bar{\rho}$ - плотность продуктов взрыва ПД в области $(-y_*; x_*)$ в момент времени $\tau = \tau_*$. На основании (4.8):

$$\overline{\rho} = \frac{\int_{0}^{y_{*}} \rho(y) dy}{x_{*} + y_{*}} = \frac{k_{\delta} + 1}{k_{\delta}} \rho_{\delta} \frac{1 - 2\left(\left(\frac{k_{\delta} + 1}{2k_{\delta}}\right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}} - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta} + 1}\right) \frac{y_{*}}{L_{*}}}{x_{*} + y_{*}}.$$
 (4.18)

$$1 - 2 \left(\left(\frac{k_{\delta} + 1}{2k_{\delta}} \right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}} - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta} + 1} \frac{y_{*}}{L_{*}} \right)$$

$$E_{k}^{(1)} = \frac{1}{2} \overline{\rho} W_{1}^{2} y_{*} = \frac{k_{\delta} + 1}{k_{\delta}} \rho_{\delta} y_{*} \frac{1 - 2 \left(\left(\frac{k_{\delta} + 1}{2k_{\delta}} \right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}} - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta} + 1} \right) \frac{y_{*}}{L_{*}}}{x_{*} + y_{*}} W_{1}^{2}.$$

$$(4.19)$$

Учитывая, что при ударном сжатии материала выполняется условие $E_k^{(2)} = A$ [19, 231], имеем:

$$E_k^{(2)} + A = \rho_o W_1^2 \int_0^{\tau_*} D_y d\tau \approx \rho_o D_y' \tau_* W_1^2, \qquad (4.20)$$

где
$$D_y' = A + BW_1$$
. (4.21)

На основании (4.11) — (4.21), получаем следующее уравнение для определения W_1 :

$$\begin{split} \frac{k_{\delta}}{(k_{\delta}-1)(3k_{\delta}-1)}P_{n}L_{*}\left(1-\left(1-\frac{k_{\delta}-1}{k_{\delta B}}\frac{y}{L_{*}}\right)^{\frac{3k_{\delta}-1}{k_{\delta}-1}}\right) - \frac{1}{k_{\delta}^{2}-1}\frac{y_{*}}{L_{*}}\left(1-2\left[\left(\frac{k_{\delta}+1}{2k_{\delta}}\right)^{\frac{2}{k_{\delta}-1}}-\frac{k_{\delta}-1}{k_{\delta}+1}\right]\frac{y_{*}}{L_{*}}\right)^{k_{\delta}} \\ + \frac{1}{2k_{\delta}(k_{\delta}+1)}\frac{y_{*}}{L_{*}}\left(1-\frac{2k_{\delta}+1}{k_{\delta}}\frac{y_{*}}{L_{*}}\right) - \frac{k_{\delta}+1}{2k_{\delta}}\left[1-2\left[\left(\frac{k_{\delta}+1}{2k_{\delta}}\right)^{\frac{2}{k_{\delta}-1}}-\frac{k_{\delta}-1}{k_{\delta}+1}\right]\frac{y_{*}}{L_{*}}\frac{y_{*}}{L_{*}}z^{2} = \\ = \left(\frac{k_{\delta}+1}{k_{\delta}-1}\right)\frac{\rho_{oo}}{\rho_{\delta}}\frac{y_{*}}{L_{*}}\left(\frac{A}{D_{B}}+Bz\right)z^{2} \end{split}$$

$$\Box E \ z = \frac{W_{1}}{D_{\delta}}. \end{split}$$

На основании (4.11), (4.12), (4.17), (4.18) определяем статическую составляющую давления в продуктах детонации ПД в момент τ_* :

$$P_{H}^{"} \approx P_{H} \left\{ \frac{1 - 2 \left[\left(\frac{k_{\sigma} + 1}{2k_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{k_{\sigma} - 1}} - \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right] \frac{D_{\sigma}}{L_{*}} \left(\frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right) \frac{R_{o}}{V_{zop}} \left[\left(\frac{\pi}{6\chi_{9}^{o}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\}^{k_{\sigma}}}{1 + \frac{k_{\sigma} + 1}{2(k_{\sigma} - 1)} \left(\frac{W_{yo}}{D_{\sigma}} + z \right)}, \quad (4.23)$$

Кинетическая составляющая давления P_k' продуктов взрыва ПД в момент τ_* найдется из уравнения:

$$P_{k}^{"} \approx \frac{k_{\delta} + 1}{2k_{\delta}} \rho_{\delta} W_{1}^{2} \left\{ \frac{1 - 2 \left[\left(\frac{k_{\delta} + 1}{2k_{\delta}} \right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}} - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta} + 1} \right] \frac{D_{\delta}}{L_{*}} \left(\frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta} + 1} \right) \frac{R_{o}}{V_{zop}} \left[\left(\frac{\pi}{6 \chi_{s}^{o}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]}{1 + \frac{k_{\delta} + 1}{2(k_{\delta} - 1)} \left(\frac{W_{yo}}{D_{\delta}} + z \right)} \right\}. \quad (4.24)$$

При распаде зоны сжатия $P_f > P_o = P_{_H}^{''} + P_{_k}^{''}$, где $P_f = \rho_{oo} W_1 \big(A + B W_1 \big)$ - давление в зоне сжатия.

Следовательно, при распаде зоны сжатия в ЭВВ возникнет торможение продуктов детонации ПД. Это приводит к возрастанию в них давления до величины P_x . Данная величина определяется из условия: скорости движения продуктов взрыва ПД и продуктов разложения ЭВВ на границе их раздела совпадают. На основании указанного условия имеем [19, 231]:

$$\sqrt{\frac{2P_o}{\overline{\rho}}} \frac{z_1 \frac{P_f}{P_o} - 1}{\sqrt{(k_E + 1)z_1 \frac{P_f}{P_o} + k_E - 1}} = \frac{2k_{_{3M}}}{k_{_{3M}}^2 - 1} \left(\frac{P_f}{P_*}\right)^{\frac{k_{_{3M}} - 1}{2k_{_{3M}}}} D_* \left[1 - z_1^{\frac{k_{_{2M}} - 1}{2k_{_{3M}}}}\right], \quad (4.25)$$

где $z_1 = \frac{P_x}{P_f}$; P_* , D_* , $k_{_{9M}}$ - давление в точке Чепмена-Жуге, скорость детонации, коэффициент политропы ЭВВ соответственно.

Тогда получаем следующее требование к ПД – в момент τ_* ЭВВ давление в продуктах взрыва ПД на границе «продукты взрыва ПД - продукты взрыва ЭВВ» P_x должно быть не меньше, чем давление в продуктах взрыва ЭВВ:

$$P_* \le P_x \tag{4.26}$$

Значения P_* , D_* , $k_{_{9M}}$ определяются на основании решений, изложенных в п. 2.5. Тогда из (4.26) можно определить минимальное L_* для данного химического состава ПД и рассматриваемого ЭВВ.

В случае невозможности подбора L_* , в качестве вещества ПД необходимо использовать BB с более высокими детонационными характеристиками.

Ограничения на диаметр $\Pi \coprod d$ находятся из условия

$$d > \max \left\{ 4V_p \tau_*; 2D_* \tau_* \right\}, \tag{4.27}$$

где $V_p \approx \frac{D_\delta}{2}$ - скорость боковой волны разряжения в продуктах взрыва ПД [19, 231]; $2D_*\tau_*$ - минимальный диаметр зоны реакции в ЭВВ, исключающий влияние волн разряжения на характер взрывного разложения ЭВВ.

Б). Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва промежуточного детонатора (ПД), изготовленного из промышленных капсюлечувствительных смесевых аммиачно-селитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ)

Характерной особенностью рассматриваемого случая является TO обстоятельство, что детонация ВВ, из которого изготовлен ПД (аммонит или ЭВВ), происходит в ячеистом режиме. В этом случае фронт детонационной волны в ПД представлен пульсирующей поверхностью [55, 71, 72, 83, 141, 207]. Это приводит к тому, что при втекании продуктов детонации ПД в ЭВВ в последнем формируется поверхность «продукты детонации ПД - ЭВВ», которая будет иметь не гладкую, а рельефную структуру («впадина-выступ /лидирующий участок/»). Указанная топология поверхности «продукты детонации ПД ЭВВ» обуславливает возникновение в области «впадин» системы сходящихся ударных волн. Это вызывает возрастание давления и температуры в данных областях ЭВВ по сравнению со случаем, когда продукты детонации ПД имеют ту же массовую скорость, но граница «продукты детонации ПД - ЭВВ» плоская и гладкая [41]. Однако необходимо отметить, что сходящиеся ударные волны в области «впадин» будут воздействовать на ЭВВ, которое уже было подвержено воздействию расходящихся ударных волн, испущенных «выступами» /лидирующими участками/ границы «продукты детонации ПД - ЭВВ». Таким образом, ЭВВ в области соприкосновения с продуктами детонации ПД подвергается двойному ударному сжатию. Согласно [8, 9, 121, 207], опережающее действие слабых ударных волн (в нашем случае - расходящиеся волны, возбужденные «выступами») может как десенсибилизировать инициируемое ЭВВ, так и облегчить его инициирование последующим импульсом (в нашем случае сходящимися волнами в области «впадин»).

Рассмотрим процесс втекания эмульсии под действием ударной волны в газовую пору. Как уже отмечалось в п.1.2, высокоскоростная киносъемка процесса схлопывания газовой поры в жидкости под действием сильной ударной

волны показала, что данный процесс происходит асимметрично [253]. Поток, втекающей в пору, заполняет ее примерно до половины объема (заполняется полусфера, обращенная выпуклостью к потоку). Далее, оставшаяся часть поры распадается на большое количество мельчайших пор. Таким образом, если ударная волна не инициирует возгорание эмульсии до момента разрушения поры на мельчайшие поры, то возгорание эмульсии под действием ударной волны не состоится. Это связано с тем, что схлопывание мелких пор будет происходить не в гидродинамическом режиме (вследствие малого размера пор), а в вязком режиме. Однако схлопывание в вязком режиме осуществляется с небольшой скоростью [96], поэтому возгорание возможно лишь при большой задержке времени загорания (порядка нескольких микросекунд - [237]). Однако это на один-два порядка превышает опытные данные [114].

Таким образом, возможны два варианта развития событий в ЭВВ при падении на него пульсирующего ударного фронта ПД:

- 1. Первичные ударные волны, испущенные лидирующими участками («выступами»), разбивают поры в ЭВВ на мельчайшие поры до загорания эмульсии.
- 2. Первичные волны возбуждают загорание эмульсии до момента распада поры в ЭВВ.

В первом случае, как показано выше, непосредственное воздействие ПД на ЭВВ не вызывает в нем детонации.

Во втором случае в поре после воспламенения поверхности эмульсии в областях наибольших сдвиговых напряжений (экваториальная область поры – ось по направлению ударной волны) вспыхивает втекающий в пору поток эмульсии, диспергированный на мельчайшие частицы [88]. Инициируется горение эмульсии в направлении, нормальном к поверхности поры. Образующиеся при горении и ранее содержащиеся в поре газы препятствуют ее коллапсу [146, 233], обеспечивая наличие достаточно крупной поры к моменту попадания данной поры в область «впадин», где под действием сходящихся ударных волн разогретая при первом ударе эмульсия втекает в пору в гидродинамическом режиме.

Эмульсия дополнительно сжимается разогревается. Согласно [31] И эффективность «определяется не средней, инициирования локальной температурой в наиболее «горячей» точке. Такими точками в реальной волне являются области столкновения поперечных Следовательно, ВОЛН≫. при помощи ПД с эффективность инициирования ЭВВ пульсирующим детонационным фронтом может быть весьма высокой.

Анализ ТУ различных видов ЭВВ, патентов на эмульсионные ПД [105, 180, 181] и многочисленные экспериментальные данные по применению ПД из аммонита 6ЖВ [77, 111, 160] показывает, что ЭВВ, сенсибилизированные газовыми порами, возбуждаются от промежуточного детонатора (ПД), изготовленного из промышленных капсюлечувствительных смесевых аммиачноселитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ). Это возможно в случае, если десенсибилизации ЭВВ первичными ударными волнами не происходит, т.е. инициирование ЭВВ проходит по второму варианту.

Сделаем некоторые численные оценки инициирующей способности рассматриваемого вида ПД. Начальное контактное давление границе на «выступа» с ЭВВ можно определить из уравнения (4.3), т.к. контактные напряжения в момент удара близки к напряжениям в плоской волне. Далее при проникновении лидирующих участков продуктов детонации ПД в ЭВВ образуются расходящиеся от «выступов» ударные волны, давление в которых «выступов» падает мере удаления OT вследствие геометрического расхождения. После столкновения данных волн по равноудаленной от смежных выступов линии отраженные волны образуют область разгрузки, которая подвергается воздействию сходящихся ударных волн в области «впадин».

Оценим величину возрастания давления в области столкновения сходящихся во «впадине» ударных волн /коэффициент отражения/, по сравнению с воздействием ударной волны с гладким плоским фронтом. Известно, если взаимодействуют одинаковые ударные волны, то в силу симметрии достаточно рассмотреть взаимодействие одной ударной волны с жесткой стенкой [75, 217, 223].

Оценим величину коэффициента отражения этой ударной волны от жесткой стенки. Нам априори неизвестна степень разложения ЭВВ в первичных ударных волнах, поэтому рассмотрим два крайних случая:

вторичные ударные волны распространяются в инертной пористой жидкости и отражаются от жесткой стенки (соответствует случаю, когда разложение ЭВВ в первичной волне незначительно);

отражение детонационной волны от жесткой стенки (случай значительного разложения ЭВВ в первичных волнах).

В первом случае - при значительных давлениях на фронте ударной волны, падающей на жесткую поверхность, определяющее влияние на давление в отраженной волне играют начальная пористость вещества ЭВВ и величина давления в падающей волне [23, 78, 219], а также сжимаемость ЭВВ и вещества преграды [19, 103, 226].

На рис. 4.1 и 4.2 приведены зависимости значений коэффициента отражения от жесткой стенки при различном давлении в падающей волне для ЭВВ с различной окислительной фазой. Рассматривались следующие типы ЭВВ по химическому составу:

Тип 1 : NH_4NO_3 — 46,4 %, $Ca(NO_3)_2$ -30 %, H_2O — 16 %, топливная фаза — 7,6 %. Плотность матричной эмульсии — 1,488 г/см³. Скорость звука в эмульсии — 2490 м/с.

Тип 2 : NH_4NO_3 — 78,5 %, H_2O -15,5 %, топливная фаза — 6 %. Плотность матричной эмульсии - 1,33 г/см³. Скорость звука в эмульсии - 1920 м/с.

Во втором случае — согласно данным [75] при расчете столкновения детонационных волн в смесевом промышленном ВВ методика работы [221] позволяет получать корректные результаты. На рис. 4.3 приведены зависимости величины коэффициента отражения детонационной волны в ЭВВ от жесткой стенки от угла падения (при различных значениях коэффициента политропы). Графики простроены на основании решений [221].

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4.1-4.3, показывает, что величина коэффициента отражения $k_{\text{отр}}$ слабо зависит от степени разложения ЭВВ в первичных ударных волнах. Поэтому в оценочных расчетах будем полагать, что коэффициент отражения ударных волн в области «впадин» равен $k_{\text{отр}} \approx 2,3$.

В этой величине возрастания давления в области столкновения сходящихся во «впадине» ударных волн не учитывается увеличение давления вследствие геометрического схождения ударных волн [98, 101, 146, 221, 228]. Однако ввиду вероятных колебаний смежных «выступов» по высоте и форме ограничимся данным значением, считая его нижней границей оценочных расчетов. Принятое значение $k_{\rm отр}$ согласуется с данными о повышении давления в областях детонационной волны в жидких ВВ, где происходит взаимодействие поперечных волн [79].

Легко видеть, что инициирование начинается на некоторой глубине от границы «продукты детонации ПД - ЭВВ», что согласуется с данными [207] по неидеальному инициированию.

Из (4.1)-(4.3) следует, что увеличение начального давления на плоской границе «продукты детонации ПД - ЭВВ» в $k_{\rm отр}$ достигается при формальном увеличении скорости детонации ПД примерно в $\sqrt{k_{\rm отp}}$ раз (при неизменных значениях $\rho_{\rm o}$, $k_{\rm o}$).

Следовательно, оценка геометрических параметров ПД из ЭВВ и аммонита 6ЖВ для инициирования ЭВВ может осуществляться по методике, приведенной в п.А настоящего параграфа, если расчетное значение скорости детонации ВВ ПД увеличить в $\sqrt{2,3}\approx1,5$ раза по сравнению с фактической. Интересно отметить, что данное значение согласуется с величиной возрастания скорости детонации в начале ячейки относительно средней скорости детонационного процесса в многофронтовой газовой детонации [30].

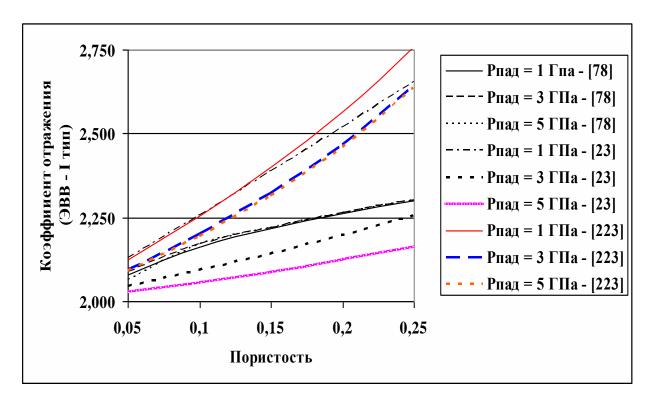


Рис.4.1. Зависимости значений коэффициента отражения от жесткой стенки при различном давлении в падающей волне для ЭВВ I типа

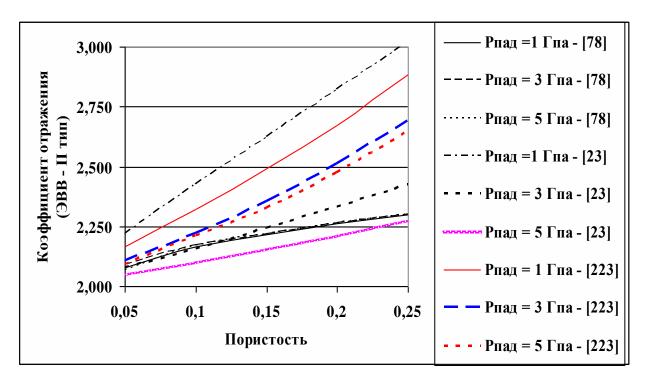


Рис.4.2. Зависимости значений коэффициента отражения от жесткой стенки при различном давлении в падающей волне для ЭВВ II типа

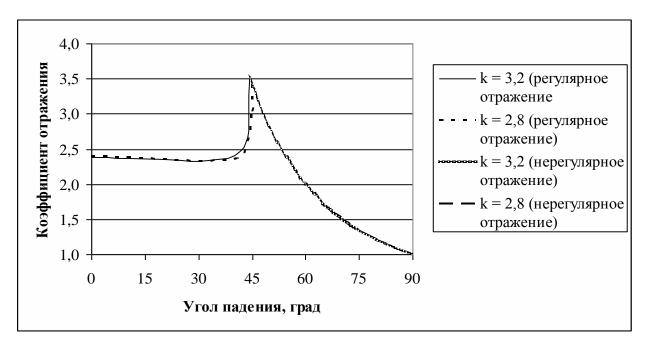


Рис.4.3. Зависимость величины коэффициента отражения детонационной волны в ЭВВ от жесткой стенки от угла падения при различных значениях коэффициента политропы (по [221])

В случае наличия в ЭВВ твердых включений размером 2-5 мм и их содержании до 30% (объем.) давление в ударной (детонационной) волне усиливается вследствие отражения на этих включениях [109].

4.2. Инициирование ЭВВ при взрыве удлиненного (линейного) ПД

В настоящем параграфе приводится оценка условий возбуждения детонации в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, под действием скользящей детонационной волны, вызываемой взрывом линейного (удлиненного) промежуточного детонатора.

В основу решения положены результаты, полученные в работах [46, 47, 53].

Рассмотрим линейный промежуточный детонатор радиусом r_o , помещенный в пространство, заполненное ЭВВ. Принимаем, что ПД характеризуется гладким детонационным фронтом.

Введем линейную систему координат «Oy» с осью у линейного ПД. Начало данной системы координат совместим точкой инициирования ПД.

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальную скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ» W_{ro} в направлении перпендикулярном оси ПД можно найти на основании газодинамических решений для скользящей детонационной волны [19]:

$$W_{ro} = \frac{2k_{\delta}D_{\delta}}{k_{\delta}^{2} - 1} \left[1 - \left(\frac{(k_{\delta} + 1)\rho_{oo}}{\rho_{\delta}} \frac{(A + BW_{ro})W_{ro}}{D_{\delta}^{2}} \right)^{\frac{k_{\delta} - 1}{2k_{\delta}}} \right].$$
(4.28)

Как отмечено в п.4.1, возбуждение процесса детонации в ЭВВ не является мгновенным. Для осуществления данного процесса вещество ЭВВ необходимо сжать, обеспечить его возгорание и прогорание между «горячими» точками. Данный процесс происходит за определенное время τ_* , которое определяется особенностями инициируемого ЭВВ. За данное время граница раздела «продукты детонации — ЭВВ» смещается в радиальном направлении на расстояние x_* , а вглубь продуктов детонации в радиальном направлении проникает возникающая в них волна разряжения на глубину $\Delta \mathbf{r}_*$.

Согласно п.4.1
$$\tau_* \approx \tau_o$$
, (4.29)

где τ_o - время прогорания ЭВВ между сенсибилизирующими порами (4.6).

Оценим величину давления в продуктах детонации ПД и скорость смещения в радиальном направлении границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» в момент τ_* в сечении «у». Принимаем, что время прихода детонационной волны, распространяющейся в ПД, в сечение «у» соответствует моменту времени $\tau = 0$. На основании [19, 230] можно показать, что начальные распределения плотности $\rho(y)$ и давления P(y) в продуктах взрыва ПД в момент τ_* в области, не охваченной радиальной волной разряжения, будут описываться следующими учитывающими действие аксиальной волны разряжения уравнениями:

$$\rho(y) = \rho_{\delta} \frac{k_{\delta} + 1}{k_{\delta}} \left(1 - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{D_{\delta} \tau_{*}}{y + D_{\delta} \tau_{*}} \right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}}, \tag{4.30}$$

$$P(y) = P_{H} \left(1 - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{D_{\delta} \tau_{*}}{y + D_{\delta} \tau_{*}} \right)^{\frac{2k_{\delta}}{k_{\delta} - 1}}.$$
 (4.31)

Величина проникновения радиальной волны разряжения вглубь продуктов детонации ПД равна

$$\Delta \mathbf{r}_* = \int_0^{\tau_*} c(y) dt , \qquad (4.32)$$

где $c(y) = \frac{D_6}{k_6 + 1} \left(1 + \frac{(k_6 - 1)y}{y + D_6 \tau_*} \right)$ - скорость звука в продуктах детонации ПД в области, не охваченной радиальной волной разряжения, в сечении «у». Уравнение (4.32) справедливо при $\tau_* \le \min \left\{ \frac{2y}{D_6}; \tau_{oo} \right\}$, (4.33)

где
$$au_{oo} = z_{oo} \frac{y}{D_o}$$
. z_{oo} - корень уравнения $z + (k_o + 1) \ln(1 + z) = (k_o + 1) r_o y^{-1}$.

При выполнении (4.33) величина Δr_* определяется из (4.32) и равна

$$\Delta \mathbf{r}_* = D_{\delta} \tau_* (\mathbf{k}_{\delta} + 1)^{-1} \left[1 + (k_{\delta} - 1) \mathbf{y} (\mathbf{D}_{\delta} \tau_*)^{-1} \ln (1 + \mathbf{D}_{\delta} \tau_* \mathbf{y}^{-1}) \right]. \tag{4.34}$$

В случае $\tau_* \ge \tau_{oo}$ радиальная волна разряжения доходит до оси ПД, поэтому в этом случае принимаем, $\Delta r_* \equiv r_o$.

Величину смещения x_* границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» определим из уравнений: $x_* = W_* \tau_*$ и $W_* \approx 0.5 (W_{ro} + W_{r1})$, (4.35)

где W_{r1} - радиальная компонента скорости смещения границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» в момент времени au_* .

Оценим величину W_{r1} из закона сохранения энергии. Рассмотрим объем вещества ПД и ЭВВ, ограниченный сечениями у и у + dy . Тогда

$$d(\Delta E_{T}) = d(E_{K,\Pi,\Pi}) + d(E_{K,\Theta BB}) + d(A), \qquad (4.36)$$

где $d(\Delta E_{\tau})$ - изменение тепловой энергии продуктов взрыва ПД в области (y; y + dy) за промежуток времени τ_* с учетом не только радиального расширения, но и потерь энергии вследствие аксиального движения продуктов детонации ПД;

 $d(E_{\kappa,\Pi,\overline{H}})$ - кинетическая энергия радиального движения продуктов взрыва ПД в области (y;y+dy) в момент времени $\tau=\tau_*$; $d(E_{\kappa,BB})$ - кинетическая энергия радиального движения вещества ЭВВ, находящегося в области (y;y+dy) в момент $\tau=\tau_*$; d(A) - работа на ударное сжатие вещества ЭВВ, находящегося в области (y;y+dy) к моменту $\tau=\tau_*$.

При оценке величины W_{r1} из уравнения (4.36) полагаем: 1. $d(E_{\kappa, \rm SBB}) = d(A)$, т.к. вещество ЭВВ подвергается ударному сжатию [19]; 2. Радиальная скорость движения материала ЭВВ в зоне сжатия изменяется по закону $W_{\rm r} = W_{\rm ro} \left(\frac{r_o}{r}\right)^{0.5}$

[166]; 3. Радиальная скорость разлетающихся взрывных газов ПД изменяется линейно с изменением текущего радиуса, а плотность продуктов взрыва ПД внутри области, охваченной радиальной волной разряжения и границей «продукты детонации ПД-ЭВВ», постоянна [136].

Решение задачи распадается на два случая: а). $\tau_* \ge \tau_{oo}$ - к моменту распада зоны сжатия в ЭВВ радиальная волна разгрузки доходит до оси ПД; б). $\tau_* < \tau_{oo}$ - к моменту распада зоны сжатия в ЭВВ радиальная волна разгрузки охватывает только часть сечения ПД.

Ввиду громоздкости получающихся выражений приведем уравнение, полученное из (4.36), для определения скорости W_{r1} в случае $\tau_* \geq \tau_{oo}$ Имеем:

$$\begin{split} &\frac{D_{6}^{2}}{k_{6}^{2}-1}\left(1-\frac{k_{6}-1}{k_{6}}\frac{D_{6}\tau_{*}}{y+D_{6}\tau_{*}}\right)^{\frac{2k_{6}}{k_{6}-1}}\left[1-\frac{1}{\left(1+x_{*}\right)^{2(k_{6}-1)}}\right] = \frac{2\rho_{o}}{\rho_{\delta}}W_{ro}^{2}\frac{\left(A+BW_{*}\right)\tau_{*}}{r_{o}} + \\ &+\frac{k_{\delta}+1}{4k_{\delta}}W_{rl}^{2}\left(1-\frac{k_{\delta}-1}{k_{\delta}}\frac{D_{6}\tau_{*}}{y+D_{6}\tau_{*}}\right)^{\frac{2}{k_{6}-1}} \end{split} \tag{4.37}$$

На основании (4.31), (4.35) определяем статическую составляющую давления в продуктах детонации ПД в момент τ_* :

$$P(y,\tau_*) = \frac{P_{H}}{(1+x_*)^{2k_{\delta}}} \left(1 - \frac{k_{\delta}-1}{k_{\delta}} \frac{D_{\delta}\tau_*}{y+D_{\delta}\tau_*}\right)^{\frac{2k_{\delta}}{k_{\delta}-1}}.$$
 (4.38)

Кинетическая составляющая давления P_k' продуктов взрыва ПД в момент τ_* найдется из уравнения

$$P_{k}' = \frac{k_{\delta} + 1}{2k_{\delta}} \rho_{\delta} W_{rl}^{2} \left(1 - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{D_{\delta} \tau_{*}}{y + D_{\delta} \tau_{*}} \right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}} (1 + x_{*})^{-2}.$$
(4.39)

При распаде зоны сжатия $P_f > P(y, \tau_*) + P_k^{'}$, где $P_f = \rho_o(A + BW_{rl})W_{rl}$ - давление в зоне сжатия [42].

