

На правах рукописи

РЕШЕТНЯК Александр Юрьевич

ДЕТОНАЦИЯ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ
С ЦЕНОСФЕРАМИ

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК
2007

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.


Научный руководитель	кандидат физико-математических наук Медведев Алексей Елизарович
Научный консультант	академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор Фомин Василий Михайлович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук Аньшаков Анатолий Степанович, ИТ СО РАН доктор технических наук Мучник Сергей Владимирович, ИГД СО РАН
Ведущая организация -	Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская об- ласть.

Защита состоится « 9 » ноября 2007 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 при Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, конференц-зал ИТПМ, (Факс: (383)3307268); E-mail совета: **klimchik@itam.nsc.ru**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

Автореферат диссертации разослан « ___ » сентября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 доктор технических наук. Засыпкин
Иван Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из главных экономических показателей горной добычи является стоимость буровзрывных работ (БВР), одним из основных показателей которой является удельный расход взрывчатых веществ (ВВ) при разрушении горных пород. Исследование и управление качеством дробления горных пород взрывом – главная задача проектирования рациональных параметров БВР. Эффективность разрушения горных пород, как определяющий процесс любой горной технологии, основывающаяся на взаимосвязи и взаимовлиянии параметров взрыва и свойствах разрабатываемых пород, выдвигает высокие требования к выбору применяемых ВВ, их детонационным характеристикам.

Смесевые ВВ на основе аммиачной селитры (АС) сегодня занимают лидирующие позиции по объемам применения в горной промышленности. Разнообразие предлагаемых к применению составов ВВ – свидетельство большого объема работ в области исследования детонации промышленных ВВ и разработки оптимальных рецептур ВВ на основе АС и, в частности, эмульсионных ВВ (ЭВВ). В тоже время, разработка современных взрывчатых материалов с высокими параметрами энергоотдачи, технологические приемы их получения и работы с ними, основы безопасности при обращении с ними не имеют надежных научных основ. Исследовательские работы в этом направлении не выходят, как правило, за рамки экспериментальных исследований.

Детонация смесевых ВВ на основе аммиачной селитры (АС) становится возможной при их аэрации, заключающейся во внесении в основу газовых пор, играющих при детонации роль горячих точек – мест инициирования химических реакций, сопровождающих детонационный процесс. На практике аэрация осуществляется использованием пористых и гранулированных (порошковых) взрывчатых материалов либо добавлением в энергонасыщенную основу различных оболочных газонаполненных частиц, либо добавлением специальных химических реагентов (в ЭВВ) – газогенераторов, выделяющих газообразные продукты в виде газовых пузырьков. При этом параметры детонации зависят как от объема порозного газа, так и от размеров пор. Однако в предлагаемых к производству и применению составах ВВ указывается только значение плотности заряда, при которой гарантируются заявляемые пределы детонационных характеристик, как правило, несовпадающее с оптимальной. Таким образом, расчеты при проведении БВР должны производиться на основе заведомо заниженных детонационных параметров ВВ, что приводит к перерасходу ВВ и увеличению стоимости буровых работ за счет увеличения диаметра зарядов и/или сгущения сетки зарядов.

Трудности определения оптимальной плотности зарядов ВВ на основе АС связаны с немонотонной зависимостью скорости детонации (основного параметра, характеризующего эффективность ВВ) от плотности. При этом положение максимума скорости детонации и его значение зависит от среднего размера пор. Эта немонотонная зависимость прямо не следует из классической теории детонации.

Использование ЭВВ для проведения взрывов на блоках с глубиной скважин свыше 20 м вследствие высокого гидростатического давления связано с трудностями химического газообразования в скважинах. Для таких зарядов находят применение оболочные порообразующие добавки – сенсibilизаторы такие, как, например, вспученный перлит (Чехия) или специализированные стеклянные микросферы (США, Канада, Австралия, Германия и др.). Эти добавки находят свое применение и в производстве патронированных ВВ. Получение искусственных оболочных сенсibilизаторов связано с наличием специализированных производств, определяющих их высокую цену.

Одним из перспективных материалов, используемых в качестве сенсibilизатора для ЭВВ, может оказаться концентрат, извлекаемый из зол энергетических углей, состоящий из ценосфер – минеральных микросферических частиц, образующихся при сжигании углей. Доступность, значительные объемы и легкость его извлечения (частицы легче воды) из золоотстойников ТЭЦ определяют его невысокую стоимость. Известный успешный опыт использования ценосфер в производстве ВВ (РФ, Казахстан) указывают на необходимость внимательного их исследования.

Все вышеизложенное определяет актуальность темы данных исследований.

Объектом исследования диссертации является процесс детонации ЭВВ на основе АС с добавками ценосфер в качестве порообразующих компонент ЭВВ.

Предмет исследования:

1. детонационные характеристики ЭВВ с добавками фракционированных ценосфер;
2. ценосферы, с позиций оценки перспективности их использования для производства ВВ.

Цели работы:

1. разработка методики расчета скорости детонации ЭВВ с контролируемым общим объемом и средним размером пор для прогнозирования детонационных параметров аэрированных ЭВВ;
2. исследование ценосфер для определения их ведущих характеристик при использовании в качестве сенсibilизирующих добавок в ЭВВ и методики оценки объемов выхода целевых фракций ценосфер, образующихся при сжигании углей различных месторождений.

Методы исследования.

На основании полученного в ходе проведения взрывных экспериментов эмпирического материала и анализа сопоставимых литературных данных была сформирована система гипотез об области влияния пор – присоединенной к порам части эмульсионной основы, в которой реализуются экзотермические химические реакции, сопровождающие детонационный процесс. Расчет общего тепловыделения проводится на основе вероятностного подхода к оценке объема обобщенной области влияния. Расчет скорости детонации проводится в рамках одномерной задачи.

Зависимость скорости детонации ЭВВ, как основной исследуемой характеристики детонации ЭВВ, от параметров заряда представляется в рамках зависимости «скорость детонации – пористость заряда», методологическое преимущество которой против традиционной – «скорость детонации – плотность заряда» показано на примере исследования детонации октогена с добавками ценосфер.

По данным оптической микроскопии и на основании макрокомпонентного химического анализа состава оболочек ценосфер была установлена связь между средним размером ценосфер в их тонких размерных фракциях и осредненным относительным содержанием оксидов алюминия и железа в оболочках ценосфер.

