

*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 горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Екатеринбург 2018

Работа выполнена в ФГБУН Институт горного дела Уральского отделения  
Российской академии наук

Научный консультант:  
академик РАН, доктор физико-математических наук,  
профессор АДУШКИН Виталий Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
АКИНИН Николай Иванович

доктор технических наук, профессор  
БЕЛИН Владимир Арнольдович

доктор технических наук, профессор  
ДЕРЖАВЕЦ Аврам Семенович

Ведущая организация - ФГБУН Горный институт Кольского научного центра  
Российской академии наук

Защита диссертации состоится «25» декабря 2018 г.  
в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.010.02  
при Институте горного дела УрО РАН по адресу:  
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук  
Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Просьба направлять отзывы почтой в 2 экземплярах, заверенных печатью  
организации, по указанному выше адресу.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук А.А. ПАНЖИН

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Значительная часть того, что потребляет цивилизация, представляет собой природные или техногенные минерально-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) и применением их 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.

Конкурентными преимуществами ЭВВ перед многочисленными ПВВ других классов являются их высокие потребительские характеристики, что обеспечивает устойчивый спрос на ЭВВ на рынке современных ПВВ для горнодобывающей промышленности.

Однако анализ имеющегося обширного научного материала 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 сенсibiliзирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии;

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 технологий взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которых происходит детонационное разложение ЭВВ по всей длине зарядов.

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 опытно-конструкторских работ,

направленных на их решение. Однако, несмотря на очевидную значимость рассматриваемой проблемы и наличие достаточно большого объема теоретических и экспериментальных исследований, до сих пор не разработаны физико-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 и практических способов построения экологически и взрывобезопасной, 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, сенсibilизированных газовыми порами, учитывающей не только рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсibilизирующих пор, но и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметры инициирующего воздействия;

определение закономерностей распространения детонации в скважинных зарядах ЭВВ;

определение условий возникновения 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:**

разработаны физико-математическая модель детонации ЭВВ и методика расчета детонационных параметров ЭВВ, впервые учитывающие не только рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсibilизирующих 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 рецептурно-микроструктурные 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 научных положений, 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, и 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 сенсibiliзирующих 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, учитывающая основные рецептурно-технологические параметры ЭВВ и 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 автора осуществлен анализ и обработка полученных экспериментальных результатов, формулировка и обоснование выводов, рекомендаций и 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 селитры 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 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 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 научно-практических 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 взрывчатые вещества (ПВВ): 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 научно-методическую 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 содействие и помощь при проведении промышленных экспериментов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. Анализ проблемы устойчивости детонации эмульсионных взрывчатых веществ**

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).

В настоящее время в горнодобывающей промышленности России и за рубежом широкое распространение получили ЭВВ. Анализ данных российских и зарубежных исследователей 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 была произведена непосредственно на горных предприятиях (Соснин В.А., Межеричкий С.Э.).

По мнению Соснина В.А., Колганова Е.И., Кутузова Б.Н., Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Шведова К.К., Крысина Р.С., Сюйгуана В. и др. в настоящее время ЭВВ и гранэмнты (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.

Значительную роль в распространении ЭВВ и совершенствовании технологии их производства и применения внесли российские ученые Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Шведов К.К., Кондриков Б.Н., Дерибас А.А., Державец А.С., Соснин В.А., Колганов Е.В., Кутузов Б.Н., Белин В.А., Викторов С.Д., Фокин В.А., Иляхин С.В., Щукин Ю.Г., Парамонов Г.П., Кукиб Б.Н., Маслов И.Ю., Старшинов А.В. и др.



Важное значение в технологии производства эмульсии для получения ЭВВ, а также в области технологий использования ЭВВ в промышленности имеют труды зарубежных исследователей: Блюма Г.Ф., Вейда С.Г., Олнея Р.С., Сюйгуана В., Ли Дж., Перссона П.А., Конрада К.Л., Маранды А., Кудзило С., Кобаяши Дж., Ямамото К., Ито К., Крысина Р.С., Куприна В.П., Шимана Л.Н. и др.

Непрерывный рост объемов использования и расширение областей применения ЭВВ требует углубления наших знаний и представлений о закономерностях взрывчатого разложения данных ПВВ и факторах, позволяющих управлять данным процессом. Это важно для дальнейшего повышения безопасности при изготовлении и применении ЭВВ, а также для увеличения эффективности его использования при ведении взрывных работ при добыче минерального сырья, выполнении отдельного вида промышленных и строительных работ.

Современные представления о механизме детонации ЭВВ во многом опираются на исследования детонации жидких ВВ, в которые значительный вклад внесли работы российских и зарубежных ученых: Дубовика А.В., Боболева В.К., Дремина А.И., Шведова К.К., Трофимова В.С., Боудена Ф., Юханссона К., Шоудри М., Мадера С., Кемпелла А.В. и др. Важные результаты в понимании механизма детонации водосодержащих аммиачно-селитренных ВВ получены Куком М.А., Влодарчиком Э., Анниковым В.Э. и др., а в механизме детонации ЭВВ - Дерibasом А.А., Медведевым А.Е., Бордзиловским С.А., Карахановым С.М., Сильвестровым В.В., Юношевым А.С., Хасаиновым Б.А., Ермолаевым Б.С., Решетником А.Ю., Рафейчиком С.И., Ли Дж., Перссоном П.А., Кобаяши Дж., Ямамото К., Такэчи С. и др.

Анализ моделей возникновения детонации в ЭВВ показал, что в основе всех моделей лежит концепция Боудена Ф. и Иоффе А., согласно которой при ударном воздействии на неоднородное ВВ в местах неоднородностей возникают локальные очаги разогрева – «горячие точки». В данных очагах происходит возгорание ВВ, переходящее в последующем в детонацию. При этом анализ моделей механизма детонации ЭВВ показал, что в них не находит отражение влияния дисперсности окислительной фазы на детонационные показатели ЭВВ, а в ряде моделей не учитывается и размер газовых пор. Между тем анализ экспериментальных данных по детонации ЭВВ показывает их зависимость от внутренней структуры ЭВВ, включая дисперсность эмульсии (Колганов Е.И., Соснин В.А., Сюйгуан В. И др.)

Необходимо отметить, что в практике ведения взрывных работ скважинными зарядами ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, отмечено возникновение неожиданных обрывов (или переходов на низкоскоростные режимы) детонации в процессе ее распространения по заряду (Белин В.А., Шеменев В.Г. и др.).

Затухающие взрывные процессы в скважинных зарядах ЭВВ зафиксированы Е.И. Жученко, В.Б. Иоффе, Б.Н. Кукибом, К.К. Шведовым, В.В.

Лавровым. Для объяснения данных процессов упомянутыми исследователями выдвинуто положение, что детонационная волна способна распространяться в заряде ЭВВ даже тогда, когда его диаметр меньше критического. При этом длина распространения затухающего взрывного процесса зависит от соотношения между диаметром заряда и критическим диаметром детонации.

Однако анализ научно-технической литературы показывает, что данные явления могут быть вызваны проявлением неустойчивостей при распространении детонации в ЭВВ, подобно неустойчивостям, наблюдаемым при детонации смесевых аммиачно-селитренных порошкообразных и гранулированных ВВ, а также в игданитах (Даниленко В.А., Кудинов В.М.), при детонации в жидких ВВ (Дремин А.Н., Савров С.Д., Шведов К.К., Трофимов В.С.), при детонации плотных смесевых пластов индивидуальных ВВ (Козак Г.Д., Кондриков Б.Н., Обломский В.Б.). Поэтому эмпирические зависимости по длине пробега детонационной волны вдоль скважинного заряда, предложенные в работах Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Кукиба Б.Н., Шведова К.К. и Лаврова В.В., могут быть отражением возникновения неустойчивости при распространении детонации в ЭВВ.

Эксперименты по измерению скорости детонации в скважинных зарядах также показали, что наряду с затухающими детонационными процессами возможны режимы распространения детонации с практически постоянной скоростью по колонке восстающего заряда ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами. Однако данное явление не укладывается в существующие модели, описывающие распространения детонации в ЭВВ, т.к. по мере подъема по колонке заряда отмечается уменьшение плотности ЭВВ (Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Фокин В.А.), что должно повлечь за собой постепенное снижение скорости детонации.

Таким образом, в настоящее время вопросы надежного прохождения детонационной волны по скважинному заряду и связанная с этим полнота энерговыделения при взрыве заряда ЭВВ остаются во многом неясными и не решенными.

В работах Калякина С.А., Прокопенко В.С., Добрынина И.А., Маслова И.Ю. экспериментально зафиксирована зависимость скорости детонации в ЭВВ от параметров промежуточного детонатора, что также не находит объяснения в рассмотренных моделях детонации ЭВВ.

В работах Андреева В.В., Аттенкова А.В., Соловьева В.С., Афанасенкова А.Н., Воскобойникова И.М., Бордзиловского С.А., Боудена Ф., Иоффе А., Васильева В.А., Дремина А.Н., Трофимова В.С., Дубовика А.В., Боболева В.К., Каупертвейта М., Кука М.А., Мейдера Ч., Нунциато Дж., Стребю Р., Хоува П., Шильпероода А., Юханссона К. и др. представлены исследования по выявлению минимальных (критических) параметров ударной волны, вызывающей детонационные процессы в индивидуальных и смесевых конденсированных ВВ. Однако данные критерии выполняются в случаях, когда в химические превращения в ВВ обусловлены его равномерным объемным разогревом во

фронте волны при ударном сжатии. Это делает весьма ненадежным использование данных критериев для расчета параметров промежуточных детонаторов (ПД) для инициирования ЭВВ.

Разработке методов выбора и оценки эффективности ПД для инициирования ПВВ посвящены работы Кука М.А., Щукина Ю.Г., Козырева С.А., Дубнова Л.В., Романова А.И., Друкованого М.Ф., Калякина М.А., Фокина В.А., Белина В.А., Комащенко В.И., Воробьева Е.Д. и др.

Анализ данных работ показал, что в настоящее время, ввиду отсутствия разработок, позволяющих учитывать при выборе ПД ударную сжимаемость вещества ЭВВ, кинетику процесса воспламенения эмульсии и рецептурно-технологические параметры ЭВВ, выбор ПД для инициирования ЭВВ осуществляется 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 и не гарантирует оптимальности и универсальности полученного результата.

На основании вышесказанного в диссертации были поставлены следующие задачи научного исследования:

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

определение закономерностей распространения детонации в скважинных зарядах ЭВВ;

определение условий возникновения 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.

