

На правах рукописи



Никитин Алексей Дмитриевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

Специальность 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре «Физика конструкционных материалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Никитин Илья Степанович**
доктор физико-математических наук, профессор,
директор института автоматизации проектирования
Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Петров Игорь Борисович,**
доктор физико-математических наук, член-
корреспондент Российской академии наук,
заведующий кафедрой информатики и вычислительной
математики ФГАОУ ВПО «Московский физико-
технический институт (государственный университет)»

Марчевский Илья Константинович,
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем механики Российской
академии наук им. А.Ю. Ишлинского

Защита состоится «15» декабря 2017г. в 10:00 часов на заседании
диссертационного совета Д212.125.14 Московского авиационного института по
адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д212.125.14, кандидат физико-
математических наук, доцент



Гидаспов В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных требований, предъявляемых к разработке новых взрывчатых составов (ВС), является повышение их эффективности и работоспособности. Основными показателями эффективности взрывчатых смесей считаются параметры ударно-волнового воздействия на объекты, такие как амплитуда избыточного давления во фронте ударной волны (УВ), удельный импульс фазы сжатия. Повышение указанных характеристик достигается применением более мощных взрывчатых веществ, а также использованием в составе смеси энергоемких добавок. К таким составам относятся составы с металлическими добавками, в том числе алюминий-содержащими ВС (АВС), а также термобарические составы (ТБС). При детонации зарядов АВС разложение взрывчатой основы происходит в детонационном режиме, как у обычного унитарного ВВ. Однако в процессе разлета продуктов детонации (ПД) происходит догорание частиц алюминия. За счет этого обеспечивается повышенное фугасное действие заряда.

Несмотря на значительное число экспериментальных и теоретических работ (Беяева А.Ф., Гоголи М.Ф., Махова М.Н., Долгобородова А.Ю., Семенова И.С., Давыдова В.Ю., Бекстеда М.В., Ховарда В.М., Фингера М.), посвященных алюминизированным взрывчатым веществам и их свойствам, ряд принципиальных вопросов, связанных с параметрами детонации, поведением частиц в детонационной волне, процессами догорания частиц алюминия, остаются невыясненными. Основной проблемой в данной области остается сложность прямого экспериментального наблюдения за процессом окисления частиц алюминия газообразными ПД конденсированных ВВ. Поэтому изучение данных процессов возможно только косвенными методами, доступными непосредственному экспериментальному наблюдению. Вследствие этого фундаментальные вопросы о кинетических закономерностях окисления алюминия при детонации ВС данного класса остаются и на сегодняшний день открытыми. Для объяснения несоответствия между фугасными и бризантными формами взрыва существует множество гипотез (Троцюк А.В., Гришкин А.И., Дубнов Л.В., Давыдов В.Ю., Воскобойников И.М., Гоголя М.Ф., Анискин А.И., Бердхолд Д., Фингер М. и др.), связанных с механизмами окисления алюминия. Однако выводы авторов относительно кинетики горения алюминия и его реакционной способности сильно расходятся.

Целью диссертационной работы является математическое моделирование процессов детонации алюминизированных взрывчатых веществ. Комплексное рассмотрение процессов детонации алюминизированных взрывчатых веществ, изучение основных экспериментальных закономерностей.

Задачи исследования.

1. Исследование основных закономерностей процесса детонации алюминизированных взрывчатых веществ.

2. Исследование процессов окисления частиц алюминия в детонационной волне. Математическое моделирование взаимодействия частиц алюминия с продуктами детонации.
3. Математическое моделирование процессов детонации АВС с использованием модифицированных уравнений состояния для продуктов детонации с учетом вторичного энерговыделения.
4. Исследование взаимодействия продуктов детонации алюминизированных взрывчатых составов на контактной границе ПД с внешней средой.

Метод исследования. В настоящей работе исследование процессов взрыва зарядов алюминизированных взрывчатых составов проводилось с применением как экспериментальных, так и расчетно-теоретических методов. Из-за сложности прямого наблюдения за процессом окисления алюминия в процессе взрыва, основным методом исследования являлось математическое моделирование взрыва АВС. Были предложены уточненные (модифицированные) уравнения состояния для ПД, математические модели взаимодействия АВС с ПД и окружающей средой. С их помощью были проведены численные расчеты процессов взрыва алюминизированных взрывчатых составов.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Численно показано, что процесс горения частиц алюминия возможен в зоне химической реакции (ЗХР).
2. Предложено модифицированное уравнение состояния для взрывчатых веществ с учетом вторичного энерговыделения.
3. В результате проведенных численных расчетов установлено, что метательная способность (МС) зарядов АВС сильно зависят от времени начала выделения дополнительной энергии в различных слоях ВВ. При варьировании времени начала выделения дополнительной энергии удалось описать эффекты, наблюдаемые в эксперименте.

Практическая ценность.