Основные задачи исследования:

1. разработка методик лабораторного получения эмульсии с контролируемым дисперсным составом, ее сенсibilизации добавками стеклянных микросфер или ценосфер с минимизацией вовлекаемого в эмульсию паразитного воздуха, формирования зарядов-сборок для проведения взрывных экспериментов;
2. разработка методик постановки, планирования и проведения взрывных экспериментов для получения эмпирических данных для формирования теоретических представлений о детонации ЭВВ;
3. разработка методик размерного и плотностного фракционирования ценосфер; проведение гранулометрических и макрохимических исследований во фракциях ценосфер; расчет прочности оболочек ценосфер и оценка энергозатрат на их разрушение при гидростатическом нагружении;
4. обоснование методологического подхода к интерпретации экспериментальных данных о скорости детонации в зависимости от *пористости зарядов ВВ* с добавками высокоплотных частиц (ценосфер) на примере детонации октогена с добавками ценосфер;
5. разработка на основе полученного эмпирического материала рабочих гипотез о детонации ЭВВ с полыми частицами и расчетной формулы для скорости детонации, учитывающей параметры пористости.

Защищаемые научные положения:

1. Методика постановки, планирования и проведения взрывных экспериментов для получения эмпирических данных, необходимых при получении расчетной формулы для скорости детонации ЭВВ с различными порообразующими добавками-сенсibilизаторами;
2. Методологический подход к интерпретации экспериментальных данных о скорости детонации в зависимости от *пористости зарядов ВВ* с добавками высокоплотных частиц (ценосфер);
3. Результаты исследования ценосфер, устанавливающих связь макрохимического состава оболочек с их размером как основу прогноза выхода целевых фракций ценосфер при использовании для энергогенерации углей различных угольных месторождений;

4. Гипотезы об *области влияния* пор и тепловыделении в *областях влияния* пор; вероятностный подход к расчету объединенной *области влияния*, создаваемой случайно распределенными в эмульсии порообразующими частицами;
5. Расчетная формула для скорости детонации ЭВВ, учитывающая параметры порообразующих добавок, калибруемая при использовании цилиндрических зарядов одного диаметра по данным взрывных экспериментов.

Достоверность научных положений, выводов и результатов работы обеспечивается использованием фундаментальных положений физики взрыва и математической теории вероятности, достаточным (с точки зрения вариаций начальных данных при формировании зарядов ЭВВ) объемом экспериментальных исследований, удовлетворительным соответствием результатов теоретических расчетов экспериментальным данным.

Научная новизна результатов исследований заключается:

- в установлении связи макрoхимического состава оболочек с их размером как основы прогноза выхода целевых фракций ценосфер при использовании для энергогенерации углей различных угольных месторождений;
- в обосновании методологического подхода к интерпретации экспериментальных данных о скорости детонации в зависимости от *пористости зарядов ВВ* с добавками высокоплотных частиц (ценосфер);
- во введении понятия области влияния (действия) поры, в которой происходят экзотермические химические реакции, сопровождающие детонационный процесс, и получении на основе вероятностного подхода оценки тепловыделения во фронте детонационной волны;
- в получении эмпирической формулы для расчета скорости детонации ЭВВ в зависимости от количества и размеров порообразующих добавок.
- в обосновании критериев эффективного применения ценосфер в качестве сенсibiliзирующих добавок в ЭВВ;

Практическая значимость работы:

- для получения более точных данных о свойствах ВВ (скорость детонации, удельная энергия взрыва), закладываемых в расчеты при проектировании БВР может быть использована полученная расчетная формула для скорости детонации ЭВВ и других ВВ на основе аммиачной селитры, что позволит снизить расход ВВ и стоимость БВР;
- использование для сенсibiliзации ЭВВ ценосфер как недорогого и эффективного компонента при производстве патронированных ЭВВ позволит снизить их стоимость;
- установленная связь макрoхимического состава оболочек с их размером может быть использована для обоснования ресурсных возможностей по показателю выхода целевых фракций ценосфер.

Личный вклад автора состоит:

- в организации, подготовке, проведении и анализе результатов комплекса экспериментальных исследований;

- формировании основных предположений, легших в основу полученной расчетной формулы для скорости детонации ЭВВ с порообразующими добавками;
- формировании основных выводов и рекомендаций.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 19 научных мероприятиях: 3-я международная научная конференция «Физические проблемы разрушения горных пород», 2002, Абаза, Россия; Intl. Conf. “Shock waves in condensed matter”, 2002, 2004; IV Школа-семинар «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте», 2003, Новосибирск, Россия; Всероссийская научно-техническая конференция «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы»/ Третьи Ставеровские чтения, 2003, Красноярск, Россия; China-Russia Seminar on Materials Physics Under Ultra-conditions, 2003, China; 5th Intl Symp. on Impact Engineering (ISIE-5), 2004, Cambridge, UK; XII и XIII Intl Conf. on the Methods of Aerophysical Research, 2004 и 2007, Novosibirsk, Russia; IV Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 2004, Томск, Россия; VII Харитоновские тематические научные чтения, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, Саров, Россия; Int. VIIIth Seminar “New Trends in Research of Energetic Materials”, 2005, Pardubice, the Czech Republic; III Межотраслевая научно-техническая конференция «Промышленные взрывчатые вещества (ПВВ): состояние, перспективы, разработки и применения», 2005, Дзержинск, Россия; 20th ICDERS, 2005, Montreal, Canada; XIX Всероссийская конференция «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности», 2005, Бийск, Россия; Intl Conf. "Coal Science & Technology", 2005, Okinawa, Japan; IX Всероссийский Съезд по Механике, 2006 г, Н. Новгород, Россия; Международная конференция “IX Забабахинские научные чтения”, 2007 года, Снежинск, Россия; Всероссийской конференции “Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва”, 2007 года, Новосибирск, Россия.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 3 научные статьи в реферируемых журналах, 5 полнотекстовых докладов в сборниках трудов различных научных мероприятий.

Основная часть работы была выполнена в рамках исследований по грантам РФФИ № 02-01-01270а (2002-2003 гг.) и № 04-03-33187а (2004-2005 гг.), где автор являлся исполнителем и Интеграционного междисциплинарного проекта фундаментальных исследований СО РАН № 118, (2003-2005 гг.), где автор являлся руководителем (ответственным исполнителем) работ, выполняемых в ИТПМ СО РАН.

Объем и структура работы. Объем диссертации – 117 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка и 10 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций и библиографического списка из 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В *первой главе* постановке исследуемой в настоящей работе проблеме предшествует литературный обзор работ, посвященных исследованию детонации ВВ на основе АС. Также даются наиболее интересные с точки зрения автора сведения и гипотезы, касающиеся исследуемой проблемы.

Взрывчатые свойства аммиачной селитры были открыты во второй половине XIX века, однако ее широкому использованию препятствовали нестабильность детонационных свойств ВВ на ее основе и трудности с их инициированием.

Все ВВ на основе АС относятся к классу смесевых ВВ и проявляют т.н. неидеальное поведение, т.е. зависимость своего детонационного поведения от размеров заряда, – для цилиндрических зарядов это – его диаметр, для плоских зарядов – толщина слоя ВВ. Кроме того, для таких ВВ существует значение плотности заряда, выше которой ВВ на основе АС теряют способность к детонации. В зависимости от плотности зарядов, ВВ на основе АС демонстрируют немонотонный характер поведения скорости детонации, не описываемый в рамках классической одномерной теории детонации.