## **2. Физико-математическая модель детонации ЭВВ**

Для описания детонационного процесса в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами предложена следующая физическая модель.

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

На начальном этапе (до воспламенения) эмульсии 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 УВ 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 в поре газов. После возгорания вещества эмульсии в порах среды возникает противодействие, среда начинает воспринимать нагрузку, как непористое вещество. 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 среды, величиной фронтального давления и длительностью промежутка времени между моментом подхода фронта детонационной волны к поре и моментом времени, соответствующем началу разложения. Для пористых 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 детонационной волны. Дальнейшее возрастание массовой скорости среды происходит после возгорания уплотненной эмульсии и определяется удельным тепловыделением с учетом затрат энергии на сообщение среде массовой скорости на начальном этапе. Эти обстоятельства делают необходимым при расчете детонационных параметров ЭВВ учет массовой скорости  $U$  и плотности  $\rho_0$  вещества ЭВВ в момент начала экзотермического разложения ЭВВ (момент перехода на ударную адиабату).

Величину  $\rho_0$  в дальнейшем будем называть характеристической плотностью.

Рассмотрим детонацию зарядов, имеющих диаметр больше предельного. При этом полагаем, что структура детонационной волны стационарна и однородна по ее площади.

Допустим, что при детонации рассматриваемых ВВ происходит химическая реакция согласно уравнению (состояние в точке Чемпена-Жуге):

$$\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j, \quad (1)$$

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

Удельная теплота взрыва  $Q_V$  в соответствии с общепринятой методикой, определяется из уравнения Гесса:

$$Q_V = \frac{1}{G} \left[ \sum b_i Q_P^{X_i} + \sum f_j Q_P^{Y_j} - \sum a_m Q_P^{A_m} + 2,48 \Delta b \right], \quad (2)$$

где  $Q_V^{(3)}$ , кДж/моль - стандартная теплота образования вещества  $Z$  ( $Z \rightarrow X_i$  и  $Y_j$ );  $G$  - масса вещества вступившего в реакцию;  $\Delta b$  - количество молей газообразных продуктов взрыва; - универсальная газовая постоянная.

Температура взрыва  $T_B$  определяется на основании уравнения теплового баланса:

$$(T_B - T_o) R \left[ \sum b_i \bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) + 3 \sum f_j \xi_j \right] = G Q_V, \quad (3)$$

$\xi_j$  - количество атомов в твердотельном  $j$ - веществе;  $\bar{c}_V^{(X_i)}(T_B)$  - относительная мольная теплоемкость  $X_i$  - газа при температуре  $T_B$ , определяемая на основании соотношений Эйнштейна-Дебая (относительная теплоемкость - отношение мольной теплоемкости к универсальной газовой постоянной  $R$ );  $T_o$  - начальная температура ВВ.

Исследования показали, что на основании уравнения состояния продуктов взрыва ЭВВ (в качестве уравнения состояния использовалось уравнение Абеля) можно получить зависимость:

$$\frac{Q_V}{D^2} = \frac{\bar{c}}{2(k+1)} \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_o^{gaz} \right) \left( 1 - \sum_j \beta_j \right), \quad (4)$$

где  $\bar{c}$  - относительная теплоемкость продуктов взрыва при температуре;

$k$  - показатель политропы взрывных газов;

$\alpha$  - среднее значение коволюма продуктов взрыва;

$\beta_j$  - массовая доля  $j$ -твердого продукта взрыва;

$D$  - скорость детонации ЭВВ в системе координат, двигающейся со скоростью  $U$  в направлении детонации;

$\rho_o^{gaz}$  - плотность «газовой части» вещества эмульсии в момент возгорания эмульсии («газовая часть» - часть вещества эмульсии, из которой образуются газообразные продукты взрыва):

$$\rho_o^{gaz} = \frac{\rho_o \left( 1 - \sum_j \beta_j \right)}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}, \quad (5)$$

где  $\rho_j$  – удельная масса  $j$ -твердого продукта взрыва.

На основании первого закона термодинамики в рамках двухполитропной аппроксимации закона расширения взрывных газов и при условии несжимаемости твердых продуктов реакции, имеем

$$\frac{Q_v}{D^2} \left(1 - \frac{3 \sum_j f_j \xi_j}{c \Delta b}\right) = \frac{1}{2(k+1)} \left\{ \frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \left(\frac{1}{K_+ \alpha \rho_0^{2\alpha 3}}\right)^{(k-1)} + \frac{\sum_j \beta_j}{k+1} \left(1 + (k+1) \frac{U}{D}\right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{k+1} \left[ \left( \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0} \right) k - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right] \left( k + 2 + (k+1) \frac{U}{D} \right) \left[ 1 + k \frac{\rho_{00}}{\rho_0} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right] \frac{U}{D} + \right. \\ \left. \left[ \frac{\sum_j \beta_j - \rho_{00} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}{1 - \sum_j \beta_j} \right] \left[ 1 + \left( k + 2 + (k+1) \frac{U}{D} \right) \frac{U}{D} \right] \left[ 1 + k \frac{\rho_{00}}{\rho_0} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $\rho_{00}$  – начальная плотность ВВ;  $\gamma$  – коэффициент адиабаты. Величина  $\gamma$  находится из уравнения:

$$\gamma = 1 + \frac{R \Delta b}{\sum_i b_i \bar{c}_V^{(X_i)}(T_*)}, \quad (7)$$

где  $\bar{c}_V^{(X_i)}(T_*)$  – относительная мольная теплоемкость  $X_i$  – газа при температуре  $T_*$ ;  $T_*$  – температура взрывных газов в точке сопряжения:

$K_+$  – параметр, характеризующий объем газообразных продуктов взрыва в точке сопряжения при двухполитропном описании зависимости давления в газообразных продуктах взрыва от их удельного объема ( $K_+ \approx 4,4$ ).

$$T_* = 2T_B \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \left(\frac{1}{K_+ \rho_0^{2\alpha 3} \alpha}\right)^{k-1} \frac{K_+ - 1}{K_+} \frac{1}{\left(1 - \frac{k+1}{k} \rho_0^{2\alpha 3} \alpha\right)}. \quad (8)$$

Величина  $U/D$  определяется на основании законов сохранения массы и импульса:

$$\frac{U}{D} = \left( \left( \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0} \right) k - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right) \left( \frac{k}{\rho_0} + \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right)^{-1}. \quad (9)$$

На основании (4) скорость детонации (без учета скорости сноса  $U$ ) равна:

$$D^2 = \frac{2(k+1)Q_v}{\bar{c} \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_0^{2\alpha 3}\right) \left(1 - \sum_j \beta_j\right)}, \quad (10)$$

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

$$P_* = \frac{\rho_0^{2\alpha z}}{k+1} D^2. \quad (11)$$

В случае ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами,  $\rho_o$  определяется из уравнения

$$\rho_o = z\rho_{oo} + (1-z)\rho_s \quad (12)$$

где  $z$  - отношение пористости ЭВВ в момент начала взрывного разложения к начальной пористости;  $\rho_s$  – плотность матричной эмульсии,

Система уравнений (1) - (12) полностью решает поставленную задачу по определению детонационных параметров ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, если будет известна характеристическая плотность  $\rho_o$ .

При определении характеристической плотности исходили из того, 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 сжатии 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. Изучение изменения свойств АС при изменении температуры, выполненное нами методом синхронного термического анализа, а также анализ литературы, посвященной данному вопросу, показали, что интенсивное автокаталитическое разложение АС, сопровождаемое выделением тепла и резким возрастанием давления газа в порах, происходит при достижении температуры 520-530° К.

Учитывая вышесказанное,  $\rho_o$  при расчетах определяли из условия достижения температуры эмульсии, втекающей в поры, величины  $T_{AC}^* = 250^\circ \text{C}$  (523° К).

На основе анализа турбидиметрических и рентгенографических исследований структуры эмульсии ЭВВ, а также выполненных дополнительных рентгенографических и реологических исследований вещества эмульсии показано, что в окислительной фазе эмульсии находится значительное количество чрезвычайно мелких кристалликов аммиачной селитры. 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 границам слоев втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных слоев из-за трибомеханического разогрева поверхностей скольжения, кроме этого вещество эмульсии дополнительно нагревается теплотой сжимаемых в поре газов.

Расчеты, основанные на приведенных выше соображениях, показали, что отношение пористости ЭВВ в момент начала взрывного разложения к начальной пористости может быть найдено из выражения

$$z \cong 1 - \frac{\frac{D}{k+1} + U + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_3} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)}}{2R_o} \cdot t_*, \quad (13)$$

где  $t_* = \frac{4\pi(T_{AC}^* - T_{zp})^2 \lambda_{AC} c_{AC}}{\mu_{mp}^2 \rho_{AC} \left( \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_3} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)} \right)^6} \left( \frac{R_o}{\Delta} \right)^6$  - время между моментом

падения детонационной волны на газовую пору и моментом начала экзотермического разложения аммиачной селитры во втекающей в пору эмульсии;  $P_f = \rho_{oo} (D+U) \left( \frac{D}{k+1} + U \right)$  - фронтальное детонационное давление;  $T_{zp}$  - температура эмульсии на поверхности газовой поры, определяемая с учетом разогрева газов, содержащихся в поре, и отношения термоактивностей этих газов и эмульсии;  $\rho_{AC}$ ,  $\lambda_{AC}$ ,  $c_{AC}$  - плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость аммиачной селитры, соответственно;  $\mu_{mp}$  - коэффициент внутреннего трения аммиачной селитры;  $R_o$  - радиус поры,  $\Delta$  - размер частиц окислительной фазы эмульсии.

Из уравнений (12), (13) определяется  $\rho_o$ , что решает задачу определения всех основных детонационных параметров данных ЭВВ с учетом химического состава, плотности и структуры ЭВВ (размеры частиц дисперсной фазы эмульсии и сенсibiliзирующих пор) и завершает построение физико-математической модели стационарной детонации ЭВВ.

На основании полученных решений разработан итерационный алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ для зарядов, имеющих диаметр больше предельного.

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.

Результаты предварительных микроскопических исследований показали, что средний размер частиц эмульсии составляет 3-4 мкм.

Химический состав Украинит-ПП-2:  $NH_4NO_3$  - 44,0 %,  $Ca(NO_3)_2$  - 32%,  $H_2O$  - 16,0 %, топливная фаза - 9,0 %.



Результаты полигонных испытаний, показали, что в пластиковых трубах диаметром 100 мм при плотности ЭВВ  $1,26 \text{ г/см}^3$  измеренная скорость детонации 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 экспериментальные данные следующие: при плотностях ВВ  $1,15 \text{ г/см}^3$  – 5107 м/с, при  $1,21 \text{ г/см}^3$  – 5211 м/с. Дисперсность газовых включений в объеме эмульсии составляла  $\approx 100$ -150 мкм.