Следовательно, при распаде зоны сжатия в ЭВВ возникнет торможение продуктов детонации ПД продуктами распада ЭВВ. Это приводит к возрастанию в продуктах ПД давления до величины P_x . Данная величина определяется из условия: скорости движения продуктов взрыва ПД и продуктов разложения ЭВВ на границе их раздела совпадают. На основании указанного условия в соответствии с (4.25) имеем:

$$\sqrt{\frac{2P_o}{\rho_{\bullet}}} \frac{z_1 \frac{P_f}{P_o} - 1}{\sqrt{(k_E + 1)z_1 \frac{P_f}{P_o} + k_E - 1}} = \frac{2k_{_{\mathfrak{I}M}}}{k_{_{\mathfrak{I}M}}^2 - 1} \left(\frac{P_f}{P_*}\right)^{\frac{k_{_{\mathfrak{I}M}} - 1}{2k_{_{\mathfrak{I}M}}}} D_* \left[1 - z_1^{\frac{k_{_{\mathfrak{I}M}} - 1}{2k_{_{\mathfrak{I}M}}}}\right], \tag{4.40}$$

где $z_1 = \frac{P_x}{P_f}$; P_* , D_* , $k_{_{\mathfrak{IM}}}$ - давление в точке Чепмена-Жуге, скорость детонации, коэффициент политропы ЭВВ соответственно.

Здесь $\bar{\rho}_{\bullet}$ - плотность продуктов взрыва ПД в момент $\tau = \tau_{*}$:

$$\overline{\rho_{\bullet}} = \frac{k_{6} + 1}{k_{6}} \rho_{6} \left(1 - \frac{k_{6} - 1}{k_{6}} \frac{D_{6} \tau_{*}}{y + D_{6} \tau_{*}} \right)^{\frac{2}{k_{6} - 1}} (1 + x_{*})^{-2} . \tag{4.41}$$

Система уравнений (4.28) - (4.41) позволяет оценить возбуждение ЭВВ скользящей детонационной волной.

4.3. Инициирование ЭВВ системой сближенных сосредоточенных зарядов.

В основу решения положены результаты, полученные в работе [52].

Как уже отмечалось выше, практика ведения взрывных работ на карьерах с использованием наливных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, выявляет тенденцию к применению все более мощных промежуточных детонаторов, как линейных (удлиненных) ПД [110, 226, 234, 249], так и мощных сосредоточенных ПД [76, 77, 111, 130]. Это объясняется стремлением избежать возникновения режимов низкоскоростного взрывчатого разложения ЭВВ, при которых не только снижается эффективность и безопасность взрывных работ, но и ухудшается экология вследствие повышенного выброса ядовитых газов в атмосферу.

Однако в настоящее время промышленностью освоен выпуск большой номенклатуры сосредоточенных промежуточных детонаторов небольшой и средней мощности, успешно зарекомендовавших себя при инициировании простейших и гранулированных ВВ. Многие горные предприятия уже давно используют две (и более) такие шашки для инициирования наливных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами.

В настоящем параграфе представлена методика расчетов, изложенная в работе [52] и позволяющая определять размеры зарядов ПД, оптимальные расстояния между зарядами ПД в зависимости от детонационных параметров ВВ, из которого изготовлен ПД, а также химического состава, плотности и структуры возбуждаемых ЭВВ,.

Эффективность инициирующего воздействия на ЭВВ сближенных сосредоточенных ПД вытекает из эффекта взаимодействия встречных ударных волн при взрыве сближенных зарядов. В этом случае (при равенстве данных сближенных зарядов) отражение ударных волн друг от друга происходит, как от абсолютно жесткой стенки [221, 227]. Это способствует увеличению коэффициента отражения в $(1 + \frac{\rho_{oo}D_*}{\rho_c C_p})$ раз по сравнению с отражением от сжимаемой стенки скважины $(\rho_c, C_p$ - плотность среды, окружающей заряд, и

скорость продольных волн в этой среде). Данная система зарядов и будет ПД, который в дальнейшем будем называть когерентным ПД.

При взрыве сферического заряда (ПД) в ЭВВ возникает расширяющийся в радиальном направлении газовый пузырь, который при расширении испускает ударную волну, также распространяющуюся в радиальном направлении.

Введем обозначения: R_n - текущий радиус газового пузыря; R_y - текущий радиус фронта ударной волны.

Согласно [34] время расширения газового пузыря до размеров сферы радиуса R_n определяется по формуле

$$t_n = \sqrt{\frac{\rho_{oo}}{2}} \int_{R_s}^{R_g} R_n \sqrt{\frac{R_n}{H}} dR_n , \qquad (4.42)$$

где

$$H = \int_{R_n}^{R_n} R_n^2 \Phi(R_n) dR_n. \tag{4.43}$$

При времени расширения полости $t < \frac{3,5R_{\delta}}{D_{\delta}}$ усреднения давления в полости не происходит, поэтому давление взрывных газов на границе «продукты взрыва ПД-ЭВВ» описывается уравнением

$$\Phi(R_n) = P_n \left(\frac{R_{\sigma}}{R_n}\right)^{3k_{\sigma}}, \qquad (4.44)$$

где $P_{\scriptscriptstyle H}$ - начальное детонационное давление ПД.

На основании (4.42)-(4.44) имеем

$$t_{n} = R_{\delta} \sqrt{\frac{3(k_{\delta} - 1)}{2} \frac{\rho_{oo}}{P_{H}}} \int_{1}^{\frac{R_{n}}{R_{\delta}}} z_{n} \sqrt{\frac{z_{n}}{1 - \frac{1}{z_{n}^{3(k_{\delta} = 1)}}}} dz_{n} , \qquad (4.45)$$

где
$$z_n = \frac{R_n}{R_s}$$
.

Точного решения в элементарных функциях интеграл, входящий в (4.45), не имеет. Однако при $\frac{R_n}{R_\delta} < 1.7$ уравнение (4.45) можно с точностью до 0,1% представить в виде (учитываем, что $P_n = \frac{\rho_\delta D_\delta^2}{k_+ + 1}$)

$$t_n \approx \frac{R_{\delta}}{D_{\delta}} \sqrt{\frac{3(k_{\delta}^2 - 1)\rho_{oo}}{2\rho_{\delta}}} \Big((0.1588z_n^2 - 0.5848z_n + 0.4066) k_{\delta} + 2.2226z_n - 2.0937 \Big). \quad (4.46)$$

Вследствие резкого падения во взрывных газах ПД при их расширении практический интерес представляет область $\frac{R_n}{R_6} < 1.7$, т.к. при $\frac{R_n}{R_6} \ge 1.7$ давление во взрывных газах ПД упадет в $> 1.7^9 \approx 120\,$ раз. Согласно [141] давление во фронте детонационной волны в составе В (60% гексогена и 40% тротила) при плотности ВВ 1,67-1,68 г/см³ (данный состав является одним из самых мощных при производстве промышленных ПД) составляет 24,3-25,6 ГПа.

При падении давления в 120 раз его остаточная величина составляет примерно 0,2 ГПа (при использовании тротила и пентолита – примерно 0,1 ГПа). Данная область давлений не представляет интереса при рассмотрении вопроса о возбуждении детонации при воздействии ПД на ЭВВ, т.к. значительно меньше детонационного давления в ЭВВ [15].

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальную скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ» W_{ro} можно найти на основании равенства давлений в ЭВВ и взрывных газов ПД на границе «продукты взрыва ПД-ЭВВ» [176]:

$$\rho_{oo}(A + BW_{ro})W_{ro} = P_{H}\left(1 - \left(W_{ro} - \frac{D_{\delta}}{k_{\delta} + 1}\right) \frac{k_{\delta}^{2} - 1}{2k_{\delta}D_{\delta}}\right)^{\frac{2k_{\delta}}{k_{\delta} - 1}}.$$
(4.47)

Величину массовой скорости за фронтом ударной волны в ближней зоне определяем по уравнению [19]

$$W_r \approx W_{ro} \frac{R_{\delta}}{R_{v}} . \tag{4.48}$$

Тогда скорость ударной волны на расстоянии R_{ν} будет равна

$$D_{yr} \approx A + BW_{ro} \frac{R_{\delta}}{R_{y}} . \tag{4.49}$$

Учитывая, что $D_{yr} = \frac{dR_y}{dt}$, интегрируя (4.49), получаем уравнение движения фронта ударной волны в ближней зоне заряда

$$R_{y} \approx R_{\delta} + At + \frac{BW_{ro}}{A} R_{\delta} \ln \left(\frac{\frac{R_{y}}{R_{o}} + \frac{BW_{ro}}{A}}{1 + \frac{BW_{ro}}{A}} \right). \tag{4.50}$$

На рис. 4.4 представлена схема взаимодействия двух сближенных зарядов. Принятые обозначения: сплошные линии — начальная граница зарядов; штрихпунктирные линии — граница «продукты взрыва ПД-ЭВВ»; штриховые линии — граница фронта ударной волны; О1 и О2 — центры зарядов; АВСО — область взаимодействия ударных волн (область повышенного давления).

Расчет параметров когерентного ПД осуществляется из требования выполнения следующего условия [18]: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления P_f необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее $d_{krit}(P_f)$, в течение времени $t(P_f)$ поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке $-P_f$ ($d_{krit}(P_f)$, $t(P_f)$ - критический диаметр заряда и время химической реакции при фронтальном давлении P_f).

Принимаем за момент t=0 момент выхода детонационной волны ПД на внешнюю поверхность ПД.

Допустим, что инициирование ЭВВ вследствие взаимодействия ударных волн произошло в момент времени t_n , когда радиус газового пузыря достигнет размера $R_n(t_n) = z_n R_{\delta}$. Радиус фронта ударной волны при этом определяется на основании (4.46) и (4.50). Величину этого радиуса можно представить в виде функции $R_v = R_v(t_n)$.

Из рис. 4.4 имеем следующие ограничения на $R_n(t_n)$ и $R_y(t_n)$:

$$R_n(t_n) + R_v(t_n) \le h$$
, $R_v(t_n) > h/2$. (4.51)

На основании (4.50) и рис.4.4 имеем:

A) время встречи ударных волн $t_{v}^{(1)}$

$$t_{y}^{(1)} = \left(\frac{h}{2R_{\delta}} - 1 - \frac{BW_{ro}}{A} \ln \left(\frac{\frac{h}{2R_{\delta}} + \frac{BW_{ro}}{A}}{1 + \frac{BW_{ro}}{A}}\right)\right) \frac{R_{\delta}}{A}; \tag{4.52}$$

Б) время выхода ударной волны на поверхность газового пузыря смежного заряда $t_{_{y}}^{(2)}$

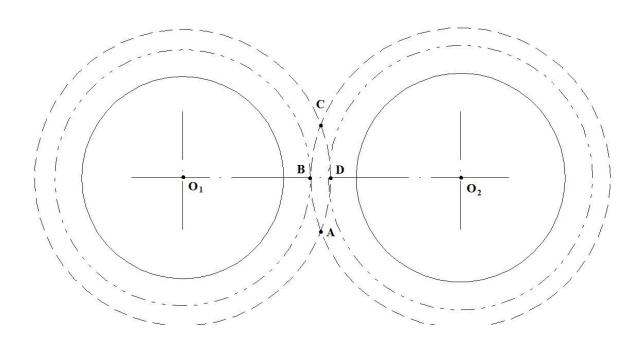


Рис.4.4. Схема взаимодействия сближенных зарядов когерентного ПД.

$$t_{y}^{(2)} = \left(\frac{h - R_{n}}{R_{\delta}} - 1 - \frac{BW_{ro}}{A} \ln \left(\frac{\frac{h - R_{n}}{R_{\delta}} + \frac{BW_{ro}}{A}}{1 + \frac{BW_{ro}}{A}}\right)\right) \frac{R_{\delta}}{A}.$$
 (4.53)

При времени $t > t_y^{(2)}$ происходит инжекция эмульсии в газовые полости смежных зарядов, что сопровождается резким падением давления в эмульсии.

В соответствии с (4.51) имеем следующее ограничение на характерные моменты времени для когерентного ПД $t_{\nu}^{(1)} < t_n < t_{\nu}^{(2)}$. (4.54)

Время существования области высокого давления АВСD (рис. 4.4) равно

$$t_* = t_n - t_v^{(1)}. (4.55)$$

Наименьшее давление в области высокого давления соответствует времени t_n . В соответствии с закономерностью падения давления от времени при отражении ударной волны от жесткой стенки [19, 221] имеем

$$P(t_n) \approx 2.3W_{ro} \frac{R_{\delta}}{R_{\nu}(t_n)} \left(A + BW_{ro} \frac{R_{\delta}}{R_{\nu}(t_n)} \right) \left(\frac{h}{2R_{\nu}(t_n)} \right)^3. \tag{4.56}$$

Объем области высокого давления в момент t_n (сечение указанного объема представлено на рис. 4.4 фигурой ABCD) равен (необходимые сведения для определения объема указанной области заимствованы в руководстве [29])

$$V(t_n) = \frac{2\pi}{3} \left(R_y(t_n) - \frac{h}{2} \right)^2 \left(2R_y(t_n) + \frac{h}{2} \right). \tag{4.57}$$

Диаметр сферы, имеющей объем (4.57), равен

$$d(t_n) = \left(4\left(R_y(t_n) - \frac{h}{2}\right)^2 \left(2R_y(t_n) + \frac{h}{2}\right)^{\frac{1}{3}}.$$
 (4.58)

На основании уравнений (4.46)-(4.58) определяются все необходимые для дальнейшего анализа параметры t_n , $P(t_n)$, $d(t_n)$, характеризующие воздействие когерентного ПД из двух сближенных зарядов на ЭВВ.

Если заряды когерентного ПД прижаты к стенке скважины, то при условии $\sqrt{R_y^2(t_n) - \frac{h^2}{4}} > R_\delta$ необходимо учитывать повторное отражение эмульсии, находящейся в области ABCD (рис. 4.4), от стенок скважины. В этом случае возможно возбуждение высокоскоростного режима детонации в результате 3-кратного ударного сжатия ЭВВ (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие при взаимодействии УВ от сближенных зарядов ПД – сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины). Это приведет к возрастанию давления $P(t_n)$ в $\frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_n + \rho_{co} D_s}$ раз.

Окончательное решение возможно после получения зависимостей P_f , $d_{krit}(P_f)$, $t(P_f)$ для инициируемого ЭВВ. Данные зависимости определяются для инициируемого ЭВВ с учетом его химического состава, плотности и структуры на основании методик, изложенных в третьей и четвертой главе.

Необходимо отметить, что уравнения (4.47) - (4.58) позволяют оценить инициирующее воздействие одиночного сосредоточенного заряда в скважине на заряд ЭВВ. Однако в этом случае расчет осуществляется при рассмотрении 2-кратного ударного сжатия (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины).

4.4. Анализ экспериментальных данных по инициированию ЭВВ различными ПД

1. Инициирование ЭВВ ПД из индивидуального ВВ

Результаты данного раздела параграфа основываются на результатах работы [148].

В качестве обсуждения приведенной методики расчета параметров ПД при фронтальном инициировании ЭВВ рассмотрим опыт, описанный в работе [104].

Электромагнитным методом измерялись детонационные параметры смеси эмульсии плотностью $1.51~{\rm г/cm^3}~({\rm табл.4.1})$ с промпродуктом НМПМ-4 (ферросилиций) в соотношении 93/7 по массе. Смесь аэрировалась путем введения полых стеклянных микросфер диаметром 70 мкм, плотностью $0.15~{\rm г/cm^3}$ в количестве 2.4% по весу. Плотность аэрированного ЭВВ $1.3~{\rm г/cm^3}$. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии — $A = 2600~{\rm m/c}$, B = 1.4~[104].

Заряд аэрированного ЭВВ помещался в пластиковой трубе внутренним диаметром d = 104 мм с толщиной стенки 3 мм, длиной 300 мм.

Инициатором служила таблетка прессованного ТНТ плотностью 1.59 г/см³, диаметром 80 мм, массой 340 г. При расчетах принимались следующие параметры ТНТ [85]: $D_{\delta}=6900$ м/с, $\rho_{\delta}=1,59$ г/см³, $k_{\delta}=3,3$. Величина $L_{*}=0,05$ м.

Результаты измерений и расчетные значения детонационных параметров рассматриваемого ЭВВ при инициировании его таблеткой прессованного ТНТ представлены в табл. 4.2.

Таблица 4. 1. Состав эмульсии ЭВВ в опытах [104].

Вещество	Процентное содержание	ГОСТ
Селитра кальциевая	33 (в пересчете на	ТУ
(Ca(NO ₃) ₂)	безводную селитру)	2181-028-32496445-01
Селитра аммиачная	43.5	ГОСТ 2-85 марка Б
(NH ₄ NO ₃)		
Вода	14.8	Техническая
Дизельное топливо	6.7	ДСТУ 3868-99
Амолин	2	ТУУ
		24.6-19436-11-003-2002

Таблица 4.2. Экспериментальные ([104]) и расчетные значения детонационных параметров

	Опытное	Точность	Расчетное	Относит.	
Показатели	значение,	метода, %	значение,	отклонение	
	м/с	[81]	м/с	%	
Скорость	5300	~4	5250	1,0	
детонации, м/с	3300	T	3230	1,0	
Массовая	1730	~4	1660	4,0	
скорость, м/с	1730		1000	4,0	
Время химической					
реакции в	1,20	~15	1,07	10,8	
детонационной волне,	1,20	13	1,07	10,0	
мкс					

Расчеты детонационных параметров ЭВВ осуществлялись по методике, изложенной в главе 2.

Характерные значения промежуточных параметров возбуждения детонационного процесса, определенные на основании настоящих исследований, следующие: $W_{yo}=1935\,$ м/с, $W_1=1664\,$ м/с, $P_f=10,9\,$ ГПа, $P_o=6,26\,$ ГПа, $P_x=7,82\,$ ГПа, $P_*=7,65\,$ ГПа (условие $P_*\leq P_x\,$ выполняется).

Пересжатие детонации практически отсутствует. Таким образом, в описанном опыте была возбуждена абсолютно устойчивая детонация, которая описывается теорией ЗНД. Это согласуется с выводами работы [104], сделанными на основании анализа эпюры изменения давления в продуктах взрыва за фронтом детонационной волны.

Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных. Это позволяет осуществить аналитическое сравнение инициирующих способностей ПД из различных индивидуальных ВВ (смеси ВВ).

В таблице 4.3 представлены расчетные значения детонационных параметров, развиваемых различными ПД в ЭВВ следующего химического состава - NH_4NO_3 - 76,7 %, H_2O - 18 %, топливная фаза - 5,3%. Плотность ЭВВ 1,15 г/см³. Плотность эмульсии - 1,33 г/см³. Размеры частиц дисперсной фазы эмульсии для рассматриваемых ВВ - 3 мкм. Способ сенсибилизации эмульсии - пузырьки газа радиусом 40 мкм. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии - A=1920 м/c, B=1,98 [104].

Таблица 4.3. Детонационные параметры ЭВВ при применении различных ПД

II		ПД І		пд II			ПД III		
Инициируемое ВВ	D_* ,	P_* ,	k_n	D_* ,	P_* ,	k_n	D_* ,	P_* ,	k_n
	м/с	ГПа	n	м/с	ГПа	п	м/с	ГПа	n
ЭВВ	4710	6,37	1,21	5090	7,16	1,49	5250	7,48	1,60

Рассматриваются следующие ПД:

I — состав: литой тротил 80% + гранулотол 20%. Плотность 1,48 г/см³, скорость детонации 6800 м/с, коэффициент политропы 3,2. Геометрические параметры: высота 200 мм, диаметр 70 мм. Масса 1000 г.

II — состав: 50 % тротил + 50 % ТЭН. Плотность 1,58 г/см³, скорость детонации 7500 м/с, коэффициент политропы 3,37. Геометрические параметры: высота 188 мм, диаметр 66 мм. Масса 850 г.

III — состав: 40 % тротил + 60 % гексоген. Плотность 1,62 г/см³, скорость детонации 7700 м/с, коэффициент политропы 3,11. Геометрические параметры: высота 105 мм, диаметр 85 мм. Масса 850 г.

Анализ табл. 4.3. показывает, что величина достижимых детонационных параметров ЭВВ зависит от величины инициирующего импульса. Таким образом, систему «ЭВВ– ПД» необходимо рассматривать как единое целое.

Рассмотрим экспериментальные данные, приведенные в работе [129], по детонации ЭВВ, сенсибилизированных стеклянными микросферами, полученные методами лазерной допплеровской интерференции и рентгеновской томографии плотности с применением синхротронного излучения.

В табл. 4.4 приведены экспериментальные данные [129] и расчетные значения, определенные по методикам, изложенным в гл.3, 4 настоящей работы. При выполнении расчетов полагали, что ЭВВ имеет следующий химический состав: $NH_4NO_3 - 63,0$ %, $NaNO_3 - 14,0$ %, $H_2O - 16$ %, топливной фазы -7 %. Плотность ЭВВ и радиус микросфер, принимались равными 1,07 г/см³ и 40 мкм, соответственно. Размеры частиц эмульсии считали равными 2,5 мкм. Инициирование детонации в ЭВВ осуществлялось зарядами тротила и тэна поэтому на основании приведенных в табл. 4.3 данных величину коэффициента пересжатия детонации принимали равной 1,3.

Также представляет интерес сравнение температуры «горячих точек», температуры взрыва эмульсии, определенных по эмпирическим графикам, приведенных в работе [203], времени формирования «горячей точки» [114], а также величины критического диаметра заряда [200] с расчетными значениями.

Указанные значения приведены табл. 4.5. При определении температурных показателей исходили из расчетного значения фронтального детонационного давления – 7,7 ГПа.

Табл.4.4. Экспериментальные [129] и расчетные значения детонационных параметров ЭВВ

	Скорость	Ширина	Время	Плотность
Показатели	детонации,	30ны хим.	реакции,	во фронте
	км/с	реакции, мм	мкс	детон. волны,
				Γ/cm^3
Эксперимент	4,6	4,0	0,94	1,89
Расчет	4,58	3,1	0,99	1,94

Табл.4.5. Экспериментальные и расчетные значения температуры «горячей точки», температуры взрыва и времени формирования «горячей точки»

	Температура	Температура	Время	Критический
Показатели	«горячей	взрыва	формирования	диаметр,
	точки»,	эмульсии,	«горячей	MM
	^{o}K	^{o}K	точки»,	
			10^{-8} c	
Эксперимент	3100 ([203])	2100([203])	≈ 2([114])	5,0 ([200])
Расчет	2945	2014	1,11	4,1

Анализ табл. 4.4 и 4.5 показывает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что дополнительно свидетельствует о корректности развиваемого в настоящей работе способа описания как инициирования ЭВВ, так и распространения в них детонации.

2. Инициирование ЭВВ ПД из аммонита

В работе [160] приведены результаты измерения скорости детонации эмулита «ВЭТ-700» (ВВ, полученные механическим смешением 70% масс. ЭВВ, сенсибилизированного газовыми порами, и 30% масс. смеси «АС+ДТ») в открытых зарядах, плотностью 1,26 г/см³, диаметром 240 мм и длиной 1 м при инициировании их ПД из различных ВВ. При этом менялись размеры ПД при неизменной массе.

Данные по ПД и результаты измерений скорости детонации приведены в табл. 1.1.

Применялись следующие ПД:

- шашка ТГФ-850Э состав: 40 % тротил + 60 % гексоген. Плотность 1,62 г/см³, скорость детонации 7700 м/с, коэффициент политропы 3,11.
- шашка Т-1000 состав: литой тротил 80% + гранулотол 20%. Плотность 1,48 г/см³, скорость детонации 6800 м/с, коэффициент политропы 3,3.
- специально изготовленные для опытов патроны аммонита 6ЖВ плотность $1.0\,$ г/см³, скорость детонации 4800 м/с, коэффициент политропы 2,53.

В табл. 4.6 приведены результаты расчета скорости детонации в эмулите в зависимости от применяемого ПД. Показатели детонации эмулита при длине ПД из аммонита 6ЖВ 25 мм не рассчитывались, т.к. в данном случае при возбуждении

наблюдается очень выпуклый детонационный фронт. Это создает временную задержку для момента начала срабатывания измерительного кабеля, расположенного на внешней поверхности инициируемого заряда, по отношению к началу детонации в осевой линии части возбуждаемого заряда.

При расчетах принималось: $R_o = 40$ мкм, $\Delta = 3$ мкм. Параметры в уравнении ударной адиабаты — A = 1920 м/с; B = 1,98 [103] (близки к данным [153]). Химический состав согласно ТУ 7276-016-17131060-2001. Расчет осуществлялся по методике, изложенной в п. 4.1. При этом в связи с наличием в ЭВВ гранул гладкой аммиачной селитры величину скорости детонации ПД, используемую при

вычислении, увеличивали в $\sqrt{k_{orp}^{rp}}$ раз, где $k_{omp}^{zp} \approx \frac{2\rho_{AC}C_{AC}}{\rho_{AC}C_{AC} + \rho_{oo}A}$, где ρ_{AC} , C_{AC} - плотность гранул аммиачной селитры и скорость продольных волн в этих

В рассматриваемом случае

гранулах, соответственно.

$$k_{omp}^{ep} \approx \frac{2\rho_{AC}C_{AC}}{\rho_{AC}C_{AC} + \rho_{oo}A} = \frac{2\cdot 1, 5\cdot 2800}{1, 5\cdot 2800 + 1, 26\cdot 1920} = 1,27,$$

(плотность гранул гладкой селитры - 1,5 г/см³ [161], скорость продольных волн в гранулах при данной плотности - 2800 м/с /на основании линейной аппроксимации экспериментальных данных [233]/). Тогда $\sqrt{k_{\rm orp}^{\rm rp}} \approx$ 1,12 .

Табл. 4.6. Сравнение экспериментальных и расчетных значений скорости детонации в эмулите «ВЭТ-700» при различных ПД

Тип ПД	Параметры ПД:	Скорость	Скорость	
	(длина (мм) /	детонации	детонации	
	диаметр (мм) /	(эксперимент),	(расчет), м/с	
	масса(г)	м/с		
ТГФ-850Э	115/79/850	4648	4677	
T-1000	185/68/1000	3824	4931	
Аммонит 6ЖВ	25/240/1000	4830	-	
«»	120/110/1000	5089	5007	
«»	240/77/1000	5121	5143	
«»	480/54/1000	5206	5205	

Таким образом, при расчетах параметров детонационного процесса в эмулите, вызываемого взрывом ПД, принимали следующие значения эффективной скорости детонации ПД: шашка $T\Gamma\Phi$ -850 Θ – 8600 м/с (7700*1,12); шашка G — 8000 м/с (4800*1,5*1,12).

Анализ табл. 4.6 показывает хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных при использовании шашки ТГФ-850 и ПД из аммонита 6ЖВ. Исключением является расхождение экспериментальных и расчетных данных по шашке Т-1000. Последнее можно объяснить или ошибкой при инструментальной записи процесса, или в случае, когда при применении шашки Т-1000 состав эмулита был недостаточно газифицирован, что повлекло увеличение плотности этого ВВ и возрастание предельного диаметра. Последнее привело к низким значениям скорости детонации при опытном взрыве.

Как уже было отмечено, табл. 4.6 показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных при инициировании ЭВВ ПД, имеющими пульсирующий детонационный фронт, что свидетельствует о корректности предложенного способа оценки детонационных параметров в ЭВВ при инициировании их указанными видами ПД.

3. Инициирование ЭВВ удлиненным эмульсионным ПД

В основу теоретических положений данного раздела параграфа положены результаты, полученные в работах [46, 47, 53, 59].

В работе [37] приведены результаты измерения скорости детонации по длине скважинных зарядов ЭВВ «Сибирит-1200» при их инициировании удлиненными эмульсионными ПД «Senatel Powerfrag».

Диаметр зарядов 115 и 125 мм. Длина зарядов — 12-15 м. Инициирование — нижнее. Окружающий массив — гранит. Плотность ЭВВ — 1,05 и 1,1 г/см³. Размеры удлиненных ПД: диаметр 50 мм, длина - 420 и 630 мм (соответственно, два и три патрона «Senatel Powerfrag» массой 0,5 кг).

На основании (4.28) - (4.41) осуществлен расчет скорости детонации, вызываемой в инициировании скважинных зарядов ЭВВ ПД (50*420 мм) из патронов «Senatel Powerfrag».

При расчетах исходили из следующих данных:

химический состав ЭВВ - NH_4NO_3 – 77 %, H_2O - 16 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии - 1,35 г/см³. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии - A=1920 м/c, B=1,98 [104]. Радиус газовых пор ЭВВ при атмосферном давлении – 40 мкм, размер частиц эмульсии – 3 мкм;

плотность ЭВВ ПД -1,21 г/см³;

скорость детонации ЭВВ ПД – 5200 м/с, коэффициент политропы ЭВВ ПД – 2,8;

инициирование – нижнее, глубина заложения ПД – 12 м;

радиус газовых пор на глубине 12 м равен -27,1 мкм при начальной плотности 1,05 г/см³; 26,9 мкм при начальной плотности 1,1 г/см³.