Снижения плотности ВВ на основе АС, как обязательное условие приобретения ими способности к детонации достигается их аэрированием, заключающимся во введении в энергонасыщенную основу газовых пор. По общему мнению, газовые поры во ВВ при ударно-волновом нагружении играют роль т.н. горячих точек, т.е. мест в которых происходит инициирование химических реакций, сопровождающих детонационный процесс.

В литературе рассматриваются различные механизмы возникновения горячих точек, однако общим и важным для детонационного процесса следует считать их наличие и зависимость детонационных свойств ВВ на основе АС от количества горячих точек и их размера, т.е. размера пор.

Из крайне малого числа предлагаемых моделей детонации смесевых ВВ преимущество, несомненно, должно быть отдано моделям, рассматривающим взаимодействие различных конкурирующих механизмов. Например, при увеличении плотности заряда увеличивается объемное содержание энергии в заряде ВВ и одновременно уменьшается количество горячих точек в единице объема. Эти два явления имеют по отношению к скорости детонации противоположный эффект, что обеспечивает немонотонность скорости детонации заряда в зависимости от его плотности. Однако расчетных формул для скорости детонации, основанных на физических законах, эти модели не содержат.

В рецептурах на различные аммиачно-селитренные ВВ указывается плотность зарядов, обеспечивающая заявляемые детонационные характеристики. Однако использование для сенсibilизации энергонасыщенной основы тяжелых толстостенных полых частиц оставляет плотность зарядов на достаточно высоком уровне даже при избыточном их содержании. Поэтому целесообразно указание пористости зарядов, выражаемую отношением объема порозного газа к объему заряда вместо плотности заряда.

На Рис. 1. представлено характерное поведение скорости детонации в зависимости от пористости зарядов аммиачно-селитренного ЭВВ одного диаметра для двух различных средних диаметров добавляемых сенсibiliзирующих полых газонаполненных частиц.

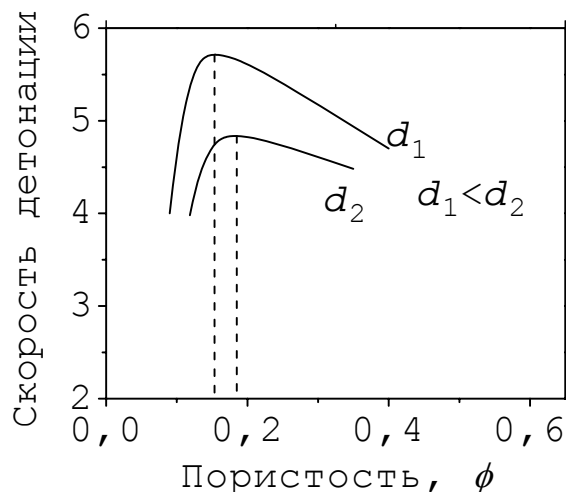


Рис. 1. Зависимость скорости детонации (км/сек) азрированного ЭВВ от пористости, создаваемой порами различного диаметра (d_i – средний диаметр пор).

При нулевой пористости детонация отсутствует. При достижении критической пористости скорость детонации сначала растет, достигает максимума, затем убывает. Значение и положение максимума зависит от среднего диаметра сенсibiliзирующих добавок.

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование детонации ЭВВ с ценосферами и создание расчетной модели, описывающей немонотонную зависимость скорости детонации от пористости эмульсионного ВВ.

Поскольку использование различных сенсibiliзаторов и в их различных концентрациях приводит к получению, вообще говоря, различных ВВ, то исследованию подлежат эмульсионная составляющая ЭВВ с позиций ее участия в детонационном процессе и сенсibiliзирующий эффект различных сенсibiliзаторов.

Во *второй главе* рассматриваются вопросы подготовки и проведения экспериментов с ЭВВ, а также сделан анализ полученного эмпирического материала.

Для проведения экспериментального цикла работ была освоена методика приготовления эмульсии и способов контроля над ее дисперсностью, постоянство которой обеспечило бы необходимую стабильность от порции к порции свойств эмульсионной матрицы, которые бы обеспечили в свою очередь адекватную интерпретацию получаемых в эксперименте данных.

Получаемая эмульсия относится к типу «вода-в-масле», где дисперсная составляющая представляет собой концентрированный водный раствор окислителя, а непрерывная фаза (масло) – горючий компонент эмульсии (Рис. 2.).

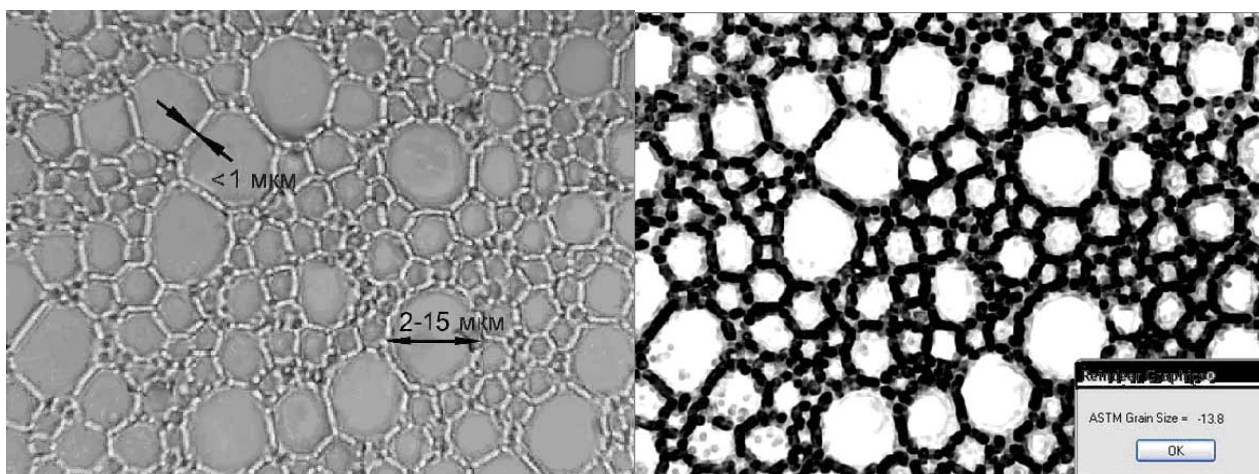


Рис. 2. Фотография эмульсии и пример цифрового оконтуривания капель при компьютерной обработке фотографий эмульсии для определения ее дисперсности с помощью специализированного фильтра к программе обработки графических файлов.

Средний размер капель характеризует степень смешения реагентов, от которой зависит скорость их химического взаимодействия. Получение эмульсии с постоянной дисперсностью явилось одной из важных технологических задач при проведении работ.

Базовой основой ЭВВ является эмульсия, состоящая из высококонцентрированного раствора аммония азотнокислого (нитрата аммония, аммиачной селитры) и индустриального масла И-20 в смеси с эмульгатором РЭМ-1. Состав эмульсии, выраженный в весовых процентах, следующий: АС – 76,9%; вода – 15,2%; масло индустриальное – 6,9%; эмульгатор – 1,0%.