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

Также было осуществлено сравнение экспериментальных данных Кудзило С. и др. по скорости детонации для ЭВВ, имеющих различные плотности, химический состав и структуру, с расчетными значениями данной величины, полученными на основе разработанной физико-математической модели, которое показало, что они находятся в удовлетворительном согласии.

### **3. Устойчивость детонации ЭВВ**

Согласно модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга (ЗНД) химическая реакция инициируется одновременно по всему фронту детонационной волны, а вещество ВВ до ударного перехода не разлагается и сохраняет свою природу. Структура детонационной волны в этом случае однородна и стационарна по всей ее площади. Поверхность фронта детонационной волны является гладкой.

Однако анализ экспериментальных исследований показывает, что фактическая структура детонационной волны в смесевых ВВ (смесь твердых порошков типа “ВВ+ВВ”, “ВВ+ инертное вещество”, “аммиачная селитра + жидкое горючее”, “ВВ+ вода(раствор селитр)”) [Даниленко В.А., Кудинов В.М], в некоторых индивидуальных жидких ВВ [Дремин А.Н. и др.] и даже в плотных смесевых сплавах индивидуальных взрывчатых веществ [Кондриков Б.Н и др.] является трехмерной и нестационарной. Данное обстоятельство обуславливает возникновение неустойчивых и пульсирующих режимов детонации в указанных видах ВВ.

ЭВВ являются гетерогенными ВВ, содержащими огромное количество микронеоднородностей. Данное обстоятельство позволяет предположить, что

при распространении детонации в данных ВВ также возможно возникновение неустойчивых и пульсирующих режимов детонации. Однако данный вопрос не освещен в научной литературе, что потребовало специальных исследований.

Анализ экспериментальных и теоретических данных показывает, что для детонационной волны в ЭВВ корректно следующее представление о зоне реакции - зона реакции имеет двухслойную структуру:

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.

Теоретические исследования устойчивости фронта детонационной волны на основе критерия Дьякова-Конторовича показали, что при распространении детонационной волны в ЭВВ разрыва фронта детонационной волны на струи не происходит.

Реализуются только режимы детонации, когда на поверхности зоны сжатия возникают или устойчивые возмущения (состояние нейтральной устойчивости), или экспоненциально угасающие со временем возмущения (состояние абсолютной устойчивости).

В случае угасающих со временем возмущений будет наблюдаться стационарная детонация с гладким детонационным фронтом.

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений детонационного фронта в областях выпуклости детонационной волны (по направлению к зоне реакции) возникают зоны повышенного давления. Это обусловлено тем обстоятельством, что продукты детонации, двигаясь вглубь данной области, будут находиться в стесненных условиях, и их сжатие будет передаваться фронту волны. 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 результате данные процессы обуславливают возникновение поперечных детонационных волн, приводящих к формированию многофронтного (ячеистого) 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 Лаврова В.В. и др. В результате возникают явления перехода детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонации.

Многофронтную (ячеистую) структуру зоны химических реакции в ЭВВ удалось зафиксировать в ходе специальных опытов.

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

(аммиачная селитра (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.



Рис. 1. Пластина-свидетель после взрыва

На рис. 1 приведены характерные результаты воздействия взрывных газов, образующихся при взрыве заряда ЭВВ, на свинцовую пластину. Характеристика заряда ЭВВ: окислительная фаза эмульсии - на основе монораствора АС, плотность -  $1,02\text{г/см}^3$ , длина - 1000 мм, диаметр - 90 мм. Размер пластины - 220x150x12 мм.

На рис.1. наглядно представлено, что отпечатки на свинцовой пластине от воздействия на нее взрывных газов при истечении с боковой поверхности заряда имеют регулярный характер. Также отмечается регулярная деформация медной трубки, помещенной перед взрывом вдоль оси цилиндрического заряда.

Данные результаты опытов свидетельствуют, что детонация в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, проходит с образованием ячеистой структуры фронта детонационной волны.

Теоретические исследования показали, что 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. Ячеистая детонация ЭВВ будет проходить в пересжатом (по сравнению с гладким фронтом) режиме.

Исследования показали, что расчет параметров детонации ЭВВ в пересжатом режиме можно вести по методике для стационарной детонации, если вместо  $Q_v$  использовать величину

$$Q_{эфф} = k_n Q_v, \quad \text{где} \quad k_n \approx 1 + \frac{P_*}{\rho_{oo} Q_v} \left( \frac{P_{c,r}}{P_*} \left( 1 - \frac{k}{k+1} \left( \frac{P_*}{P_{c,r}} \right)^{\frac{1}{k}} \right) - \frac{1}{k+1} \right) - \text{коэффициент}$$

пересжатости, показывающий относительное 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;  $P_{c,r}$  - давление во взрывных газах в момент окончания реакции (в общем случае  $P_{c,r} \neq P_*$ ).

Этот математический прием является отражением неравномерности давления и температуры в зоне химической реакции при ячеистой детонации вследствие поперечных детонаций.

На основании теории устойчивости ударных волн и полученных результатов по описанию детонации в ЭВВ показано, что детонация проходит в ячеистом режиме, если

$$k_{зофф} = \frac{\left(1 + \frac{V_f}{V_{00}}\right) \frac{V_f}{V_{00}} \left(\frac{D_*}{c_{зв}}\right)^2 - 1}{\left(1 - \frac{V_f}{V_{00}}\right) \frac{V_f}{V_{00}} \left(\frac{D_*}{c_{зв}}\right)^2 + 1} - \frac{V_0 - V_f}{V_0 + V_f} \left( \frac{V_0}{V_f} (n_* + 1) - 1 \right) > 0, \quad (14)$$

где  $V_{oo}$ ,  $V_o$ ,  $V_f$  - начальный удельный объем, удельный объем в точке возгорания эмульсии и удельный объем во фронте детонационной волны, соответственно;  $c_{зв}$  - скорость звука в веществе на границе «зона сжатия – газовая зона»;  $D_*$  - скорость распространения детонационной волны;  $n_*$  - показатель политропы продуктов взрыва при однополитропном приближении.

Если  $k_{зофф} < 0$ , то ячеистый режим детонации становится невозможным, возможна детонация только с гладким фронтом детонационным фронтом в устойчивом режиме, при которой не происходит пересжатия детонации.

Таким образом, условие  $k_{зофф} = 0$  служит критерием, позволяющим определить момент разрушения ячеистой структуры детонационного фронта в ЭВВ и перехода на низкоскоростной режим детонации (или обрыв процесса).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости скорости детонации в ЭВВ ( $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 19,0 %, топливная фаза – 6,0 %) при различных  $k_n$  при нижнем инициировании 12-метрового скважинного заряда. Размер частиц дисперсионной фазы эмульсии – 2,5 мкм, радиус газовых пор и плотность эмульсии при атмосферном давлении – 50 мкм и 1,07 г/см<sup>3</sup>, соответственно.

При нижнем инициировании вертикальных (наклонных) скважинных зарядов детонационная волна движется в направлении снижения гидростатического давления в ЭВВ. В этом случае по мере продвижения детонационной волны будет наблюдаться изменение структуры (укрупнение газовых пор) и снижение плотности ЭВВ.

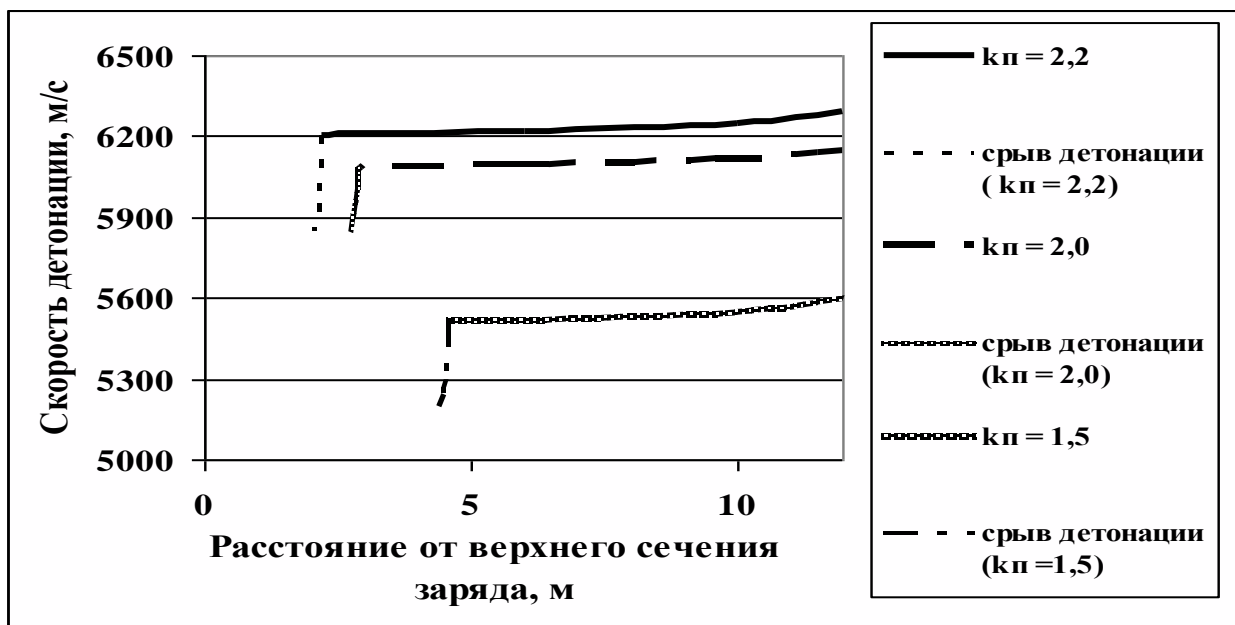


Рис. 2. Зависимость скорости детонации по длине скважинного заряда при нижнем инициировании при различных значениях  $k_n$  ( $x = 0$  – верх заряда;  $x = 12$  – точка инициирования).

На рис. 3 в координатах (радиус поры; плотность ЭВВ) показаны области: допустимых значений начальной плотности ЭВВ, при которых детонация происходит в режиме нейтральной устойчивости (высокоскоростном режиме); значений плотности ЭВВ, при которых возможно распространение только в режиме абсолютной устойчивости.