1. Определенное в работе оптимальное содержание алюминия в смесях с А-IX-1 и окфолом-3,5, а также учет «эффекта догорания» ПД для ВВ с отрицательным кислородным балансом и для АВС позволяет выработать практические рекомендации по оптимизации габаритно-массовых характеристик и рецептур АВС.
2. Разработанные математические модели и методики численного анализа, позволяют адекватно описывать процессы детонации АВС.
3. Предложенные уточненные (модифицированные) уравнения состояния продуктов детонации АВС, учитывающие вторичное энерговыделение, позволяют достоверно описывать экспериментальные результаты при численном моделировании.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Показано существенное влияние процессов догорания ПД АВС в воздухе на метательное действие и скорость расширения ПД. При этом с увеличением скорости движения ПД в воздухе эффект догорания проявляется сильнее.
- Проведено численное моделирование прохождения детонационной волны по частице алюминия. Показано, что в детонационной волне происходит разрушение и снос оксидной пленки с поверхности частицы алюминия. На основе этих расчетов была предложена математическая модель, согласно которой горение частиц алюминия начинается непосредственно в зоне химических реакций.
- Предложено модифицированное уравнение состояния продуктов детонации, включающее в себя время горения частиц алюминия и количество выделенного в данном процессе тепла.
- Проведена численная оценка влияния эффектов сгорания добавок алюминия на метательное действие зарядов, а также определены количества прореагировавшего алюминия при различных условиях протекания реакции.
- Проведено моделирование процессов радиального и торцевого расширения продуктов детонации ПД. Предложена модель, определяющую роль в наблюдаемых скоростях расширения продуктов детонации играют множественные кумулятивные струи, образующиеся на поверхности прессовых зарядов ВВ в процессе разлета ПД.
- Проведено численное моделирование процессов детонации зарядов А-IX-1 и А-IX-1 + 10% Al с учетом дополнительного энерговыделения и его влияния на метательное действие оболочек и пластин. Показано, что расчетные данные по скорости метания пластин и оболочек сильно зависят от времени выделения дополнительной энергии в продуктах детонации.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечиваются строгостью математических постановок, разработкой адекватных физико-математических моделей, устойчивостью и сходимостью используемых численных методов, тестированием вычислительных алгоритмов, а также сравнением результатов численного моделирования с результатами экспериментальных и расчетно-теоретических исследований других авторов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований докладывались на научно-технических конференциях «Проектирование систем» в МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва в 2014, 2015, 2016 гг.; на научной конференции «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», г. Саров в 2013, 2015 гг.; на Всероссийской научно-технической конференции «Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов», г. Нижний Тагил, 2013, 2014 г.г.; на Международной конференции «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск, 2014г., на конференции «Харитоновские тематические научные чтения», г. Саров, 2015г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 15 работах, включая 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и в 10 статьях и тезисах докладов в материалах тематических конференций.

Личный вклад. Соискатель принимал непосредственное участие в проведении экспериментальных работ по данной тематике и компьютерной обработке полученных результатов; в проведении расчетно-теоретических исследований по определению основных закономерностей взрыва АВС; в разработке физико-математических моделей и методик, получении модифицированных уравнений состояния, учитывающих вторичное энерговыделение АВС; в проведении численных расчетов, моделирующих вторичное энерговыделение АВС при прохождении детонационных волн.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованной литературы из 107 наименований, изложена на 89 стр., иллюстрируется 36 рисунками, содержит 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 посвящена анализу современных воззрений в области исследования конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) с металлическими добавками. Интерес к таким составам обусловлен возможностью увеличения метательного действия ВВ. С точки зрения фундаментальной науки смеси ВВ-металл интересны как пример неидеальной детонации. Для таких составов взаимодействие между компонентами может продолжаться в фазе сильного расширения продуктов детонации. Использование смесевых и, в первую очередь, алюминизированных ВВ имеют явное преимущество по суммарной энергоемкости состава. Повышение теплоты взрыва положительно сказывается на работоспособности ВВ (его фугасном действии), тогда как скорость детонации, давление продуктов детонации (ПД) в плоскости Чепмена-Жуге(Ч-Ж) и бризантное действие снижаются.

Относительно же эффективности алюминизированных ВВ применительно к метательной способности среди разных авторов (Пепекин В.И., Губин С.А., Давыдов В. Ю., Гогоуля М.Ф., Махов М.Н., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А.) существует ряд противоположных мнений, от отсутствия повышения МС взрывчатым составом при введение в его состав алюминия, до существенного повышения МС при 15%-ом содержании алюминия в октогене или гексогене. Настолько разные точки зрения можно объяснить тем, что разные авторы используют различные способы регистрации процесса метания и методы математической обработки данных. Кроме того, под скоростью метания одни авторы понимают радиальную скорость оболочки, другие же реальную скорость с учетом угла разворота оболочки. Одно можно утверждать точно, что максимальное выделение энергии, связанное с окислением Al, а вместе с ней и трансформация в полезную работу взрыва, происходит при некоторой степени расширения ПД. В частности, для композиций с алюминием при метании по методике М-40 на конечном участке регистрации скорости пластины, характерным является её положительный градиент. Это свидетельствует о том, что энергетические возможности таких составов к конечной фазе ещё не исчерпаны.

Большой интерес представляет также вопрос повышения метательной способности взрывчатых веществ за счет добавки металлического горючего разной дисперсности, а также кислородный баланс ВВ-основы. Среди разных авторов (Гоголя М. Ф., Бражников М. А., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Давыдов В.Ю.) в данном вопросе также существуют серьезные противоречия и противоположные точки зрения по поводу перспектив использования нанодисперсного алюминия в составах метательного действия. В данном случае разные авторы также приводят противоречивые данные: некоторые говорят об отсутствии эффекта при использовании нанодисперсного металла, другие же приводят данные, показывающие увеличение теплоты взрыва и метательной способности при метании АВС с нанодисперсным алюминием. Сложности в сопоставлении результатов также связана с тем, что часто в статьях не указан размер самих зерен ВВ. Как видно из экспериментов, в случае с более мелким ВВ, метательная способность выше на 2-3%.