Для получения эмульсионной матрицы постоянной дисперсности была отработана технология ее контроля, основанная на зависимости диэлектрических свойств эмульсии от ее дисперсности.

При изготовлении эмульсии ее дисперсность контролировалась специально разработанным емкостным датчиком. Его показания были оттарированы по фотографиям проб эмульсии, по которым определялся средний размер капель. Это делалось как непосредственными измерениями по совместно сфотографированной линейке либо по формуле (1) (метод секущей):

$$d = 3C_{V,AC} / m, (1)$$

где d – средний диаметр капель, $C_{V,AC}$ – объемная концентрация водного раствора аммиачной селитры в ЭВВ, m – число точек пересечений границ капель на единице длины секущей фотоизображение эмульсии прямой, (1/мм), называемой «главным стереометрическим соотношением», так и с применением специальных компьютерных программ.

Оперативный контроль над дисперсностью осуществлялся в соответствии с полученными зависимостями значений емкости эмульсии от среднего размера капель и от времени перемешивания эмульсии при ее получении (Рис. 3.).

Основным способом создания ЭВВ является сенсibilизация эмульсионной матрицы методом ее аэрирования, т.е. внесения в ее объем газовых пузырьков. При этом происходит снижение видимой плотности эмульсии. Создание

ЭВВ низкой плотности с контролируемыми размерами пор может быть обеспечено внесением в эмульсионную матрицу оболочных микросфер определенных размерных фракций.

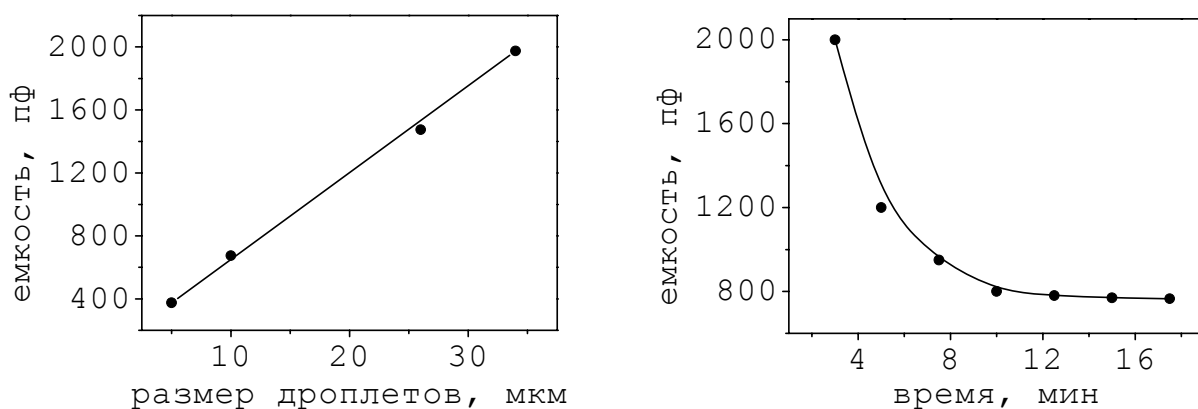


Рис. 3. Зависимость емкостных характеристик эмульсии от среднего размера дроплетов и от времени перемешивания эмульсии при ее получении.

Наиболее доступным, с широкой гаммой размерного и плотностного (по насыпному весу, с разной толщиной оболочки) фракционного разнообразия оказалось сырье, получаемое из зол энергетических углей, извлекаемое из золотстойников ТЭС. Алюмосиликатные полые микросферы, образующиеся при сгорании углей, называемые ценосферами, легко рассеивались на размерные фракции в пределах 30-315 мкм и, дальнейшей флотацией, на фракции по насыпному весу, то есть фракции с различными толщинами оболочек.

В исследованиях наряду с разделенными на размерные и/или весовые фракции ценосферами также были использованы специализированные микросферы корпорации 3M[®] марки K1.

Патронирование осуществлялось в цилиндрические тонкостенные пластиковые или бумажные (с пропиткой) оболочки при помощи поршневого устройства.

Опционально донце патрона изготавливалось съемным с целью размещения в его теле датчика давления.

Соотношение длины патрона к его диаметру составляло 6 – 10.

Большинство патронов имело внутренний диаметр 55 мм, длину – 350 мм. Для проведения исследований по определению критического диаметра ЭВВ патроны имели внутренний диаметр 40, 30, 24 и 19 мм. Соотношение диаметра патрона к его длине для этой группы экспериментов составляло 1:10.

Для наблюдения прохождения ударно-детонационной волны в ЭВВ в дальней от места инициирования части патрона устанавливались проволочные контактные датчики с порогом срабатывания 200–300 кг/см³, что позволяло регистрировать также нестационарную, затухающую ударную волну.

Взрывные эксперименты проводились во взрывных камерах или в условиях открытого полигона. Для получения данных о скорости детонации использовались приборы, способные обеспечить высокую точность измерений:

1. прибор И1 (ОАО Институт прикладной физики)
2. частотомеры ЧЗ-34 (Институт Гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН)
3. осциллограф Tektronix TDS-820 (полигон ФГУП Новосибирский завод искусственного волокна)

При отстреле двух серий зарядов с одинаковыми параметрами во взрывной камере ОАО Институт прикладной физики «на стабильность», отклонение в измерениях скорости детонации составило 0,7% для высокой пористости и 1,7% при пористости близкой к критической.

Результаты всех экспериментов не объединялись какой-либо зависимостью, поэтому из них были выделены наиболее представительные эксперименты, проведенные для отдельных размерных фракций. На Рис. 4. построены зависимости скорости детонации от плотности зарядов, соответствующие различным фракциям ценосфер. Линии, соответствующие этим зависимостям, пересекаются. С одной стороны, можно было бы предположить, что в данном случае более крупные частицы лучше, поскольку детонация происходит в более плотном ВВ. С другой, более мелким ценосферам соответствует более высокая максимальная скорость детонации для этой фракции. При переходе к зависимости скорости детонации от пористости, получаются более понятные зависимости.