Первая область имеет следующие границы: сверху область ограничена прямой «максимально допустимой плотности», слева – величиной минимально возможного радиуса поры, при котором схлопывание поры осуществляется в динамическом режиме (на рис. 3 не показана, т.к. ее величина меньше 10 мкм), снизу – кривой, разграничивающей режимы нейтральной и абсолютной устойчивостей детонационного фронта. Положение нижней границы соответствует таким плотностям ЭВВ, меньше которых возможно распространение только абсолютно устойчивого процесса.

Рис. 3 соответствует ЭВВ на основе эмульсии, имеющей следующий химический состав:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18,0 %, топливная фаза – 7,0 %. Размер частиц эмульсии – 2 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

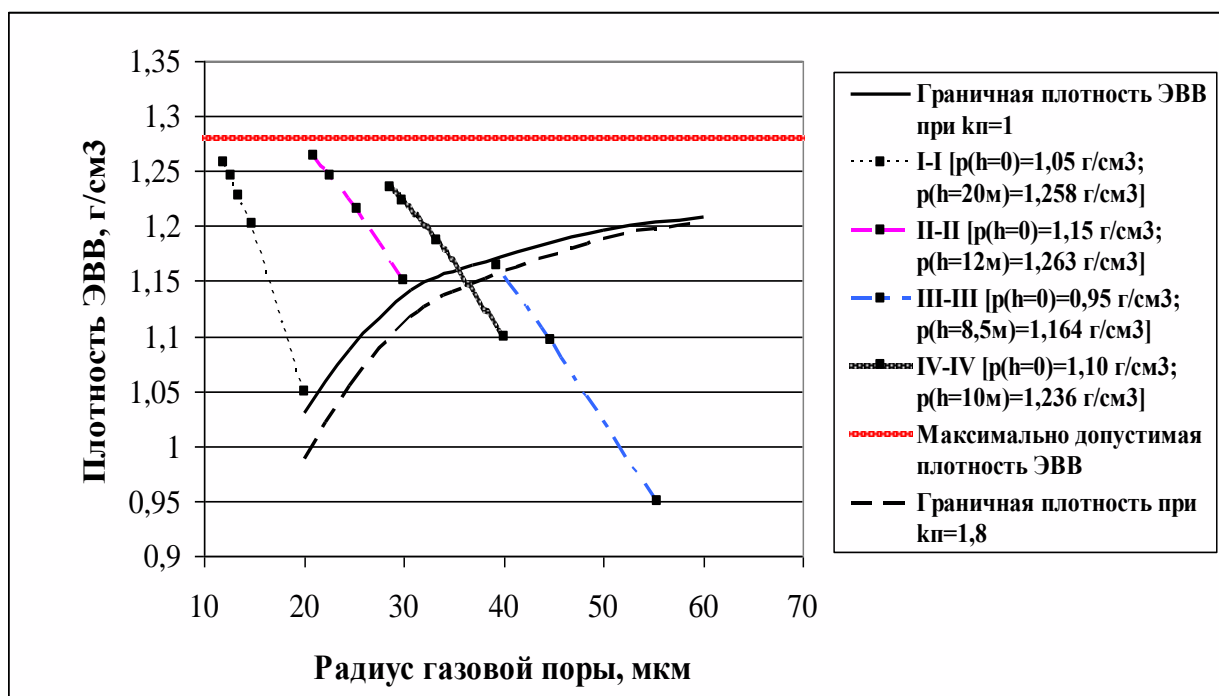


Рис. 3. Зависимость граничной плотности ЭВВ от радиуса газовых пор.

Линии с I-I по IV-IV соответствуют зависимости плотности ЭВВ от радиуса газовых пор для вертикальных скважинных зарядов, характеристики которых указаны на рисунках;  $h$  - расстояние от верхнего сечения до текущего сечения заряда.

Детонация скважинных зарядов I-I, II-II 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 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 при нижнем инициировании начинает проходить в высокоскоростном режиме, но при пересечении линии, разграничивающей режимы детонации состояние нейтральной устойчивости детонационного фронта пропадает. Происходит разрушение ячеистого режима детонации, что приводит к падению температуры в зоне реакции и замедлению химических реакций. Это обуславливает резкое возрастание предельного и критического диаметров. В результате наблюдается быстрое снижение скорости детонации вплоть до полной остановки детонационного процесса.

Для большей наглядности полученных результатов на рис. 4 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. В этом случае длина отрезка на линии, соответствующей скважинному заряду, между осью абсцисс и точкой

пересечения этой линией с линией границы, разделяющей режимы детонации, соответствует длине заряда, на которой наблюдается «срыв» детонации.

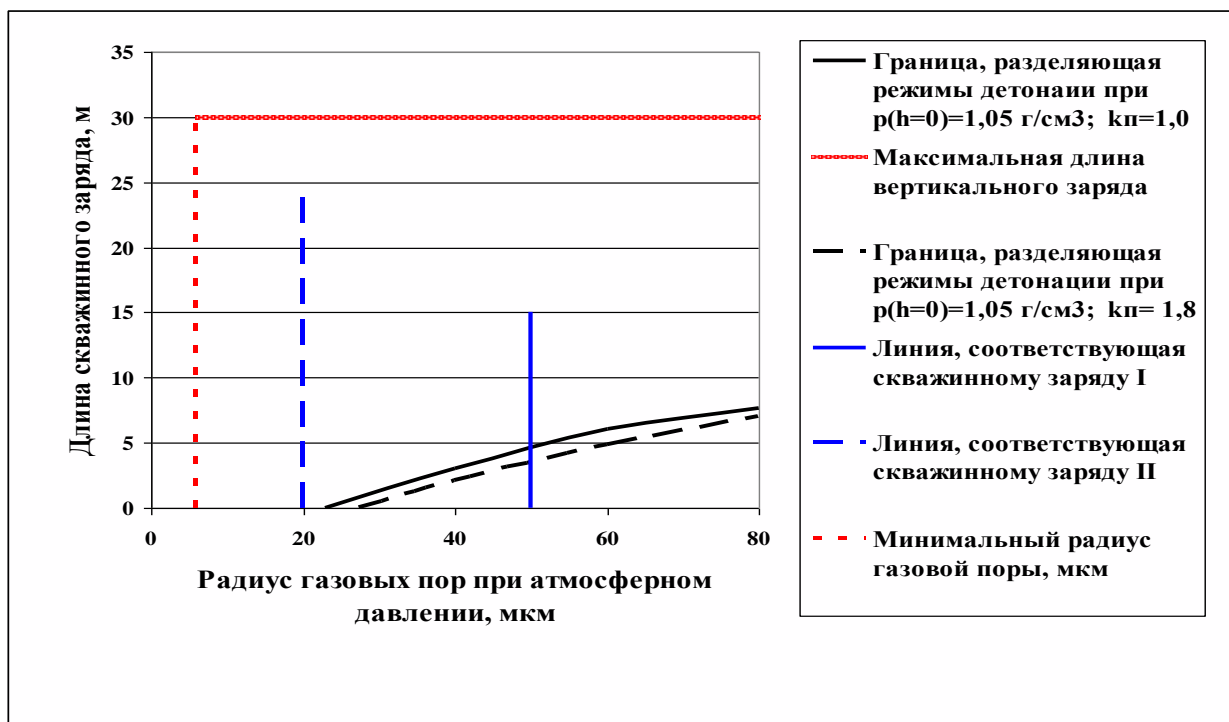


Рис. 4. Зависимости удаления границы, разделяющей режимы распространения детонационной волны, от верхнего сечения вертикального скважинного заряда ЭВВ при нижнем инициировании от радиуса газовых пор при атмосферном давлении при начальной плотности ЭВВ – 1,05 г/см<sup>3</sup>.

Однако 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.

Выполненные теоретические исследования находят многочисленные подтверждения в практике применения скважинных зарядов ЭВВ. Анализ многочисленных опытов по изучению распространения детонации в скважинных зарядах ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, показывает, что при детонации указанных ЭВВ, независимо от химической природы их окислительной фазы и размеров частиц эмульсии, могут возникать скачкообразные переходы на низкоскоростные режимы детонации или даже



обрывы детонационного процесса. При этом данные процессы часто происходят 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).

Для иллюстрации данных утверждений на рис.5 представлена эпюра скорости детонации по длине скважинного заряда, зафиксированная нами при взрывании ЭВВ в скважинных зарядах диаметром 250 мм. Химический состав эмульсии ЭВВ:  $NH_4NO_3$  - 73,8 %,  $H_2O$  - 18,5 %, топлив. фаза – 7,7 %. Длина скважины 17 м, длина колонкового заряда - 12 м. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении - 1,0 г/см<sup>3</sup>. Инициирование нижнее. ПД - одна шашка ПТП-750. Принятые обозначения на рис.5: сплошная линия – экспериментальное значение скорости детонации, штриховая линия – верхняя граница заряда.

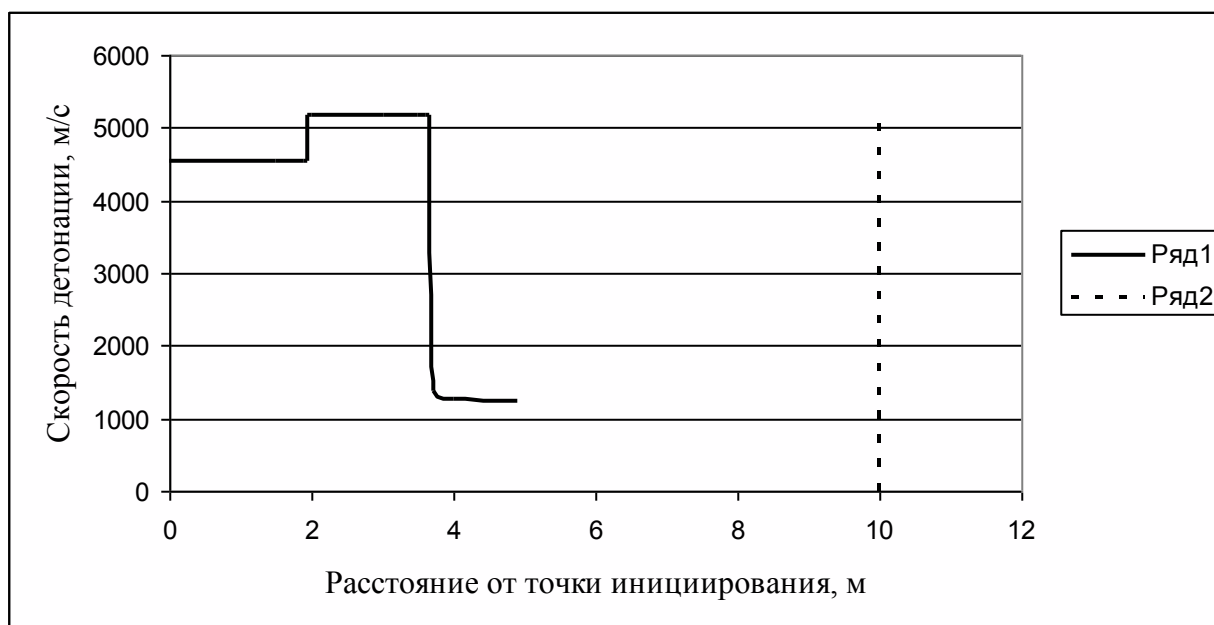


Рис. 5. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования

Возбужденная промежуточным детонатором высокоскоростная детонация, пройдя по заряду расстояние около 15 калибров, оборвалась, а оставшаяся часть заряда выгорела.