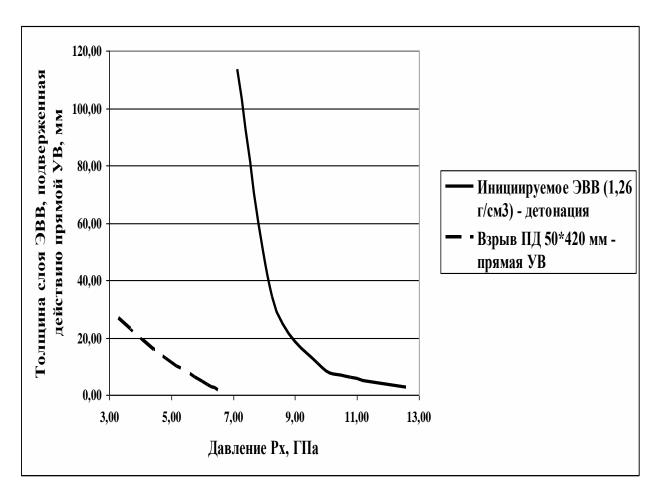


Рис.4.5. Зависимости толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции (плотность ЭВВ -1,26 г/см³).

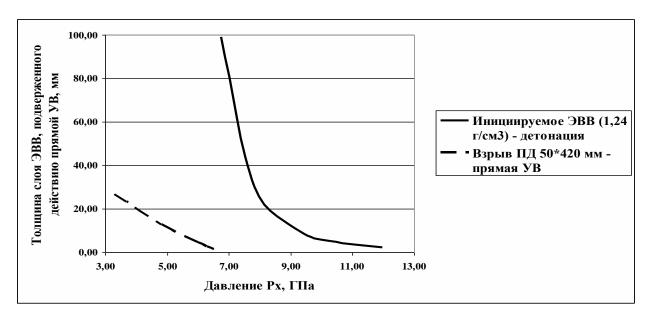


Рис. 4.6. Зависимости толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции (плотность ЭВВ – $1,24 \text{ г/см}^3$)

На рис. 4.5 и 4.6 представлены зависимости необходимой толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции для осуществления детонации с абсолютно устойчивым или нейтрально устойчивым фронтом (сплошные линии). Устойчивые детонационные процессы в ЭВВ возможны при нахождении параметров детонации выше сплошных линий на рис. 4.5 и 4.6.

Рис. 4.5 соответствует плотности ЭВВ -1,26 г/см³ (начальная плотность -1,1 г/см³), а рис. 4.6 - плотности ЭВВ -1,24 г/см³ (начальная плотность 1,05 г/см³). Значения плотностей рассчитаны по методике работы [235]. Взрыв ПД вызывает в области действия прямой УВ давления, показанные на рис. 4.5 и 4.6 штриховыми линиями.

Анализ рис. 4.5 и 4.6 показывает, что под действием расширяющихся продуктов детонации ПД в окружающем ПД ЭВВ может реализовываться только недосжатая детонация.

В этом случае фронт ударной волны удаляется от зоны распада ЭВВ, что обуславливает применение теории УВ при расчете величины давления в ЭВВ при различных отражениях.

Технология механического заряжания взрывных скважин ЭВВ не предполагает симметричного обтекания ПД эмульсией при вводе ЭВВ в скважину. Поэтому без применения особых приспособлений ПД всегда будет прижат к стенке скважины. Геометрический анализ распространения УВ при данном расположении ПД показывает, что УВ претерпевают три отражения: два – от стенок скважины и одно - от жесткой стенки. Последнее соответствует столкновению двух зеркально симметричных УВ (плоскость симметрии проходит через оси симметрии скважины и ПД). Углы отражения меньше критического, поэтому при оценочных расчетах значение коэффициента отражения УВ от $k_{ompaxc} = \frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_{oo} D_*}.$ Важным стенок принимаем равным скважины обстоятельством является то, что после первого отражения от стенки скважины

обстоятельством является то, что после первого отражения от стенки скважины отраженные потоки имеют незначительное геометрическое расхождение. Поэтому окончательное давление во фронте УВ в ЭВВ после 3-х последовательных отражений будет равно

$$P_{\Sigma} \approx 2.3 k_{ompaxe}^2 P_{nao} \cdot f(\tau_*) ,$$
 (4.59)

где $P_{na\partial}$ - давление во фронте падающей УВ перед первым отражением от стенки скважины.

Полагая, что радиальная скорость движения материала ЭВВ в зоне сжатия изменяется по закону $W_r = W_{ro} \left(\frac{r_o}{r} \right)^{0.5}$ - [166], определяем

$$P_{nao} \approx \rho_{oo} W_{ro} \left(\frac{d_{\Pi J}}{d_{c\kappa e}} \right)^{0.5} \left(A + B W_{ro} \left(\frac{d_{\Pi J}}{d_{c\kappa e}} \right)^{0.5} \right), \tag{4.60}$$

где $d_{\it ПД}$, $d_{\it скв}$ - диаметры ПД и скважины (полагаем, что заряд занимает все сечение скважины), соответственно.

Давление в области столкновения УВ через время τ_* после столкновения можно рассчитать по формуле [221]

$$P_f(\tau_*) \approx P_{\Sigma} \left(1 + \frac{D_y \tau_*}{L \sin \varphi_*} \right)^{-3} = P_{\Sigma} \left(1 + \frac{D_{\delta} \tau_*}{L} \right)^{-3}, \tag{4.61}$$

(при коэффициенте политропы ЭВВ \approx 3); φ_n - угол падения УВ на стенку

скважины:
$$\varphi_n = \arcsin \frac{D_y}{D_\delta}$$
 [22].

На основе геометрического анализа распространения УВ, вызванных в ЭВВ взрывом ПД, можно показать, что минимальная длина УПД, при которой на давление в области столкновения двух зеркально симметричных ветвей УВ на протяжении времени τ_* не оказывает влияния аксиальная волна разряжения и его значение можно оценивать по уравнению (5.9), равна

$$(L_{\Pi J})_{\min} = (d_{c\kappa g} - d_{\Pi J}) \frac{D_{\delta}}{D_{y} \sqrt{1 - (D_{y} D_{\delta}^{-1})^{2}}} + D_{\delta} \tau_{*}.$$
 (4.62)

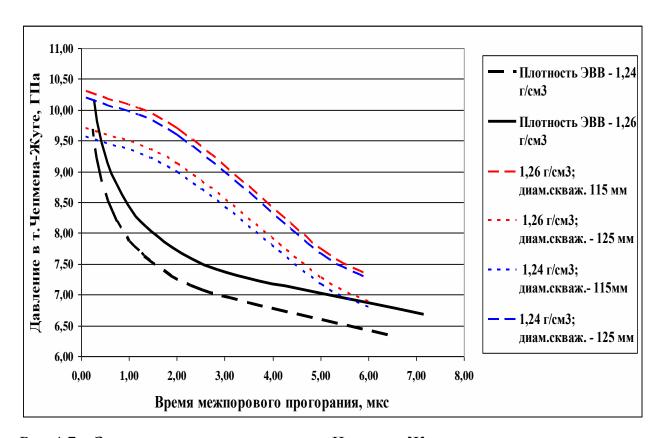


Рис.4.7. Зависимости давления в т.Чепмена-Жуге от времени межпорового прогорания для ЭВВ и изменение давления в отраженной УВ в зависимости от времени после отражения.

Принимая в качестве критерия возбуждения детонации условие, предложенное в работах [15, 18], на основании (4.59)-(4.61) имеем: для

возбуждения детонации с величиной фронтального давления $P_f(\tau_*)$ необходимо выполнение условия

$$P_{f}\left(\tau_{*}\right) \approx 2.3k_{ompaxc}^{2}\rho_{o}W_{ro}\left(\frac{d_{\Pi J}}{d_{ck6}}\right)^{0.5}\left(A + BW_{ro}\left(\frac{d_{\Pi J}}{d_{ck6}}\right)^{0.5}\right)\left(1 + \frac{D_{o}\tau_{*}}{L_{\Pi J}}\right)^{-3}.$$
(4.63)

На рис. 4.7 приведены зависимости давления в точке Чепмена-Жуге от времени межпорового прогорания для ЭВВ и изменение давления в отраженной УВ в зависимости от времени после отражения (на основании методики [221]).

Табл.4.7. Величина давления P_{Σ} при различной акустической плотности гранита и различных диаметрах взрывных скважин, вызываемая взрывом ПД (50*420мм) из патронов «Senatel Powerfrag».

Плотность среды (г/см³) /	Диаметр взрывной	Величина P_{Σ} , ГПа
Скорость продольных	скважины, мм	$(\rho_{oo} = 1,26 \text{ г/cm}^3)$
волн (км/с)		/
		$(\rho_{oo} = 1,24 \text{ r/cm}^3)$
2,65 / 5,46	115	10,3/ 10,2
	125	9,72/ 9,66
2,84 / 6,3	115	11,1/11,0
	125	10,5/ 10,4

Примечание: данные о механических свойствах гранитов заимствованы из [189].

В табл. 4.7 представлены результаты расчетов давления $P_{\scriptscriptstyle \Sigma}$ в ЭВВ.

Анализ рис. 4.7 показывает, что при времени межпорового прогорания меньше 1 мкс, давление в отраженной волне незначительно отличается от давления в момент отражения. Поэтому при оценочных расчетах используем данные табл. 4.7.

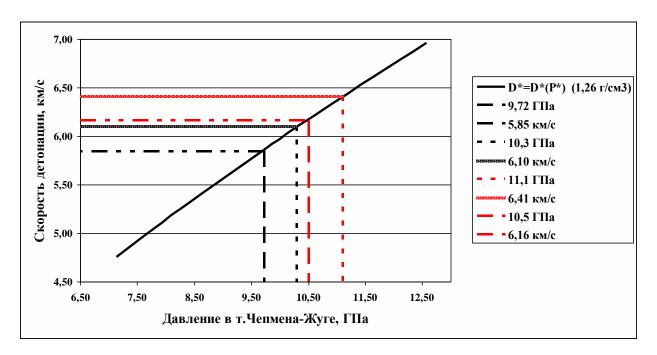


Рис. 4.8. Зависимость скорости детонации в ЭВВ плотности 1,26 г/см³ от давления в т. Чепмена-Жуге.

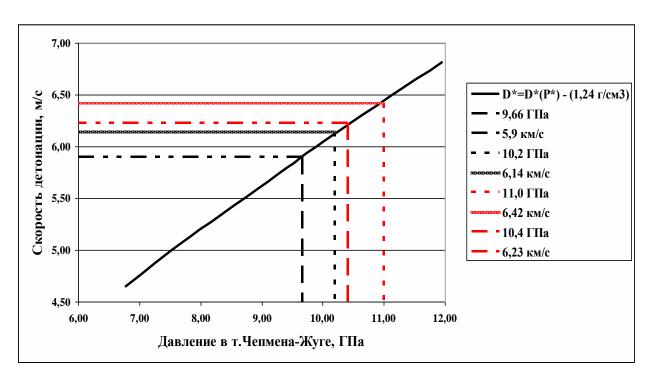


Рис. 4.9. Зависимость скорости детонации в ЭВВ плотности 1,24 г/см³ от давления в т. Чепмена-Жуге.

На рис. 4.8 и 4.9 представлены зависимости скорости детонации в ЭВВ плотности 1,26 г/см³ и 1,24 г/см³ от давления в т. Чепмена-Жуге.

Анализ рис. 4.8 и 4.9 показывает, что при инициировании ЭВВ (начальная плотность 1,05 - 1,1 г/см³) в скважинах диаметром 115-125 мм при помощи удлиненного ПД из двух патронов «Senatel Powerfrag» скорость детонации на начальном участке должна иметь значение 6100-6420 м/с

(если взрывание происходит в высокопрочных гранитах). На карьере ЗАО «Семиозерское КУ» добывают преимущественно высокопрочные граниты. Согласно экспериментальным данным [37] скорость детонации инициирующей ударной волны при использовании линейного промежуточного детонатора удлиненной формы в скважинном заряде диаметром 115-125 мм составляет 6144-6610 м/с.

Наблюдается согласие расчетных и экспериментальных данных.

Оценим инициирующие способности линейных инициаторов ТУ 7276-56466532-25-2007 [249] в ЭВВ типа «Сибирит-1200».

При расчетах исходим из следующих данных:

химический состав ЭВВ - $NH_4NO_3 - 77$ %, H_2O - 16 %, топливная фаза —

7 %. Плотность матричной эмульсии - 1,35 г/см³. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии - A = 1920 м/с, B = 1,98. Радиус газовых пор ЭВВ при атмосферном давлении – 40 мкм, размер частиц эмульсии – 3 мкм;

плотность ПД -1,6 г/см³; скорость детонации ПД -7200 м/с [249]; коэффициент политропы ЭВВ ПД -3,4;

инициирование – нижнее, глубина заложения ПД – 10 м;

плотность ЭВВ -1,24 г/см³ (начальная плотность -1,1 г/см³) и 1,22 г/см³ (начальная плотность 1,05 г/см³).

радиус газовых пор на глубине 10м равен -29,1 мкм при начальной плотности 1,05 г/см³; 29,6мкм при начальной плотности 1,1 г/см³.

На рис. 4.10 представлены зависимости необходимой толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции для осуществления детонации с абсолютно устойчивым или нейтрально устойчивым фронтом (сплошные линии). Устойчивые детонационные процессы в ЭВВ возможны при нахождении параметров детонации выше штриховой линии, если

плотность ЭВВ больше 1,22 г/см³, и сплошной – если плотность ЭВВ больше 1,24 г/см³.

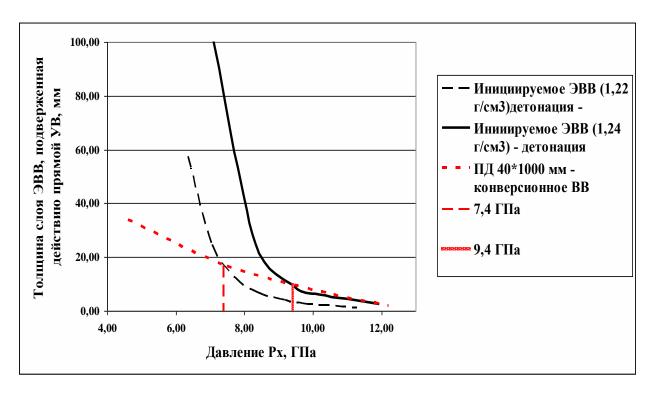


Рис. 4.10. Зависимости необходимой толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции для осуществления детонации с абсолютно устойчивым или нейтрально устойчивым фронтом (сплошные линии). ЭВВ плотностью 1,22 г/см³, 1,24 г/см³ и ПД 40*1000 из конверсионного ВВ.

Красная пунктирная линия соответствует зависимости толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией под действием прямой УВ, от давления в зоне этой реакции для ПД, имеющего размеры 40*1000 мм и соответствующего ТУ 7276-56466532-25-2007.

Анализ рис. 4.10 показывает, что взрыв ПД 40*1000 из конверсионного ВВ вызывает высокоскоростное детонационное разложение ЭВВ (при начальной плотности ЭВВ не более 1,1 г/см³) непосредственно в прямой волне, излучаемой при взрыве ПД. При этом среднее значение скорости детонации ЭВВ (начальная плотность 1,05-1,1 г/см³) составит 5400 м/с (рис. 4.11).

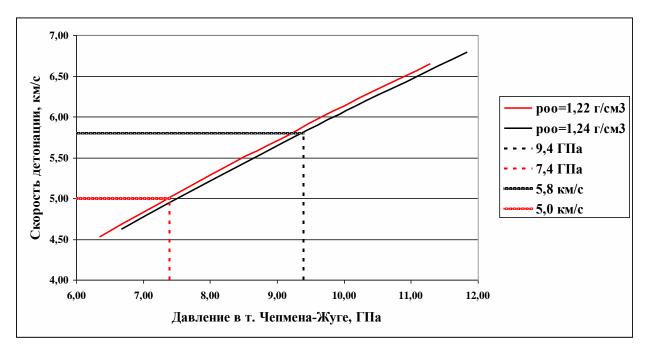


Рис. 4.11. Зависимость скорости детонации в ЭВВ от давления в т. Чепмена-Жуге (плотность ЭВВ = $1,237 \text{ г/см}^3$).

Авторы работы [226] экспериментально зафиксировали скорость детонации в эмулите «ВЭТ-700» (начальная плотности 1,11 г/см³) при инициировании его линейным ПД на участке вне зоны воздействия ПД – 5229,4 - 5234,8 м/с.

Также наблюдается согласие расчетных и экспериментальных данных.

Следовательно, физико-математическая модель детонации ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, представленная в гл. 2 и 3, в сочетании с условием инициирования промышленных ВВ, предложенного в работе [18], позволяет осуществлять аналитическую оценку инициирующей способности ПД, при воздействии на ЭВВ как плоской, так и цилиндрической УВ.

Таким образом, при применении удлиненных (линейных) эмульсионных ПД возбуждение полноценной детонации в ЭВВ возможно лишь при усилении давления в отраженных волнах (от стенок скважин или от специально введенных твердых объектов). Данный вывод косвенно подтверждается результатами исследований, изложенных в работе [109].

При применении ПД из конверсионных BB в ЭВВ плотностью до 1,24 г/см³ (начальная плотность 1,1 г/см³ при глубине заложения ПД 10 м) сразу вблизи ПД

под действием прямой УВ возникает радиальная детонация. Дополнительным подтверждением правильности данного вывода служит успешная практика применения линейных инициаторов ТУ 7276-56466532-25-2007 [249] на карьерах ОАО «Ковдорский ГОК» и ОАО «Карельский окатыш» при инициировании наливных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, начальной плотностью до 1.11 г/см³ [225].

4. Обсуждение экспериментальных результатов инициирования когерентным ПД

Для проверки выявленных закономерностей распространения детонационных волн в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, и эффективности их инициирования когерентным ПД на Асбестовском карьере были проведены опытные взрывы ЭВВ «Порэмит-1А», в которых измерялась скорость детонации по длине заряда при различных инициирующих импульсах [64] (инициирование одной или двумя шашками ПТ-П750).

Применялось ЭВВ, имеющее следующие характеристики: плотность — 1,0г/см³; хим. состав: аммиачная селитра — 73,8%, вода — 18,5%, топливная фаза — 7,7%; способ сенсибилизации - газовые поры (размер частиц эмульсии — 10 мкм, радиус газовых пор — 300 мкм [64, 225]). Скважины бурились в прочных горных породах (коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову f = 13).

Глубина скважин – 17м, длина заряда – 12 м, наклон скважин - 75°, диаметр – 250 мм. Заряды ЭВВ формировались при зарядке из одной зарядной машины. Измерения скорости детонации проводились реостатными приборами «Handitrap Vod Recorder» – датчиковый провод «VOD probecable-HT» устанавливался по длине заряда.

Рассмотрим случай, когда инициирование зарядов (нижнее) производилось от промежуточных детонаторов, состоящих из шашек «ПТ-П750», расположенных одна над другой на расстоянии между ними 15 см, и внутрискважинных капсюлей неэлектрической системы Искра С-500-18.

Результаты обрабатывались в программе «Handi TrapII-v2p0», поставляемой изготовителем с прибором, и представлены на рис. 4.12. Изменение плотности ЭВВ по длине заряда рассчитывали по методике [235].

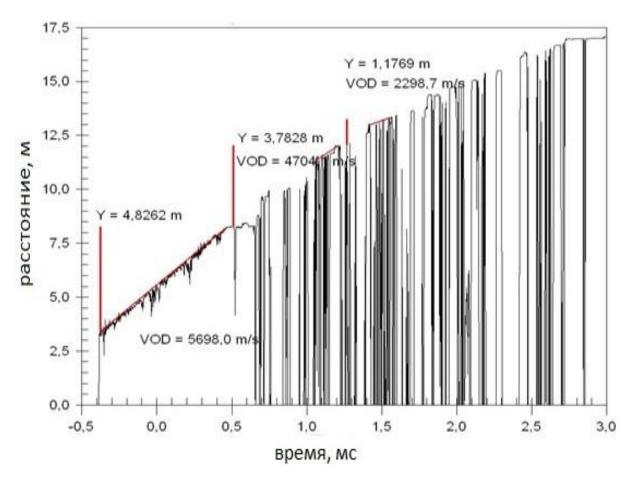


Рис. 4.12. Зависимость длины (м) заряда от времени детонации (мс) ЭВВ. Промежуточный детонатор, состоящий из 2 шашек «ПТ-П750». Обозначения: VOD – скорость детонации, м/с; Y – длина участка заряда, м.

На рис. 4.12 приведены графики экспериментально определенной и расчетной скоростей детонации по длине скважинного заряда. Расчет скоростей детонации осуществлялся по методике, изложенной в гл.2, а условий ликвидации нейтральной устойчивости— по методике, изложенной в гл.3. При выполнении расчетов исходили из приведенного выше химического состава ЭВВ, его плотности при атмосферном давлении и структурных характеристик эмульсии.

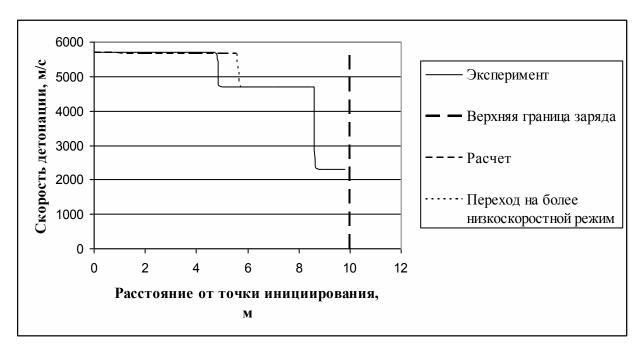


Рис.4.13. Зависимости скорости детонации ЭВВ от места инициирования (эксперимент и расчет).

Табл.4.8. Расчетные значения параметров детонации в ЭВВ при их инициировании когерентным ПД (по длине заряда)

Расстояние	Текущая	Текущий	Скорость	Давление	Время
от ПД, м	плотн.ЭВВ,	коэфф.	детонации,	в т. Чепмена-	прогоран.
	Γ/CM^3	политропы	м/с	Жуге,	между
		ЭВВ		ГПа	порами,
					мкс
0,0	1,198	3,21	5661,2	8,68	5,6
5,64					
(момент перехода на НСР)	1,137	3,06	5657,0	8,26	3,6

Расчеты показали, что возбуждение высокоскоростного режима детонации происходит в результате 3-кратного ударного сжатия ЭВВ (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие при взаимодействии УВ от сближенных зарядов ПД –

сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины). Результаты расчетов приведены в табл. 4.8.

Анализ рис.4.13 и табл. 4.8 показывает, что разработанные методики расчета позволяют достаточно точно определять параметры детонации, вызванной воздействием когерентного ПД.

На рис.4.14 приведена зависимость коэффициента гофрировки от удаления от места инициирования.

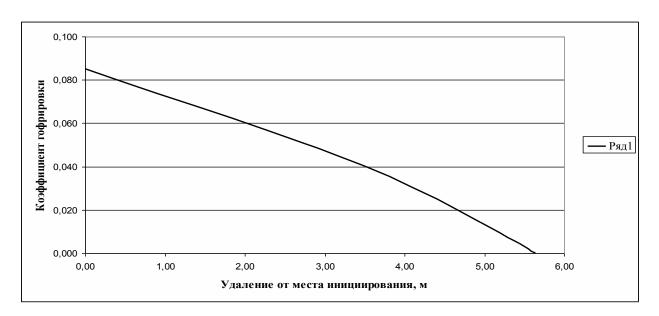


Рис.4.14. Зависимость коэффициента гофрировки от удаления от места инициирования.

Необходимо отметить, что расчетный и экспериментально определенный моменты перехода детонации на низкоскоростной режим (НСР) практически совпадают (рис.4.13, 4.14). Этот результат:

подтверждает наше положение, о переходе детонационного процесса на более низкоскоростной режим при ликвидации нейтральной устойчивости детонационного фронта;

позволяет принять необходимые технологические меры для обеспечения полноты детонации: изменение места установки ПД, установка дополнительных ПД /многоточечное инициирование/, изменение начальной плотности ЭВВ, изменение структуры ЭВВ [53, 150].

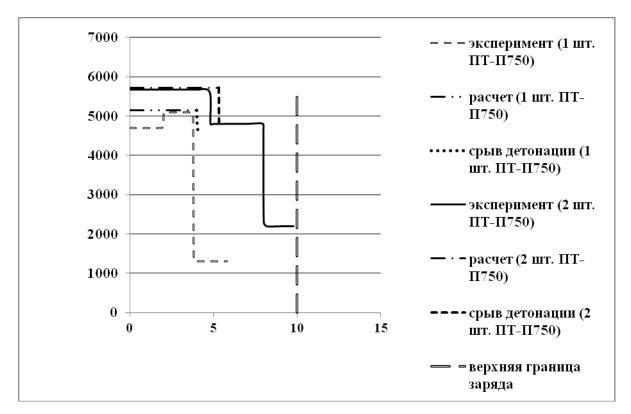


Рис.4.15. Зависимости скорости детонации ЭВВ от места инициирования при ПД различной массы (эксперимент и расчет).

На рис. 4.15 представлены экспериментальные и расчетные зависимости скорости детонации от удаления от места инициирования при нижнем инициировании одинаковых скважинных зарядов ПД из одной шашки ПТ-П750 и двух шашек ПТ-П750, соответственно [266]. Экспериментальные зависимости построены на основании выполненных нами опытов на карьере ОАО «Ураласбест». Характеристики ЭВВ и параметры скважинных зарядов указаны в начале настоящего параграфа.

Сравнение представленных на рис. 4.15 зависимостей наглядно показывает на влияние инициирующего воздействия на параметры детонации ЭВВ. Более сильное и продолжительное инициирующее воздействие обеспечивает более высокие значения детонационных показателей, а также большую длину участка высокоскоростной детонации.

Выводы по главе 4

Разработаны методики расчета параметров ПД для инициирования детонации в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами:

при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД (нагружение плоской ударной волной как с гладким, так и пульсирующим фронтами);

при скользящем ударе продуктами взрыва линейного (удлиненного) ПД; при взрыве системы сближенных сосредоточенных зарядов.

В разработанных методиках учитываются размеры ПД, детонационные параметры ВВ, из которого изготовлен ПД, диаметр взрывных скважин и акустическая жесткость окружающих заряд пород, химический состав, плотность и структура возбуждаемых ЭВВ.

Показано, что химический состав, плотность и структура ЭВВ влияют на параметры инициирующих их импульсов. Поэтому, регулируя данные параметры, можно в известных пределах управлять эффективностью возбуждения детонации.

Показано, что при возбуждении детонации в ЭВВ важную роль может играть эффект скачкообразного возрастания давления во фронте ударной волны, возбуждаемой в ЭВВ при взрыве ПД, при отражении от стенок скважины и (или) специально введенных в ЭВВ твердых включений.

ПД из высокоплотных индивидуальных ВВ (смесей или плавов индивидуальных ВВ), а также из конверсионных ВВ обладают высокой инициирующей способностью при возбуждении детонации в ЭВВ. При этом при определенной плотности ЭВВ при взрыве линейного (удлиненного) ПД из высокоплотных индивидуальных ВВ (смесей или плавов индивидуальных ВВ) детонация может возникнуть под действием только прямой радиальной УВ, испускаемой при взрыве ПД.

ПД При определении параметров ОНЖОМ использовать условие, предложенное в работах [18], которое применительно К ЭВВ онжом сформулировать следующим образом: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления P_f необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее $d(P_f)$, в течение времени $t(P_f)$ поддерживать давление с наименьшим

значением на указанном временном промежутке $-P_f$ ($t(P_f)$)- время прогорания межпорового пространства при ударном нагружении ЭВВ давлением P_f , $d(P_f)$ - диаметр минимального объема возбужденного вещества ЭВВ, при котором давление в зоне реакции в момент времени $t(P_f)$ равно P_f).

Показано, что величина детонационных параметров ЭВВ при детонации в режиме нейтральной устойчивости детонационного фронта зависит от характеристик инициирующего воздействия.

Экспериментально подтверждено утверждение о переходе детонационного процесса на более низкоскоростной режим при ликвидации нейтральной устойчивости детонационного фронта.

Показано, что для обеспечения полноты детонации необходимо использовать технологические методы: изменение места установки ПД, установку дополнительных ПД /многоточечное инициирование/, изменение начальной плотности ЭВВ, изменение структуры и рецептуры ЭВВ.

ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Как показано в предыдущей главе, ЭВВ и ПД представляют систему, в которой детонационные параметры ЭВВ зависят параметров, как OTЭВВ (химический характеризующих состав, плотность, размеры сенсибилизирующих И частиц эмульсии), так И пор характеризующих ПД (создание ударным воздействием в достаточном объеме ЭВВ необходимого давления при необходимой продолжительности действия).