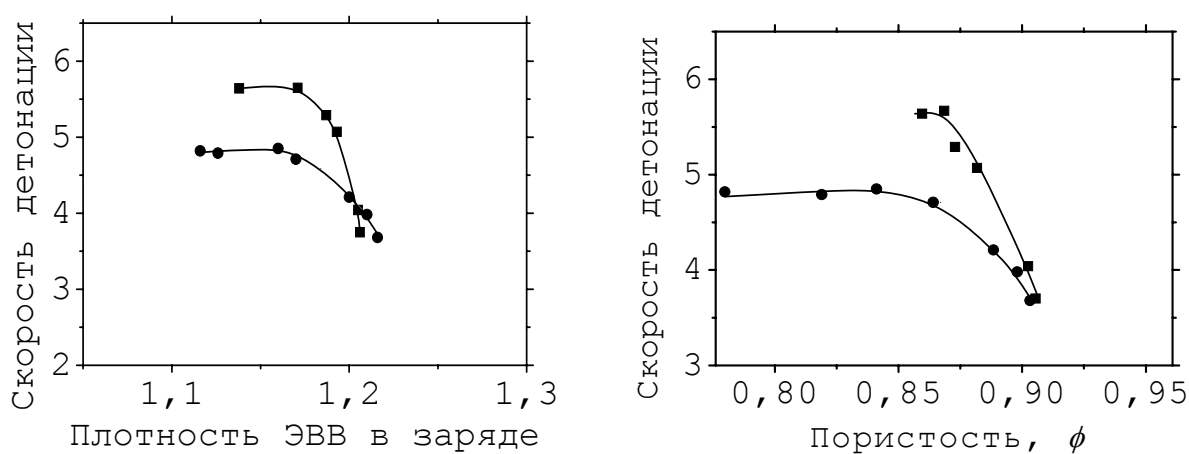


Рис. 4. Зависимость скорости детонации ЭВВ с ценосферами от плотности (слева) и от пористости (справа) заряда. ■ – ценосферы фракции 71-100 мкм; ● - ценосферы фракции 80-180 мкм.

Были проведены определения давления в детонационной волне. Записанная история давления показывает, что детонация в ЭВВ происходит аналогично модели Зельдовича-Неймана-Деринга, т.е. наблюдается скачок давления – химический пик и дальнейшее плавное снижение давления (Рис. 5.).

Для эмульсии с микросферами 3М был определен критический диаметр цилиндрических зарядов, который составил 22 мм.

Таким образом, анализируя результаты экспериментов, заметим:

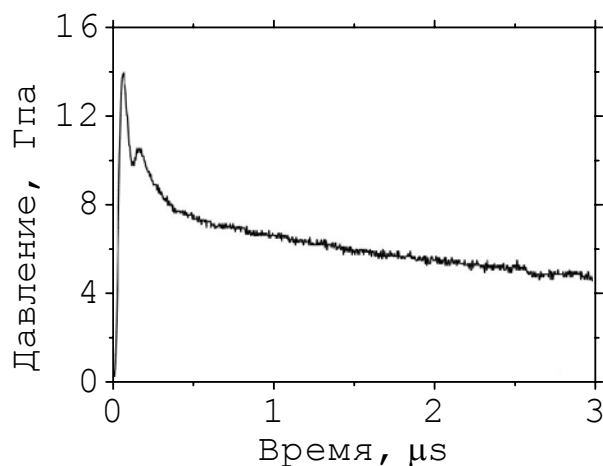


Рис. 5. История давления для образца ЭВВ с 230 мл ценосфер фракции 71-100 мкм.

- скорость детонации в зарядах ЭВВ с ценосферами имеет немонотонный характер зависимости от пористости (плотности) заряда;
- положение максимума скорости детонации в зарядах ЭВВ с ценосферами и его значение зависят от среднего диаметра добавляемых микросферических сенсбилизаторов;
- детонация аэрированного ЭВВ соответствует модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга.

Новизна научного результата

1. впервые проведены экспериментальные исследования детонации ЭВВ с фракционированными ценосферами;
2. установлено, что для размерной фракции ценосфер 71-100 мкм скорость детонации соответствует скорости детонации ЭВВ со специализированными стеклянными микросферами K1 фирмы 3M® (5,73 км/сек).

В *третьей главе* приведены результаты исследований ценосфер.

Основным гранулометрическим исследованием было определение количественного распределения размерных подфракций в размерных фракциях и определение среднего диаметра микросфер во фракции.

При оптической микроскопии ценосфер было обнаружено, что в их разных размерных фракциях преимущественное количество принадлежит какому-либо типу ценосфер.

По данным оптической микроскопии можно выделить пять основных *морфологических* типов ценосфер (Рис. 6.).

Исследование макрохимического состава ценосфер различного морфологического типа позволило установить их зависимость (соответствие) (Рис. 7.).

Сопоставление преобладающего в размерных фракциях макрохимического состава ценосфер (Таблица) позволяет установить его взаимосвязь с размером ценосфер. Эту взаимосвязь можно положить в основу прогнозов выхода целевых размерных фракций при сжигании углей различных угольных месторождений. Так при прогнозной оценке различных месторождения кузнецкого бассейна наивысший выход ценосфер диапазона <160 мкм соответствует углям,

поступающим на Томь-Усинскую ГРЭС. Ситовый анализ показал, что объем целевой фракции составляет около 56% общего объема концентрата, что соответствует сделанному прогнозу и ставит Томь-Усинскую ГРЭС как весьма перспективный источник сырья для получения сенсibiliзирующих добавок при производстве ВВ.

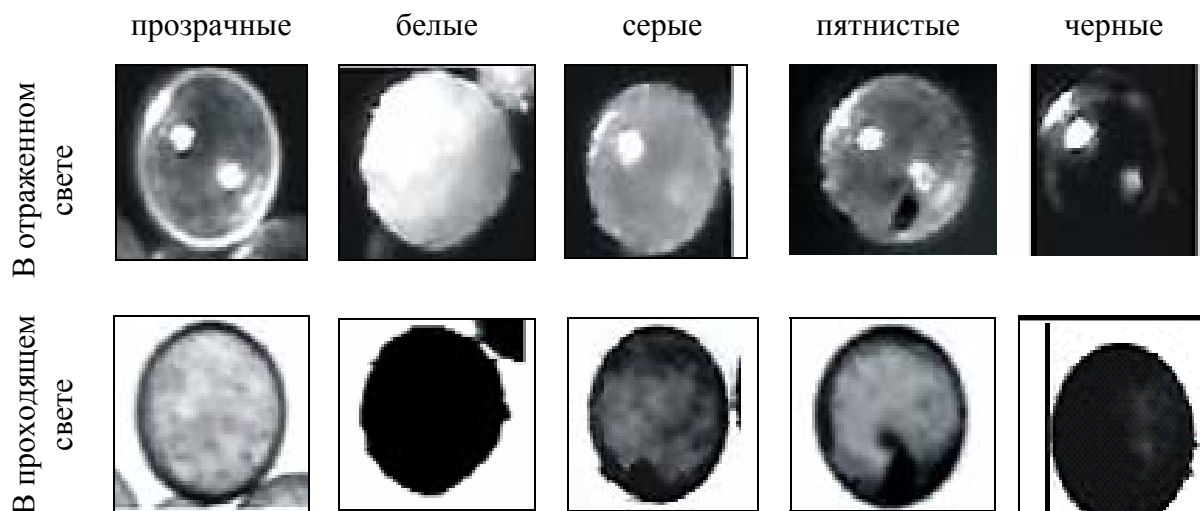


Рис. 6. Типы ценосфер по данным оптической микроскопии.