Анализ возможных вариантов объяснения причин возникновения подобных обрывов (или переходов на низкоскоростные режимы) детонации ЭВВ показал, что данные явления не могут быть объяснены такими причинами, как

недостаточная инициирующая способность промежуточных детонаторов;  
нарушение технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки;



нарушение измерительных кабелей приборов для замера скорости детонации ЭВВ;

воздействие со стороны массива на вещество ЭВВ при распространении в массиве волн напряжений, вызванных взрывом заряда;

попадание буровой мелочи или обломков пород в заряд ЭВВ, хотя данные причины, безусловно, могут служить негативными факторами, препятствующими распространению детонационной волны по заряду ЭВВ или искажающими инструментальную запись процесса детонации.

Однако данные скачкообразные переходы на низкоскоростные режимы детонации или даже обрывы детонационного процесса объясняются потерей устойчивости при распространении детонационной волны в заряде ЭВВ.

Сравнение зависимостей скорости детонации, приведенных на рис. 3, с экспериментальными данными, представленными на рис. 5, показывает их качественное совпадение, что свидетельствует о непротиворечивости наших представлений о закономерностях распространения детонационных волн в ЭВВ.

Для того чтобы избежать негативных последствий неполной детонации скважинных зарядов ЭВВ при выполнении взрывных работ, необходимо при проектировании учитывать структуру ЭВВ и рассчитывать плотность зарядов таким образом, чтобы в координатной плоскости (радиус пор; 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 этом выбранный ПД должен обеспечивать инициирование этого заряда в заданном проекте взрывных работ месте.

#### **4. Иницирование детонации в ЭВВ промежуточными детонаторами**

Разработанная методика расчета детонационных параметров ЭВВ, учитывающая основные рецептурно-технологические параметры ЭВВ и характеристики инициирующего ударно-волнового воздействия, позволяет перейти к осуществлению теоретического определения основных параметров ПД для инициирования ЭВВ.

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 зафронтальной 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 капсул чувствительных смесевых аммиачно-селитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ).

Действительно, детонационные процессы в твердых индивидуальных ВВ (смеси твердых индивидуальных ВВ) при высокой плотности этих ВВ и достаточно большом диаметре проходят в режиме, близком к идеальному. Поэтому при взрыве ПД из данных ВВ в ЭВВ вводится УВ с гладкой поверхностью (плоской, цилиндрической, сферической и т.п. – в зависимости от геометрии ПД). Детонация же заряда аммонита (Даниленко В.А., Кудинов В.М.) или ЭВВ (согласно нашим исследованиям, изложенным в 3 гл. настоящей работы) происходит преимущественно в режиме пульсирующего детонационного фронта. Следовательно, при взрыве ПД из данных ВВ в ЭВВ вводится УВ, осуществляющая его инициирование из многочисленных вершин пульсирующего фронта ударной волны. В этом случае детонация устанавливается в результате взаимодействия УВ, испускаемых пульсирующей границей «продукты детонации ПД - ЭВВ».

Известно, что макроскопические критерии ударно-волновой чувствительности выполняются в случаях, когда в химические превращения в ВВ обусловлены его однородным разогревом при ударном сжатии, что характерно для индивидуальных конденсированных ВВ. Однако 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 для расчета параметров ПД для инициирования ЭВВ было использовано следующее условие инициирования гетерогенных ВВ: для возбуждения детонации необходимо создать ударным воздействием в достаточном объеме ВВ необходимого давления при необходимой продолжительности действия. Данное условие было предложено Ф.А. Баумом и А.С. Державцом для определения параметров ПД при инициировании смесевых порошкообразных и гранулированных ВВ. В случае инициирования ЭВВ это условие можно сформулировать следующим образом: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления  $P_f$  необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее  $d_{пред}(P_f)$ , в течении времени  $t(P_f)$  поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке –  $P_f$ , где  $d_{пред}(P_f)$ ,  $t(P_f)$  - предельный диаметр заряда и время химической реакции при фронтальном давлении  $P_f$ .

При расчете инициирующего воздействия ПД на ЭВВ считаем заданными:

плотность, скорость детонации, коэффициент политропы ВВ ПД и геометрические размеры ПД;

начальная плотность ЭВВ и плотность эмульсии, параметры структуры ЭВВ (радиус поры, размер частиц окислительной фазы эмульсии) и ударную адиабату ЭВВ  $D_y = A + BW_y$ , где  $A$ ,  $B$  - параметры ударной адиабаты инициируемого ВВ,  $D_y$  - скорость УВ,  $W_y$  - массовая скорость.

Рассмотрим физическую модель инициирующего воздействия ПД, изготовленного из индивидуального ВВ (смеси индивидуальных ВВ) при прямом ударе продуктов взрыва (направление детонации и массовой скорости продуктов взрыва за детонационной волной совпадают).

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Это обуславливает возникновение плоской УВ сжатия в ЭВВ и плоской волны разряжения в продуктах взрыва ПД.

Начальное давление  $P_{yo}$  и скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ»  $W_{yo}$  можно найти из решения газодинамических уравнений, описывающих движение продуктов детонации:

$$W_{yo} = \frac{D_{\sigma}}{k_{\sigma} + 1} \left\{ 1 + \frac{2k_{\sigma}}{k_{\sigma} - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{yo}}{\rho_{\sigma} D_{\sigma}^2} (k_{\sigma} + 1) \right)^{\frac{k_{\sigma} - 1}{2k_{\sigma}}} \right] \right\}. \quad (15)$$

где  $P_{yo}$  - начальное давление во фронте ударной волны в ЭВВ:

$$P_{yo} = \rho_{oo} W_{yo} (A + B W_{yo}), \quad (16)$$

Исходя из (15) и (16) можно определить начальное значение  $W_{yo}$ :

$$\frac{3k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma}^2 - 1} D_{\sigma} = \frac{2k_{\sigma} D_{\sigma}}{k_{\sigma}^2 - 1} \left[ \frac{(k_{\sigma} + 1) \rho_{oo} (A + B W_{yo}) W_{yo}}{\rho_{\sigma} D_{\sigma}^2} \right]^{\frac{k_{\sigma} - 1}{2k_{\sigma}}} + W_{yo}. \quad (17)$$

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. Данный процесс происходит за время  $\tau_* = t_o + \tau_o$ , которое определяется особенностями инициируемого ЭВВ:  $t_o$  - время возгорания;  $\tau_o$  - время прогорания ЭВВ между смежными сенсibiliзирующими порами. Расчеты показывают, что  $t_o \ll \tau_o$ .

Тогда  $\tau_* \cong \tau_o$ .

Время прогорания межпорового пространства следующее:

$$\tau_o = \frac{R_o}{V_{zop}} \left( \left( \frac{\pi}{6\chi_o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right), \quad (18)$$

где  $V_{zop}$  - скорость горения эмульсии в межпоровом пространстве;  $\chi_o$  - начальная пористость ЭВВ.

$V_{zop}$  определяется на основании теории горения ВВ Зельдовича-Беляева.

Принимая порядок реакции горения ЭВВ равным двум (Державец А.С. и др.), имеем:

$$V_{zop} = \frac{1}{\rho_f} \sqrt{\frac{2K_m \left( \frac{RT_n^2}{E_A} \right)^3}{Q_z} \frac{3!}{(T_n - T_o)^2} \frac{M}{N_A} Z \exp\left(-\frac{E_A}{RT_n}\right)}, \quad (19)$$

где  $\rho_f$  - плотность ЭВВ в зоне сжатия в момент прогорания;

$E_A$  - энергия активации аммиачной селитры;  $N_A$  - 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);  $Q_z = \frac{P_f}{2} \left( \frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_f} \right) + Q_v^3$ , где  $\rho_o$  -

плотность ЭВВ в момент начала термического разложения;

$Q_v^3$  - теплота разложения ЭВВ до первичных продуктов (на  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $N_2$ ,  $C$ );

$Z$  - предэкспоненциальный множитель.

Скорость смещения границы «продукты детонации ПД - ЭВВ» в момент  $\tau_*$  определяется на основании закона сохранения энергии и использования метода характеристик для описания параметров расширяющихся продуктов детонации ПД. Это позволяет найти величину смещения границы «продукты взрыва ПД - ЭВВ» и размеры области продуктов взрыва ПД, охваченной действием волны разряжения. На основании этого определяется давление в продуктах детонации ПД на границе «продукты взрыва ПД - ЭВВ» в момент  $\tau_*$ , когда происходит слияние сфер горения эмульсии, имеющих центр в центре газовой поры.

Оценки показали, что при распаде зоны сжатия давление в ней превышает давление в продуктах взрыва ПД, примыкающих к данной зоне.

Следовательно, при распаде зоны сжатия в ЭВВ возникнет торможение продуктов детонации ПД продуктами взрывчатого разложения зоны сжатия в ЭВВ. 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.

Условие инициирования ЭВВ при взрыве ПД будет следующим - в момент  $\tau_*$  давление в продуктах взрыва ПД на границе «продукты взрыва ПД - продукты взрыва ЭВВ»  $P_x$  должно быть не меньше, чем давление в газообразных продуктах взрыва ЭВВ при стационарной детонации:

$$P_* \leq P_x . \quad (24)$$

Учитывая, что величина падения давления в продуктах взрыва за данное время зависит от  $L_*$  - длины ПД, то условие (24) позволяет определить минимальную длину ПД с учетом свойств ВВ, из которого изготовлен ПД, а также параметров, характеризующих инициируемое ЭВВ.

В случае невозможности подбора  $L_*$  необходимо использовать для изготовления ПД ВВ с более высокими детонационными характеристиками или изменять параметры ЭВВ.