Понять причины, по которым не получается реализовать на практике повышение детонационных характеристик мощных ВВ, имеющих в своем составе алюминий, а также объяснить несоответствия между фугасными и бризантными формами работы взрыва алюминизированных ВВ, включая их метательное действие, весьма трудно. Трудности заключаются в невозможности прямого наблюдения за процессом окисления алюминия продуктами детонации конденсированных ВВ и в сложности теоретического описания физико-химических процессов детонации гетерогенных металлизированных ВВ. Поэтому в литературе существует множество гипотез, связанных с процессом окисления алюминия в продуктах детонации (Троцюк А.В, Гришкин А.И., Дубнов Л.В., Давыдов В.Ю, Воскобойников И.М., Гоголя М.Ф., Анискин А.И., Бердхолд Д., Фингер М.). Расчёты детонационных свойств алюминизированных ВВ в большинстве литературных источников сделаны на основе термодинамического описания состояния ПД в плоскости Ч-Ж и не учитывают реального механизма взаимодействия алюминия с ПД.

Неясным также остается вопрос об определении механизма и времени взаимодействия металлической добавки с ПД. В настоящее время существуют разные точки зрения на эту проблему (Давыдов В.Ю., Клименко В.Ю., Долгобородов Ю.А., Arnold W., Rottenkolber E. и др.). Большинство исследователей (Давыдов В.Ю., Семенов И.А., Arnold W., Rottenkolber E., Donahue L., Ripley R.C., Kim C.-K., Hwang J.-S.) считает, что добавка реагирует в фазе сильного расширения продуктов детонации. Подтверждением этой точки зрения является наблюдаемый в эксперименте прирост скорости метания пластин. Хотя не исключено, что алюминий может просто выступать как катализатор или менять ход реакции. Чтобы проанализировать поведение добавки в зоне химической реакции, сопоставляются экспериментальные данные с результатами теоретических расчетов параметров смеси в предположении различного механизма влияния добавки. Возможности такого подхода ограничены, поэтому не удивительно, что в разных источниках (Имховик Н.А., Давыдов В.Ю., Семенов И.А., Arnold W., Rottenkolber E., Donahue L., Ripley R.C., Kim C.-K., Hwang J.-S, Беляев А.Ф., Мейдер Ч., McGuire R.R., Tao W.S) можно

видеть существенно различающиеся значения от 0% до 70%. Для выяснения данного вопроса и составления достоверных моделей, необходима регистрация как всего комплекса детонационных характеристик, относящихся к состоянию Ч-Ж, так и более поздних стадий разлета ПД.

Необходимость прогнозирования детонационных характеристик ВВ и общей работоспособности (фугасности) продуктов взрыва (ПВ) стимулирует развитие термодинамических методов для расчета параметров детонации. Разработанные к настоящему времени коды позволяют с хорошей точностью рассчитывать параметры идеальной детонации индивидуальных взрывчатых веществ. Для смесевых составов ВВ ситуация более сложная, поскольку в данном случае большие трудности вызывает расчет степени завершенности химических реакций, протекающих в детонационной волне. В частности, для смесевых ВВ с добавкой алюминия нет окончательной ясности о степени его окисления в точке Чепмана-Жуге. Поэтому термодинамические расчеты параметров детонации проводятся при условном допущении определенной степени окисления алюминия.

Необходимость прогнозирования детонационных характеристик ВВ привело к развитию теоретических методов описания процессов детонации. Прогнозирование давления детонации традиционно осуществляется через условие Чепмана-Жуге (С-Ж) термодинамической теории детонации. Эта теория подразумевает, что термодинамическое равновесие достигается мгновенно. Существуют термодинамические компьютерные коды, такие как ВКВ, RUBY, TIGER, CHEQ, CHEETAN (в С версии TIGER), AUTODYN, LS-DYNA, и др., которые позволяют найти параметры детонации отдельных взрывчатых веществ с хорошей точностью. В этих кодах используются эмпирические уравнения состояния (УРС), такие как Бейкер-Кистяковский-Вилсон (ВКВ-ЕОС), Джейкобс-Копертвайт-Звислер (JСZ-ЕОС) и Кихара-Хакита-Танака (КНТ-ЕОС), JWL, JWLB, соответствующие экспериментальным данным для конкретных взрывчатых веществ. В определенных условиях эти уравнения состояния могут довольно точно отражать термодинамические свойства и многокомпонентных смесей, хотя численные термодинамические расчеты параметров детонации АВС, как правило, осуществляются при условии определенной степени окисления алюминия. В большинстве случаев предполагается, что реакция алюминия происходит за фронтом реакции, в ходе расширения газообразных продуктов детонации. Т.е. частицы алюминия выступают как инертный ингредиент. Такой подход является простым, и в ряде задач дает неплохое согласование с экспериментальными результатами.