В случае участия в возбуждении детонации отраженных от стенки скважин ударных волн также играют роль такие факторы, как сжимаемость горных пород, окружающих заряд ЭВВ, и геометрические параметры, характеризующие форму, размеры ПД и отражающей поверхности.

Однако согласно исследованиям, приведенным в третьей главе, не всякая детонационная волна, возбужденная в ЭВВ, способна пройти по всей длине вертикального (наклонного) скважинного заряда при нижнем инициировании. Для выполнения данного требования необходимо соблюдения определенных условий.

Следовательно, при использовании ЭВВ первоначально необходимо оценить условия принципиальной возможности прохождения детонации по всей длине заряда ЭВВ, принятого при осуществлении взрывных работ.

Далее, исходя из полученных результатов, осуществляется расчет ПД, необходимого для инициирования заряда ЭВВ. Для определения параметров ПД используем критерий [18], который применительно к ЭВВ можно сформулировать следующим образом: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления P_f необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее $d(P_f)$, в течении времени $t(P_f)$ поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке — P_f . Здесь $t(P_f)$ - время прогорания межпорового пространства при ударном нагружении ЭВВ давлением

 P_f , $d(P_f)$ - диаметр минимального объема возбужденного вещества ЭВВ, при котором давление в зоне реакции в момент времени $t(P_f)$ равно P_f .

В параграфах 5.2 - 5.3 на примере карьера ОАО «Ураласбест» приведено обоснования условий, обеспечивающих детонацию ЭВВ по всей длине скважинного заряда.

5.1. Оценка возможности прохождения детонации по всей длине скважинного заряда ЭВВ

На карьерах ОАО «Ураласбест» для массовой отбойки горных пород используется бестарное ЭВВ следующего химического состава:

 $NH_4NO_3 = 75.0 - 75.5 \%$, $H_2O - 18 \%$, топливная фаза -6.5 - 7.0 %.

Плотность матричной эмульсии - 1,33 г/см³. Размер частиц эмульсии -5-7 мкм (средний размер - 6,5 мкм). Радиус газовых пор при атмосферном давлении - 50-120 мкм.

Микроскопические исследования дисперсности исследуемых образцов эмульсии выполнялись перед проведением опытных и промышленных взрывом с целью получения информации о микроструктуре ЭВВ, необходимой для последующего анализа.

Измерения осуществлялись с помощью оптического микроскопа Olympus BX-51 фирмы «Olympus», оборудованного мультипортами для видео- и фоторегистрации. Точность измерений геометрических размеров составляет 0,5 % отн. Методика проведения экспериментов на оптическом микроскопе Olympus BX-51 описана в работе [225].

ЭВВ размещается в скважинах длиной 14 - 17 метров. Длина заряда — 8-12 метров. Диаметр скважин — 160-250 мм.

Забойка в необводненных скважинах отсутствует, а в обводненных роль забойки выполняет вода, покрывающая заряд.

На основании сведений, приведенных в третьей главе настоящей работы, определены области устойчивого и нейтрально устойчивого режимов

распространения детонации по высоте скважинного заряда при размерах газовых пор, частиц эмульсии и разной степени возбуждения для ЭВВ, применяемых при взрывных работах на карьерах ОАО «Ураласбест».

Результаты расчетов для необводненной скважины представлены на рис.5.1. Рассмотрено нижнее инициирование. Принято следующее обозначение: h - расстояние от верхнего сечения до текущего сечения заряда.

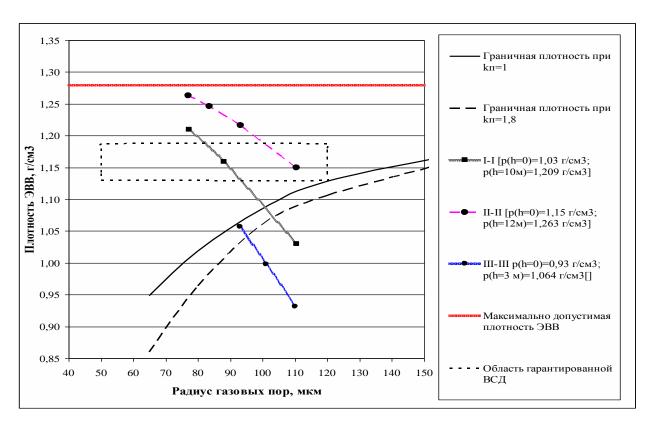


Рис.5.1. Зависимость граничной плотности ЭВВ от размера газовых пор (необводненная скважина). Размер частиц эмульсии – 6,5 мкм

Детонация скважинного заряда II-II при нижнем инициировании проходит в высокоскоростном режиме без «срывов» процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области нейтральной устойчивости.

Детонация скважинного заряда III-III при нижнем инициировании проходит в режиме абсолютной устойчивости процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области абсолютной устойчивости.

Детонация скважинных зарядов I-I при нижнем инициировании начинает проходить в высокоскоростном режиме, но при пересечении линии граничной

плотности состояние нейтральной устойчивости детонационного фронта пропадает. Происходит переход на другой режим детонации. Данный переход может приводить к обрыву процесса. Последнее крайне нежелательно ввиду ухудшения качества дробления горных пород, повышения вредного воздействия на экологию окружающей среды, снижения уровня безопасности горных работ.

Анализ рис. 5.1 показывает, что детонация 12-метрового скважинного заряда ЭВВ, применяемого на карьерах ОАО «Ураласбест», возможна только в высокоскоростном режиме (режиме нейтральной устойчивости).

Согласно микроскопическим исследованиям диапазон размеров сенсибилизирующих газовых пор весьма широк (радиусы пор находятся в интервале от 50 до 120 мкм). Это обуславливает следующий диапазон плотностей ЭВВ в верхней части 12-метрового скважинного заряда — минимальное значение равно 1,13 г/см³ (значение граничной плотности при k_n =1 и R_o = 120 мкм), а максимальное — 1,20 г/см³ (в этом случае плотность ЭВВ на глубине 12 м будет равна 1,28 г/см³ — максимально допустимой согласно данным работы [92]). Данная область обозначена на рис. 5.1, как область гарантированной ВСД (высокоскоростной детонации).

Расчеты на основании методики работы [235] показывают, что для обводненной скважины при глубине заряда 12 м с учетом гидростатического давления 5-метрового водяного столба плотность ЭВВ в верхней части заряда будет равна 1,13 г/см³ в случае сравняется с максимально допустимым значением при начальной плотности 1,17 г/см³.

Таким образом, область допустимых значений плотности ЭВВ при атмосферном давлении ρ_{oo} для 12-метровых колонковых зарядов как в обводненных, так и в необводненных скважинах на карьерах ОАО «Ураласбест» лежит в диапазоне 1,13 г/см³ < ρ_{oo} < 1,17 г/см³.

Полученный результат имеет важное в практике взрывных работ следствие: при необходимости ведения взрывных работ длинными вертикальными (наклонными) скважинными зарядами бестарных ЭВВ для обеспечения полного

энерговыделения при взрыве этих зарядов целесообразно изменять конструкцию колонковых зарядов. Непрерывный по длине колонковый заряд следует разбивать специальными устройствами на отделенные участки, имеющие такую длину (высоту), на которой плотность ЭВВ не будет выходить из зоны допустимых значений. Такими специальными устройствами будут любые приспособления, препятствующие передаче гидростатического давления выше расположенного по высоте участка заряда на нижележащий заряд. При этом каждый участок инициируется собственным ПД.

5.2. Выбор и промышленное испытание ПД для инициирования скважинного заряда ЭВВ

В п. 5.1 получены необходимые, но недостаточные условия прохождения детонации по всей длине колонкового скважинного заряда ЭВВ, т.к. не ЭВВ. вопросы инициирования Определим требования рассмотрены инициирующему импульсу, полагая, что ПД для инициирования скважинного заряда располагается в его центре по длине заряда. Выбор данного места для инициирования был обусловлен необходимостью экспериментальной проверки теоретического вывода, сделанного в п. 3.3, о том, что распространение детонации в направлении уменьшения размеров газовых пор (в направлении «ПД – забой нисходящей скважины») происходит без «срывов». Единственное ограничение – плотность ЭВВ в нижней части скважины не должна превышать максимально допустимого значения [93].

При расчетах используем следующие характерные для ОАО «Ураласбест» показатели используемых ЭВВ: хим. состав - NH_4NO_3 - 75,0 %, H_2O - 18 %, топливная фаза - 7,0 %. Плотность матричной эмульсии - 1,33 г/см³. Размер частиц эмульсии - 6,5 мкм. Радиус газовой поры при атмосферном давлении равен 120 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении - 1,15 г/см³.

Горные породы на карьерах ОАО «Ураласбест» представлены серпентинитами (крепость по М.М. Протодьяконову – 8-10), перидотитами

(крепость – 12-14) и габбро (крепость 16-18). Механические свойства данных пород приведены в табл. 5.1.

В качестве ПД предполагалось использовать ПД из сближенных шашек ПТ-П750 (ТУ 7288-036-07511608-2009).

Характеристики ВВ для изготовления шашек-детонаторов: пентолит 50:50, плотность - 1,58 г/см³, скорость детонации - 7500 м/с, коэффициент политропы - 3,37. При расчете коэффициента отражения ударной волны от стенок скважин использовались механические характеристики горных пород, представленные в табл. 5.1.

Табл. 5.1. Механические свойства типичных горных пород карьеров ОАО «Ураласбест»

Горные породы	Плотность,	Скорость	Акустическая
	кг/м3	продольных волн,	жесткость (· 10 ⁻⁶),
		м/с	кг/(м²*c)
Серпентинит	2600	4550	11,83
[178]			
Габбро [190]	2990	6410	19,17
Перидотит [190]	3050	6520	19,89

На координатной плоскости (фронтальное детонационное давление; параметры детонации) нанесены зависимости некоторых детонационных параметров ЭВВ от величины фронтального детонационного давления, а также значения аналогичных параметров, возникающих в ЭВВ при взрыве когерентного ПД из двух шашек-детонаторов ПТП-750. Рис. 5.2 относится к необводненной, а рис. 5.3 - к обводненной скважинам. Рассматривается центральная часть заряда по его длине.

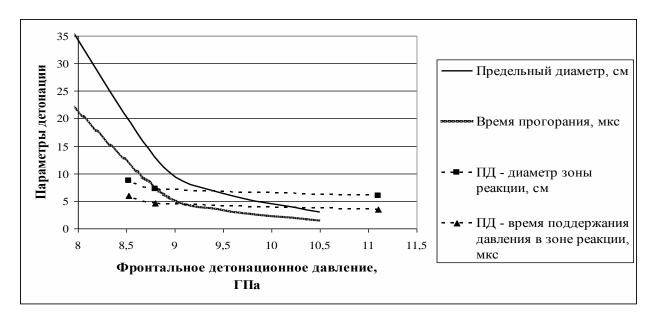


Рис. 5.2. Зависимости детонационных параметров от фронтального давления и параметры зоны реакции вызываемой в ЭВВ при взрыве когерентного ПД (центр по длине необводненного 10 - метрового скважинного заряда)

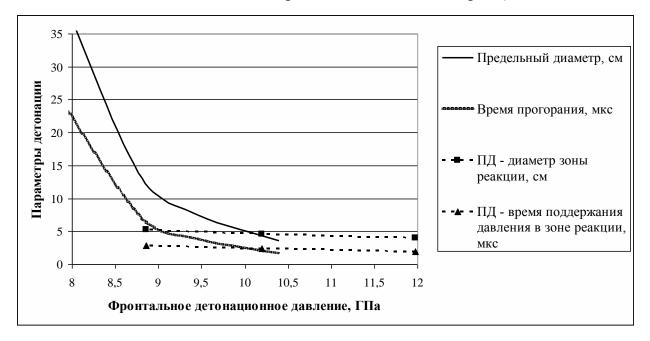


Рис. 5.3. Зависимости детонационных параметров от фронтального давления и параметры зоны реакции вызываемой в ЭВВ при взрыве когерентного ПД (центр по длине обводненного 10 - метрового скважинного заряда при высоте столба воды -5 м)

Анализ результатов, представленных на рис. 5.2 и 5.3, показывает, что когерентный ПД, представленный двумя сближенными шашками-детонаторами

ПТП-750, должен обеспечивать надежное инициирование высокоскоростной детонации в ЭВВ требуемой плотности как в обводненных, так и необводненных скважинах.

Для проверки расчетов на карьере «Центральный» ОАО «Ураласбест» в период с 02.08.2012 по 27.12.2012 был произведен 21 массовый взрыв. Инициирование зарядов осуществлялось ПД из двух сближенных на расстояние 10-30 см шашек-детонаторов ПТП-750 в центральной (по длине) части 250-миллиметрового скважинного заряда.

Плотность применяемого ЭВВ при атмосферном давлении колебалась в рекомендованном диапазоне: 1,13 г/см³< ρ_{oo} < 1,17 г/см³.

Всего за указанный период было взорвано 1502 скважинных заряда, расположенных как в обводненных, так и в необводненных горных породах, и отбито около 1000 тыс. кубометров горной массы.

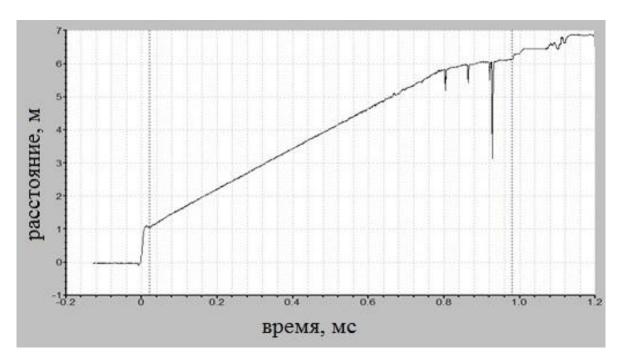


Рис. 5.4. Зависимость длины, пройденной детонационной волной от времени (участок «ПД – верхнее сечение скважинного заряда»)

Контрольные измерения скорости детонации показали, что детонация в верхних частях скважинных зарядов (участок «ПД – верхнее сечение скважинного

заряда») происходит по всему замеряемому участку заряда с высокой скоростью (5600 м/с) без скачкообразных снижений скорости или «срывов» процесса (рис. 5.4).

Так как инициирование скважинных зарядов осуществлялось ПД, расположенным в центральной (по длине) части заряда, осуществить инструментальные замеры скорости детонации в нижней (ниже ПД) части заряда не представлялось возможным.

Полноценность детонации ЭВВ в нижней части заряда оценивалась опосредованно – посредством оценки качества проработки почвы уступа после обстоятельство объясняет работ. Данное значительное выполненных опытно-промышленных взрывов. Наблюдения показали, что во всех опытно-промышленных взрывах была хорошая проработка почвы, что свидетельствовало о том, что ЭВВ, размещенное в нижних частях скважинных зарядов (участок «ПД – забой скважины»), полноценно детонировали при производстве взрывов. Таким образом, вывод, сделанный в п. 3.3, о надежности распространения детонации в направлении уменьшения размеров газовых пор (направление - «ПД - забой нисходящей скважины») пока плотность ЭВВ будет критической, нашел экспериментальное меньше подтверждение. Данное обстоятельство позволяет рассматривать многоточечное встречное взрывчатого инициирования как одни из методов обеспечения полноты разложения при применении нисходящих скважинных зарядов ЭВВ.

Кроме этого нашло экспериментальное подтверждение эффективности использования когерентных ПД для инициирования скважинных зарядов бестарных ЭВВ при открытых горных работах.

Способ инициирования зарядов ЭВВ когерентным ПД нашел широкое распространение при ведении взрывных работ на карьере АО «Ураласбест», т.к. он обеспечивает прохождение детонации по всей длине скважинного заряда. Это способствует полному выделению энергии при взрыве заряда ЭВВ, что обуславливает улучшение дробления и снижение экологически вредного воздействия на окружающую среду за счет уменьшения выброса окислов азота и

отсутствия остатков невзорвавшегося ЭВВ, которые при разложении под действием внешних факторов (погодные условия, карьерные воды) насыщают карьерные воды вредными нитратами и нитритами.

5.3. Обоснование параметров эмульсионного УПД

В настоящее время ряд горнодобывающих предприятий обладает оборудованием для изготовления как бестарных, так и патронированных ЭВВ. В этих условиях возникает целесообразность изготавливать эмульсионные ПД.

Вопрос геометрических параметров ПД приобретает очень важное технологическое и экономическое значение.

Исследования, представленные в п.4.4, показывают высокую эффективность эмульсионных УПД. Поэтому рассмотрим вопрос о геометрических параметрах УПД подробнее, следуя работам [53, 59] и данным п. 4.4.

Рассмотрим ЭВВ следующего химического состава:

 $NH_4NO_3-75,0$ %, H_2O -18,0 %, топливная фаза — 7 %. Плотность матричной эмульсии - 1,33 г/см³.

При расчете параметров ПД исходим из выполнения следующего условия, предложенного в работе [18]: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления P_f необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее $d_{npeo}(P_f)$, в течении времени $t(P_f)$ поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке — P_f ($d_{npeo}(P_f)$, $t(P_f)$ - предельный диаметр заряда и время химической реакции при фронтальном давлении P_f).

На рис. 5.5 приведены зависимости фронтального детонационного давления от времени прогорания межпорового пространства при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ в случае устойчивой детонации.

При построении зависимостей, представленных на рис. 5.5, принимали:

- 1. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии (ударная адиабата D_y = $A+BW_y$, где A, B параметры ударной адиабаты, D_y скорость ударной волны, W_y массовая скорость) равны: A=1920 м/с, B=1,98 [104] .
- 2. ПД размещается на глубине 9,1 м от верхнего уровня заряда.

Обозначения, принятые на рис. 5.5: R_{oo} , ρ_{oo} , $d^* \equiv \Delta$ (2 мкм $\leq d^* \leq 5$ мкм) - радиус газовых пор, плотность ЭВВ при атмосферном давлении, размер частиц дисперсной фазы эмульсии, соответственно.

ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами: $\rho_{\delta}=1,17$ г/см³, $D_{\delta}=5100$ м/с, $k_{\delta}=2,8$.

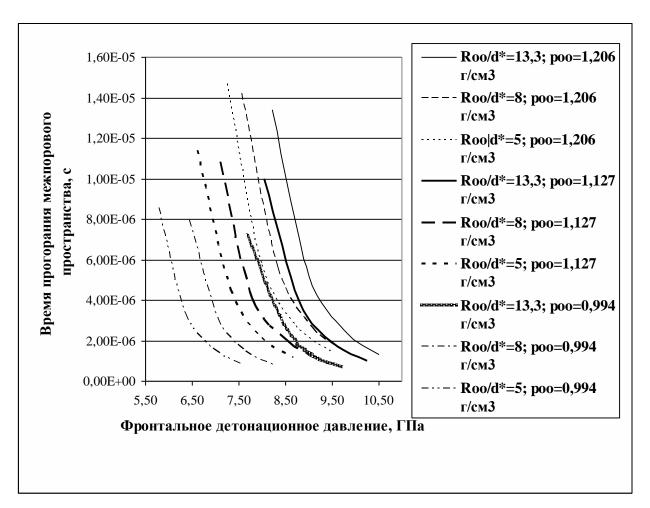


Рис.5.5. Зависимость фронтального детонационного давления от времени прогорания межпорового пространства при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ

На рис. 5.6 представлены полученные на основании (4.59) - (4.63) зависимости фронтального детонационного давления в ЭВВ от времени межпорового прогорания при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ для устойчивых режимов детонации (значения плотности ЭВВ и отношения радиуса пор к размеру частицы окислительной фазы даны при атмосферном давлении).

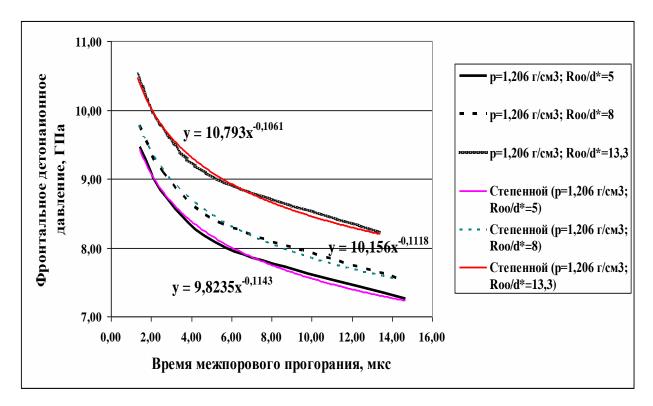
При построении зависимостей, представленных на рис. 5.6, рассматривались детонационные процессы на глубине 9,1 м от верхнего уровня заряда (место расположения ПД).

На основании (4.62), (4.63) и уравнений $P_f(\tau_*)$, приведенных на рис. 5.6, получены зависимости между длиной и диаметром УПД, имеющим минимальную массу при данной длине УПД, при различной плотности и структурных особенностях инициируемого ЭВВ. Принимали, что УПД изготовлен из ЭВВ, имеющего следующие характеристики: $\rho_{\delta}=1,17$ г/см³, $D_{\delta}=5100$ м/с, $k_{\delta}=2,8$. Диаметр взрывной скважины — 250 мм. Коэффициент отражения УВ от стенок скважины — 1,5.

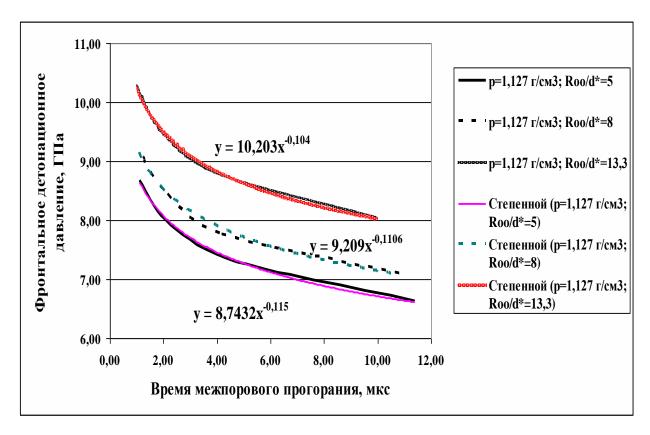
На рис. 5.6 представлены полученные на основании (4.59) - (4.63) зависимости фронтального детонационного давления в ЭВВ от времени межпорового прогорания при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ для устойчивых режимов детонации (значения плотности ЭВВ и отношения радиуса пор к размеру частицы окислительной фазы даны при атмосферном давлении).

При построении зависимостей, представленных на рис. 5.6, рассматривались детонационные процессы на глубине 9,1 м от верхнего уровня заряда (место расположения ПД).

На основании (4.62), (4.63) и уравнений $P_f(\tau_*)$, приведенных на рис. 5.6, получены зависимости между длиной и диаметром УПД, имеющим минимальную массу при данной длине УПД, при различной плотности и структурных особенностях инициируемого ЭВВ. Принимали, что УПД изготовлен из ЭВВ,



a)



б)

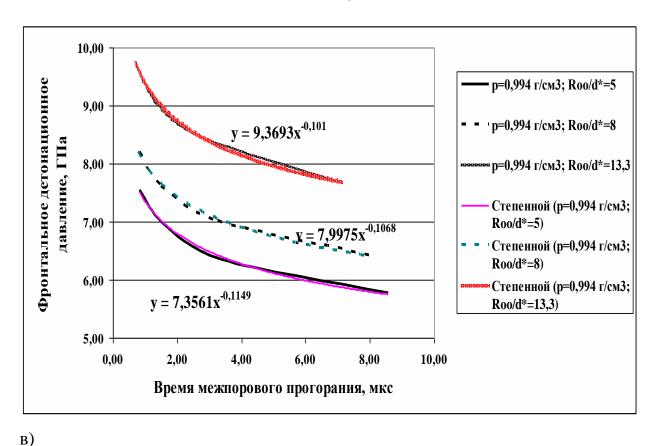


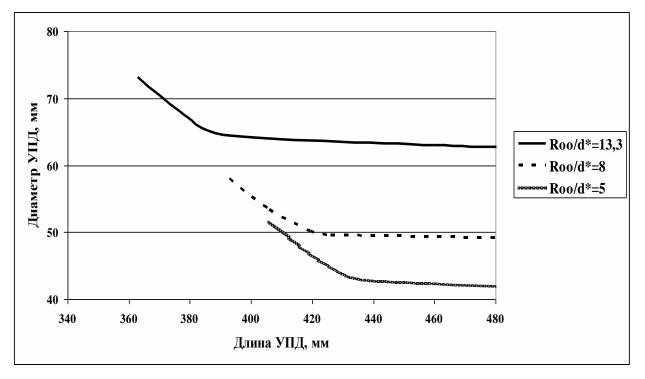
Рис. 5.6. Зависимости фронтального детонационного давления от времени межпорового прогорания при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ для устойчивых режимов детонации

имеющего следующие характеристики: ρ_{δ} =1,17 г/см³, D_{δ} =5100 м/с, k_{δ} =2,8. Диаметр взрывной скважины — 250 мм. Коэффициент отражения УВ от стенок скважины — 1,5.

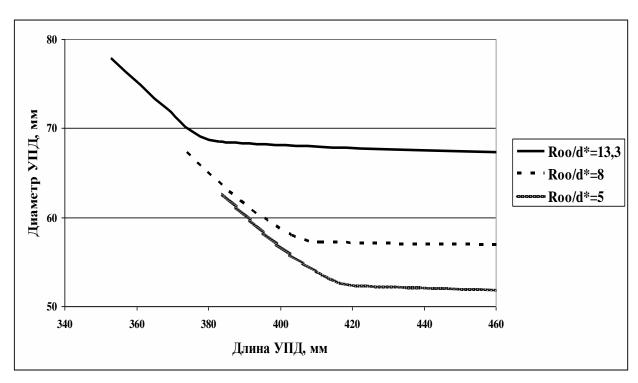
Результаты расчетов для ЭВВ с различной начальной плотностью при атмосферном давлении, но при различных структурных особенностях представлены на рис. 5.7.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5.7, рис. 5.8, а также уравнения (4.62), показывает:

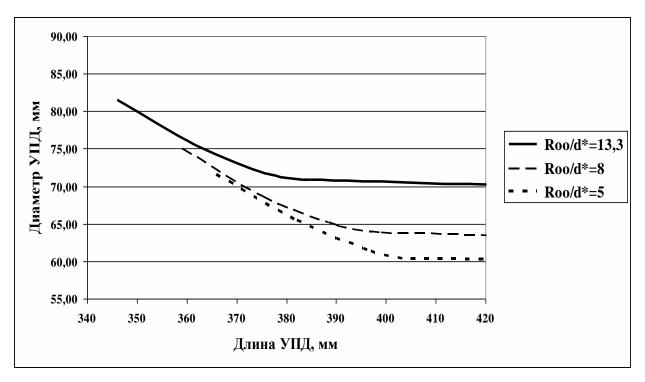
1. Существуют оптимальные по массе УПД для инициирования устойчивой детонации ЭВВ;



А) Начальная плотность ЭВВ - 0,994 г/см 3



Б). Начальная плотность ЭВВ - 1,127 г/см³



В). Начальная плотность ЭВВ – 1,206 г/см³

Рис. 5.7. Взаимосвязь между длиной и диаметром УПД, имеющим минимальную массу при его данной длине, при различных структурных особенностях и начальной плотности инициируемого ЭВВ

2. Оптимальные диаметр, длина и масса УПД зависят от плотности, структурных особенностей инициируемого ЭВВ, отношения диаметра УПД к диаметру взрывной скважины и сжимаемости разрушаемой горной породы.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5.7 показывает, что УПД, имеющие диаметр 70 мм и длину 415 мм (масса – 1860 г) при размещении на глубине 9,1 м инициирует ЭВВ плотностью при атмосферном давлении до 1,21 г/см³, при сенсибилизации ЭВВ как мелкими, так и крупными порами.

Уменьшение плотности инициируемого ЭВВ (до 0,994 г/см³ при атмосферном давлении) позволяет уменьшить массу УПД при сенсибилизации ЭВВ крупными порами до 1200 г (диаметр 60 мм, длина 370 мм), а при сенсибилизации мелкими порами - до 725 г (диаметр 43 мм, длина 440 мм).

На рис. 5.8 приведены результаты расчетов скорости детонации ЭВВ при различных геометрических размерах УПД. Верхняя часть приведенных кривых

до точки поворота соответствует УПД с диаметром больше оптимального; нижняя ветвь кривых – диаметр УПД меньше оптимального.

Нижняя ветвь отражает на первый взгляд парадоксальную ситуацию: наблюдается снижение скорости детонации при увеличении массы УПД. Данное обстоятельство связано с тем, что эта ветвь относится к случаю уменьшающегося диаметра УПД.