Ограничения на диаметр ПД  $d$  находятся из условия:

$$d > \max\{ 2V_p \tau_* ; D_* \tau_* \}, \quad (25)$$

где  $V_p \approx \frac{D_{\sigma}}{2}$  - скорость боковой волны разряжения в продуктах взрыва ПД;  $D_{*\tau_*}$  - минимальный диаметр зоны реакции в ЭВВ, исключая влияние волн разряжения на характер взрывного разложения ЭВВ.

При иницировании ЭВВ вследствие прямого удара продуктов взрыва ПД, изготовленного из аммонита и эмульсионного ВВ, необходимо учитывать, что детонация данных ВВ происходит в ячеистом режиме. В этом случае фронт детонационной волны в ПД представлен пульсирующей поверхностью. 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 УВ. Это вызывает возрастание давления и температуры в данных областях иницируемого ЭВВ по сравнению со случаем, когда продукты детонации ПД имеют ту же массовую скорость, но граница «продукты детонации ПД - ЭВВ» гладкая.

Расчеты показали, что давление в области столкновения сходящихся УВ во «впадинах» возрастает в  $k_{отр} \approx 2,3$  по сравнению с давлением, вызываемым гладким фронтом. Такое возрастание давления при гладкой границе «продукты детонации ПД - ЭВВ» достигается увеличением скорости детонации ПД в  $\sqrt{k_{отр}}$  раз (при неизменных значениях  $\rho_{\sigma}$ ,  $k_{\sigma}$ ).

Следовательно, оценка геометрических параметров ПД, изготовленных из ЭВВ или аммонита, для иницирования ЭВВ может осуществляться по методике, приведенной для гладкого иницирующего фронта, если в расчетах значение скорости детонации ВВ ПД увеличить в  $\sqrt{2,3} \approx 1,5$  раза по сравнению с фактической. Следует отметить, что это является формальным математическим приемом, позволяющим использовать полученное ранее решение для ПД с гладким детонационным фронтом для определения детонационных параметров ЭВВ при их иницировании ПД с пульсирующим детонационным фронтом.

Изложенный подход к определению параметров ПД при иницировании в ЭВВ детонации при прямом ударе продуктов взрыва ПД был использован для определения параметров линейного (удлиненного) ПД и ПД из двух сближенных сферических зарядов. Отличительной особенностью указанных случаев являлась необходимость дополнительного учета падения давления в ударной волне сжатия в ЭВВ вследствие геометрического расхождения данной волны.

Верификация разработанных методик расчета параметров ПД для иницирования детонации в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, осуществлялась на основе сравнительного анализа экспериментальных данных и расчетных результатов:

при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД с гладким фронтом анализировались опыты К.К. Шведова и др.;

при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД с пульсирующим фронтом анализировались опыты И.Ю. Маслова и др.;

при боковом ударе продуктами взрыва удлиненного ПД (УПД) анализировались опыты Возгрин Р.А. (эмульсионный УПД) и Тогунова Б.М. и др. (УПД из конверсионного ВВ);

при взрыве системы сближенных сосредоточенных зарядов анализировались результаты собственных опытов и расчетов.

В опытах Шведова К.К. и др. электромагнитным методом измерялись детонационные параметры смеси эмульсии ( $NH_4NO_3$  – 43,5 %,  $Ca(NO_3)_2$  -33 %,  $H_2O$  - 14,8 %, топливная фаза – 8,7 %) плотностью 1,51 г/см<sup>3</sup> с ферросилицием в соотношении 93/7 по массе. Смесь аэрировалась путем введения полых стеклянных микросфер диаметром 70 мкм, плотностью 0.15 г/см<sup>3</sup> в количестве 2.4% по весу. Плотность аэрированного ЭВВ 1,3 г/см<sup>3</sup>. Заряд аэрированного ЭВВ помещался в пластиковой трубе внутренним диаметром 104 мм с толщиной стенки 3 мм, длиной 300 мм.

Инициатором служила таблетка прессованного тротила (ТНТ) плотностью 1.59 г/см<sup>3</sup>, диаметром 80 мм, массой 340 г.

Таблица 1. Экспериментальные данные Шведова К.К и др. и расчетные значения детонационных параметров

Показатели	Опытное значение, м/с	Точность метода, %	Расчетное значение, м/с	Относит. отклонение %
Скорость детонации, м/с	5300	~4	5250	1,0
Массовая скорость, м/с	1730	~4	1660	4,0
Время химической реакции в детонационной волне, мкс	1,20	~15	1,07	10,8

Результаты измерений и расчетные значения детонационных параметров рассматриваемого ЭВВ при иницировании его таблеткой прессованного ТНТ представлены в табл.1.

При расчетах принимались следующие параметры ТНТ (Дубнов Л.В. и др.):  $D_0 = 6900$  м/с,  $\rho_0 = 1,59$  г/см<sup>3</sup>,  $k_0 = 3,3$ . Величина  $L_* = 0,05$  м. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии -  $A=2600$  м/с,  $B=1,4$  (Шведов К.К.).

Расчеты детонационных параметров ЭВВ осуществлялись по изложенной выше методике.

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 полностью согласуется с выводами Шведова К.К. и др., сделанными на основании анализа эпюры изменения давления в продуктах взрыва за фронтом детонационной волны. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Изложенная методика определения детонационных параметров ЭВВ при инициировании их ПД с пульсирующим детонационным фронтом нашла количественное подтверждение в опытах Маслова И.Ю. и др., направленных на нахождение ПД с оптимальными габаритными размерами для инициирования ЭВВ.

В ходе опытов взрывались открытые заряды эмулита диаметром 240 мм и длиной 1 м при инициировании их ПД из различных ВВ. При этом менялись размеры ПД при неизменной массе. Экспериментальные и расчетные значения скорости детонации в эмулите «ВЭТ-700» при различных ПД представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений скорости детонации в эмулите «ВЭТ-700» при различных ПД

Тип ПД	Параметры ПД: (длина (мм) / диаметр (мм) / масса(г))	Скорость детонации (эксперимент), м/с	Скорость детонации (расчет), м/с
ТГФ-850Э	115/79/850	4648	4677
<i>T-1000</i>	<i>185/68/1000</i>	<i>3824</i>	<i>4931</i>
Аммонит 6ЖВ	25/240/1000	4830	-
«»	120/110/1000	5089	5007
«»	240/77/1000	5121	5143
«»	480/54/1000	5206	5205

Эмулит «ВЭТ-700» - ВВ, полученное механическим смешением 70% масс. ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами, и 30% масс. смеси «АС+ДТ». При расчетах принималось для ЭВВ:  $R_o = 40$  мкм,  $\Delta = 3$  мкм. Параметры в уравнении ударной адиабаты ЭВВ –  $A = 1920$  м/с;  $B = 1,98$ . Химический состав ЭВВ согласно ТУ 7276-016-17131060-2001.

Анализ табл. 2 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 недостаточной газификацией эмулита, что может привести к низким значениям скорости детонации при опытном взрыве.

Анализ экспериментов Возрина Р.А. по возбуждению детонации ЭВВ при помощи эмульсионного УПД и Тогунова Б.М. и др. – при использовании УПД из конверсионного ВВ показал, что

при применении удлиненных (линейных) эмульсионных ПД возбуждение полноценной детонации в ЭВВ (окислительная фаза на основе АС) возможно лишь при усилении давления в отраженных волнах (от стенок скважин или от специально введенных твердых объектов);

при применении ПД из конверсионного ВВ наблюдается высокоскоростное детонационное разложение ЭВВ непосредственно в прямой волне, излучаемой при взрыве ПД.

В опытах Возрина Р.А. осуществлялось инициирование скважинных зарядов ЭВВ (начальная плотность 1,05 - 1,1 г/см<sup>3</sup>) при помощи удлиненного ПД из патронов «Senatel Powerfrag» (диаметр – 50 мм, длина – 420 мм или 630 мм). Диаметр скважин - 115-125 мм. Окружающие заряд породы - высокопрочные граниты.

Тогда при взрыве ПД из двух патронов расчетная скорость детонации на начальном участке должна иметь значение 6100 – 6420 м/с.

Согласно экспериментальным данным Возрина Р.А. скорость детонации на начальном участке 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.

Взрыв ПД диаметром 40 мм и длиной 1000 мм из конверсионного ВВ вызывает высокоскоростное детонационное разложение ЭВВ (при начальной плотности ЭВВ не более 1,1 г/см<sup>3</sup>) непосредственно в прямой волне, излучаемой при взрыве ПД. При этом среднее расчетное значение скорости детонации ЭВВ составит 5400 м/с. Тогунов Б.М. и др. экспериментально зафиксировали скорость детонации в эмулите «ВЭТ-700» (начальная плотность 1,11 г/см<sup>3</sup>) при инициировании его линейным ПД на участке вне зоны воздействия ПД – 5229,4 – 5234,8 м/с.

Дополнительно для проверки выявленных закономерностей распространения детонационных волн в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, и эффективности их инициирования когерентным ПД нами на Асбестовском карьере были проведены опытные взрывы ЭВВ «Порэмит-1А», в которых измерялась скорость детонации по длине заряда при различных инициирующих импульсах.



Применялось ЭВВ, имеющее следующие характеристики - плотность – 1,0г/см<sup>3</sup>; хим.состав: аммиачная селитра – 73,8 %, вода – 18,5 %, топливная фаза – 7,7 %; способ сенсibilизации - газовые поры (размер частиц эмульсии – 10 мкм, радиус газовых пор – 300 мкм). Скважины бурились в прочных горных породах (коэффициент крепости по М.М. Протоdjяконову  $f = 13$ ).

Глубина скважин – 17 м, 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-НТ» устанавливался по длине заряда.

Инициирование зарядов (нижнее) производилось от промежуточных детонаторов, состоящих из одной шашки «ПТ-П750» и двух указанных шашек, расположенных одна над другой на расстоянии между ними 15-25 см, и внутрискважинных капсулей неэлектрической системы Искра С-500-18.