Время от времени, в литературе возникают альтернативные методы оценки детонационных параметров алюминизированных взрывчатых веществ, основанные на рассмотрении химического состава смесевых взрывчатых веществ с формулой $C_aH_bN_cO_dAl_e$. Подобные методы являются перспективными, но требуют сложных компьютерных кодов и хорошего понимания происходящих в зоне химических реакций процессов. Среди подобных кодов, можно отметить компьютерный код EDPHT способный предсказывать скорость детонации, давление, теплоту взрыва,

температуру детонации, скорость Гарни, адиабаты и удельные импульсы взрывчатых веществ с общей формулой $C_aH_bN_cO_d$. Этот код может быть использован для прогнозирования скорости детонации и давления смесевых ВВ, имеющих общую формулу $C_aH_bN_cO_dAl_e$. Данный код не требует прогнозирования степени окисления алюминия в ЗХР, но его использование возможно только в узком спектре рассматриваемых задач.

Глава 2 посвящена описанию полученных экспериментальных результатов взаимодействия продуктов детонации конденсированных ВВ с окружающим воздухом.

Впервые экспериментально показано, что энергия сгорания алюминия реализуется в осевом и радиальном направлениях не одинаково и убывает с ростом толщины оболочки. С увеличением толщины оболочки эффект от добавки алюминия не возрастает, как принято считать, а снижается. При увеличении толщины оболочки с 2 до 10мм удельная (отнесенная к единице длины) энергия оболочки для А-IX-1 и для А-IX-1 +10%Al возрастает. В то же время, эффект от добавки Al по скорости разлета снижается с 17 до 11%. Таким образом, увеличение времени отбора энергии в 5 раз, с 3 до 15мкс, снижает прирост скорости и энергии оболочек. Введение Al приводит к уменьшению скоростей метания пластины на 3-5%. Данные результаты можно связать с отставанием зоны реакции Al от фронта детонационной волны.

Был рассмотрен вопрос по определению оптимального содержания алюминия во взрывчатых смесях, для достижения максимальной скорости метания оболочек. Показано, что для взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом оптимальное количество добавки алюминия составляет 10-15%. В промышленности же чаще используют взрывчатые вещества с 20% добавкой алюминия.

Для того, чтобы показать, как влияет окружающий воздух на скорость расширения продуктов детонации и метательную способность, были проведены эксперименты в барокамере с остаточным давлением 10кПа. Было показано, что на ранних стадиях расширения продуктов детонации, при слете с торца в разреженную атмосферу, скорость воздушной ударной волны для смеси А-IX-1 с 10% алюминием ниже, чем для А-IX-1. При разлете продуктов детонации на 30мм от начального радиуса заряда, значение скорости ударной волны для алюминизированной смеси начинает превышать данные показатели для А-IX-1. Исследования в воздухе показали обратную картину: значения скорости воздушной ударной волны для смеси А-IX-1+10% алюминия выше на всем участке наблюдения.

Метательная способность взрывчатых составов исследовалась по известной методике М-40. Зависимости скоростей метания пластин от плотности зарядов определялись для флегматизированного октогена (окфола-3,5), бис-(2,2,2-тринитроэтил) нитрамина (БТНЭНА), а также их смесей с 15% (масс.) алюминия. Были получены зависимости удельной энергии пластины от плотности зарядов для Окфола-3,5, БТНЭНА и их смесей с алюминием, представленные на Рис. 1. Из данных графиков видно, что происходит увеличение угла наклона зависимостей $W_2(\rho)$ с ростом расстояния ускорения пластин для Окфола-3,5, имеющего

отрицательный кислородный баланс (-33%), что связано с догоранием ПД на воздухе. А для БТНЭНА, молекула которого имеет 40% избыточного кислорода, данного эффекта не наблюдается.

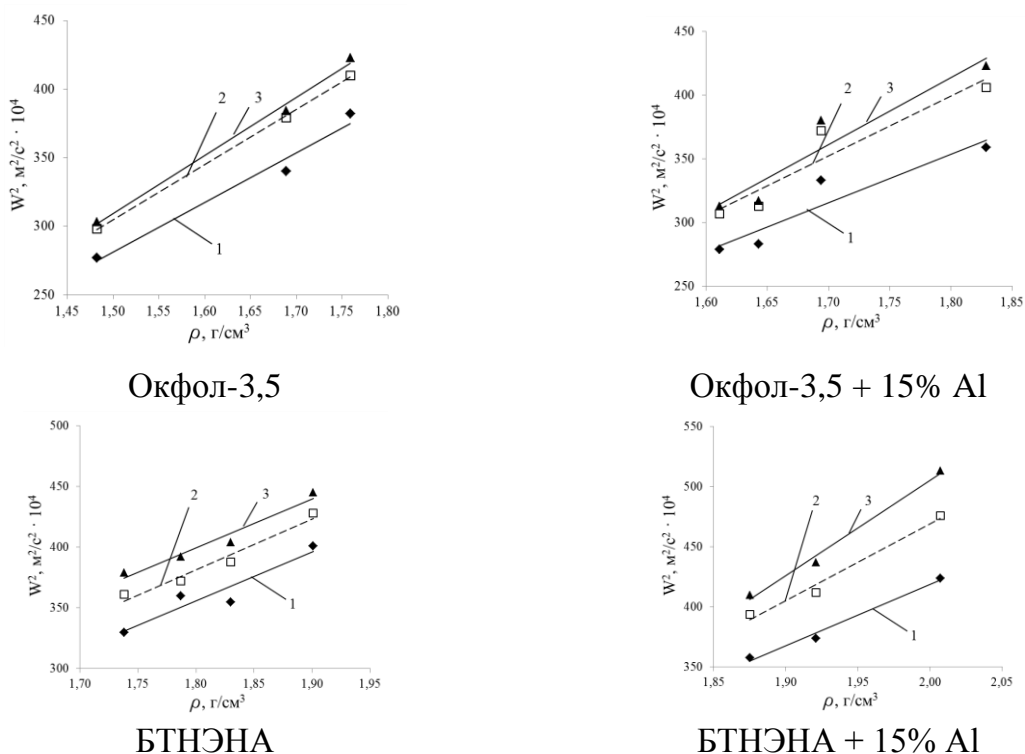


Рисунок 1. Зависимости удельной энергии пластин от плотности зарядов для Окфола-3,5, БТНЭНА и их смесей с алюминием. Расстояния ускорения пластин: 1 – 20 мм, 2 – 30 мм, 3 – 40 мм.