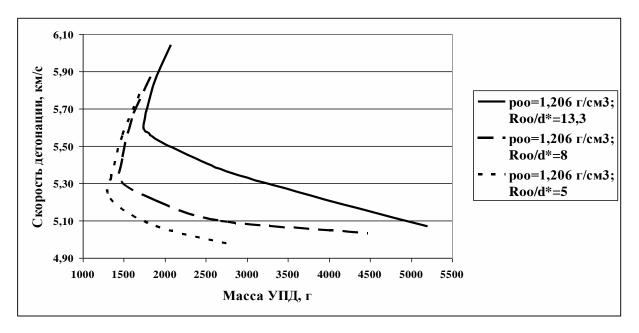


Рис. 5.8. Влияние массы и размеров УПД на скорость детонации в инициируемом ЭВВ

Согласно (4.59) - (4.61) по мере уменьшения диаметра УПД снижается давление в отраженных от стенок скважины ударных волнах, что обуславливает необходимость увеличения продолжительности импульса взрыва УПД для обеспечения возможности инициирования ЭВВ. Из (4.61) следует, что увеличение продолжительности импульса достижимо при увеличении длины УПД. Однако необходимая длина УПД при уменьшении диаметра УПД возрастает весьма быстро (рис. 5.7). Таким образом, падение давления в отраженных ударных волнах (при уменьшении диаметра УПД) не перекрывается эффектом увеличения продолжительности импульса взрыва УПД, поэтому наблюдается снижение

скорости детонации при увеличении массы УПД, что и отражается нижней ветвью рис. 5.8.

Дополнительный анализ рис. 5.8 показывает, что оптимальные по массе и размерам УПД, обеспечивают устойчивую детонацию ЭВВ (плотность при атмосферном давлении – 1,206 г/см³) со скоростью 5,3-5,5 км/с, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к промышленным ЭВВ. Поэтому увеличение массы УПД сверх оптимальных значений нерационально.

Очень эффективным способом снижения массы УПД является сенсибилизация, осуществляемая мелкими порами (при этом размеры пор должны быть таковы, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме [64]). Данное обстоятельство отражено на рис. 5.9.

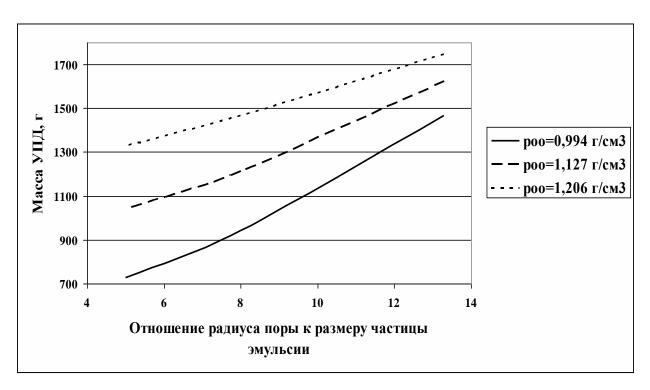


Рис. 5.9. Зависимость минимальной массы УПД от структурных особенностей инициируемого ЭВВ при его различной начальной плотности

В табл. 5.2 представлены параметры эмульсионных ПД, выпускаемых ЗАО «ПВВ» (г. Междуреченск), а в табл. 5.3 - соответствующие параметры оптимальных ПД, рассчитанных на основе представленной выше методики.

При расчете параметров ПД исходим из выполнения следующих условий:

- 1. Инициируется ЭВВ следующего химического состава: $NH_4NO_3 75,0$ %, $H_2O_3 18,0$ %, топливная фаза -7 %. Плотность матричной эмульсии 1,33 г/см³. Плотность ЭВВ и радиус газовых пор при атмосферном давлении -1,13 г/см³ и 20 -50 мкм, соответственно. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии $\Delta = 3$ мкм.
- 2. ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами: $\rho_{\delta}=1{,}15~{\rm \Gamma/cm^3},~D_{\delta}=5100~{\rm m/c},~k_{\delta}=2{,}8.$
- 3. ПД размещается на глубине 8-10 м от верхнего уровня заряда.
- 4. Коэффициент отражения ударных волн от стенок скважины 1,4 (осадочные породы прочностью по М.М. Протодьяконову f = 4-6); 1,6 (осадочные породы прочностью f = 8-12). Расчет коэффициентов отражения осуществлялся на основе экспериментальных данных о свойствах горных пород, приведенных в работе [190].
- 5. Диаметр взрывных скважин 160, 200 и 250 мм.

Сравнительный анализ табл. 5.2 и табл. 5.3 показывает, что результаты расчета геометрических размеров эмульсионных ПД (п.4.1, п.4.2, п.5.4) находятся в согласии с типоразмерами эмульсионных ПД, используемых для инициирования ЭВВ на разрезах Кузбасса на протяжении нескольких лет.

Табл. 5.2. Патроны ЭВВ «Патронит-М» (ЗАО «ПВВ», г. Междуреченск)

Диаметр, мм	Плотность, г/см ³	Масса, г	Длина, мм
26 ± 1	$1,08 \pm 0,01$	260 ± 20	460±20
32 ± 2	$1,08 \pm 0,01$	400 ± 30	460±20
36 ± 2	$1,08 \pm 0,01$	500 ± 40	460±20
50 ± 4	$1,13 \pm 0,02$	1000 ± 50	460±20
90 ± 4	$1,15 \pm 0,03$	3350 ± 60	460±20

А) ТУ 7288-034-17131060-2006

Диаметр, мм	Плотность, г/см ³	Масса, г	Длина, мм
60 ± 1	$1,15 \pm 0,03$	970 ± 20	300 ±10
60 ± 2	$1,15 \pm 0,03$	1300 ± 30	400 ±10
60 ± 2	$1,15 \pm 0,03$	1620 ± 40	500 ±10
60 ± 4	$1,15 \pm 0,03$	1950 ± 50	600 ±10
60 ± 4	$1,15 \pm 0,03$	2270 ± 60	700 ±10

Б) ТУ 7288-043-77353418-2015

Табл. 5.3. Патроны оптимального размера (расчет)

Горные породы	Диаметр	Диаметр	Длина ПД,	Macca
	скважин,	ПД, мм	MM	ПД, г
	MM			
	160	70	440	1950 *
f = 4-6	200	70	440	1950 *
	250	70	440	1950 *
	160	50	330	750 **
f = 8-12	200	70	440	1950 *
	250	70	440	1950 *

Примечания: * - инициирование ЭВВ происходит вследствие торцевого ударного воздействия ПД (п. 4.1); ** - инициирование ЭВВ происходит в отраженных от стенок скважины цилиндрических ударных волнах (п. 4.2, п. 5.4).

С учетом данного обстоятельства, для АО «НИПИГОРМАШ» были рассчитаны представленные в табл. 5.4 размеры эмульсионных ПД для инициирования ЭВВ для расширенного круга горных пород и диаметров

взрывных скважин. На основании данных расчетов были приняты типоразмеры эмульсионных ПД, которые были внедрены в промышленное производство.

Табл. 5.4. Рекомендованные для АО «НИПИГОРМАШ» параметры ПД

Горные	Диаметр	Диаметр ПД,	Длина ПД, мм	Macca
породы	скважин, мм	MM		ПД, г
	100	45	280	510
	160	70	440	1950
f = 4-6	200	70	440	1950
	250	70	440	1950
	320	70	440	1950
	100	36	200	230
	160	45	360	660
f = 8-12	200	55	400	1100
	250	70	370	1650
	320	70	440	1950
	100	32	200	180
	160	36	440	520
f = 14-16	200	45	440	800
	250	60	330	1070
	320	70	440	1950
	100	32	200	180
	160	36	250	290
f = 18-20	200	45	280	510
	250	50	340	770
	320	60	440	1430

При расчете параметров эмульсионных ПД исходили из выполнения следующих условий:

1. Инициируется ЭВВ следующего химического состава: $NH_4NO_3 = 75,0$ %, $H_2O_3 = 18,0$ %, топливная фаза = 7 %. Плотность матричной эмульсии = 1,33 г/см³.

Плотность ЭВВ и радиус газовых пор при атмосферном давлении — 1,13 г/см³ и 20-40 мкм, соответственно. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии - $\Delta=2$ мкм.

- 2. ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами: $\rho_{\delta}=1,15$ г/см³, $D_{\delta}=5100$ м/с, $k_{\delta}=2,8$.
- 3. ПД размещается на глубине 10 м от верхнего уровня заряда.
- 4. Коэффициент отражения ударных волн от стенок скважины -1,4 (f = 4-6); 1,6 (f = 8-12); 1,7 (f = 14-16); 1,8 (f = 18-20).
- 5. Диаметр взрывных скважин 100 мм, 160 мм, 200 мм, 250 мм и 320 мм.
- 5.4. Влияние рецептурного состава и структуры инициируемых ЭВВ на параметры эмульсионных ПД

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5.5 – 5.9, показывает, что отношение размера сенсибилизирующих газовых пор к размеру частицы дисперсной фазы инициируемой эмульсии оказывает существенное влияние на параметры инициирующего импульса. Поэтому управление данным отношением, наряду с управлением плотностью играет важную роль как в выборе ПД (геометрические размеры и вещество ПД), так и назначении условий прохождения детонации вдоль всей длины скважинного заряда (рис. 3.14 и 3.15). Это достигается или управлением размерами газовых пор, или размерами частиц дисперсной фазы эмульсии, или тем и другим одновременно. Размеры газовых пор в наиболее широко распространенном методе сенсибилизации наливных ЭВВ – методе химической газогенерации - определяются степенью дробления жидкости, содержащей газогенерирующие добавки, при ее впрыске в поток

закачиваемой в скважину эмульсии. Поэтому разработка методов управления размерами газовых пор заключается в совершенствовании технологических принципов впрыска и (или) конструкции узла ввода жидкости, содержащей газогенерирующие добавки, в поток эмульсии. Это отдельная самостоятельная задача, имеющая множество различных важных практических приложений (изготовление лекарств, отдельных видов красок и др.), которая выходит за рамки настоящего исследования. Однако управление отношением размера сенсибилизирующих газовых пор к размеру частицы дисперсной фазы инициируемой эмульсии возможно путем регулирования размера частиц дисперсной фазы. Воспользуемся решениями, изложенными в работе [51].

Согласно [127, 224, 286] при создании эмульсии методом механического перемешивания (при неизменных технологических характеристиках: количестве диспергируемого вещества, эмульгаторе и аппарате эмульгирования) дисперсностью эмульсии можно управлять изменением скорости и времени перемешивания. Однако управлять дисперсностью эмульсии можно без внесения конструктивных изменений и без изменения производительности аппарата эмульгирования путем изменения количества применяемого эмульгатора.

В работе [224] отмечено, что качество эмульсии улучшается при увеличении количества используемого эмульгатора, НО при ЭТОМ не рекомендуется применять эмульгатора более 2% масс. В работе [127] указано, что при использовании эмульгатора ПГТ качество (определялось по величине электрической емкости) и водостойкость эмульсии Порэмита-1 возрастают по массовой доли эмульгатора (до 2%, мере увеличения далее показатели снижаются). [127] также приведены результаты микроскопических исследований структуры эмульсии Порэмита-1, полученного с использованием эмульгатора ПГТ, при различной массовой доле эмульгатора. Однако точность этих исследований не позволяет выявить какие-либо закономерности изменения размеров частиц дисперсной фазы при изменении содержания эмульгатора от 1,0 до 2,5% масс.

Необходимо отметить, что эмульгаторы являются дорогостоящими компонентами при получении эмульсий для производства ЭВВ [127, 189, 224], что обусловило проведение исследований для определения минимального расхода различных марок эмульгаторов при производстве ЭВВ в зависимости от срока хранения эмульсии (или ЭВВ) [169, 189].

В работе [54] представлены результаты исследований влияния содержания эмульгатора «РЭМ-5» в топливной смеси эмульсии на крупность частиц дисперсной фазы эмульсии в диапазоне содержания эмульгатора 0,5...1,5 % масс (в составе эмульсии на основе раствора аммиачной селитры). Результаты исследований показали, что в диапазоне содержания эмульгатора 0,5...1,5 % (масс.) по мере увеличения содержания эмульгатора дисперсность эмульсии увеличивается. Однако диапазон содержания эмульгатора более 1,5% (масс.) в указанных исследованиях не отражен.

Для получения количественной зависимости размеров частиц дисперсной фазы эмульсии от расхода эмульгатора «РЭМ-5» нами были проведены лабораторные исследования. Изучалось влияние содержания эмульгатора в топливной фазе эмульсии (на основе монораствора аммиачной селитры) на крупность частиц дисперсной фазы эмульсии в диапазоне содержания эмульгатора 0,6...3,5 % масс. При этом общее количество топливной фазы составляло 7 % масс.

Измерения, как и в работах [54, 225], осуществлялись с помощью оптического микроскопа Olympus BX-51 фирмы «Olympus», оборудованного мультипортами для видео- и фото- регистрации. Точность измерений геометрических размеров составляет 0,5 % отн.

Исследования проводили как в отраженном свете, так и в проходящем в поляризованном и неполяризованном свете на оптическом микроскопе Olympus BX-51, получая фотографии на различных участках покрывных стекол. Среднее значение диаметра частиц дисперсной фазы эмульсии рассчитывали по формуле:

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i}}}$$

где d_i - диаметр i-й частицы, вычисленный из программного обеспечения, исходя из ее площади, предполагаю, что она сферичной формы.

Результаты исследований представлены в табл. 5.5.

На основании данных табл. 5.5 построена зависимость среднего размера частицы дисперсной фазы эмульсии от содержания эмульгатора «РЭМ-5» (в диапазоне 0,6...3,5% масс), представленная на рис. 5.10.

Табл. 5.5. Химический состав эмульсии и средний размер частиц дисперсной фазы эмульсии при различном содержании эмульгатора.

Аммиачная селитра, (% масс.)	H ₂ O, (% масс.)	Нефтепродукт (% масс.)	Эмульгатор (% масс.)	D, мкм
74,4	18,6	6,4	0,6	3,5
74,4	18,6	6,2	0,8	3,4
74,4	18,6	4,8	1,2	2,0
74,4	18,6	5,25	1,75	1,1
74,4	18,6	4,55	2,45	1,5
74,4	18,6	3,5	3,5	5,8

Анализ рис. 5.10 показывает, что наибольшая дисперсность эмульсии достигается при использовании эмульгатора «РЭМ-5» в количестве 1,86% (масс.). При этом размер частицы дисперсной фазы можно рассчитывать на основании степенного уравнения (при 0,6< X<3,5):

$$\overline{D} = 1,734 X^2 - 6,4651 X + 7,1165 \text{ (MKM)},$$
 (5.1)

где X – масс. доля эмульгатора в составе ЭВВ в процентах.

При возрастании массовой доли эмульгатора «РЭМ-5» в составе ЭНА от 0 до 1,86% дисперсность увеличивается, но при дальнейшем увеличении массовой доли эмульгатора дисперсность уменьшается. Вероятно, это связано как с недостатком молекул масла для создания непрерывных масляных пленок, разделяющих частицы дисперсной фазы эмульсии, так и образованием объемно ориентированных структур из молекул эмульгатора в этих пленках.

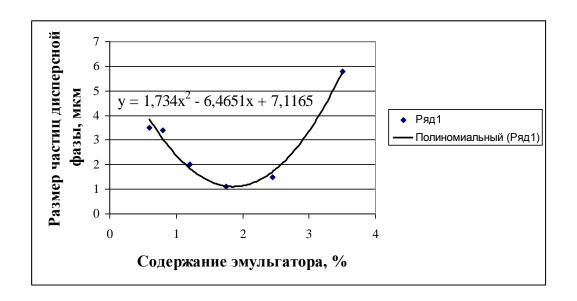


Рис. 5.10. Зависимость размера частиц дисперсной фазы ЭНА от массовой доли эмульгатора «РЭМ-5».

Зависимость (5.1) позволила методически просто осуществить экспериментальную проверку расчетных значений скорости детонации ЭВВ при различной дисперсности эмульсии и размерах сенсибилизирующих пор. Измерялась скорость детонации ЭВВ, имеющего следующий химический состав - $NH_4NO_3 - 75,0$ %, H_2O - 18 %, топлив. фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см³.

Регулирование размеров частиц эмульсии осуществлялось изменением количества применяемого при создании эмульсии эмульгатора «РЭМ-5», а размеры пор – изменением концентрацией газообразующего реагента.

Были проведены опытно-полигонные взрывы, в которых осуществлялся подрыв 200-миллиметровых зарядов плотностью — 1,15 г/см³, имеющих длину 1000 мм. Радиус сенсибилизирующих газовых пор при выполненных сериях взрывов — 30 и 40 мкм. Оболочка заряда — картон. Инициирование зарядов производилось патронами ЭВВ, имеющими диаметр 50 мм, длину 440 мм и массу 950 г. Патроны инициировались капсюлями неэлектрической системы Искра С-500-18. Используемая аппаратура для измерения скорости детонации: прибор VOD Маte, непрерывно измеряющий величину сопротивления электрической цепи проводника-датчика. Результаты обрабатывались в программе, поставляемой изготовителем вместе с прибором.

На рис. 5.11 представлены расчетные зависимости скорости детонации и экспериментальные данные. Анализ данных, представленных на рис. 5.11, показывает, что предложенная в настоящей работе методика определения детонационных параметров ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, позволяет получать расчетные значения, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

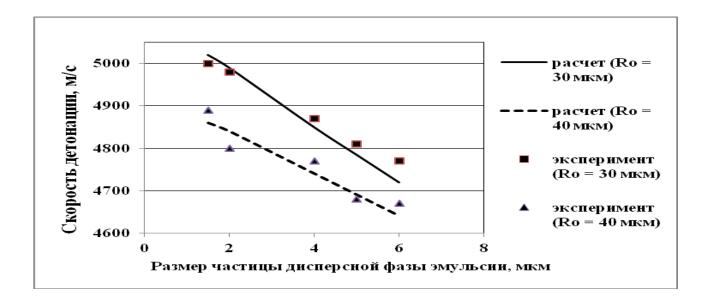


Рис. 5.11. Зависимость скорости детонации от размера частиц дисперсной фазы эмульсии при различных размерах сенсибилизирующих пор (расчетные и экспериментальные данные)

Известный экспериментальный факт ухудшения качества эмульсии при использовании эмульгатора в количестве более 2% (масс.) [127, 224] объясняется наблюдающимся в этом случае укрупнением частиц дисперсной фазы эмульсии.

Анализ (5.1) и зависимостей, показанных на рис. 5.9, показывает, что уменьшение размеров частиц дисперсной фазы эмульсии без одновременного уменьшения размеров газовых пор нецелесообразно, т.к. в этом случае будет наблюдаться возрастание значения отношения радиуса газовой поры к размеру частицы дисперсной фазы эмульсии. При этом для инициирования потребуется ПД большей массы (рис. 5.9). Кроме этого, из зависимостей, изображенных на рис. 3.14, рис. 3.15, следует, что в этом случае осложнится выбор условий для обеспечения прохождения детонации вдоль всей длины скважинного заряда при нижнем инициировании. Поэтому, если не предусматривается уменьшение размеров газовых пор, то при производстве эмульсии для создания бестарных ЭВВ целесообразно использовать лишь такое количество эмульгатора, которое будет обеспечивать физико-химическую стабильность эмульсии на технологически требуемый промежуток времени. Данный вывод согласуется со сведениями, приведенными в работе [127], согласно которым при применении ЭВВ на открытой поверхности с механизированной закачкой в скважины от эмульсии ввиду относительно короткого срока хранения не требуется высокого качества.

Необходимо также отметить, что существенное влияние на параметры ПД, инициирующего детонацию в ЭВВ, оказывает химический состав данного ЭВВ.

На рис. 5.12 представлены расчетные зависимости времени межпорового прогорания от фронтального детонационного давления для ЭВВ одинаковой внутренней структуры, но различного химического состава.

Состав I - NH_4NO_3 – 75,0 %, H_2O - 18 %, топлив. фаза – 7 %. Размер частиц эмульсии – 3 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см³.

Состав II - NH_4NO_3 – 43,0 %, $Ca(NO_3)_2$ - 30,0 %, H_2O - 18 %, топлив. фаза – 9 %. Размер частиц эмульсии – 3 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,48 г/см³.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5.12, показывает, что время межпорового прогорания для одного и того же значения фронтального давления в 2-3 раза меньше, чем для состава І. Следовательно, время поддержания необходимого давления в зоне химических реакций детонационной волны в случае применения ЭВВ состава ІІ меньше, чем в случае состава І.

Согласно исследованиям, представленным в четвертой главе, для возбуждения детонации в ЭВВ состава II, потребуется ПД меньшего диаметра, чем для ЭВВ состава I (при прочих равных условиях), т.к. критический и предельный диаметры для ЭВВ состава II также будет существенно ниже, чем для ЭВВ состава I [48].

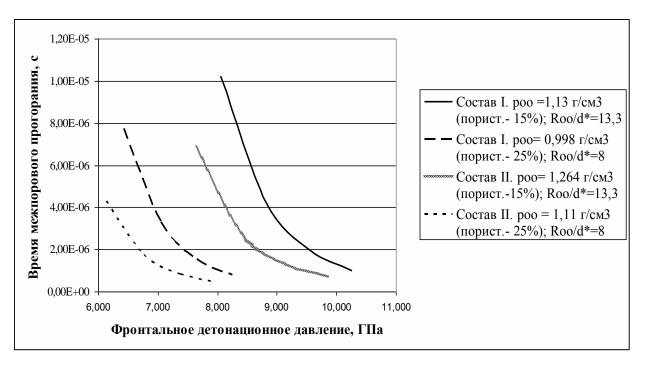


Рис. 5.11. Зависимости времени межпорового прогорания от фронтального детонационного давления для ЭВВ одинаковой внутренней структуры, но различного химического состава

Для проверки данного утверждения были проведены опытно-полигонные взрывы, в которых осуществлялся подрыв 90-миллиметровых зарядов состава I (плотность – 1,06 г/см³ (пористость – 20%), $\Delta = 3$ мкм) и состава II (плотность – 1,18 г/см³ (пористость – 20%), $\Delta = 3$ мкм). Длина зарядов – 1000 мм. Оболочка –

картон. Инициирование зарядов ЭВВ осуществлялось ПД из аммонита №6 ЖВ (плотность – 1 г/см³). В ходе проведения опытов изменялся диаметр ПД.

Осуществлялась визуальная фиксация результатов подрыва зарядов ЭВВ по принципу – «взрыв», «отказ». Количество опытов – 3 для каждого ПД и каждого рецептурного состава. Результаты взрывов представлены в табл. 5.6.

Полученные результаты подтверждают, что критический и предельный диаметры для ЭВВ состава II также будет существенно ниже, чем для ЭВВ состава I.

Табл. 5.6. Результаты инициирования ЭВВ различного рецептурного состава

Характеристики ПД			Результаты опытных взрывов	
Диаметр,	Длина, мм	Масса, г	Состав I	Состав II
MM				
32	250	200	взрыв	Взрыв
18	250	65	отказ	Взрыв

Данные обстоятельства могут иметь решающее значение при выборе направлений развития рецептур и технологий производства ЭВВ и их дальнейшего применения в подземных условиях и (или) использовании скважин уменьшенного диаметра на карьерах [48]. Это подтверждается успешным внедрением ЭВВ на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры на подземных горных работах на руднике «Удачный» им. Ф.Б. Андреева АО «АЛРОСА» (ПАО).

Выводы по главе 5

На основе численного моделирования распространения детонации в вертикальном (наклонном) скважинном колонковом заряде ЭВВ показано, что в условиях карьеров ОАО «Ураласбест» прохождение детонации по всей длине 12-метровых колонковых скважинных зарядов (как обводненных, так и

необводненных) выполняется, если плотность ЭВВ при атмосферном давлении удовлетворяет условию 1,13 г/см³< ρ_{oo} < 1,17 г/см³.

При этом теоретически показано и экспериментально доказано, что детонация проходит по всей длине заряда при его инициировании когерентным ПД, представляющим собой две одновременно взрываемые шашки-детонаторы ПТП-750, разнесенные на расстояние 15-30 см друг от друга. Место расположения ПД – центральная часть заряда (по длине).

Хорошая проработка почвы отбиваемой части уступов при проведении значительного количества опытно-промышленных взрывов, в которых инициирование скважинных зарядов осуществлялось когерентным ПД, позволила подтвердить теоретическое утверждение о том, что при распространении в ЭВВ детонационной волны в направлении уменьшения размеров газовых пор и увеличения плотности происходит детонационное полноценное энерговыделение при взрывчатом разложении ЭВВ (конечно до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую).

Таким образом, теоретические выводы гл. 4 о рекомендации использования методов многоточечного и встречного инициирования как методов, способствующих полному детонационному разложению ЭВВ, получили экспериментальное подтверждение.

При необходимости ведения взрывных работ длинными вертикальными (наклонными) скважинными зарядами ЭВВ для обеспечения полной детонации этих зарядов целесообразно заряд разделять специальными устройствами на отделенные участки, имеющие такую длину (высоту), на которой плотность ЭВВ не будет выходить из зоны допустимых значений. Такими специальными устройствами будут любые приспособления, препятствующие передаче гидростатического давления выше расположенного по высоте участка заряда на нижележащий заряд. При этом каждый участок инициируется собственным ПД.

Численное моделирование процесса инициирования ЭВВ УПД показало, что

существуют оптимальные по массе УПД для инициирования устойчивой детонации в ЭВВ;

оптимальные параметры (длина, диаметр, масса) УПД зависят от плотности, внутренней структуры, химического состав ЭВВ, детонационных характеристик вещества УПД, а также от отношения диаметра УПД к диаметру взрывной скважины и сжимаемости пород, окружающих заряд ЭВВ;

снижение плотности инициируемого ЭВВ позволяет уменьшить массу необходимого УПД;

уменьшение радиуса газовых пор позволяет уменьшить массу необходимого УПД (радиус пор должен быть таковым, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме).

Рассчитан и внедрен в производство типоразмер эмульсионных УПД для нужд НАО «НИПИГОРМАШ», выпускающего как оборудование для производства патронированных и бестарных ЭВВ, так и сами ВВ. Это позволяет предприятию поставлять на рынок адаптированную к условиям производства систему «ЭВВ — эмульсионный ПД» и оборудование для ее производства. Благодаря этому предприятие получает конкурентные преимущества на рынке ПВВ и оборудования для производства ПВВ.

Показана взаимозависимость параметров внутренней структуры ЭВВ (радиус газовых пор и размер частиц дисперсной фазы эмульсии) с параметрами УПД.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что детонационные параметры ЭВВ зависят от размера частиц дисперсной фазы эмульсии и радиуса газовых пор, при этом с увеличением дисперсности эмульсии наблюдается возрастание скорости детонации.

Теоретически и экспериментально доказано, что ЭВВ с окислительной фазой из бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры инициируются ПД меньшей массы, чем ЭВВ с окислительной фазой из раствора аммиачной селитры (монораствор). Это объясняется тем, что ЭВВ на основе бинарного раствора

имеют меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ на основе монораствора.

Данные обстоятельства могут иметь решающее значение при выборе направлений развития рецептур и технологий производства ЭВВ и их дальнейшего применения в подземных условиях и (или) использовании скважин уменьшенного диаметра на карьерах.

Это подтверждается успешным внедрением ЭВВ на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры на подземных горных работах на руднике «Удачный» им. Ф.Б. Андреева АК «АЛРОСА» (ПАО).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований разработаны научно обоснованные положения и практические способы построения взрывобезопасной, экологически и экономически целесообразной системы технологий обеспечения устойчивой детонации скважинных зарядов ЭВВ, основанной на использовании комплекса современных способов регулирования рецептуры, плотности и структуры ЭВВ и их инициирования в условиях скважинной отбойки горных пород, что является решением важной и актуальной научно-технической проблемы.

Для решения указанной научно-технической проблемы исследована система «эмульсионное взрывчатое вещество - промежуточный детонатор» и установлены закономерности возникновения и распространения детонации в ЭВВ с учетом рецептурно-технологических, энергетических и микроструктурных характеристик ЭВВ и параметров возбуждающего импульса.

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

1. Разработаны физико-математическая модель детонации ЭВВ и методика расчета детонационных параметров, в которых впервые учитываются как рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсибилизирующих пор, так и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также характеристики инициирующего воздействия.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что при определении детонационных параметров ЭВВ необходимо учитывать размеры частиц дисперсной фазы эмульсии и параметры инициирующего воздействия.

2. Впервые теоретически обосновано и экспериментально доказано, что детонация ЭВВ может проходить в режиме образования ячеистой структуры детонационного фронта заряда ЭВВ.

Исследования показали, что в ЭВВ реализуются следующие режимы детонации:

нейтрально устойчивый режим (на поверхности детонационной волны возникают устойчивые возмущения);

абсолютно устойчивый режим (однородный стационарный фронт; возмущения на поверхности детонационной волны экспоненциально угасают во времени).

Режим детонации с разрывом детонационной волны на неограниченно возрастающие струи не реализуется.