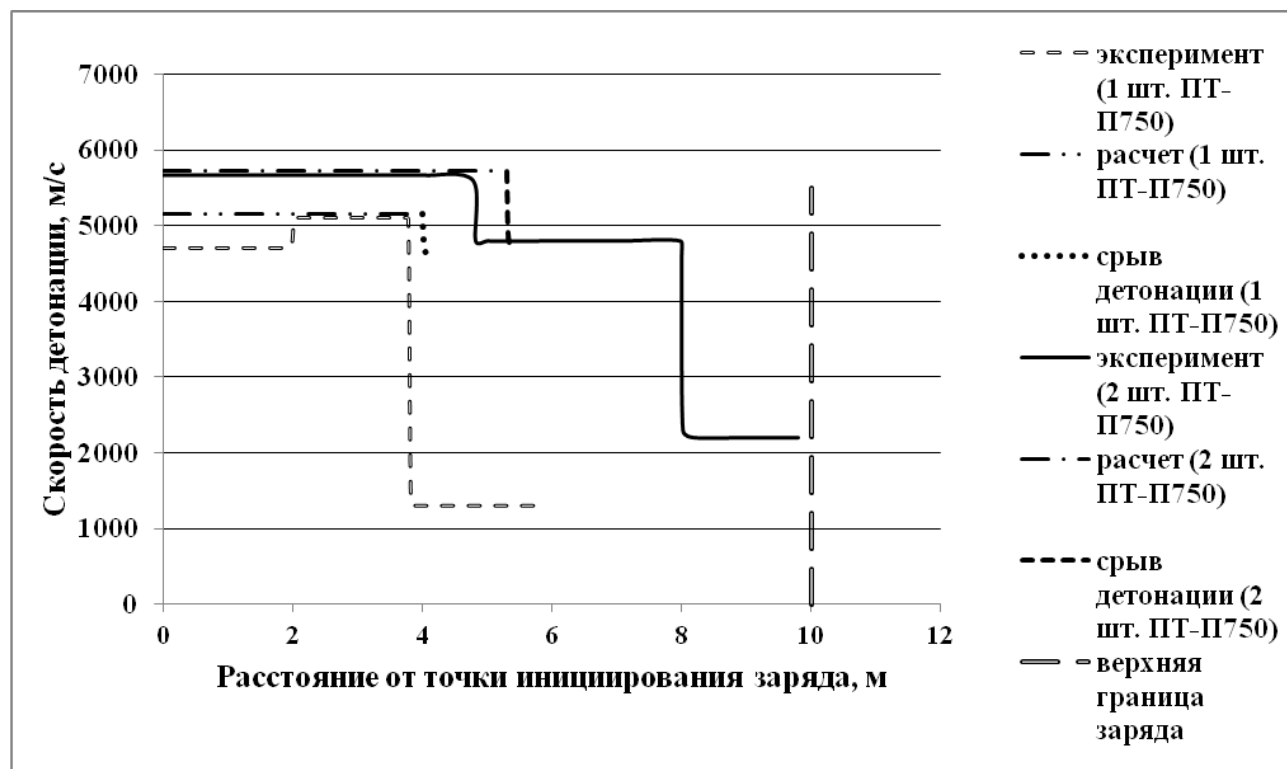


Рис. 6. Зависимости скорости детонации ЭВВ от расстояния от точки инициирования при ПД различной массы (эксперимент и расчет).

На рис. 6 приведены графики экспериментально определенных и расчетных скоростей детонации по длине скважинного заряда. Расчет скоростей детонации осуществлялся по разработанной методике, а условие ликвидации нейтральной устойчивости - по выражению (14). При выполнении расчетов исходили из приведенного выше химического состава ЭВВ, его плотности при атмосферном давлении и структурных характеристик эмульсии.

Анализ рис. 6 показывает, что разработанные методики расчета позволяют достаточно точно определять параметры детонации, вызванной воздействием ПД.

Необходимо отметить, что расчетный и экспериментально определенный моменты перехода детонации на низкоскоростной режим (НСР) практически совпадают (рис. 6).

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 и рецептуры ЭВВ.

Сравнение представленных на рис. 6 зависимостей также наглядно показывает 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.

Кроме этого осуществлено сравнение экспериментальных данных Колесникова С.А. и др. по изучению зоны реакции ЭВВ (табл. 3) с расчетными значениями соответствующих параметров, определенных по методикам, изложенным в настоящей работе.

Таблица 3. Экспериментальные (Колесников С.А. и др.) и расчетные значения детонационных параметров ЭВВ

Показатели	Скорость детонации, км/с	Ширина зоны хим. реакции, мм	Время реакции, мкс	Плотность во фронте детон. волны, г/см <sup>3</sup>
Эксперимент	4,6	4,0	0,94	1,89
Расчет	4,58	3,1	0,99	1,94

Экспериментальные данные получены путем регистрации профилей массовой скорости с помощью лазерного доплеровского интерферометра VISAR и рентгеновской томографии плотности вещества в зоне реакции с помощью синхротронного излучения от электронного ускорителя ВЭП-3.

Рассматривалось ЭВВ следующего химического состава:  $NH_4NO_3$  - 63 %,  $NaNO_3$  - 14 %,  $H_2O$  - 16 %, топлив. фаза – 7 %. Плотность ЭВВ и радиус микросфер - 1,07 г/см<sup>3</sup> и 40 мкм, соответственно. Размеры частиц эмульсии при расчетах считали равными 2,5 мкм. Инициирование детонации в ЭВВ осуществлялось зарядами тротила и тэна.

В табл. 4 представлены экспериментальные значения температуры «горячих точек», температуры взрыва эмульсии, определенных по эмпирическим графикам, приведенным в работе [1], времени формирования «горячей точки» [2], а также величины критического диаметра заряда [3] с расчетными значениями. При определении температурных показателей исходили из расчетного значения фронтального детонационного давления – 7,7 ГПа.

Таблица 4. Экспериментальные и расчетные значения температуры «горячей точки», температуры взрыва и времени формирования «горячей точки»

Показатели	Температура «горячей точки», °K	Температура взрыва эмульсии, °K	Время формирования «горячей точки», Мкс	Критический диаметр, мм
Эксперимент	3100 [1]	2100 [1]	≈ 2 [2]	5,0 [3]
Расчет	2945	2014	1,11	4,1

Анализ табл. 3 и табл. 4 показывает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует о корректности развиваемого в настоящей работе способа описания как инициирования ЭВВ, так и распространения в них детонации.

## 5. Обеспечение устойчивой детонации ЭВВ в технологиях взрывного разрушения горных работ

Представленные выше исследования показывают, что ЭВВ и ПД представляют систему, в которой детонационные параметры ЭВВ зависят как от параметров, характеризующих ЭВВ (химический состав, плотность, размеры сенсibiliзирующих пор и частиц эмульсии), так и от параметров, 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 исследования также показали, что не всякая детонационная волна, возбужденная в ЭВВ, способна пройти по всей длине вертикального (наклонного) скважинного заряда при нижнем инициировании. Для выполнения данного требования необходимо соблюдение 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, при этом для определения параметров ПД целесообразно использовать условие инициирования Баума-Державца.

Данная концепция обеспечения прохождения детонации по всей длине скважинного заряда прошла промышленную проверку на карьере ОАО «Ураласбест».

На основе численного моделирования распространения детонации в вертикальном (наклонном) скважинном колонковом заряде ЭВВ было 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  $1,13 \text{ г/см}^3 < \rho_{oo} < 1,17 \text{ г/см}^3$ . При этом теоретически было показано, что детонация проходит по всей длине заряда при его инициировании когерентным ПД, представляющим собой две одновременно взрывающиеся шашки-детонаторы ПТП-750, разнесенные на расстояние 15-30 см друг от друга. Место расположения ПД – центральная часть заряда (по длине).

Для проверки расчетов на карьере «Центральный» ОАО «Ураласбест» в период с 02.08.2012 по 27.12.2012 был произведен 21 массовый взрыв с указанным способом инициирования скважинных зарядов (диаметр 250 мм).

Всего за указанный период было взорвано 1502 скважинных заряда, расположенных как в обводненных, так и необводненных горных породах, и отбито около 1000 тыс. кубометров горной массы.

Контрольные измерения скорости детонации показали, что детонация в верхних частях скважинных зарядов (участок «ПД – верх заряда») происходит по всему верхнему участку заряда с высокой скоростью (5600 м/с) без скачкообразных снижений скорости или «срывов» процесса.

Так как инициирование скважинных зарядов осуществлялось ПД, расположенным в центральной (по длине) части заряда, то произвести 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 взрывных работ. Данное обстоятельство объясняет значительное число 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 детонировало при производстве взрывов. Таким образом, ранее сделанный на основании теоретических исследований вывод о надежности распространения детонации в направлении уменьшения размеров газовых пор (направление - «ПД - забой нисходящей скважины») пока плотность ЭВВ будет меньше критической,

нашел экспериментальное подтверждение. Данное обстоятельство позволяет рассматривать многоточечное и встречное инициирование как один из методов обеспечения полноты взрывчатого разложения при применении нисходящих скважинных зарядов бестарных ЭВВ.

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, окружающий заряд ЭВВ;

снижение плотности инициируемого ЭВВ позволяет уменьшить массу необходимого УПД;

уменьшение размера газовых пор позволяет уменьшить массу необходимого УПД (размер пор должен быть таковым, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме).

Для верификации указанной методики были выполнены расчеты оптимальных размеров ПД для следующих условий:

Иницируется ЭВВ следующего химического состава:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18,0 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении – 1,13 г/см<sup>3</sup>. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии – 3 мкм. Радиус сенсibiliзирующих пор – 20 – 50 мкм.

ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами:  $\rho_0 = 1,15$  г/см<sup>3</sup>,  $D_0 = 5100$  м/с,  $k_0 = 2,8$ .

ПД размещается на глубине 8-10 м от верхнего уровня заряда.

Взрывные работы осуществляются в осадочных горных породах с прочностью по М.М. Протоdjяконову  $f = 4 - 12$ .

Диаметр взрывных скважин – 160 – 250 мм.

Данные условия характерны для разрезов Кузбасса.

Сравнение размеров эмульсионных ПД, выпускаемых на протяжении длительного периода ЗАО «ПВВ» (г. Междуреченск) для карьеров Кузбасса, с полученными расчетными оптимальными размерами ПД показало, что они находятся в удовлетворительном согласии.

Учитывая данное обстоятельство, для НАО «НИПИГОРМАШ» были рассчитаны размеры эмульсионных ПД для инициирования ЭВВ для расширенного круга горных пород (прочность по М.М. Протоdjяконову  $f = 4 - 20$ ) и диаметров взрывных скважин (100 – 320 мм).

При расчете параметров эмульсионных ПД исходили из выполнения следующих условий

Иницируется ЭВВ следующего химического состава:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18,0 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Радиус сенсibiliзирующих пор – 20 – 40 мкм.

Плотность ЭВВ при атмосферном давлении – 1,13 г/см<sup>3</sup>. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии – 2 мкм.

На основании выполненных расчетов даны рекомендации по оптимальным размерам эмульсионных ПД. Данные рекомендации внедрены в промышленное производство. Это позволяет НАО «НИПИГОРМАШ» 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 технических средств для производства ППВ.