Возрастание эффекта при добавлении к ВВ дисперсного алюминия, в свою очередь, связано с большим тепловым эффектом реакций окисления алюминия по сравнению с реакциями окисления горючих компонентов ПД и свидетельствует о неполноте сгорания Al в ПД не только ВВ с отрицательным кислородным балансом, но и в смесях с ВВ- окислителями.

Глава 3 посвящена:

- а) разработке математических моделей процессов взрыва заряда АВС с учетом эффекта догорания продуктов детонации во времени,
- б) описанию модели разрушения оксидной пленки и кинетике процесса горения металлизированных ВВ,
- в) разработке методики оценки количества прореагировавшего алюминия в процессе взрыва
- г) рассмотрению вопросов детонации алюминизированных ВВ с учетом вторичного энерговыделения.
- д) мат. моделированию детонации и взрыва алюминизированных ВВ.
- е) мат. моделированию процессов разлета ПД в воздухе и вакууме.

Модель разрушения оксидной пленки при ударно-волновом сжатии включает в себя химическое взаимодействие частиц металла с продуктами детонации ВВ преимущественно в твердой фазе, и при давлениях выше 3 ГПа. При ударно-

волновом нагружении происходит разрушение оксидной пленки за характерное время $t_l = 1-10$ нс. Вследствие различия в ударных сжимаемостях ВВ, оксида и алюминия за ударным фронтом детонационного комплекса происходит обтекание частиц алюминия разлагающимся ВВ. В результате происходит снос оксида с поверхности алюминия, обеспечивается подвод окислителей к поверхности частицы и снос продуктов реакции. При сгорании алюминия вследствие перераспределения энергии между упругой и тепловой в пользу последней с увеличением полноты сгорания Al степень снижения параметров детонации должна возрастать. Другими словами, чем больше снижение скорости детонации, тем больше полнота сгорания добавки в ПД.

Было проведено численное моделирование сноса оксидной пленки с поверхности алюминия (Рис. 2). Для описания керамики использовалась модель Джонсона-Холмквиста. Показано, что разрушение керамической пленки Al_2O_3 происходит сразу же во фронте детонационной волны. На Рис. 3а. видно, что степень поврежденности оксидной пленки по модели Джонсона-Холмквиста во фронте детонационной волны составляет 100%, что свидетельствует о её разрушении. Предел текучести для керамики Al_2O_3 перед детонационной волной равен 38 кбар, а сразу же за фронтом падает до нуля. Перепад скорости на границе частицы равен, примерно 700 м/сек.

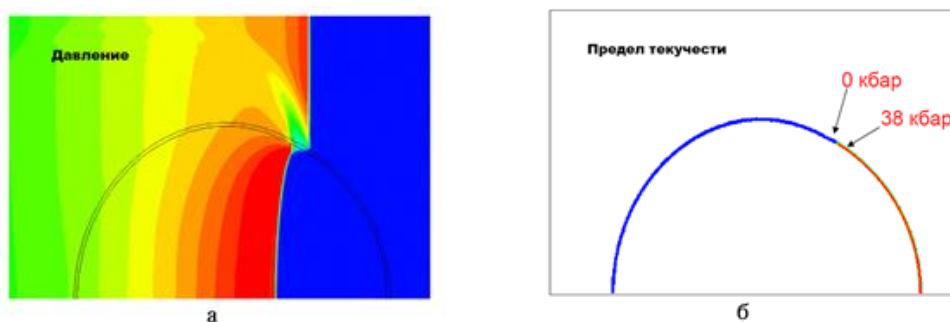


Рисунок 2. а) Сечение, проходящее через центр частицы алюминия
б) Разрушение оксидной пленки во фронте детонационной волны

Рассчитанные давление, степень поврежденности и профиль скорости в центральном сечении частицы алюминия приведены на Рис.2, 3.

В работе было показано, что чем меньше сжимаемость добавки (частиц алюминия), тем выше скорость горения алюминия в ДВ, так как возрастает градиент массовых скоростей между ПД и алюминием, что является определяющим макрокинетическим фактором процесса горения металлических частиц.