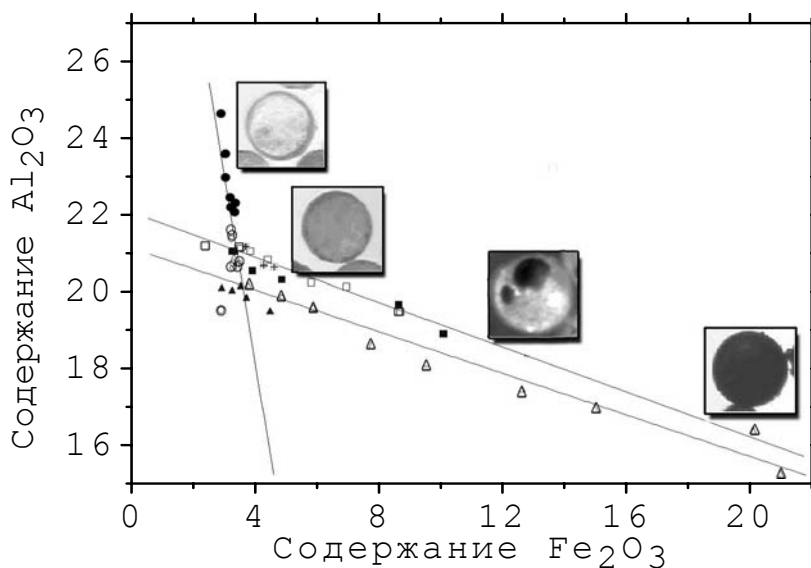


Рис. 7. Макрокомпонентный состав (масс. %) продуктов разных способов выделения ценосфер. + - концентрат Новосибирской ТЭЦ-5 и Томь-Усинской ГРЭС; Δ - продукты магнитной сепарации (ПМЦ), фракция 250-500 мкм; \square , \blacksquare - ПМЦ, фракция 80-180 мкм; \blacktriangle - ПМЦ, фракция 160-200 мкм; продукты классификации по размеру: \bullet - меньше 80 мкм, \circ - 80-180 мкм.

Таким образом, при сопоставлении скоростей детонации эмульсионных ВВ на основе аммиачной селитры показано, что высококачественным сенсibiliзаторам, способным заменить синтетические стеклянные микросферы фирмы

ЗМ, удовлетворяют ценосферы фракций размером менее 0,160 мм с насыпной плотностью менее 0,35 г/см³.

Таблица

Фракции, мм	Физические характеристики			Хим. состав, масс. %	
	$\rho_{\text{нас.}}$, г/см ³	d , мм	δ , мм	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
40-50	0,32	49	1,9	25,0	2,6
50-63	0,34	63	2,6	23,3	2,8
50-63	0,46	65	3,8	22,5	3,0
71-100	0,35	75	3,2	22,7	3,0
125-160	0,36	134	5,9	20,9	3,1

Новизна научного результата

Впервые установленное соответствие макрхимического состава размеру ценосфер легло в основу прогнозных оценок выхода целевых размерных фракций ценосфер производимых по общим зольным остаткам используемых углей.

В *четвертой главе* даются результаты исследования детонации октогена с добавками ценосфер.

Немонотонный характер зависимости скорости детонации от плотности (или пористости) заряда для аммиачно-селитренных ВВ при использовании ценосфер, инициировал вопрос: каково влияние добавок ценосфер в высшие ВВ?

Был проведен цикл экспериментов, в которых во флегматизированный октоген добавлялись ценосферы примерно в тех же соотношениях, как и при создании ЭВВ. При этом часть зарядов прессовалась давлением ниже номинального, таким образом, что в формируемых зарядах помимо пористости создаваемой ценосферами присутствовала остаточная пористость.

Эксперименты показали, что имеется общая тенденция – скорость детонации снижается при снижении плотности заряда. Тем не менее, экспериментальные данные не объединялись определенной зависимостью. Положение изменилось, когда скорость детонации была рассмотрена в зависимости от пористости заряда (Рис. 8.).

Таким образом, эксперименты с флегматизированным октогеном показали обоснованность методологического подхода интерпретации экспериментальных данных, при котором при использовании сенсбилизаторов с высоким насыпным весом зависимость «скорость детонации - пористость» имеет преимущество перед зависимостью «скорость детонации - плотность».

Новизна научного результата

Экспериментально обоснован методологический подход к интерпретации результатов экспериментов, в которых для создания пористости (уменьшения плотности) используются порообразующие добавки в высокой насыпной плот-

ность и при котором скорость детонации представляется в зависимости от пористости – отношения объема порозного газа к объему заряда.

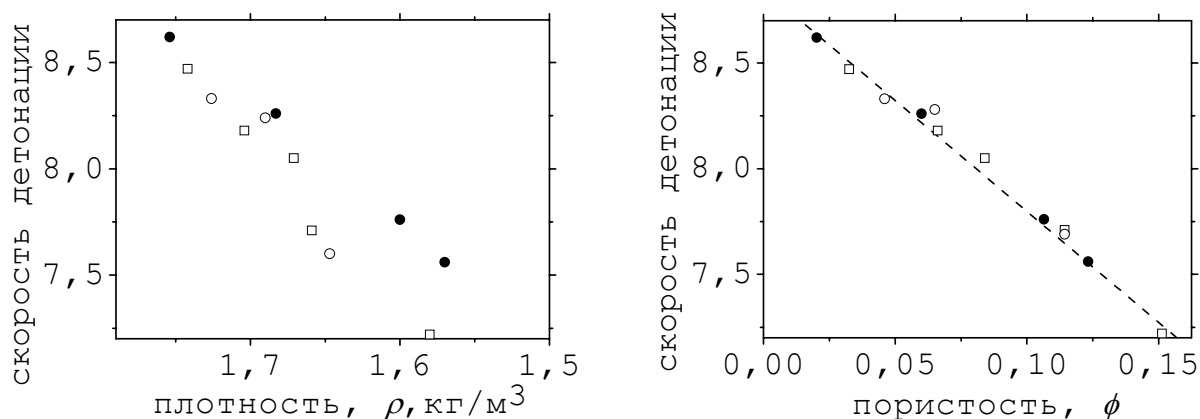


Рис. 8. Слева – зависимость скорости детонации окфола от плотности заряда. (● – окфол различной плотности без ценосфер, ○ – окфол с ценосферами фракции 50-90 мкм, □ – окфол с ценосферами фракции 125-160 мкм). Справа – зависимость скорости детонации окфола от пористости заряда.

Пятая глава посвящена получению расчетной зависимости скорости детонации ЭВВ от пористости заряда, учитывающей размеры пор.