В случае угасающих со временем возмущений детонационного фронта будет наблюдаться стационарная детонация, описываемая теорией Зельдовича-Нейманна-Деринга (детонация с гладким фронтом).

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (нейтральная устойчивость) формируется ячеистая структура детонационного фронта. Детонация при этом проходит в пересжатом режиме.

3. Впервые теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что при распространении детонации скважинном заряде ЭВВ обрыв детонации или ее переход на низкоскоростной режим обусловлен разрушением ячеистой структуры детонационного фронта (ликвидацией нейтральной устойчивости детонационного фронта).

Показано, что величина детонационных параметров ЭВВ при детонации в режиме нейтральной устойчивости детонационного фронта зависит от величины инициирующего импульса.

Предложен критерий оценки устойчивости распространения детонации по скважинному заряду ЭВВ, позволяющий с помощью разработанной методики расчета детонационных параметров ЭВВ определять момент разрушения ячеистой структуры детонационного фронта.

Режим детонации с нейтрально устойчивым фронтом является недостаточно устойчивым к изменениям в структуре и плотности ЭВВ вдоль вертикального (наклонного) заряда при распространении детонационной волны в направлении укрупнения пор и снижения плотности ЭВВ (направление «вверх» при нижнем инициировании). В этом случае возможен выход детонации из данного режима,

что обуславливает переход детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонационного процесса.

При распространении детонации в обратном направлении (в направлении уменьшения радиуса газовых пор) гидродинамических ограничений на устойчивость детонационной волны не возникает. Детонация в этом случае будет распространяться до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую.

4. Расчетно-аналитическим путем и натурными экспериментами доказано, что при выборе параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах ЭВВ необходимо учитывать детонационные и геометрические параметры ПД, сжимаемость разрушаемых пород, а также рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ.

Разработаны методики расчета параметров ПД для инициирования детонации в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами:

при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД (плоское нагружение); при скользящем ударе продуктами взрыва линейного (удлиненного) ПД; при взрыве системы сближенных сосредоточенных зарядов.

В разработанных методиках учитываются размеры ПД, детонационные параметры и особенности детонационного фронта ВВ, из которого изготовлен ПД, диаметр взрывных скважин и акустическая жесткость окружающих заряд пород, химический состав, плотность и структура возбуждаемых ЭВВ.

Показано, что

рецептурный состав, плотность и структура ЭВВ влияют на параметры инициирующих их импульсов. Поэтому, регулируя данные параметры, можно в известных пределах управлять эффективностью возбуждения детонации;

при возбуждении детонации в ЭВВ важную роль может играть эффект скачкообразного возрастания давления во фронте ударной волны, возбуждаемой в ЭВВ при взрыве ПД, при отражении от стенок скважины и (или) специально введенных в ЭВВ твердых включений;

ПД из высокоплотных индивидуальных BB (смесей или плавов индивидуальных BB), а также из конверсионных BB обладают высокой инициирующей способностью при возбуждении детонации в ЭВВ. При этом при взрыве линейного (удлиненного) ПД из данного вида BB детонация в ЭВВ может возникнуть под действием прямой радиальной УВ, испускаемой при взрыве ПД;

при определении параметров ПД для инициирования ЭВВ необходимо исходить из выполнения следующего условия: ПД при воздействии на ЭВВ должен создавать в достаточном объеме ЭВВ необходимое давление при необходимой продолжительности действия.

Численное моделирование процесса инициирования ЭВВ УПД показало, что существуют оптимальные по массе УПД для инициирования устойчивой детонации в ЭВВ;

оптимальные параметры (длина, диаметр, масса) УПД зависят от плотности, внутренней структуры, химического состава ЭВВ, детонационных характеристик вещества УПД, а также от отношения диаметра УПД к диаметру взрывной скважины и сжимаемости пород, окружающих заряд ЭВВ;

снижение плотности инициируемого ЭВВ позволяет уменьшить массу необходимого УПД;

уменьшение радиуса газовых пор позволяет уменьшить массу необходимого УПД, но при этом размер пор должен быть таковым, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме.

5. При проектировании взрывных работ с применением ЭВВ для обеспечения прохождения детонационной волны по всей длине заряда необходимо учитывать структуру ЭВВ и рассчитывать плотность зарядов таким образом, чтобы на координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ) линия зависимости плотности ЭВВ от радиуса газовых пор для скважинных зарядов не пересекала линии, разграничивающей режимы нейтральной и абсолютной устойчивостей детонационного фронта.

При необходимости ведения взрывных работ длинными вертикальными (наклонными) скважинными зарядами ЭВВ для обеспечения полноты детонации

целесообразно заряд разделять специальными устройствами на отделенные участки, имеющие такую длину (высоту), на которой плотность ЭВВ не будет выходить из зоны допустимых значений. Такими специальными устройствами будут любые приспособления, препятствующие передачи гидростатического давления выше расположенного по высоте участка заряда на нижележащий заряд.

Теоретически и экспериментально обосновано, что для обеспечения полноты детонации скважинного заряда ЭВВ необходимо согласовывать параметры заряда ЭВВ и ПД, что достигается регулированным воздействием на характеристики ЭВВ (начальная плотность, структура и рецептура), на конструкцию заряда ЭВВ и на параметры ПД, связанные как с его характеристиками (ВВ, из которого изготовлен ПД, размеры ПД), так и с условиями его применения (место установки ПД в заряде ЭВВ, конструкция ПД, установка нескольких ПД /многоточечное инициирование и (или) встречное инициирование/).

Теоретически и экспериментально доказано, что ЭВВ с окислительной фазой из бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры инициируются ПД меньшей массы, чем ЭВВ с окислительной фазой из раствора аммиачной селитры (монораствор). Это объясняется тем, что ЭВВ на основе бинарного раствора имеют меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ на основе монораствора.

Данные обстоятельства могут иметь решающее значение при выборе направлений развития рецептур и технологий производства ЭВВ и их дальнейшего применения в подземных условиях и (или) использовании скважин уменьшенного диаметра на карьерах.

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

в интересах совершенствования технологии и снижения издержек производства при ведении взрывных работ на карьерах ОАО «Ураласбест»;

при обосновании для НАО «НИПИГОРМАШ» параметров согласованной системы «ЭВВ – эмульсионный ПД», адаптированной для условий применения;

при изготовлении ЭВВ на предприятии по производству ЭВВ (рудник «Удачный» им. Ф.Б. Андреева АО «АЛРОСА» (ПАО)).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ свойств, применение: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.А. Абрамзона. Л.: Химия, 1988. 200 с.
- 2. Айвазов Б.В. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубке / Б.В. Айвазов, Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики.- 1947.- Т.17. С.888-900.
- 3. Алишкин А.Р. О химической совместимости эмульсионных взрывчатых веществ с рудами и горными породами / А.Р. Алишкин [и др.]// Безопасность труда в промышленности.- 2007.- № 7.- С.69-71.
- 4. Алымова Л.В. Детонационные характеристики эмульсионного взрывчатого состава / Л.В. Алымова [и др.]// Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 3. С. 86-91.
- 5. Ананьин А.В. К исследованию детонационной способности матрицы эмульсионных ВВ / А.В. Ананьин, С.А. Колдунов // ІХ Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 93-96.
- 6. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев М.: Оборонгиз, 1960. 595 с.
- 7. Андреев В.В. Инициирование порошкового гексогена слабой ударной волной/ В.В. Андреев // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 14. № 1. С. 126-128.
- 8. Андреев С.Г. Влияние реологических свойств на избирательную чувствительность ВВ к форме импульса ударно-волнового воздействия / С.Г. Андреев [и др.] // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С.80-87.
- 9. Андреев С.Г. Инициирование ВВ при ступенчатом нагружении / С.Г. Андреев, М.М. Бойко, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва.- 1976.- Т. 12.- № 1.- С.117-120.

- 10. Андреев С.Г. Продольно-поперечная неустойчивость ускоряющихся инициирующих ударных волн / С.Г. Андреев [и др.] // Физика горения и взрыва.-1991.- Т. 27.- № 1.- С.130-131.
- 11. Анников В.Э. О механизме детонации газонаполненных водных гелей / В.Э. Анников [и др.] // Физика горения и взрыва.- 1983.- Т. 19.- № 4.- С.139-143.
- 12. Архипов В.А. Экспериментальное исследование взаимодействия капель при столкновениях / В.А. Архипов, Г.С. Ратанов, В.Ф. Трофимов // Журнал прикладной механики и технической физики.- 1978.- №2.- С.73-77.
- 13. Асланов С.К. Устойчивость детонации конденсированных взрывчатых веществ / С.К. Асланов, В.Э. Волков В.Э.// Детонация. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву 19-24 ноября 1989 года.-Суздаль.- 1989.- С.3-5.
- 14. Аттенков А.В. О возможности разложения гетерогенных ВВ во фронте слабой ударной волны / А.В. Аттенков, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. 1987. Т.23. №4. С.113-125.
- 15. Афанасенков А.Н. Критические давления инициирования взрывчатых веществ / А.Н. Афанасенков, В.М. Богомолов, И.М. Воскобойников// Взрывное дело. Сборник № 68/25. М.: Недра, 1970. С.68-92.
- 16. Афанасьев Г.Т. Образование локальных разогревов в процессе разрушения тонких слоев при ударе / Афанасьев Г.Т. [и др.] // Физика горения и взрыва. 1972- Т. 8.- № 2.- С.299-306.
- 17. Баташев А.Л. Эмульсионные ПВВ. Аналит. обзор по мат. отеч. и заруб. печати за 1982-1986 гг. // ОНТИ- 0512.-Б.м., 1986.- 55 с.
- 18. Баум Ф.А. Об инициировании детонации ударными волнами / Ф.А. Баум, А.С. Державец // Взрывное дело. Сборник № 60/17. М.: Недра, 1966.- С.68-83.
- 19. Баум Ф.А. Физика взрыва /Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер.-М.:Физматгиз, 1959.- 800с.
- 20. Беляев А. Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем/ А.Ф. Беляев.- М.: Наука, 1968.- 255 с.

- 21. Беляев А.Ф. О горении нитрогликоля / А.Ф. Беляев// Теория горения порохов и взрывчатых веществ.- М.: Наука, 1982.- С.10-34.
- 22. Беришвили Г.А. Об эффективности низкочувствительных ВВ при инициировании их боевиками различной кострукции / Г.А. Беришвили, Т.Ш. Элизбарашвили // Взрывное дело. М.: Недра, 1976.- №76/33.- С.164-176.
- 23. Болотова Р.Х. Моделирование процессов взаимодействия сильных ударных волн в газожидкостных смесях / Р.Х. Болотова, М.Н. Галимзянов, У.О. Агишева // Изв. Вузов. Физико-математические науки. Поволжский регион. 2011. №2 (8). С.3-14.
- 24. Бондаренко И.В. Особенности применения эмульсионных ВВ в условиях кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» / И.В. Бондаренко, В.И. Хон В, Р.Я. Никитин // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научнотехнической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле», 12-14 октября 2011 г. Екатеринбург: ИГД УрОРАН.- 2012.- С.155-162.
- 25. Бордзиловский С.А. Влияние скорости нагружения на длину преддетонационного участка в ТГ-50/50 / С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 6- С. 109-113.
- 26. Бордзиловский С.А. Моделирование ударного инициирования детонации гетерогенных ВВ / С.А Бордзиловский, С.М. Караханов, В.Ф. Лобанов // Физика горения и взрыва.- 1987.- Т. 23.- № 5.- С.132-147.
- 27. Бордзиловский С.А. Оптическое излучение ударно-сжатой эпоксидной смолы со стеклянными микросферами / С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, В.В. Сильвестров// Физика горения и взрыва. 2014.- Т. 50.- № 3.- С.105-112.
- 28. Боуден Ф. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах / Ф. Боуден, А. Иоффе М.: ИЛ, 1955.- 119 с.
- 29. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев М.: Глав.ред.физматлит, 1980.- 976 с.

- 30. Васильев А.А. Модель ячейки многофронтовой газовой детонации / А.А. Васильев, Ю.А. Николаев // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12. № 5. С.744-754.
- 31. Васильев А.А. Ячеистые структуры многофронтовой детонационной волны и инициирование (обзор) / А.А. Васильев// Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С.9-30.
- 32. Васильев В.А. О чувствительности вторичных ВВ к инициированию детонации / В.А. Васильев, Л.И. Альбов// Взрывное дело.- М.: Недра, 1976.- № 76/33.- С.128-137.
- 33. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ/ В.Н. Вилюнов. -Новосибирск: Наука, 1984.- 189с.
- 34. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва / О.Е. Власов М.: изд. ВИА, 1957. 408 с.
- 35. Власова Е.А. Оценка взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ / Е.А. Власова Е.А. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 99/56. М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2008. С.119-136.
- 36. Влодарчик Э. Роль газовых пузырьков в инициировании детонации водонаполненных взрывчатых веществ / Э. Влодарчик // Успехи механики.- 1985.- Т.8.- №2.- С.57-88.
- 37. Возгрин Р.А. Повышение качества дробления горной массы при применении скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ уменьшенного диаметра: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20./ Возгрин Роман Александрович. С-П., 2015.-134 с.
- 38. Воскобойников И.М. Расчет параметров детонации смесевых взрывчатых веществ с инертными добавками / И.М. Воскобойников, А.А. Котомин // Физика горения и взрыва.- 1985.- Т. 21.- № 5.- С.83-97.
- 39. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ: Учебное пособие для вузов/ М.Б. Генералов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 397 с.

- 40. Глушак Б.Л. Инициирование твердых гетерогенных ВВ ударными волнами / Б.Л. Глушак, С.А. Новиков, А.П. Погорелов // Физика горения и взрыва.- 1984.- Т.20.- №4.- С.77-85.
- 41. Гогуля М.Ф. Взаимодействие сходящихся ударных волн в конденсированных средах / М.Ф. Гогуля, Н.Г. Демченко, И.П. Воскобойников // Физика горения и взрыва.- 1985. Т. 21.- № 2.- С. 126-130.
- 42. Голубев В.К. О механическом нагружении преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ / В.К. Голубев [и др.]// Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27. № 4.- С.94-99.
- 43. Горинов С.А. Анализ устойчивости детонационной волны при ее распространении в ЭВВ, сенсибилизированном газовыми порами / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал).- 2017.- № 5.- С.241-254.
- 44. 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.
- 45. Горинов С.А. Влияние химической природы окислителя на детонационные характеристики ЭВВ /С.А. Горинов [и др.]// Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле.- Екатеринбург: ИГД УрО РАН.- 2009.- С.191-201.
- 46. Горинов С.А. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсибилизированных газовыми порами, скользящей детонационной волной / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, В.П. Куприн // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.- 2013.- Вип. 5(82).- С. 116-123.
- 47. Горинов С.А. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсибилизированных газовыми порами, скользящей детонационной волной / С.А Горинов, И.Ю. Маслов, В.П. Куприн // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2013.- № 4(1).- С. 615-632.

- 48. 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 // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.- 2012.- Вип. 5(76). С. 56-60.
- 49. 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.
- 50. Горинов С.А. Гофрировочная неустойчивость детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсибилизированном газовыми порами/ С.А. Горинов // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научнотехнической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле», 12-14 октября 2011 г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН.- 2012.- С.163-171.
- 51. Горинов С.А. Зависимость размеров частиц дисперсной фазы эмульсии «ЭНА» от массовой доли эмульгатора «РЭМ-5» / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2018.- №2 (специальный выпуск 6).- С.3-13.
- 52. Горинов С.А. Инициирование ЭВВ когерентным промежуточным детонатором / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2017.- № 4.- С.293-304.
- C.A. 53. Горинов Инициирование эмульсионных взрывчатых веществ, сенсибилизированных линейным газовыми порами, ЭМУЛЬСИОННЫМ промежуточным детонатором / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, П.А. Брагин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2016. - № 5 (специальный выпуск 16). – С. 3-21.
- 54. Горинов С.А. Исследование структуры эмульпоров / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, Е.П. Собина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) 2011.- № 3-4.- С. 3-14.

- 55. Горинов С.А. Неустойчивость детонационного фронта в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсибилизированном газовыми порами / С.А. Горинов// Материалы XIII международной научно-технической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», Кременчуг Бургас, 23-27 июня 2014 года.- С.47-55. 56. Горинов С.А. О неустойчивости детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсибилизированном газовыми порами/ С.А. Горинов, Б.Н. Кутузов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал).- 2012.- №4.- С. 302-307.
- 57. Горинов С.А. Особенности распространения детонационной волны в ЭВВ / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Взрывное дело.- 2017.- № 117/74.- С. 146-156.
- 58. Горинов С.А. Оценка детонационной способности эмульсионных взрывчатых веществ / С.А. Горинов, В.П. Куприн, И.Л. Коваленко // Высокоэнергетическая обработка материалов.- Днепропетровск: Арт-пресс, 2009.- С.18-26.
- 59. Горинов С.А. Расчет параметров эмульсионного промежуточного детонатора для инициирования ЭВВ / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2018.- № 2 (специальный выпуск 6). С.14-29.
- 60. Горинов С.А. Режимы распространения детонационной волны в ЭВВ / Горинов С.А., Маслов И.Ю., Брагин П.А. // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно-производственных семинара и конференции по взрывным работам, 2017 г. Екатеринбург: Издательство АМБ.- 2018.- С.68-75.
- 61. Горинов С.А. Структура окислительной фазы эмульсионных взрыватых веществ / С.А. Горинов, Б.Н. Кутузов, Е.П. Собина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2011.- № 3-1.- С.20-33.
- 62. Горинов С.А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэмитов / С.А. Горинов// Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал).- 2010.- №8.- С.121-130.

- 63. 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).- 2011.- № 4-5.- С.17-20.
- 64. Горинов С.А. Устойчивость детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества, сенсибилизированного газовыми порами / С.А. Горинов // Горный журнал Казахстана.- 2014.- №1.- С.24-27.
- 65. Горинов С.А. Физико-математическая модель детонации эмульсионных взрывчатых веществ, сенсибилизированных газовыми порами. Стационарный режим / С.А. Горинов // Труды XV Международной научно-практической конференции по взрывному делу. 6-12 сентября 2015 г. Ялта, Республика Крым, Россия.- С.33-45.
- 66. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. Взам. ГОСТ 19433-81.- Дата введ. 01.01.1990.- С Изменением № 1, утвержденным в сентябре 1992 г. (ИУС 12-92). -М.: ИПК Изд. Станд., 2004.- 53 с.
- 67. Григорьев Н.А. Действие импульса давления на полость в вязкой жидкости / Н.А. Григорьев, Доронин Г.С., Одинокий В.Л. // Журнал прикладной механики и технической физики.- 1978.- №2.- С.86-88.
- 68. Гришин С. В. Измерение скорости детонации скважинных зарядов в производственных условиях с использованием различных патронов боевиков / С.
- В. Гришин, С. В. Кокин, А. В. Новиков // Взрывное дело. Выпуск № 100/57.- М.: 3AO "МВК по взрывному делу", 2008.- С.226-229.
- 69. Гришин С.В. Выбор оптимальных промежуточных детонаторов для инициирования скважинных зарядов ВВ / С.В. Гришин, С.В. Кокин, А.В. Новиков А.В. // Взрывное дело. Выпуск № 100/57.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2008.- С.229-232.
- 70. Даниленко В.А. О спиновой детонации гетерогенных твердых взрывчатых веществ / В.А. Даниленко, А.Н. Афанасенков // Письма в Журнал технической физики.- 1978.- Т.4.- вып.1.- С.35-38.

- 71. Даниленко В.А. Особенности детонации крупногабаритных зарядов смесевых ВВ / В.А. Даниленко, В.М. Кудинов // Физика горения и взрыва.- 1980.- Т.16.- №5.- С.56-63.
- 72. Даниленко В.А. Особенности потери устойчивости детонации в удлиненных зарядах / В.А. Даниленко, В.М. Кудинов // Физика горения и взрыва. 1983. Т.19. №2. С.101-105.
- 73. Державец А.С. О возможности отнесения эмульсий, применяемых для приготовления промышленных ВВ, в подкласс 5.1 «эмульсия, суспензия или гель нитрата аммония, используемые при производстве бризантных веществ / Державец А.С. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск №101/58.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2009.- С.175-193.
- 74. Дерибас А.А. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами / Дерибас А.А. [и др.]// Доклады РАН.- 2003.- Т.389.- №6. -С.747-748.
- 75. Дерибас А.А. Столкновение плоских детонационных волн в аммоните 6ЖВ / А.А. Дерибас, Н.А. Костюков, А.М. Ставер// Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11.- № 3.- С.456-462.
- 76. Добрынин А.А. Взрывчатые вещества. Химия, составы. Безопасность/ А.А. Добрынин. М.: изд. ИД Академии Жуковского, 2014. 527 с.
- 77. Добрынин И.А. Обоснование параметров промежуточных детонаторов в скважинных зарядах для повышения эффективности дробления горных пород: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Добрынин Иван Александрович. М., 2010.- 20 с.
- 78. Донцов В.Е. Отражение ударной волны от твердой стенки в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками / В.Е. Донцов, Б.Г. Покусаев // Акустический журнал.- 1999.- Т.45.- №2.- С.215-222.
- 79. Дремин А.Н. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин [и др.].- М.: Наука, 1970.- 164 с.

- 80. Дремин А.Н. О двуразмерной ячеистой структуре кинетически неустойчивого детонационного фронта/А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва.- 2008.- Т.44.- №4.- С. 80-86.
- 81. Дремин А.Н. Определение давления Чепмена-Жуге и времени реакции в детонационной волне мощных ВВ / А.Н. Дремин, К.К. Шведов // Журнал прикладной механики и технической физики.- 1964.- №2.- С.154-159.
- 82. Дремин А.Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке /А.Н. Дремин// Физика горения и взрыва.- 2000.- Т.36.- №6.- С. 31-44.
- 83. Дремин А.Н. Пульсирующий детонационный фронт/ А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва.- 1983.- Т.19.- №4.- С. 159-169.
- 84. Друкованый М.Ф. Исследование детонации гранулированных ВВ при инициировании их боевиками различной мощности / Друкованый М.Ф. [и др.] // Взрывное дело. Сборник № 70/27.- М.: Недра, 1971.- С.12-17.
- 85. Друкованый М.Ф. Методы управления взрывом на карьерах./ М.Ф. Друкованый. М.: Недра, 1973. 416 с.
- 86. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов. М.: Недра, 1988.- 358 с.
- 87. Дубовик А.В. Расчет критических параметров инициирования твердых ВВ ударом на копре / Дубовик А.В., Лисанов М.В. // Физика горения и взрыва, 1985, т. 21, № 4, с.87-93.
- 88. Дубовик А.В. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару / А.В. Дубовик, В.К. Боболев М.: Наука, 1978.- 232 с.
- 89. Дунин С.3. Динамика закрытия пор во фронте ударной волны / С.3. Дунин, В.В. Сурков // Прикладная математика и механика.- 1979.- Т.43.- С.511-518.
- 90. Дунин С.З. О распространении пластических волн в пористых телах / С.З. Дунин, В.К. Сироткин, В.В. Сурков // Механика твердого тела. 1978. №3. С.92-98.

- 91. Дьяков С.П. Об устойчивости ударных волн / С.П. Дьяков// Журнал экспериментальной и теоретической физики.- 1957.- Т.27.- С.288-295.
- 92. Жученко Е.И. О детонации скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ, сенсибилизированных газовыми включениями / Е.И. Жученко, В.Б. Иоффе, Б.Н. Кукиб // Взрывное дело. Выпуск №110/67.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2013.- С.88-99.
- 93. Жученко Е.И. Применение ЭВВ, сенсибилизированных методом газогенерации, в глубоких скважинах / Жученко Е.И [и др.]// Безопасность труда в промышленности. 2002. № 11. С.30-32.
- 94. Жученко Е.И. Смесительно-зарядные и доставочные машины, предназначенные для транспортирования, изготовления и заряжания эмульсионных взрывчатых веществ Сибиритов / Е.И. Жученко, В.Б. Иоффе, И.К. Зырянов // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 5. С.39-41.
- 95. Жученко Е.И. Эмульсионные взрывчатые вещества / Жученко Е.И. [и др.] // Сб.науч.трудов РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2000, с.339-349.
- 96. Забабахин Е.И. Заполнение пузырьков в вязкой жидкости / Е.И. Забабахин // Прикладная математика и механика.- Т. XXIV.- вып.6.- С.1129-1131.
- 97. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва/ Е.И. Забабахин. Снежинск: РФЯЦ: ВНИИНТФ, 1997.- 208 с.
- 98. Забабахин Е.И. Явление неограниченной кумуляции / Сб.науч.статей «Кумуляция и неустойчивость»// Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. С.69-106.
- 99. Заслов В.Я. Современное оборудование для заряжания скважин ВВ на горных работах / В.Я. Заслов, В.Б. Ткачев, В.Г. Шеменев // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле.- Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2009.- С.235-244.
- 100. Зельдович Я.Б. К теории распространения детонации в газообразных системах/ Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики.-1940.- Т.10.- вып.5.- С.542-568.

- 101. Зельдович Я.Б. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики.- 1959.- Т.36.- С.782-792.
- 102. Зельдович Я.Б. Теория горения порохов и взрывчатых веществ. / Я.Б. Зельдович // Теория горения порохов и взрывчатых веществ.- М.: Наука, 1982.- С.49-86.
- 103. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. М.: Наука, 1966. 688 с.
- 104. Изучение разложения эмульсии под действием ударных волн: отчет по НИР (заключительный) /Шведов К.К. Черноголовка: Институт проблем химической физики, 2004.- 17 с.
- 105. Ильин В.П. Эмульсионные промежуточные детонаторы / В.П. Ильин [и др.]// Взрывное дело. Выпуск № 110/67.- М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2013.- С.76-87.
- 106. Илюхин В.С. Возможность применения эмульсионных взрывчатых веществ в сульфидных породах и рудах / В.С. Илюхин [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 101/58.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2009.- С.100-109.
- 107. Иоффе В.Б. Научные основы безопасного производства и применения эмульсионных взрывчатых веществ типа «Сибиритов» на горных предприятиях: дисс. ... докт. техн. наук: 05.26.03, 25.00.20/ Иоффе Валерий Борисович. М., 2002. 349 с.
- 108. Кабальнов А.С. Влияние природы и состава дисперсной фазы на устойчивость прямых эмульсий к переконденсации / А.С. Кабальнов, А.В. Перцов, Е.Д. Щукин // Коллоидный журнал. 1985. Вып. 6. С. 1048-1053.
- 109. Калякин С.А. Исследование влияния крупности инертных частиц в составе взрывчатого вещества на его скорость детонации и работоспособность / Калякин С.А. [и др.] // Материалы XIII международной научно-технической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая

- эффективность и техногенная безопасность», 3-8 февраля 2014 года, г. Кременчуг Кошице, Украіна Словаччина. С.75-78.
- 110. Калякин С.А. О линейном инициировании зарядов взрывчатых веществ / С.А. Калякин, В.С. Прокопенко // Сучасніресурсоенергозберігаючі технологіі гірничноговиробництва.- 1/2013 (11).- С.41-47.
- 111. Калякин С.А. Обоснование параметров промежуточных детонаторов для инициирования скважинных зарядов ВВ / С.А. Калякин // Сучасніресурсоенергозберігаючі технологіі гірничноговиробництва.- 1/2012 (9).- С.50-57.
- 112. Калякин С.А. Обоснование числа промежуточных детонаторов для инициирования простейших взрывчатых веществ / С.А. Калякин, В.С. Прокопенко// Сучасніресурсоенергозберігаючі технологіі гірничноговиробництва.- 2/2012 (10). с. 40-47.
- 113. Калякин С.А. Совершенствование простейших ВВ и способов их инициирования в скважинах / С. А. Калякин. Информационный бюллетень УСИВ.- 2011.- № 2. С. 7 12.
- 114. Караханов С.М. Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде / С.М. Караханов [и др.]// Физика горения и взрыва.- 2016.- Т. 52.- № 3.- С.105-113.
- 115. Каупертвейт М. Модельные задачи об инициировании детонации в конденсированных взрывчатых веществах / М. Каупертвейт // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981.- С.8-21.
- 116. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва / В.К. Кедринский // Журнал прикладной механики и технической физики.- 1987.- №4.- С.23-48.
- 117. Кедринский В.К. Особенности динамики сферического газового пузырька в жидкости / В.К. Кедринский // Журнал прикладной механики и технической физики.- 1967.- №3.- С.120-125.
- 118. Кедринский В.К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа / В.К. Кедринский // Физика горения и взрыва.- 1980.- Т. 16.- №5.- С.14-25

- 119. Клейтон В. Эмульсии. Их теории и технологические применения / В. Клейтон; под. ред. П.А. Ребиндера. М.: Иностр. лит., 1950. 680 с.
- 120. Клименко А.П. Жидкие углеводородные газы: хранение, транспорт, регазификация и использование жидких газов М.:Гостоптехиздат, 1959. 295 с.
- 121. Кобылкин И.Ф. Экспериментальное исследование изменения ударноволновой чувствительности зарядов ВВ при предварительном нагружении их слабыми ударными волнами / И.Ф. Кобылкин, Н.И. Носенко, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва .- 1992.- Т. 28.- № 6.- С.70-73.
- 122. Коваленко И.Л. Взаимодействие эмульсионных взрывчатых веществ и их компонентов с сульфидными минералами / И.Л. Коваленко, В.П. Куприн // Взрывное дело. Выпуск № 103/60.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2010.- С.154-170.
- 123. Коваленко И.Л. Разработка и исследование гетерогенных систем на основе нитратов кальция и аммония: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.01 / Коваленко Игорь Леонидович.- Днепропетровск, 2002.- 20 с.
- 124. Козак Г.Д. Спиновая детонация в твердых веществах / Г.Д. Козак, Б.Н. Кондриков, В.Б. Обломский // Физика горения и взрыва. 1989. Т.25. №4. С.86-93.
- 125. Козырев С.А. Оценка влияния массы и типа боевика на характер распространения детонации в скважинных зарядах гранулированных ВВ / Козырев С.А. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 100/57.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2008.- С.152-161.
- 126. Колганов Е.В. Безопасность эмульсионных промышленных взрывчатых веществ / Е.В. Колганов, В.А. Соснин // Записки горного института.- 2007.- Т.171.- С.203-212.
- 127. Колганов Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. 1-я книга (Составы и свойства) / Е.В. Колганов, В.А. Соснин Дзержинск Нижегородской области, издательство ГосНИИ «Кристалл», 2009. 592 с.