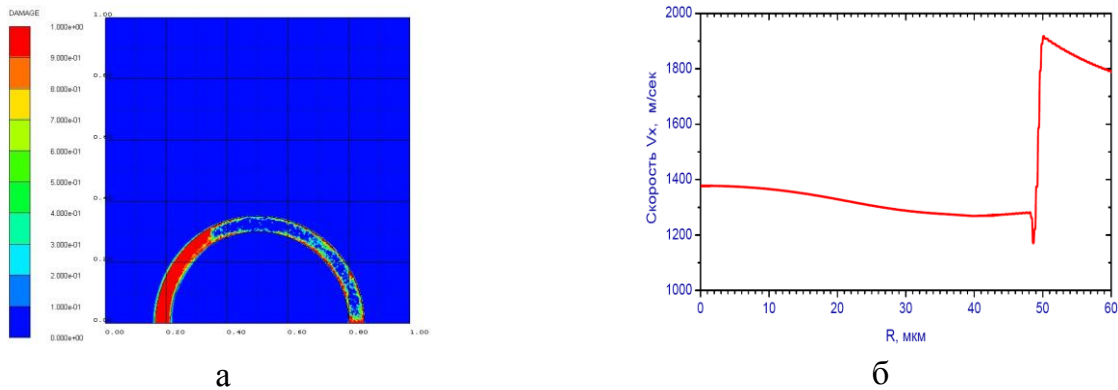


Рисунок 3. а) Степень поврежденности оксидной пленки для времени $t = 0,54$ мкс б) Профиль скорости V_x , в сечении, проходящем через центр частицы алюминия

Процесс сноса оксидной пленки и горения алюминия в детонационной волне является быстрым и ограниченным во времени. Масса сгоревшего в детонационной волне алюминия равна m_{ALD} . Выделенная энергия равна Q_{ALD} . За процессом горения алюминия в детонационной волне начинается процесс разогрева, плавления и горения частицы в ПД. В главе приводится вывод уравнений для расчёта горения частиц алюминия в продуктах детонации. Скорость послыоного горения частицы алюминия описывается выражением:

$$-\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{4/3\pi R_0^3} aP^n 4\pi R_0^2 (1-\lambda) = KP^n (1-\lambda)^{2/3} \quad (1)$$

где K, n – калибровочные параметры.

Холодный алюминий успевает нагреться только на 200-300 градусов в детонационной волне за счет ударно-волнового воздействия. Затем алюминий значительную часть времени прогревается до температуры плавления и до достижения температуры, при которой происходит его сгорание. По сравнению с временем распространения детонационной волны, это долгий процесс, требующий больших энергетических затрат. В продуктах детонации к моменту, когда алюминий начинает гореть, свободного кислорода практически не остается. Единственным источником кислорода, необходимого для горения алюминия, становится кислород, содержащийся в окружающей среде. Для описания данного процесса необходимы модифицированные уравнения состояния, которые будут включать в себя кинетику горения алюминия, как в продуктах детонации, так и со свободным кислородом воздуха.

Для определения поведения продуктов детонации используется уравнение состояния в форме JWL. Для учета дополнительного энерговыведения при сгорании алюминия в кислороде воздуха разработаны два различных метода.

Первый метод основан на использовании уравнения состояния для поведения продуктов детонации в форме JWL

$$P = P_{20} + \frac{\omega \Delta E}{V}, \text{ где } P_{20} = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

В этом методе давление явно зависит только от части $\Delta E = \lambda Q$ энергии полного сгорания алюминия Q , выделяемой при реакции алюминия.

Второй метод основан на добавлении определенной энергии ΔE к текущему значению внутренней энергии в расчетной ячейке (содержащей ПД) в течение определенного времени с заданной задержкой. Задержка вычисляется относительно времени прихода в расчетную ячейку детонационной волны. Величина добавки к энергии вычислялась по формуле: $\Delta E = \lambda Q$, где λ – доля сгоревшего алюминия, а Q – удельная теплота сгорания всей алюминиевой добавки. Этот метод похож на первый, но для данного класса процессов является универсальным.

Для определения достоверности уравнений состояния в форме JWL были проведены серии численных расчетов по моделированию метания стальных, медных оболочек, а также пластин разной длины и толщины. Также было проведено моделирование метания пластины зарядами флегматизированных гексогена и октогена в условиях методики М-40.

Постановка задачи. Моделирование поведения метаемых оболочек и пластин производилось с позиции механики деформируемого твердого тела. Система исходных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= 0 \\ \rho \frac{du}{dt} &= \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \\ \rho \frac{de}{dt} &= \sigma_r e_r + \sigma_\theta e_\theta + \sigma_z e_z + 2\sigma_{rz} e_{rz} \\ e_r &= \frac{\partial u}{\partial r}, \quad e_\theta = \frac{u}{r}, \quad e_z = \frac{\partial v}{\partial z}, \quad e_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \\ e_m &= \frac{1}{3r} \left(\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad \frac{Ds_r}{Dt} = 2G(e_r - e_m - \lambda s_r), \quad \frac{Ds_\theta}{Dt} = 2G(e_\theta - e_m - \lambda s_\theta) \\ \frac{Ds_z}{Dt} &= 2G(e_z - e_m - \lambda s_z), \quad \frac{Ds_{rz}}{Dt} = 2G(e_{rz} - \lambda s_{rz}), \quad \lambda = \frac{3}{2Y^2} (s_r e_r + s_\theta e_\theta + s_z e_z + 2s_{rz} e_{rz}) \\ p &= p(\rho, e), \quad \sigma_r = -p + s_r, \quad \sigma_\theta = -p + s_\theta, \quad \sigma_z = -p + s_z, \quad \sigma_{rz} = s_{rz} \end{aligned}$$

Здесь $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial r + v\partial/\partial z$ – материальная временная производная; u, v – скорости вдоль осей r, z ; ρ – плотность; p – давление; e – удельная внутренняя энергия; u, v скорости по направлениям r и z ; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{rz}$ – компоненты тензора напряжений; $s_r, s_\theta, s_z, s_{rz}$ – компоненты девиатора напряжений. Далее $e_r, e_\theta, e_z, e_{rz}$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{rz}$ – средняя скорость деформации, D/Dt – временная производная Яуманна; G – модуль сдвига; Y – предел текучести среды; λ – скалярный множитель, определяемый из условия идеальной пластичности Мизеса $\frac{3}{2}(s_r^2 + s_\theta^2 + s_z^2 + 2s_{rz}^2) = Y^2$. В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса и энергии, кинематические соотношения, уравнения пластического течения по теории

Прандтля – Рейсса, уравнения состояния среды, связь компонент тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими.