Выполненные исследования по изучению зависимости степени дисперсности от количества используемого эмульгатора «РЭМ-5» позволили методически просто осуществить экспериментальную проверку расчетных значений скорости детонации ЭВВ при различной дисперсности эмульсии и размерах сенсibiliзирующих пор. Измерялась скорость детонации ЭВВ, имеющего следующий химический состав –  $NH_4NO_3$  – 75 %,  $H_2O$  – 18 %, топлив. фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

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/см<sup>3</sup>, имеющих длину 1000 мм. Радиус сенсibiliзирующих газовых пор при выполненных сериях взрывов – 30 и 40 мкм. Оболочка заряда – картон. Иницирование зарядов производилось патронами ЭВВ, имеющими диаметр 50 мм, длину 440 мм и массу 950 г. Скорость детонации ЭВВ в патронах – 5100 м/с. Патроны инициировались капсюлями неэлектрической системы Искра С-500-18. Используемая аппаратура для измерения скорости детонации: прибор VOD Mate, непрерывно измеряющий величину сопротивления электрической цепи проводника-датчика. Результаты обрабатывались в программе, поставляемой изготовителем вместе с прибором.

На рис. 7 представлены расчетные зависимости скорости детонации и экспериментальные данные. Анализ данных, представленных на рис. 7, показывает, что предложенная в настоящей работе методика определения детонационных параметров ЭВВ, сенсibiliзированных газовыми порами, позволяет получать расчетные значения, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

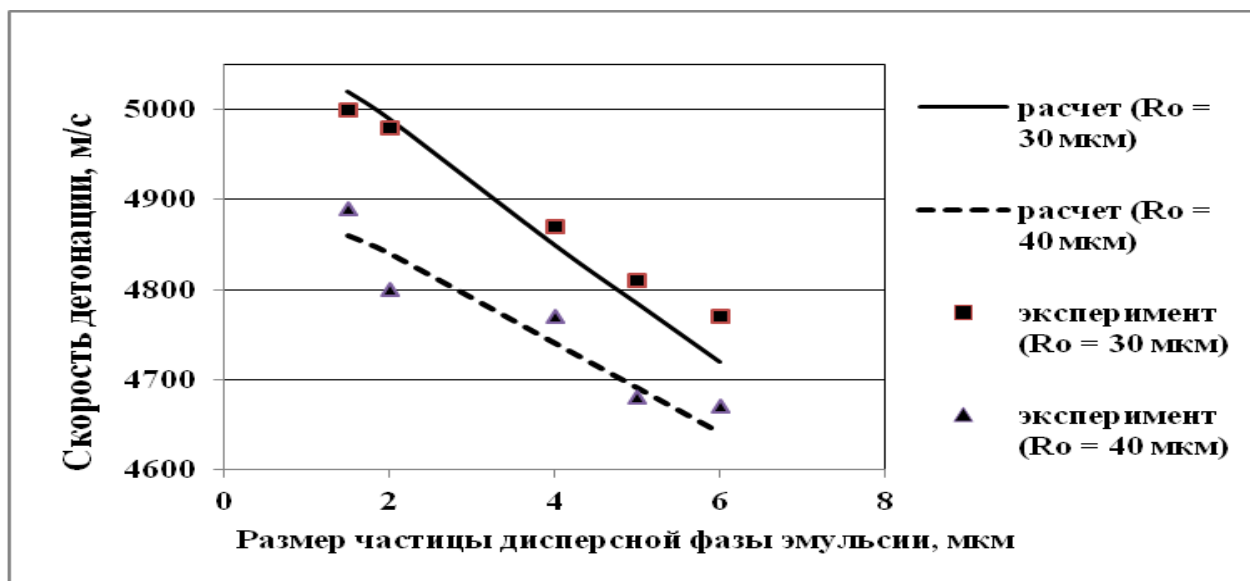


Рис. 7. Зависимость скорости детонации от размера частиц дисперсной фазы эмульсии при различных размерах сенсibiliзирующих пор (расчетные и экспериментальные данные)

Теоретические исследования влияния химического состава окислительной фазы эмульсии на детонационные характеристики ЭВВ показали, что ЭВВ с окислительной фазой на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры должны иметь меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ с окислительной фазой на основе одной аммиачной селитры (монораствор).

Это утверждение удалось доказать в ходе экспериментов по инициированию ЭВВ на основе монораствора АС и ЭВВ на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры. Данные опыты показали, что ЭВВ на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры инициируются ПД меньшей массы, чем ЭВВ на основе монораствора аммиачной селитры.

Это обстоятельство может 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. Подтверждением служит успешный опыт внедрения 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 сенсibiliзирующих 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 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, сенсibilизированных 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 импульса. 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 ВВ (смесей или плавов индивидуальных ВВ), а также из конверсионных ВВ обладают высокой

инициирующей способностью при возбуждении детонации в ЭВВ. При этом при взрыве линейного (удлиненного) ПД из данного вида ВВ высокоскоростная 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 вышерасположенного 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 регулируемым 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 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. 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.
2. 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.
3. 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.

### **Список опубликованных по теме диссертации работ:**

В изданиях, включенных в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук:

1. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Расчет детонационных параметров аммиачно-селитренных ВВ / Кутузов Б.Н., Горинов С.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2010.- № 6.- С. 40-49.
2. Горинов С.А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэммитов

// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2010.- №8.- С. 121-130.

3. Горинов С.А. Аппроксимационный метод расчета детонационных параметров низкоплотных аммиачно-селитренных ВВ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2010.- № 10.- С. 244-255.

4. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. 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.

5. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Иницирование эмульсионных ВВ и гранэммитов промежуточными детонаторами // Кутузов Б.Н., Горинов С.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2011.- № 3-1.- С. 5-19.

6. Горинов С.А. Структура окислительной фазы эмульсионных взрывчатых веществ / Горинов С.А., Кутузов Б.Н., Собина Е.П. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2011.- № 3-1.- С. 20-33.

7. Горинов С.А. Теплофизические свойства несенсибилизированной эмульсионной матрицы – компонента эмульсионных взрывчатых веществ / Горинов С.А., Маслов И.Ю. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2011.- № 4-5.- С. 17-20.

8. Горинов С.А. О неустойчивости детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсибилизированном газовыми порами / Горинов С.А., Кутузов Б.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2012.- № 4.- С. 302-307.

9. Горинов С.А. Высококцентрированные суспензии наночастиц аммиачной селитры – основа эмульсионных взрывчатых веществ / Горинов С.А., Маслов И.Ю., Собина П.Е. // Безопасность труда в промышленности.- 2013.- № 10.- С. 44-47.

10. Горинов С.А. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсибилизированных газовыми порами, скользящей детонационной волной / Горинов С.А., Маслов И.Ю., Куприн В.П. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2013.- № 4 (1).- С. 615-632.

11. Горинов С.А. Иницирование эмульсионных взрывчатых веществ, сенсибилизированных газовыми порами, линейным эмульсионным промежуточным детонатором / Горинов С.А., Маслов И.Ю., Брагин П.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2016.- № 5 (специальный выпуск 16).- С. 3-21.

12. Горинов С.А. Иницирование ЭВВ когерентным промежуточным детонатором / Горинов С.А., Маслов И.Ю. // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2017.- № 4.- С.293-404.

13. Горинов С.А. Анализ устойчивости детонационной волны при ее распространении в ЭВВ, сенсibilизированном газовыми порами / Горинов С.А., Маслов И.Ю. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2017.- № 5.- С. 241-254.

14. Горинов С.А. Особенности распространения детонационной волны в ЭВВ / Горинов С.А., Маслов И.Ю. // Взрывное дело.- 2017 .- № 117/74 .- С. 146-156.

15. Горинов С.А. Зависимость размеров частиц дисперсной фазы эмульсии «ЭНА» от массовой доли эмульгатора «РЭМ-5» / Горинов С.А., Маслов И.Ю. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2018.- № 2 (специальный выпуск 6).- С. 3-10

16. Горинов С.А. Расчет параметров эмульсионного промежуточного детонатора для инициирования ЭВВ / Горинов С.А., Маслов И.Ю. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2018.- № 2 (специальный выпуск 6).- С. 11-26.

В прочих изданиях:

17. Горинов С.А. Оценка детонационной способности эмульсионных взрывчатых веществ / Горинов С.А., Куприн В.П., Коваленко И.Л. // Высокоэнергетическая обработка материалов, Днепропетровск: изд-во АРТ-ПРЕСС, 2009.- С. 18-26.

18. Горинов С.А. Теоретическая оценка влияния химической природы окислителя на детонационные характеристики эмульсионных взрывчатых веществ / Горинов С.А., Куприн В.П., Коваленко И.Л., Собина Е.П. // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле, Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2009.- С. 191-201.

19. Горинов С.А. Гофрировочная неустойчивость детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами // Технология и безопасность взрывных работ, Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2012.- С. 163-171.

20. 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.

21. Горинов С.А. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсibilизированных газовыми порами, скользящей детонационной волной /Горинов С.А., Маслов И.Ю., Куприн В.П. //Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.- 2013.- Вип. 5(82).- С. 116-123.

22. Горинов С.А. Устойчивость детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного газовыми порами // Горный журнал Казахстана.- 2014.- №1.- С. 24-27.

23. Горинов С.А. Неустойчивость детонационного фронта в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами // Материалы XIII международной научно-технической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», 23-27 июня 2014 года, г. Бургас.- С. 47-55.
24. 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.
25. Горинов С.А. Физико-математическая модель детонации эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных газовыми порами. Стационарный режим // Труды XV Международной научно-практической конференции по взрывному делу. 6-12 сентября 2015 г. Ялта, Республика Крым, Россия.- С. 33-45.
26. Gorinov SA. Physical and technical evaluation of possibility using low-density explosives in smooth blasting / Gorinov SA, Maslov IY // 11<sup>th</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. 24-26 August 2015. Sydney, Australia: Published by AIMM, 2015.- PP. 555-564.
27. Gorinov SA. Results of the study of structure oxidizer phase emulsion explosives / Gorinov SA, Maslov IY. // Progress in Detonation Physics / Edited by S.M. Frolov and G.D. Roy/ - Moscow: TORUS PRESS, 2016.- PP. 335-342.
28. Gorinov S. Peculiarities of detonation of gas emulsion explosive / Gorinov S., Maslov I., Bragyn P., Kutuzov B.// <http://www.combex.org/papers/fUm9d3S4/>

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Формат 60x90 1/16

Объем 2 печ.л. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Типография \_\_\_\_\_