- 128. Колганов, Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества / Е.В. Колганов, В.А. Соснин 2-ая книга (Технология и безопасность).- Дзержинск Нижегородской обл.: изд. ГосНИИ «Кристалл», 2009.- 336с.
- 129. Колесников С.А. Экспериментальное исследование структуры детонационных волн в эмульсионных ВВ / Колесников С.А. [и др.] // Тезисы докладов международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2010, с. 216-217.
- 130. Комащенко В.И. Перспективы развития промышленных взрывчатых веществ и применение современных технологий взрывных работ с учетом экологической безопасности / В.И. Комащенко, Е.Д. Воробьев, В.А. Белин// Известия ТулГУ. Науки о земле. 2017. Вып. 3. С. 157-167.
- 131. Коноваленко В.Я. Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии / В.Я. Коноваленко.- Новосибирск: изд. СО РАН, 2012.- 276 с.
- 132. Конторович В.М. Отражение и преломление звука на ударных волнах / В.М. Конторович // Акустический Журнал. 1959. Т. 5. Вып. 3. С. 314-323.
- 133. Конюхов А.В. Нейтрально устойчивые ударные волны в термодинамически неидеальных средах: теория и вычислительный эксперимент /А.В.Конюхов [и др.] // Тезисы международной конференции по физике высоких плотностей энергии IX Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, Россия,10-14 сентября 2007 г.- С.153.
- 134. Конюхов А.В. Устойчивость и неоднозначное представление ударноволнового разрыва в термодинамически неидеальных средах /А.В. Конюхов [и др.] // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.- 2009. Т. 90.-Вып.1.- С. 28–34.
- 135. Конюхов А.В. Численное исследование неустойчивости ударных волн в термодинамически неидеальных средах / А.В. Конюхов [и др.]// Журнал экспериментальной и теоретической физики.- 2004.- Т. 125.- Вып. 4.- С. 927-941.

- 136. Корявов В.П. Расчет движения в ближней зоне взрыва в твердой среде / В.П. Корявов, Г.Г. Виленская // Журнал прикладной механики и технической физики.-1968.- №6.- С.76-85.
- 137. Котяшев А.А. Определение характеристик эмульсионных взрывчатых веществ методом производственного эксперимента / А.А. Котяшев, А.С. Маторин, П.В. Меньшиков // Сборник докладов VII Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. г. Екатеринбург. 2009.- С.58-63.
- 138. Крысин Р.С. Современные взрывчатые вещества местного приготовления / Р.С. Крысин, В.Н. Домничев.- Днепропетровск: «Наука и образование», 1998.- 140 с.
- 139. Крысин Р.С., Украинит-ПМ-1: техника и технология изготовления / Крысин Р.С. [и др.]// Горный журнал. 2004. № 8. С.32-36.
- 140. Кудзило С. Рабочие характеристики эмульсионных взрывчатых веществ / С. Кудзило [и др.]// Физика горения и взрыва.- 2002.- Т.38.- №4.-С.95-102.
- 141. Кудинов В.М. О результатах исследования устойчивости и структуры фронта детонационных волн в гетерогенных средах / В.М. Кудинов, В.А. Даниленко // Всесоюзная конференция "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике" 6-10 сентября 1982г.- Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1982.- С.67-68.
- 142. Кук М.А. Наука о промышленных ВВ. Пер. с англ. под ред. Г.П. Демидюка и Н.С. Бахаревич. М.: Недра, 1980. 453 с.
- 143. Кукиб Б.Н. Детонационная способность современных промышленных взрывчатых веществ / Кукиб Б.Н. [и др.] // 4-ая международная конференция. Физические проблемы разрушения горных пород.18-22 октября 2004 года, Москва.- М.: ИПКОН РАН.- С.293-296.
- 144. Кукин П.П. Теория горения и взрыва / Кукин П.П. [и др.]- М.: «Юрайт», 2014.- 435с.
- 145. Куприн В.П. О возможности применения водонаполненных аммиачно-селитренных ВВ для разрушения сульфидных руд / В.П. Куприн, И.Л. Коваленко

- // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2010.- № 8.- С.130-136.
- 146. Куропатенко В.Ф. Коллапс сферических полостей и кумуляция энергии в идеальной сжимаемой жидкости / В.Ф. Куропатенко // Физика горения и взрыва.-2015.- Т. 51.- № 1.- С.57-65.
- 147. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности / Б.Н. Кутузов. М.: МГГУ «Горная книга», 2009.- 669 с.
- 148. Кутузов Б.Н. Инициирование эмульсионных ВВ и гранэмитов промежуточными детонаторами / Б.Н. Кутузов, С.А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2011.- № 3-1.- С. 5-19.
- 149. Кутузов Б.Н. Расчет детонационных параметров аммиачно-селитренных ВВ / Б.Н. Кутузов, С.А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2010.- № 6.- С .40-49.
- 150. Кутузов Б.Н. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования / Кутузов Б.Н., Горинов С.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2011.- № 3-1.- С.34-52.
- 151. Кучерявый Ф.И. Короткозамедленное взрывание на карьерах/ Ф.И. Кучерявый, М.Ф. Друкованый, Ю.В. Гаек.— М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горн. делу, 1962. 227 с.
- 152. Лавров В.В. Исследование затухающих взрывных процессов в гетерогенных пористых системах. Разработка стандартных методов оценки безопасности: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17/ Лавров Владимир Васильевич. Черноголовка, 2008. 131 с.
- 153. Лавров В.В. Экспериментальное исследование ударной сжимаемости и структуры детонационных волн / В.В. Лавров [и др.] // XI Международная конференция. Забабахинские научные чтения. ЗНЧ 2012. Снежинск, 2012.-www.vniitf.ru/images/zst/2012/s2/2-35.pdf

- 154. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. 4-е изд., стер. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 736 с.
- 155. Лобанов В.Ф. Моделирование детонационных волн в гетерогенных конденсированных ВВ /В.Ф. Лобанов// Физика горения и взрыва.- 1980.- Т. 16.- №6.- С. 113-116.
- 156. Лойценский Л.Г. Механика жидкостей и газа.- Учеб. для студ. вузов.- 6-е изд. перераб. и доп./ Л.Г. Лойценский. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.- 840 с.
- 157. Лунин С.В. Повышение безопасности производства эмульсионных взрывчатых веществ/ С.В. Лунин // Горный журнал. 2010. №1. С.63-65.
- 158. Лыков А.В. Тепломассобмен / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978.- 479 с.
- 159. Маслов И.Ю. Влияние размеров глобул эмульсии на детонационные характеристики ЭВВ при их сенсибилизации пластиковыми полимикросферами / И.Ю. Маслов// Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). 2011.- № 12.- С. 3-9.
- 160. Маслов И.Ю. Определение фактической скорости детонации и работоспособности новых эмульсионных ВВ с целью выбора рациональной плотности заряжания при взрывоподготовке железных руд / И.Ю. Маслов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). − 2003.- №5.- С.56-60.
- 161. Маслов И.Ю. Разработка технологии взрывной отбойки обводненных горных пород глубокими скважинами с применением эмульсионных взрывчатых веществ на основе пенополистирола: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Маслов Илья Юрьевич.- М., 2013.- 23 с.
- 162. Маслов И.Ю. Улучшение качества взрывной подготовки горной массы за счет применения промежуточных детонаторов с оптимальными габаритными размерами при инициировании скважинных зарядов эмульсионных ВВ / И.Ю.

- Маслов [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 94/51.-М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2004.- С. 125–130.
- 163. Маторин А.С. Водосодержащие взрывчатые вещества местного приготовления / А.С. Маторин, В.М. Павлютенков Екатеринбург: УрО РАН, 2004.- 194 с.
- 164. Машуков В.И. Влияние промежуточного детонатора на эффективность взрывных работ при использовании гранулитов / В.И. Машуков, А.К. Новиков // Колыма.- 1968.- № 2.- С.27-29.
- 165. Медведев А.Е. Приближенно-аналитические решения задач механики реагирующих, многофазных сред: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Медведев Алексей Елизарович.- Новосибирск, 2015. 208 с.
- 166. Медведева Н.С. Волны нагрузки при подземном взрыве в горных породах / Н.С. Медведева, Е.И. Шемякин // Журнал прикладной механики и технической физики.- 1961.- №6.- С.78-87.
- 167. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации / Ч. Мейдер.- М.: Мир,1985.- 384 с.
- 168. Мищенко К.П. Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов / К.П. Мищенко, Г.М. Полторацкий. Л.: Химия, 1976.- 328 с.
- 169. Морозов К.Е. Влияние эмульгаторов на качество получаемой эмульсии при производстве эмульсионных взрывчатых веществ типа Порэмит 1A / К.Е. Морозов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17.- № 24.- С. 52-55.
- 170. Ни А.Л. Квазиодномерный анализ и численное моделирование устойчивости стационарных ударных волн в средах с произвольным уравнением состояния / А. Л. Ни, С. Г. Сугак, В. Е. Фортов //Теплофизика высоких температур.- 1986.- Т.24.- № 3.- С.564–569.
- 171. Низомов 3. Молекулярные механизмы акустической релаксации в водных растворах солей одно- и двухзарядных катионов: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Низомов Зуевуддин.- Душанбе, 2009.- 34 с.

- 172. Ноздрев В.Ф. Молекулярная акустика. Учеб. пособие для пед. ин-тов / В.Ф. Ноздрев, Н.В. Федорищенко.- М.: Высшая школа, 1974.- 288 с.
- 173. Нунциато Дж. Континуумная модель инициирования гранулированных ВВ в горячих точках / Дж. Нунциато, Е. Уолш, Дж. Кеннеди // Детонация и взрывчатые вещества.- М,: Мир, 1981 .- С.40-51.
- 174. Организация и проведение работ по испытанию промышленного взрывчатого вещества «Фортис»: отчет по НИР /Шеменев В.Г. Екатеринбург: ИГДУрО РАН, 2010. 70с.
- 175. Организация и проведение работ по испытанию промышленного эмульсионного BB «Фортис», изготавливаемого в смесительно-зарядной машине «ММU(s)-12»: от ет по НИР /Шеменев В.Г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2011. 60 с.
- 176. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара.- 2-е изд., испр./ Л.П. Орленко М.: Физматлит, 2008.- 304c.
- 177. Павлов В.А. Гофрировочная неустойчивость детонационного фронта /В.А. Павлов// Вестник СПбГУ.- 1998.- Сер.4.- Вып.4(№25).- С.87-91.
- 178. Панасьян Л.Л. Минералогические, петрографические и акустические характеристики серпентинитов индикаторы палеодинамических условий их образования (на примере Главного Уральского разлома)/ Л.Л. Панасьян [и др.] // Геология и геофизика. 2014.- Т.55.- № 12.- С.1828-1840.
- 179. Патент RU № 2388735. Способ изготовления эмульсионного взрывчатого вещества и эмульсионное взрывчатое вещество, изготовленное этим способом / И.Ю. Маслов.- Опубл. 10.05.2010.
- 180. Патент України № 52403. Емульсійнавибуховаречовина україніт-пп-1/ В.П. Купрін [та інші.]. Опубліковано: 17.01.2005.
- 181. Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации. Сер. В. Вып. 2. М.: ГУП «Научно-технич.центр по безопасности в пром-сти Гостехнадзора России», 2002.- 80с.

- 182. Перечень рекомендуемых промышленных взрывчатых веществ (Межведомственная комиссия по взрывному делу).- М.: Недра, 1971. 31 с.
- 183. Петров Е.А. Исследование сенсибилизирующей способности микросфер «Expancel» в гетерогенных ВВ / Е.А. Петров, И.И. Золотухина, Н.В. Бычин // Взрывное дело. Выпуск № 99/56.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2008.- С.174-178.
- 184. Полезная модель № 93963 (Ru). Промежуточный детонатор из эмульсионного взрывчатого состава / Страхов А.Г. [и др.].
- 185. Полезная модель № 122164 (Ru). Эмульсионный патрон-детонатор / Осторожный В.Н. [и др.].
- 186. Приказ Минтранса РФ от 8 августа 1995 г. № 73 «Об утверждении Правил перевозки опасных грузов автомобильным транспортом».
- 187. Проспект фирмы Lubrizol/Atlas. Технология производства взрывчатых эмульсий для промышленного применения. М., ноябрь 1989.
- 188. Проспект фирмы UnionExplosivesRioTinto (E.R.T.) Технический обзор производства взрывчатых эмульсий для гражданского применения. Мадрид, Испания, 1 июля 1985.
- 189. Пупков В.В. Снижение себестоимости изготовления на местах применения эмульсионных ВВ за счет подбора эмульгаторов и определения их оптимального расхода / В.В. Пупков [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 107/64.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу при АГН", 2004. С. 119-124.
- 190. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие / под ред. М.М. Протодьяконова.- М.: Недра, 1981.- 192 с.
- 191. Рафейчик С.И. Экспериментальное и численное исследование параметров детонации эмульсионных взрывчатых веществ с микробаллонами из стекла: автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук: 01.04.17 / Рафейчик Сергей Игорьевич.-Новосибирск, 2014.- 19с.

- 192. Решетняк А.Ю. Детонация эмульсии на основе аммиачной селитры с ценосферами :автореф. дис. ... канд.техн. наук: 01.02.05 / Решетняк Александр Юрьевич.- Новосибирск, 2007.- 20 с.
- 193. Русских А.П. Испытание эмульсионной матрицы порэмита 1А по методике ООН в условиях ОАО «Уралабест» / А.П. Русских // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле.- Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2009.- С.137-147.
- 194. Сахипов Р.Х. Исследование детонационных характеристик эмульсионных ПВВ типа «вода в масле» / Р.Х. Сахипов [и др.] // Материалы 9-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву в г. Суздаль 19-24 ноября 1989 г.- Черноголовка: ИПХФ АН СССР, 1989.- С.9-11.
- 195. Седов Л.И. Механика сплошной среды, т.II / Л.И. Седов.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984.- 560 с.
- 196. Сивенков В.И. Эмульсионные взрывчатые вещества и неэлектрические системы инициирования / В.И. Сивенков, С.В. Иляхин, И.Ю. Маслов М.: Щит-М, 2013.- 320с.
- 197. Сильвестров В.В. Применение эмульсионных ВВ для сварки взрывом / В.В. Сильвестров, А.В. Пластинин, С.И. Рафейчик // Автоматическая сварка. 2009. Т. 45. № 11. С. 69-73.
- 198. Сильвестров В.В. Детонационные характеристики эмульсионных ВВ с ценосферами/ В.В. Сильвестров [и др.] // Горный журнал. 2006. № 5. С.62-64.
- 199. Сильвестров В.В. Измерение температуры ударно-сжатой эмульсионной матрицы / В.В. Сильвестров [и др.]// Физика горения и взрыва.- 2016. Т. 52.- № 2.- С.138-145.
- 200. Сильвестров В.В. Критический диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества / В.В. Сильвестров [и др.] // Физика горения и взрыва.- 2008.- Т. 44.- № 3.- С. 121-127.

- 201. Сильвестров В.В. О зависимости скорости детонации от плотности для ряда взрывчатых веществ / В.В. Сильвестров // Физика горения и взрыва. 2006. Т.42. № 4. С.116-124.
- 202. Сильвестров В.В. Нагружение эмульсии ударом высокоскоростной пластины / В.В. Сильвестров, А.В. Пластинин, А.В. Юношев // Физика горения и взрыва. 2016.- Т. 52.- № 3.- С.114-118.
- 203. Сильвестров В.В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества / В.В. Сильвестров [и др.] // Физика горения и взрыва.-2015.- Т. 51.- № 1.- С.105-112.
- 204. Сильвестров В.В. Ударная адиабата эмульсионной матрицы на основе водного раствора аммиачной селитры / В.В. Сильвестров, А.С. Юношев, А.В. Пластинин // Физика горения и взрыва. -2014.- Т. 50.- № 6.- С.105-108.
- 205. Сильвестров В.В. Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа / В.В. Сильвестров [и др.] // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50.- № 4.- С.110-116.
- 206. Соболев В.В. Оптическая система инициирования зарядов взрывчатых веществ / В.В. Соболев, А.В. Чернай // Материалы X международной научнотехнической конференции «Разработка, использование и экологическая безопасность современных гранулированных и эмульсионных взрывчатых веществ», 03-08 февраля 2014 года, Кременчуг Кошице, Украіна Словаччина. С. 49-54.
- 207. Соловьев В.С. Некоторые особенности ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ / В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва.- 2000.- Т. 36.- №6.- С.65-76.
- 208. Соловьев В.С. Разложение ВВ в условиях газодинамического течения / В.С. Соловьев, А.Н. Исаев, И.Ф. Кобылкин // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 3. С.98-101.
- 209. Соснин А.В. Влияние размеров и параметров микросфер на скорость детонации в эмульсионных взрывчатых веществах / А.В. Соснин // Взрывное дело. Выпуск № 105/62.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2011.- С.199-209.

- 210. Соснин В.А. Исследование процессов детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах / В.А. Соснин, Е.В. Колганов // Химическая физика.- 2003.- Т. 23.- № 8.- С. 100-107.
- 211. Соснин В.А. Концепция разработки безопасных и экологически чистых промышленных взрывчатых веществ / В.А. Соснин, Е.В. Колганов // Горный журнал.- 2001.- № 12.- С. 1-4.
- 212. Соснин В.А. Мировые тенденции развития промышленных взрывчатых веществ / В.А. Соснин // Взрывное дело. Выпуск № 107/64.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2012.- С.107-121.
- 213. Соснин В.А. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ / В.А. Соснин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета.- 2016.- Т. 19.- № 19.- С. 28-33.
- 214. Соснин В.А. Современные промышленные взрывчатые вещества в России и за рубежом / В.А. Соснин [и др.] // Горный журнал. 1998. № 7. С.45-49.
- 215. Соснин В.А. Состояние и перспективы производства эмульсионных ПВВ / В.А. Соснин // Горный журнал. 1995. № 9. С. 46-48.
- 216. Соснин В.А. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом / В.А. Соснин, С.Э. Межерицкий // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 19. С. 84-89.
- 217. Соснин В.А. Эмульсионные ПВВ.- Аналит.обзор по мат.отеч. и заруб. печати за 1961-1981 гг. / В.А. Соснин, Р.Х. Сахипов, Г.П. Шарнин // ОНТИ-0512.- Б.м., 1982.- 67 с.
- 218. Соснин В.А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества в России / В.А. Соснин // Международная научно-практическая конференция «Проблемы производства ПВВ на современном этапе и утилизация боеприпасов». Украина, г. Павлоград. 12-15 мая 1997.- с.30.

- 219. Справочник по горнорудному делу. Открытые работы. Том І. / Под ред. Е.Ф. Шешко и В.В. Ржевского.- М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горн.делу,
- 1960.- 926 c.
- 220. Справочник по горнорудному делу. Подземные работы. Том II. / Под ред. А.М. Терпигорева и Р.П. Каплунова.- М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по
- горн.делу, 1960.- 855 с.
- 221. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды / К.П. Станюкович.- М.: Гостехиздат, 1955.- 840с.
- 222. Стребю Р. Критические условия ударноволнового инициирования детонации ВВ практического применения / Р. Стребю, Дж. Кеннеди // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981. С.255-268.
- 223. Сычев А.И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах / А.И. Сычев// Журнал технической физики. 2010. Т.8. Вып. 6. С.31-35.
- 224. Сюйгуан В. Эмульсионные взрывчатые вещества. Пер. монографии проф. Ван Сюйгуан издания Metallurgical Industry Press, Beijing, 1994г./ Ван Сюйгуан.- Красноярск: Metallurgical Industry Press, 2012.- 380 с.
- 225. Теоретическая оценка детонационной способности эмульсионных BB, предназначенных для разрушения сульфидных пород: отчет по НИР / Горинов С.А., Коваленко И.Л.- Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2010.- 115 с.
- 226. Тогунов М.Б. Повышение эффективности взрывания горных пород эмульсионными ВВ / М.Б. Тогунов [и др.] // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно-технической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле» Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012.- С.123-133.
- 227. Торунов С.И. Экспериментальное исследование неустойчивости детонационного фронта жидких взрывчатых веществ :дисс. ... канд. физ-мат. наук: 01.04.17 / Торунов Сергей Иванович.- Черноголовка, 2016.- 95 с.
- 228. Топчиян М.Е. Сходящиеся цилиндрическая детонационная волна в газе / М.Е. Топчиян, В.А. Ясаков // Физика горения и взрыва.- 1967.- Т. 3.- № 1.- С.23-31.

- 229. Трофимов В.С. Обобщение гидродинамической теории детонации на случай турбулентного движения среды / В.С. Трофимов// Взрывное дело. Выпуск № 103/60.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2010, с. 3-15.
- 230. Фейман Р. Феймановские лекции по физике. Т.7. Физика сплошных сред / Р. Фейман, Р. Лейтон, М. Сэндс. М. :Мир, 1977.- 288 с.
- 231. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко.- Изд. 3-е, перераб.- В 2-х т. Т.1.- М.: Физматлит, 2002.- 832 с.
- 232. Физическая акустика. Т. VI. Принципы и методы / под ред. У. Мэзона, Р. Терстона.- М.: Мир, 1973.- 432 с.
- 233. Фокин В.А. Методика обоснования режимов механизированного заряжания обводненных скважин эмульсионными взрывчатыми веществами на открытых горных работах / Фокин В.А. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 99/56.- М.: ЗАО "МВК по взрывному делу", 2008.- С.57-68.
- 234. Фокин В.А. Обоснование геометрических параметров удлиненной шашкидетонатора для обратного инициирования скважинных зарядов, газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ / В.А. Фокин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. 2008. №3. С.49-54.
- 235. Фокин В.А. Распределение плотности эмульсионных взрывчатых веществ по высоте колонки скважинного заряда / В.А. Фокин // Изв.ВУЗов. Горный журнал.- 2007.- №3.- С.89-94.
- 236. Харитон Ю.Б. О детонационной способности взрывчатых веществ / Ю.Б. Харитон // Вопросы теории взрывчатых веществ, вып.1.- М.-Л.: изд-во АН СССР, 1947.- С.7-42.
- 237. Хасаинов Б.А. Возбуждение химической реакции при ударноволновом сжатии жидких ВВ, содержащих стеклянные микросферы / Б.А. Хасаинов, Б.С. Ермолаев // Химическая физика. 1992. Т.11. № 11. С.1588-1600.
- 238. Хасаинов Б.А. Развитие очага реакции в пористых энергетических материалах / Б.А. Хасаинов, А.А. Борисов, Б.С. Ермолаев // Химическая физика.-1988.- Т.7.- №7.- С. 989-998.

- 239. Хотин В.Г. Об особенностях динамического сжатия веществ, способных к разложению в ударных волнах / В.Г. Хотин, С.П. Бачурин // Вопросы теории конденсированных взрывчатых систем. Труды Московского хим.-техн. института им. Д.И. Менделеева.- М.: МХТИ, 1980.- Вып. 112.- С.113-119.
- 240. Хоув П. Ударноволновое инициирование и понятие критической энергии / П. Хоув [и др.]// Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981.- С. 236-254.
- 241. Чедвик П. Механика глубинных подземных взрывов / Чедвик П., Кокс А., Гопкинсон Г. М.: Мир, 1966.- 126с.
- 242. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов.- М.: Наука, 1974.- 640c.
- 243. Шведов К.К. Параметры детонации эмульсионных ВВ / К.К. Шведов, В.В. Лавров // Проблемы взрывного дела: сб.ст. и докл.- М: изд-во МГГУ, 2002.- №1.- С.90-99.
- 244. Шведов К.К. О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке / К.К. Шведов, А.Н. Дремин // Взрывное дело. Сборник № 76/33.- М.: Недра, 1976.- С.137-150.
- 245. Швыдько П.В. К вопросу снижения выхода мелких фракций при взрывной отбойке минерального сырья, а также бурения, расхода ВВ и сейсмического эффекта на открытых горных работах / П.В. Швыдько [и др.]//Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського.-Випуск 5/2007 (46).- Частина 1.- С.94-97.
- 246. Шемякин Е.И. Некоторые модели деформирования горных пород и грунтов / Е.И. Шемякин, А.Ф. Ревуженко, С.Б. Стажевский // Взрывное дело. Сборник № 78/33.- М.: Недра, 1976.- С.204-208.
- 247. Шильпероорд А. Простая модель ударноволнового инициирования детонации в гетерогенных взрывчатых веществах /А. Шильпероорд// Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир,1981.- С.291-305.
- 248. Шиман Л.Н. Экологические преимущества применения эмульсионных взрывчатых веществ марки «ЭРА» на гранитных карьерах / Л.Н. Шиман, Т.Ф. Холоденко, А.В. Павличенко // Материалы XIII международной научнотехнической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных

- работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», 3-8 февраля 2013 года, г. Кременчуг Бургас.- С.26-31.
- 249. Щукин Ю.Г. Перспективные взрывчатые материалы для горной промышленности/ Щукин Ю.Г. [и др.]// Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. Екатеринбург: УрО РАН, 2009.- С.108-118.
- 250. Юношев А.С. Исследование влияние плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции / А.С. Юношев, А.В. Пластинин, В.В. Сильвестров // Физика горения и взрыва .- 2012.- Т. 48.- № 3, с. 79-88.
- 251. Юношев А.С. Новые приложения эмульсионных взрывчатых композиций /Юношев А.С. [и др.] // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 3. С.113-118.
- 252. Юханссон К. Детонация взрывчатых веществ / К. Юханссон, П. Персон М: Мир, 1973.-352 с.
- 253. Avdeev K.A. Experimental and computational investigation of shock wave-to-bubble water momentum transfer / K.A. Avdeev and etc// Progress in Detonation Physics / Edited by S.M. Frolov and G.D. Roy/ Moscow: TORUS PRESS, 2016. pp. 199-219.
- 254. Butcher B.M. Shock-wave compaction of porous aluminium / B.M. Butcher, M.M. Caroll, A.C. Holt // J. Appl. Phys. 1974. V.45. №9. pp.3864-3875.
- 255. Campell A.W. Shock initiation of detonation in liquid explosives / A.W. Campell, W.E. Davis, J.R. Travis // Phys. Fluids. 1961. V.4. №4. -pp.498-506.
- 256. Caroll M.M. Static and dynamic pore-collapse relation for ductile porous materials / M.M. Caroll, A.C. Holt // J. Appl. Phys. 1972. V.43. №4.- pp.1626-1636.
- 257. Chaudhrii M.M. The role of rapidly compressed gas pockets in the initiation of condensed explosives / M.M. Chaudhrii, J.E. Field // Lond., Proc. Royal Soc.- 1974.- A340.- № 974.- P.113-120.
- 258. Cooper J. Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives / Cooper J., Leiper A.G., Neilson W.G. // Proc. 12th Intern. Detonation Symp. 2002. pp. 733-741.