При обнулении девиатора напряжений уравнения упруго-пластического течения переходят в уравнения газовой динамики, которые применялись для расчета течений продуктов детонации

$$\frac{\partial u}{\partial r}u + \frac{\partial u}{\partial z}v + \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$\frac{\partial v}{\partial r}u + \frac{\partial v}{\partial z}v + \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho ru)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial r}u + \frac{\partial e}{\partial z}v - \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial r}u + \frac{\partial \rho}{\partial z}v \right) = 0, \quad p = p(\rho, E)$$

Численное моделирование проводилось методом сквозного счета на равномерной эйлеровой (неподвижной) сетке с помощью пакета программ RUSS-2D. В расчетах учитывалось предложенное уточненное уравнение состояния в форме JWL, учитывающее дополнительную энергию, выделяемую при сгорании алюминия.

Результаты расчетов. В случае идеального плоского фронта детонационной волны на границе раздела взрывчатое вещество (ВВ) - воздух (вакуум) расчетные данные по скорости расширения ПД оказались существенно (до 3,3 раз) ниже экспериментальных данных. Было выдвинуто предположение, что причиной такого несоответствия могут являться микрокумулятивные струи, которые порождаются микродефектами в приповерхностном слое заряда и являются неизбежным следствием технологии прессования ВВ. Для проверки данного предположения проводилось моделирование зарядов из А-IX-1, содержащих на своей торцевой поверхности микропоры различной конфигурации. По результатам моделирования было установлено, что при схлопывании пор и микроканалов происходит образование микрокумулятивных струй, которые имеют скорость, значительно превышающую скорость детонационной волны, и обладают высокой локальной плотностью энергии. В ходе численных расчетов было показано, что скорость таких струй при схлопывании микропор у поверхности заряда достигает 12 км/с при срыве с торца, что согласуется с экспериментальными данными.

На Рис. 4, видно, что скорость расширения продуктов детонации в торцевом направлении, при моделировании зарядов с порами согласуется с экспериментальными данными.

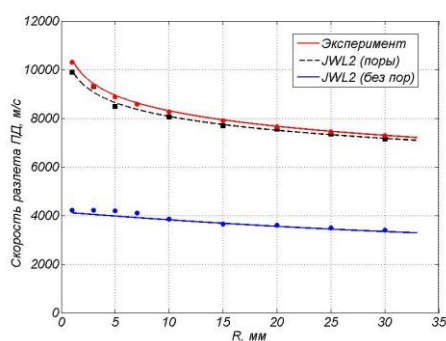


Рисунок.4. Скорость разлета ПД при срыве с торца пористых и беспористых зарядов А-IX-1 ($\rho=1,65\text{г/см}^3$)

В главе рассматриваются вопросы физико-математического моделирования процессов детонации алюминизированных ВВ с учетом вторичного энерговыделения. Особое внимание уделяется кинетике взаимодействия продуктов взрыва алюминизированных взрывчатых веществ со свободным кислородом воздуха. По экспериментальным данным, описанным в главе 2, когда наблюдалось снижение скорости пластины в случае добавления в состав заряда алюминия, в то время как скорость оболочки возрастала, было проведено численное моделирование. Постановка задачи моделирования данной методики представлена на Рис. 5.

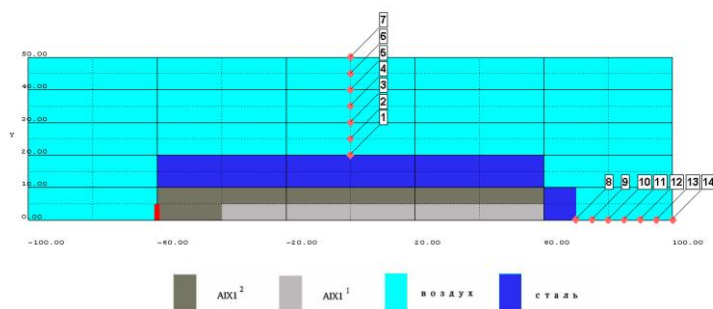


Рисунок 5. Схема численного моделирования детонации цилиндрического заряда AIX1+10% Al, помещенного в стальную оболочку.

Красной линией выделено «пятно» инициирования, представляющее собой площадку с диаметром, соответствующим размеру промежуточного детонатора. На противоположном торце в передней части заряда показана стальная пластина, в верхней части заряда – стальная цилиндрическая оболочка. Скорость разгона пластины определялась с использованием виртуальных датчиков. Использовались 7 датчиков в радиальном направлении и 7 в торцевом (обозначены номерами 1-14 на Рис. 1), зафиксированных в узлах расчетной сетки на одинаковом расстоянии друг от друга. По скачку плотности, зарегистрированному на датчике, определялось время прихода к нему материала пластины или оболочки в среднем сечении. На основании полученных времен прихода и известных расстояний между датчиками вычислялись скорости пластины и оболочки в заданных интервалах расстояний.