Тепловыделение определяется количеством участвующего в реакциях вещества. Предполагая, что вокруг поры образуется ее область влияния, в которой происходят химические реакции, используя вероятностный подход для вычисления суммарного тепловыделения, получено выражение для скорости детонации:

$$D = (1 - \phi)^{(n-1)/2} \sqrt{2(n^2 - 1)(1 - \exp(-\phi w_0/v_0))q} \quad (2)$$

где $F_{\text{пор}} = (1 - \phi)^{(n-1)/2}$ – коэффициент учета пористости (Забабахин Е.И., 1997), n – показатель политропы, $\phi = v/V$ – пористость ЭВВ, v – объем порозного газа в объеме ВВ V , w_0 – объем области влияния поры, v_0 – средний объем пор, q – удельная калорийность ЭВВ.

Применение уравнения (2) к экспериментальным данным позволило получить соответствующие им значения w_0/v_0 (соотношение $R = w_0/v_0$ определено как критерий действия усредненной поры или ее «работоспособность»), для которых была предложена аппроксимирующая зависимость. После подстановки в уравнение (3) уравнение для скорости детонации получило окончательный вид:

$$D = (1 - \phi)^{(n-1)/2} \sqrt{2(n^2 - 1) \left[1 - \exp \left(-\phi \cdot (a_{\text{dia}} - b_{\text{dia}} d)^3 \left(1 - \exp(-g(\phi - \phi_{\text{cr}})) \right)^3 \right) \right]} q \quad (3)$$

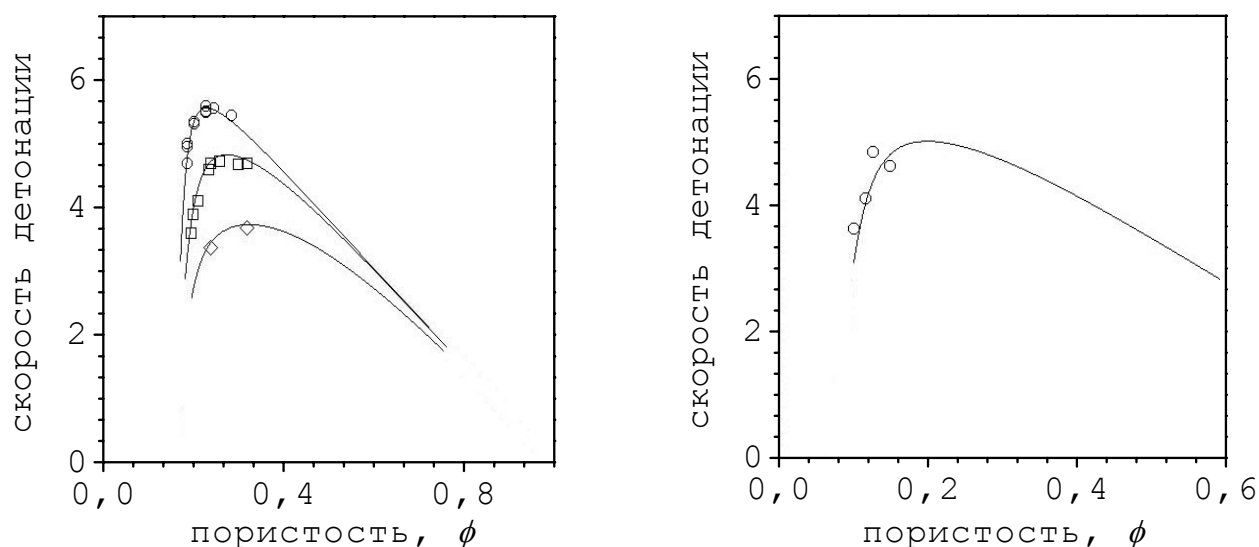


Рис. 9. Слева – зависимость скорости детонации D от пористости ϕ . Линии изображают расчетные данные, точки – эксперимент (\circ – микросферы 3М, средний размер 37 мкм; \square – ценосферы фракции 80÷180 мкм, средний размер 137 мкм; \diamond – ценосферы фракции 200÷315 мкм, средний размер 226 мкм). Справа – сравнение расчетной зависимости и экспериментальных данных для ЭВВ с ценосферами фракции 125-160 (ценосферы из зол ТЭЦ-5, Новосибирск) со средним размером ценосфер 137 мкм.

где ϕ_{cr} – критическая пористость, определяемая из экспериментальных данных, коэффициенты g , a_{dia} , b_{dia} – находятся из экспериментальных данных, d – средний диаметр частиц.

Из сравнения экспериментальных и расчетных данных (Рис.9.) видно, что предлагаемая расчетная формула качественно и количественно адекватно описывает экспериментальные данные по детонации ЭВВ. При этом она учитывает двухпараметрический характер пористости при использовании микросфер различного диаметра. Положение максимума скорости детонации и его значение в расчетах близко к имеющимся экспериментальным данным.

Новизна научного результата

Впервые получено аналитическое выражение для скорости детонации (формула (2)), которое может быть применено для оценки действия различных добавок к ВВ на основе аммиачной селитры.

Построенное на базе формулы (2) выражение (3) для расчетов скорости детонации ВВ на основе аммиачной селитры в зарядах одного диаметра имеет только два параметра (параметр $g = 40$ постоянный для всех экспериментов), которые определяются из экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенной работы:

1. Разработаны методики подготовки и проведения экспериментов, учитывающих специфику исследуемых материалов; проведены взрывные эксперимен-

ты и экспериментально получены зависимости скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществах от значений пористости в зарядах эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного различными фракциями ценосфер; установлено, что полученная зависимость является немонотонной функцией пористости и, таким образом, сенсibilизирующее действие ценосфер в эмульсии на основе аммиачной селитры аналогично действию других используемых в производстве эмульсионных взрывчатых веществ оболочных порообразующих добавок; сделана запись давления в ударно-детонационной волне; показано, что детонация в эмульсионных взрывчатых веществах на основе аммиачной селитры соответствует модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга;

2. Экспериментально исследовано влияние добавок ценосфер на детонацию флегматизированного октогена; предложено представление экспериментальных результатов в виде зависимости «скорость детонации – пористость», при котором, в отличие от традиционного – «скорость детонации – плотность», экспериментальные результаты описываются единой зависимостью;
3. Получена расчетная формула для скорости детонации в эмульсионных взрывчатых веществах на основе аммиачной селитры, основывающаяся на эмпирических данных о детонации в эмульсионных взрывчатых веществах и статистическом подходе к оценке тепловыделения в детонационной волне, для чего было введено понятие «области влияния поры» – присоединенного к поре объема эмульсии, в котором реализуются экзотермические реакции; формула содержит два параметра, определяемых из двух экспериментов; расчеты по этой формуле хорошо согласуются с экспериментом;
4. На основе экспериментальных данных о скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществ с различными фракциями ценосфер и их объемного содержания в концентрате определено значение размера целевой (сенсibilизаторы) фракции сепарируемых ценосфер – менее 160 мкм; установлен высокий сенсibilизирующий эффект для фракций ценосфер 71-100 мкм, которые могут быть рекомендованы для их использования при производстве взрывчатых веществ с высокими детонационными параметрами; обнаружена корреляция между макрохимическим составом оболочек ценосфер и их диаметром, что позволило выявить перспективные источники ценосфер с высоким выходом целевых фракций ценосфер.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Дерibas А.А., Медведев А.Е., Решетняк А.Ю., Фомин В.М. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами // ДАН. – 2003. – Т.389. – № 6. – С.163-165.
2. Анищиц А.Г., Анищиц Н.Н., Дерibas А.А., Караханов С.М., Касаткина Н.С., Пластинин А.В., Решетняк А.Ю., Сильвестров В.В.. Скорость детонации

эмульсионных взрывчатых веществ с ценосферами // ФГВ. – 2005. – Т. 41. – № 5. – С. 1-9.