- 259. Deribas A.A. Mechanism of detonation of emulsion explosives with hollow microballons / A.A. Deribasand etc // XII International Conference on the Methods of Aerophysical Research: 28 June 3 July, 2004, Novosibirsk, Russia. Novosibirsk, 2004.- Part I.- pp.75-80.
- 260. Developments in Explosives // World Mining Equip.- 1986.- Vol. 10. № 3. P. 33.
- 261. Dobmikal S. Savremene tendencije razvga eksploziva u svetu / S. Dobmikal // Eksploz. buseminir. 1987. T. 18.- № 1.- S. 1-8.
- 262. Doring W. Uber der Detonation verging in Gasen / W. Doring// Ann. Phys. 1943.- Bd. 43.- N 5.- S.421-436.
- 263. Erpenbeck J.J. Stability of step shocks / J.J. Erpenbeck// Phys. Fluids.- 1962.- V. 5.- No. 10.- pp. 1181-1191.
- 264. Fiederling N. Emulsions sprengstoffe in Pheorie und Praxis / N. Fiederling// Nobel Hefte.- 1988.- Vol. 54.- № 4.- S. 109-120.
- 265. Fiederling N. Neue Entwicklungen auf dem Lebiet gewerblicher Sprengstoffe / N. Fiederling// NatursteinIndustrie.- 1988.- № 24.- S. 25-28.
- 266. Gorinov S. Peculiarities of detonation of gas sensitized emulsion explosion/ S. Gorinov and etc. // Combustion and Explosion (COMBEX-2013), Ramsau, Austria, March 4-8, 2013.- http://www.combex.org/papers/fUm9d3S4/
- 267. Gorinov S.A. Physical and technical evaluation of possibility using low-density explosives in smooth blasting / S.A. Gorinov, I.Y. Maslov // 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. 24-26 August 2015. Sydney, Australia: Published by AIMM, 2015. pp. 555-564.
- 268. Gorinov S.A. Results of the study of structure oxidizer phase emulsion explosives / S.A. Gorinov, I.Y. Maslov // Progress in Detonation Physics / Edited by S.M. Frolov and G.D. Roy/ Moscow: TORUS PRESS, 2016. pp. 335-342.
- 269. Hara Y. Cristallization in dispersed phase of w/o emulsion/ Y. Hara, K. Takhasli, H. Nakamura //J. Jnd. Explos. Soc. Jap. − 1984. V. 45. № 3. pp. 129-134.

- 270. Hirosaki Y. Detonation characteristics of emulsion explosives as function of void size and volume / Y. Hirosaki and etc.// 12th International Detonation Symposium, 2002, USA, San Diego, California. www.intdetsymp.org/detsymp2002/PaperSubmit/FinalManuscript/pdf/Hirosaki-149.pdf
- 271. Kamsuhide H. Influence of the size of hollow spheres on the critical diameter and sensitivity of emulsion explosives / H. Kamsuhideand etc.// J. Jnd. Explos. Soc. Jap. 1984. V. 45.- № 3.- pp. 143-148.
- 272. Keirstead K.F. Effect of bubble dimensions on shock sensitivity in gelled slurry explosives / K.F. Keirstead, D. De Kee //Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 1985.-V.24.- №1.- pp.134-140.
- 273. Kobayashi J. The particle size and sensitivity of emulsion explosives to initiation / J. Kobayashi, K. Itoh, K. Yamamoto // J. Ind. Explos. Soc. Jap. 1984. V.45. №3. pp.135-142.
- 274. Langens P. Entwicklung neuer Sprengstoffe zur Verbesserung der Sprengarbeiten/ P. Langens// Nobel Hefte.- 1986.- Vol. 52.- № 2.- S. 124-127.
- 275. Lee J. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosive / J. Lee J. and etc.// Proc. 9th Intern. Detonation Symp., Portland, Origon, 1989.- pp.263-271.
- 276. Lee J. Detonation behaviour of emulsion explosives / J. Lee J., P.A. Persson // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990.- V.15.- №5.- pp.208-216.
- 277. Mader C. Initiation of detonation by the interaction of shocks with density discontinuous / C. Mader// Phys. Fluids. -1965. V.8.- №10.- pp.215-219.
- 278. Mader C. Shock and hot initiation of homogeneous explosives / C. Mader // Phys. Fluids.- 1963.- V.6.- №3.- pp.375-383.
- 279. Maranda A. Materialy wybuchowe emulsyjne (MWE) novoczesny srodek strzalowy / A. Maranda, E. Wlodarezyk //Biul. WATJ. Dabrowskiego. 1985. T. 34. № 5.- S. 13-21.
- 280. Medvedev A.E. Detonation of commercial emulsion explosives. Dependence on the charge diameter / A.E. Medvedev, A.Yu. Reshetnyak, V.M. Fomin // XIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research: 5 10 February,

- 2007, Novosibirsk, Russia: Proc. Pt I/ Ed. V.M. Fomin.-Novosibirsk: Publ. House Parallel, 2007. pp.123-127.
- 281. Modern explosives emulsions and dense ANFO // World Mining Equip. 1987.- Vol. 12.- № 3.- pp. 34-35.
- 282. Patent US No 3161551. Water resistant sensitizers for blasting agents / R.S. Egly, A.E. Neckar. Publ. 15.12.1964.
- 283. Patent US No 3164503. Aqueous emulsified ammonium nitrate blasting compositions containing nitric acid /N.E. Gehrig. Publ. 05.01. 1965.
- 284. Patent US No 3447978. Ammonium nitrate emulsion blasting agent and method of preparing same / H.F. Bluhm. Publ. 03.06.1969.
- 285. Patent US No 3642547. Method of controlling density in gas-sensitized aqueous explosives / K.L. Conrad. -Publ. 15.02.1972.
- 286. Patent US No 3765964. Water-in-oil emulsion type explosive compositions having strontium-ion detonation catalysts / C.G. Wade. Publ. 16.10.1973.
- 287. Patent US No 4110134. Water-in-oil emulsion explosive composition / C.G. Wade. Publ. 29.08.1978.
- 288. Patent US No 4110134. Production of explosive emulsions / R.S. Olney, C.G. Wade. Publ. 06.02.1979.
- 289. Patent US No 4938143. Booster shaped for high-efficiency detonating/ R. Thomas, R. Levan. Publ. 07.03.1990.
- 290. Schubert H. Prinzipien der Herstellung und Stabilitat von Emulsionen / H. Schubert, H. Armbruster // Chem. Ing. Tech. Bd. 61.- 1989.- № 9.- S. 701-711.
- 291. Silvestrov V.V. Explosive welding with the emulsion explosives / V.V. Silvestrov and etc. // Explosive production of new materials: Science, Technology, Business, and Innovation/ Ed. by A.A. Deribas and Yu. B. Scheck. Moscow: Torus Press, 2010.- P. 70.
- 292. Singh B. Investigation into the thermal behaviour of explosives used for reach blasting/B. Singh, R. Gipta, M. Gabinullah.//Annu. Rept. Cent. MiningRes. Stuh.- 1987-1988.- p.99.

- 293. Takeuchi F. Emulsion type explosives / F. Takeuchi, K. Yamamoto, H. Sakai // J. Ind. Explos. Soc. Jap. 1982.- V.43.- №5.- pp.285-294.
- 294. Takhasli K. Cristallization emulsion/ K. Takhasli, Y. Hara //J. Jnd. Explos. Soc. Jap. 1985. V. 46.- № 3.- pp. 123-127.
- 295. Tamura A. The stability of the emulsion during storage/ A. Tamura, S. Matsudaira, T. Abe //J. Jnd. Explos. Soc. Jap. 1985. V. 46. № 3.- pp. 197-203.
- 296. Thiard R. Emulsion explosives / R. Thiard, J. Linca // Ind. miner techn. -1984. №10. pp. 800-804.
- 297. Triad R. Levolution des explosives en France et dans le monde / R. Traid// Equip.mec.carrieres et mater. 1983. № 213. pp. 41, 43-45.
- 298. Turcotte R. Hot-wire ignition of AN-based emulsions / Turcotte R. and etc. // Propellants, Explos., Pyrotech.- 2008.- V. 33.- pp. 472-481.
- 299. Von Neumann J. Theory of detonation waves (OD-02) / J. Von Neumann// Technical Report, National Defense Research Committee of Scientific Research and Development, 1942. Division B. Section B-1. Serial N 238.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Результаты синхронного термического анализа аммиачной селитры

Температура, которой при начинает происходить интенсивное экзотермическое разложение аммиачной селитры, определялась при исследовании термических свойств селитры на ТГ/ДСК анализаторе синхронного термического анализа СТА 409 PC Luxx. На рис. П1 представлены совмещенные термогравиметрическая зависимость изменения массы образца селитры и зависимость изменения разности теплового потока между образцом селитры и эталоном. Анализ рис. П1 показывает, что температура, при которой начинает происходить интенсивное экзотермическое разложение аммиачной селитры, примерно равна 250 °C.

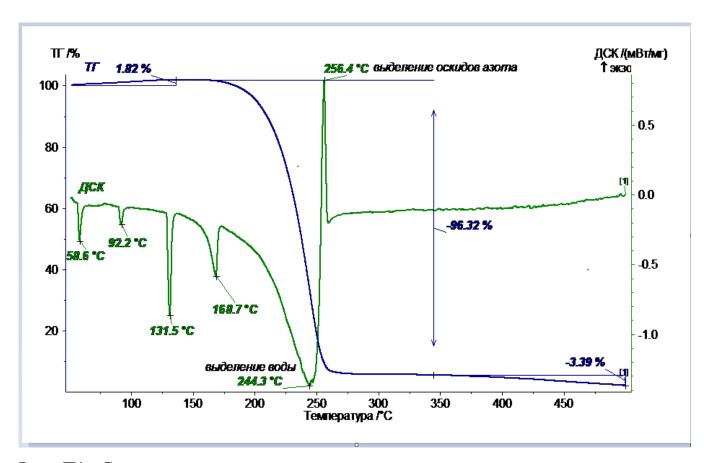


Рис. П1. Совмещенные термогравиметрическая зависимость изменения массы образца селитры и зависимость изменения разности теплового потока между образцом селитры и эталоном

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчет коэффициентов теплопроводности и теплоемкости матричной эмульсии

Согласно представленным в п.2.4 исследованиям, окислительная фаза эмульсии является высококонцентрированной суспензией мельчайших частиц аммиачной селитры в воде. Данное обстоятельство позволяет сделать теоретическую оценку коэффициентов теплопроводности и теплоемкости матричной эмульсии на основе следующей расчетной модели [63].

Среда является смесью равномерно распределенных компонентов. Введем обозначения:

 α_1 , ρ_1 , c_1 , k_1 - массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности аммиачной селитры, соответственно;

 α_2 , ρ_2 , c_2 , k_2 - массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности воды, соответственно;

 α_3 , ρ_3 , c_3 , k_3 - массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности эмульгатора, соответственно;

 α_4 , ρ_4 , c_4 , k_4 - массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности дизельного топлива (масла), соответственно;

В соответствии с принятой моделью теплоемкость системы (эмульсии) ${\it C}$ равна:

$$c_3 = \sum_{i=1}^{i=4} \alpha_i c_i.$$
 (n.2.1)

Ввиду однородности и изотропности рассматриваемой модели, коэффициент теплопроводности будет скалярной, а не тензорной величиной. Для определения его величины мысленно вырежем в эмульсии кубик со стороной *а*. Величину *а* назначим такой, что объем аммиачной селитры, содержащейся внутри кубика, будет равен единице.

Тогда толщина водяной пленки, обтягивающей единичный куб аммиачной селитры равна $\delta_2 = \frac{1}{6} \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \,. \tag{п.2.2}$

Толщина пленки эмульгатора, обтягивающей указанную водяную пленку, равна

$$\delta_{3} = \frac{1}{6} \frac{\alpha_{3}}{\alpha_{1}} \frac{\rho_{1}}{\rho_{3}} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{6} \frac{\alpha_{2}}{\alpha_{1}} \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}}\right)^{2}}.$$
 (II.2.3)

Толщина пленки дизельного топлива (масла), обтягивающей указанную эмульсионную пленку, равна

$$\delta_{4} = \frac{1}{6} \frac{\alpha_{4}}{\alpha_{1}} \frac{\rho_{1}}{\rho_{4}} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{6} \frac{\alpha_{2}}{\alpha_{1}} \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}} + \frac{1}{6} \frac{\alpha_{3}}{\alpha_{1}} \frac{\rho_{1}}{\rho_{3}} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{6} \frac{\alpha_{2}}{\alpha_{1}} \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}}}\right)^{2}\right)^{2}}.$$
 (II.2.4)

Коэффициент теплопроводности эмульсии равен [157]

$$\lambda = \frac{1}{\left(1 + \sum_{i=1}^{i=4} \delta_i\right)} \left(\frac{1 + 2\sum_{I=2}^{I=4} \delta_I}{\frac{1}{k_i} + 2\sum_{i=2}^{i=4} \delta_i} + 4(k_2 \delta_2 + k_3 \delta_3(1 + \delta_2) + k_4 \delta_4(1 + \delta_2 + \delta_3)) \right). \tag{\pi.2.5}$$

Пример:

$$\alpha_1$$
 = 0,75, ρ_1 = 1,52 г/см³, c_1 = 1745 Дж/кг·К, k_1 = 0,4 Вт/м·К; α_2 = 0,20, ρ_2 = 1 г/см³, c_2 = 4186 Дж/кг·К, k_2 = 0,64 Вт/м·К; α_3 = 0,015, ρ_3 = 0,98 г/см³, c_3 = 2930 Дж/кг·К, k_3 = 0,28 Вт/м·К; α_4 = 0,035, ρ_4 = 0,83 г/см³, c_4 = 3160 Дж/кг·К, k_4 = 0,2 Вт/м·К.

На основании (п.2.1) - (п.2.5) определяем:

$$C = \sum_{i=1}^{i=4} \alpha_i c_i = 2297,95 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}.$$

 $\lambda = 0.507 \text{ Bt/m} \cdot \text{K}$

Результаты расчетов находятся в согласии с экспериментальными данными работ [127, 258, 298].

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Зависимость вязкости эмульсии от размера частиц дисперсной фазы

В п. 2.3 предложены две модели деформирования вещества эмульсии при втекании в пору под действием ударной волны: модель непрерывного деформирования и модель деформирования по плоскостям сдвига, формирующимся во втекающем в пору веществе. В первом случае происходит объемное нагревание втекающего в пору вещества, а во втором — разогрев концентрируется на поверхностях плоскостей сдвига. Для верификации предложенных моделей деформирования необходимо знание зависимости вязкости эмульсии от размера частиц дисперсной фазы.

ПЗ.1. Микроскопические исследования

Микроскопические исследования дисперсности исследуемых образцов эмульсии выполнялись перед проведением опытных и промышленных взрывов с целью получения информации о микроструктуре ЭВВ, необходимой для последующего анализа. Составы образцов и их обозначения представлены в табл. П.3.1.

Исследования проводили как в отраженном свете, так и в проходящем в поляризованном и неполяризованном свете на оптическом микроскопе Olympus BX-51, получая фотографии на различных участках покрывных стекол. Точность измерений геометрических размеров составляет 0,5 % отн. Методика проведения экспериментов на оптическом микроскопе Olympus BX-51 заключалась в следующем [225]:

на покрывное стекло с помощью стеклянной палочки помещалась исходная эмульсия и сверху накрывалась покрывным стеклом;

между предметными стеклами помещали прокладки толщиной 100 мкм; стекла между собой прижимали и удаляли избытки эмульсии для того, чтобы создать однородный по толщине и полностью заполненный слой эмульсии между покрывными стеклами. Данная процедура контролировалась визуально.

Таблица П.3.1 Составы образцов и их обозначения

№	Сери я образ цов	Индекс образца	Массовая доля кальциевой селитры, %	Массовая доля аммиачной селитры, %	Массовая доля воды, %	Массовая доля эмульгатора, %	Массовая доля ДТ, %
1		1.1	25	51	16	3	5
2	Серия	1.2	25	51	16	2,5	5,5
3	1.1 -	1.3	25	51	16	2	6
4	1.5	1.4	25	51	16	1,5	6,5
5		1.5	25	51	16	1	7
6		1.6	25	47	20	3	5
7	Серия	1.7	25	47	20	2,5	5,5
8	1.6 –	1.8	25	47	20	2	6
9	1.10	1.9	25	47	20	1,5	6,5
10		1.10	25	47	20	1	7
11		2.1	32	44	16	3	5
12	Серия	2.2	32	44	16	2,5	5,5
13	2.1 -	2.3	32	44	16	2	6
14	2.5	2.4	32	44	16	1,5	6,5
15		2.5	32	44	16	1	7
16		2.6	32	40	20	3	5
17	Серия	2.7	32	40	20	2,5	5,5
18	2.6 –	2.8	32	40	20	2	6
19	2.10	2.9	32	40	20	1,5	6,5
20		2.10	32	40	20	1	7

При выполнении микроскопического исследования образцы предварительно изучались на однородность. Визуально изучалось поле предметного стекла. Затем получали не менее 4-х фотографий характерных различных участков (несколько фотографий в центре и по краям покрывного стекла на двух различных объективах микроскопа). На основе полученных фотографий строили распределение частиц по размерам с помощью специализированного программного обеспечения «SIAMS». В результате автоматической обработки цифровых фотографий в специализированном программном обеспечении «SIAMS» получали ряд, состоящий из размера частиц эмульсий. На одной фотографии количество частиц могло превышать 1500.

Полученный ряд чисел сортировали в порядке увеличения и затем вычисляли среднее значение диаметра частиц в объеме эмульсии по формуле

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i}}}$$
 (\pi.3.1)

где d_i - диаметр i-й частицы, вычисленный из программного обеспечения, исходя из ее площади.

Также вычисляли средний размер частиц на плоскости по формуле

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n} . \tag{\pi.3.2}$$

Регрессионный анализ различных моделей для прогнозирования среднего диаметра частиц эмульсии показал, что в данном случае значимыми факторами, влияющими на данную величину, является содержание эмульгатора.

Содержание аммиачной селитры, кальциевой селитры, воды не оказывает статически значимого влияния на средний размер частиц эмульсии в рассмотренном диапазоне их содержаний.

Табл. 2.2. Результаты микроскопических исследований

Серия образцов	Индекс образца	\overline{d} , MKM	$ar{D}$, MKM
	1.1	5,2	5,0
	1.2	8,3	7,7
Серия 1.1 - 1.5	1.3	6,8	6,4
	1.4	8,0	7,2
	1.5	8,1	7,3
	1.6	4,8	4,7
	1.7	5,5	5,2
Серия 1.6 - 1.10	1.8	7,2	6,8
	1.9	8,0	7,4
	1.10	11,0	10,8
	2.1	4,7	4,6
	2.2	6,4	6,1
Серия 2.1 - 2.5	2.3	6,9	6,4
	2.4	7,9	7,3
	2.5	11,3	16,3
	2.6	7,8	7,3
	2.7	7,6	7,3
Серия 2.6 - 2.10	2.8	6,5	6,5
	2.9	6,6	6,2
	2.10	7,9	7,1

Для расчета среднего размера частиц построена регрессионная модель вида:

$$\bar{D} = 11,322 - 2,077 \cdot X_{IIAB},$$
 ($\pi.3.3$)

где $X_{\Pi AB}$ - массовая доля эмульгатора («Украинит») в процентах.

П.3.2. Исследование реологических свойств эмульсий

Исследование реологических характеристик эмульсии заключалось в получении зависимостей изменения вязкости от скорости сдвига.

Эксперименты проведены с помощью реометра ротационного модели HAAKE MARS фирмы «Thermo Electron» (Германия), который оборудован рабочим узлом цилиндр-цилиндр, жидкостным термостатом и воздушным безмасляным компрессором. Точность измерений по данным производителя составляет 2 % отн.

Порядок работы:

Включали компрессор для подачи сжатого воздуха. Проверяли показания на манометре компрессора: 3,5 – 4 атм. на выходе в систему, связанную с рабочим узлом реометра HAAKE MARS. Проверяли показания на манометре, непосредственно связанном с реометром: 2,5 атм.

Включали водяной термостат, устанавливали требуемую для опыта температуру (15-80 °C).

Включали компьютер и блок управления реометром.

Устанавливали программу: «снятие кривой течения в координатах вязкость (ось ординат) – скорость сдвига (ось абсцисс)».

Ввиду достаточно высокой вязкости эмульсий для получения надежных результатов использовали рабочий узел реометра «конус – плита».

Помещали 1 мл эмульсии на плиту. После установки в рабочее положение проводили термостатирование эмульсии, находящейся на плите в течение 15 минут. Затем запускали выполнение измерений для получения реологической кривой.

Характерные реологические кривые при различных температурах приведены на рис. ПЗ.1, рис. ПЗ.2. Видно, что, достигая некоторого

предельного значения η_{\min} , вязкость и напряжение сдвига мало меняются в зависимости от скорости сдвига.

Вязкость эмульсии уменьшается с ростом температуры и увеличивается с ростом ПАВ. Для прогнозирования вязкости системы η от химического состава эмульсионной смеси строили регрессионные зависимости:

$$\eta = b_o + \sum_{i=1}^{5} b_i X_i + b_J T_J, \qquad (\pi.3.4)$$

где b_o , b_i , b_j - неопределенные коэффициенты модели, X_i - массовые доли компонентов в составе эмульсии, T_j - температура эмульсии.

Регрессионный анализ полученных моделей показал, что в данном случае значимыми факторами, влияющими на вязкость и напряжение сдвига, являются содержание эмульгатора и температура системы. Зависимость вязкости и напряжения сдвига от содержания эмульгатора и температуры могут быть заданы следующими моделями (при $20\,^{\circ}\text{C} < T < 80\,^{\circ}\text{C}$):

$$\eta = 1,728 + 1,255 X_{TAB} - 0,026T$$
 (II.3.5)

где $X_{\mathit{\Pi AB}}$ - массовая доля эмульгатора в процентах, T - температура эмульсии, ${}^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$.

Содержание аммиачной селитры, кальциевой селитры, воды не оказывает статически значимого влияния на вязкость в рассмотренном диапазоне их содержаний.

Анализ рис. П.3.1и рис. П.3.2 показывает, что с повышением температуры эмульсии происходит сближение графиков зависимости вязкости эмульсии от скорости сдвига друг к другу. Поэтому в иллюстрационных расчетах можно взять зависимость вязкости от размера частиц дисперсной фазы эмульсии при $T=80~^{\circ}\text{C}$. На основании (п.3.3) и (п.3.5) определяем $\eta=6,5-0,6\Delta$ (Па*c).

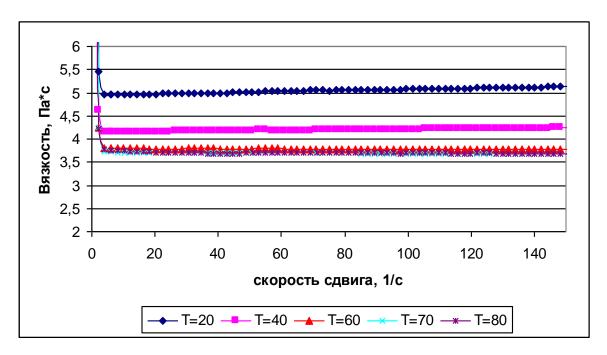


Рис.П.3.1 Зависимость вязкости от скорости сдвига при различных температурах образца (Образец 1.1).

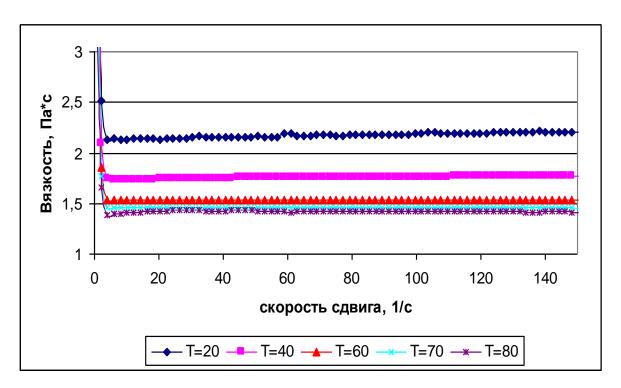


Рис.П.3.2 Зависимость вязкости от скорости сдвига при различных температурах образца (Образец 2.5)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.

Справки о внедрении в производство результатов и рекомендаций диссертационной работы

В диссертационный совет Д 004.010.02 620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58

Справка о внедрении

рекомендации результаты И Настоящим подтверждаем, что диссертационной работы Горинова Сергея Александровича на тему «Научнотехнические основы и технологии обеспечения устойчивой детонации зарядах» обладают взрывчатых веществ скважинных эмульсионных актуальностью, представляют практический интерес и были использованы на предприятии при применении эмульсионных взрывчатых веществ для массовой отбойки горных пород.

С целью повышения надежности инициирования и создания условий для прохождения детонационной волны по всей длине заряда при взрывании эмульсионных скважинных зарядов на карьерах ОАО «Ураласбест» внедрены предложенные в диссертационной работе Горинова С.А. рекомендации по инициированию зарядов ЭВВ промежуточными детонаторами, представляющими из себя две сближенных, одновременно взрываемыми шашки-детонатора, и по регулирование начальной плотности ЭВВ.

Внедрение данных рекомендаций способствует более полному выделению энергии при взрыве заряда ЭВВ и снижению экологически вредного воздействия на окружающую среду за счет уменьшения выброса окислов азота и отсутствия остатков невзорвавшегося ЭВВ, которые при разложении под действием внешних факторов (погодные условия, карьерные воды) насыщают карьерные воды вредными нитратами и нитритами.

Главный инженер ОАО «Ураласбест»

Салахиев Р.Г.

В диссертационный совет Д 004.010.02 620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты и рекомендации диссертационной работы Горинова Сергея Александровича на тему «Научно-технические основы и технологии обеспечения устойчивой детонации эмульсионных взрывчатых веществ в скважинных зарядах» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы на предприятии при производстве патронированных эмульсионных взрывчатых веществ.

НАО «НИПИГОРМАШ» выпускает, как оборудование для производства патронированных и бестарных ЭВВ, так и сами ЭВВ. При этом доходы от этой деятельности составляют существенную часть в объеме общих доходов предприятия, поэтому вопросам совершенствования производства оборудования для выпуска ЭВВ и повышению эффективности самостоятельного производства ЭВВ уделяется большое внимание. Это связано необходимостью поставки на непрерывно расширяющий рынок ЭВВ и оборудования для производства ЭВВ конкурентно способной продукции.

Диссертационные исследования Горинова С.А. показали, что бестарные ЭВВ промежуточный детонатор представляют систему, которой детонационные способности ЭВВ зависят, как от параметров, характеризующих так и от параметров, характеризующих промежуточный детонатор. При этом при применении удлиненных эмульсионных промежуточных детонаторов возбуждение высокоскоростной детонации в ЭВВ возможно лишь в отраженных ударных волнах, вызванных взрывом детонаторов, от стенок скважин. Скачок отраженных волнах зависит от соотношения давления промежуточного детонатора и взрывной скважины, а также сжимаемости горных пород, окружающих скважинный заряд. Учитывая данные обстоятельства, для НАО «НИПИГОРМАШ» Гориновым С.А. были рассчитаны размеры эмульсионных промежуточных детонаторов для инициирования ЭВВ при различных диаметрах взрывных скважин и для различных горных пород.

Внедрение в промышленное производство рекомендаций диссертационной работы Горинова С.А. по оптимальным размерам эмульсионных промежуточных детонаторов показало их актуальность и практическую полезность и позволяет предприятию поставлять на рынок адаптированную к условиям производства систему «ЭВВ — эмульсионный ПД» и оборудование для ее производства. Благодаря этому, предприятие получает конкурентные преимущества на рынке ЭВВ и оборудования для производства ЭВВ.

Директор НАО «НИПИГОРМАШ»

Волков А.В.

«НИПИГОРМАЦІ»

В диссертационный совет Д 004.010.02 620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58

Справка о внедрении

рекомендации результаты что подтверждаем, Настоящим диссертационной работы Горинова Сергея Александровича на тему «Научнообеспечения устойчивой детонации технологии технические основы обладают скважинных зарядах» веществ эмульсионных взрывчатых B актуальностью, представляют практический интерес и были использованы на руднике «Удачный» им. Ф.Б.Андреева при производстве и применении эмульсионных взрывчатых веществ.

Согласно диссертационным исследованиям Горинова С.А. ЭВВ с окислительной фазой из бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры, имеют меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ с окислительной фазой из раствора аммиачной селитры. Кроме этого для возбуждения детонации в первого типа ЭВВ требуются ПД меньшего размера и массы, чем для ЭВВ второго типа.

Данные обстоятельства были решающими при выборе на руднике «Удачный» направления развития рецептур и технологий производства ЭВВ для их дальнейшего применения в подземных условиях и использовании в скважинах уменьшенного диаметра на карьерах.

Практическая полезность и актуальность рекомендаций диссертационной работы Горинова С.А. подтверждается успешным внедрением ЭВВ с окислительной фазой из бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры на подземных горных работах на руднике «Удачный» им. Ф.Б. Андреева АК «АЛРОСА» (ПАО).

Директор – координатор предприятии

АК «АЛРОСА» (ПАО) в г. Удачный

А. Ф. Махрачёв

0 ! MOH 2018