3. *Сильвестров В.В., Дерibas А.А., Анишиц А.Г., Караханов С.М., Пластинин А.В., Решетняк А.Ю.* Детонационные характеристики эмульсионного ВВ с ценосферами // III Межотраслевая научно-техническая конференция «Промышленные взрывчатые вещества (ПВВ): состояние, перспективы, разработки и применения»: 18-20 мая 2005, Дзержинск. (Горный Журнал. – 2005. – № 5. – С. 61-65).

Статьи, опубликованные в научных сборниках и материалах конференций:

1. *Дерibas А.А., Решетняк А.Ю.*, Исследование влияния добавок в виде полых микросфер на скорость детонации различных конденсированных взрывчатых веществ. // Третья международная научная конференция «Физические проблемы разрушения горных пород»: 9-14 сентября, 2002, Абаза, Россия. Сборник трудов. – С.151-154.
2. *Deribas A.A., Medvedev A.E., Fomin V.M., Reshetnyak A.Yu., Shabalin I.I.*, Mechanism of detonation of emulsion explosives with hollow microballons // XII International Conference on the Methods of Aerophysical Research: 28 June – 3 July, 2004, Novosibirsk, Russia. – Novosibirsk, 2004. – Part I. – P.75-80.
3. *Сильвестров В.В., Караханов С.М., Анишиц А.Г., Пластинин А.В., Решетняк А.Ю., Дерibas А.А.* Скорость детонации эмульсионных взрывчатых веществ с ценосферами // Int. Conference “Shock waves in condensed matter”, July 18-23, 2004, Saint-Peterburg, Russia. Proceedings, – P.103-106.
4. *Сильвестров В. В., Караханов С.М., Пластинин А.В., Решетняк А.Ю., Дерibas А.А.* Измерение ширины зоны реакции эмульсионного ВВ // Труды IV Всероссийской конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики»: 5-7 октября 2004 г., Томск, – Изд-во ТГУ, 2004. – С. 140-141.
5. *Решетняк А.Ю., Медведев А.Е., Фомин В.М.* Статистическая модель детонации эмульсионных аэрированных аммиачно-селитренных взрывчатых веществ. // Труды XIX Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности»: 28-31 августа 2005, Бийск, Россия, – С. 245-252.
6. *Дерibas А.А., Анишиц Н.Н., Караханов С.М., Пластинин А.В., Сильвестров В.В., Рабчевский Е.В., Решетняк А.Ю., Юмашев В.В.* Скорость детонации эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных ценосферами энергетических зол // Третьи Ставеровские чтения Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы»: 23-24 октября, 2003, Красноярск. – С. 49-50.
7. *Сильвестров В.В., Караханов С.М., Пластинин А.В., Решетняк А.Ю., Дерibas А.А.* Влияние плотности на ширину зоны реакции эмульсионного ВВ // VII Харитоновские тематические научные чтения: 14-18 марта 2005, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров: Сборник тезисов докладов. – С. 75-77.
8. *Anshits N. N., Mikhaylova O.A., Rabchevskiy E. V., Anshits A.G., Titkov A.I., Sala-*

- nov A.N., Reshetniak A.Yu., Fomin V.M.* Morphology of narrow fractions of power fly ash cenospheres and utilization of this as sensitizing agents for emulsion explosives // Proc. Int. Conf. "Coal Science & Technology": 9-14 October. 2005. Okinawa, Japan. 2P603. – P.1-8.
9. *Дерибас А.А., Решетняк А.Ю.*, Исследование влияния добавок в виде полых микросфер на скорость детонации различных конденсированных взрывчатых веществ. // Int. Conference "Shock waves in condensed matter": Sept. 1-6, 2002, Saint-Peterburg, Russia. Proceedings. – P. 83-84.
 10. *Решетняк А. Ю., Пластинин А. В.*, Детонация аммиачно-селитренных эмульсионных взрывчатых веществ с ценосферами. // IV Школа-семинар «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте»: 16-19 сентября 2003, Новосибирск, Тезисы докладов, – С. 94-95.
 11. *Deribas A.A., Fomin V.M., Medvedev A.E., Reshetnjak A.Yu.*, Detonation of emulsion explosives with hollow microspheres. // China-Russia Seminar on Materials Physics Under Ultra-conditions: November 26-29, 2003: Book of Abstracts – Yanshan University, Qin Huangdao, China. – P. 9.
 12. *Anshits A.G., Deribas A.A., Fomin V.M., Kasatkina N.S., Karakhanov S.M., Kundo N.N., Medvedev A.E., Plastinin A.V., Reshetnjak A.Yu., Silvestrov V.V.*, Investigation of Detonation of Emulsion Explosives with Cenospheres. // Int. Symp. ISIE-5.: July 2004, Cambridge, UK. Kidlington, Oxford, U.K. : Elsevier, ©2004, Abstract, – P. 61.
 13. *Deribas A.A., Karakhanov S.M., Plastinin A.V., Reshetnjak A.Yu., Silvestrov V.V.*, The experimental determination of width of the reaction zone for emulsion explosive // Int. VIIIth Seminar "New Trends in Research of Energetic Materials": April 19-21, 2005, Pardubice, the Czech Republic, – <http://www.ntrem.com/2006/proceedings.htm>
 14. *Reshetnyak Alexander Yu., Medvedev Alexey E., Fomin Vasilij M.*, Simulation of detonation of aerated ammonium nitrate based emulsion explosives // 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems: 31 July – 5 August, 2005, Montreal, Canada, – <http://www.icders.mcgill.ca>
 15. *Медведев А.Е., Решетняк А.Ю.*. Механизм детонации промышленных эмульсионных взрывчатых веществ. // IX Всероссийский Съезд по Механике: 22-28 августа 2006, Н. Новгород, Тезисы докладов. – С. 146-147.
 16. *Medvedev A.E., Reshetnyak A.Yu., Fomin V.M.* Detonation of commercial emulsion explosives. Dependence on the charge diameter // XIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research: 5–10 February, 2007, Novosibirsk, Russia: Proc. Pt I / Ed. V.M. Fomin. – Novosibirsk: Publ. House "Parallel", 2007. – P. 123-127.