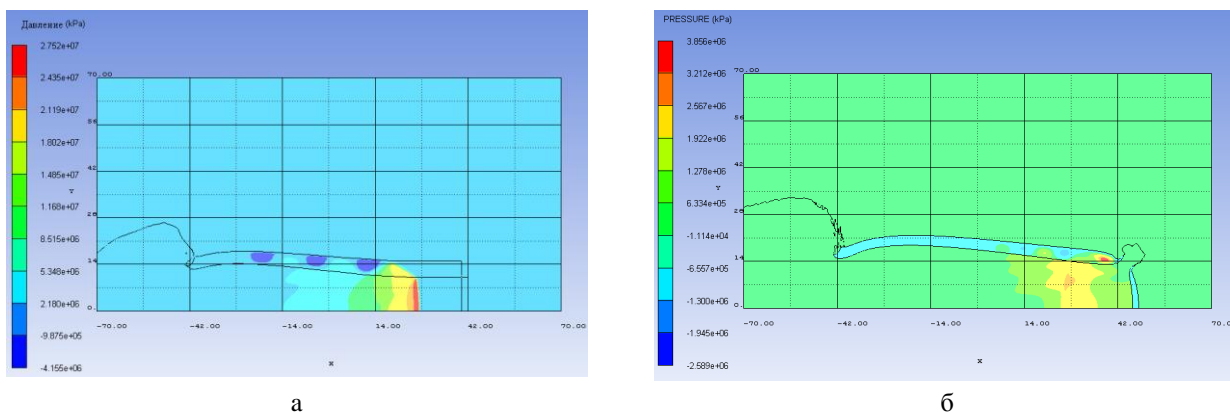


Рисунок 6. Численное моделирование. Распределение давления в цилиндрическом заряде при временах а) $t=7,84$ мкс б). $t=12,82$ мкс

Для учета процесса выделения энергии при сгорании алюминия в продуктах детонации добавлялась определенная энергия к текущему значению внутренней энергии в расчетной ячейке (содержащей ПД) в течение определенного времени с заданной задержкой. Задержка вычисляется относительно времени прихода в расчетную ячейку детонационной волны. Весь объем заряда был поделен на две области А—IX-1-1, А-IX-1-2, как показано на Рис.5. В первом случае время начала дополнительного энерговыделения в этих двух областях было одинаковым. Во второй серии численных экспериментов, время начала дополнительного энерговыделения было разным для двух областей. В первой серии экспериментов время энерговыделения длилось от 1 мкс до 100 мкс. Во второй серии экспериментов в области А-IX-1-1 время энерговыделения длилось от 1 мкс до 100 мкс, а в области А-IX-1-2 от 100 мкс до 100 мс. Данные значения времени энерговыделения были подобраны так, чтобы полученные результаты были близки или совпадали с экспериментальными значениями, а также не противоречили значениям времени, описанным выше. Результаты численных расчетов представлены в Таблице 1.

Таблица 1

	Эксперимент		Численное моделирование		
	АIX1, эксп.	АIX1+10%Al, эксп.	АIX1,	АIX1 ¹ + 10%Al, АIX1 ² +10%Al, t=1÷100мкс	АIX1 ¹ + 10%Al, t=1÷100мкс АIX1 ² +10%Al, t=0,1÷100мс
<i>l = 80 мм., δ=5мм</i>					
Скорость пластины, u , м/с	960±30	920±60 -4%↓	1020	1120 +9%↑	960 -6%↓
Скорость оболочки, v , м/с	860±30	980±50 +14%↑	880	950 +8%↑	940 +6%↑
<i>l = 120 мм., δ=10мм</i>					
Скорость оболочки, v , м/с	605±20	670±30 +11%↑	640	810 +26%↑	700 +9%↑

Было показано, что в случае, когда дополнительное выделение энергии начинается одновременно во всем объеме, наблюдается прирост по скорости как для оболочки, так и для пластины. В случае же выбранных указанным образом задержек по времени, скорость оболочки растет, в то время как скорость пластины незначительно снижается. Таким образом, показано, что с помощью варьирования времени дополнительного энерговыделения можно численно моделировать эффект, наблюдаемый в эксперименте.

В ходе проведенной работы также сделана серия численных расчётов, в которых производилось варьирование толщины внешнего слоя. Схема эксперимента полностью повторяла предыдущую задачу. Моделирование проводилось для трубок длиной 80мм, толщиной стенки 5мм. Толщины внешнего слоя составляла 5мм; 2,5мм; 1мм. Отметим, что результаты для 1мм в данном случае не приближаются к значениям, полученным для АIX1, а также к случаю одновременного выделения энергии в двух слоях одновременно. Это связано с тем, что энерговыделение для внутреннего слоя АIX1¹ + 10%Al для значительного диапазона по времени меньше, чем даже для АIX1. Проведенные исследования в первую очередь направлены для того, чтобы показать влияние толщины внутреннего и внешнего слоя на общую закономерность наблюдаемых скоростей. Полученные данные приведены в таблице 2:

Таблица 2

Толщина внешнего слоя	5мм	2,5мм	1мм
Скорость пластины, u, м/с	990	960	956
Скорость оболочки, u, м/с	970	940	911

Из этих данных видно, что важно правильно оценивать внешнюю толщину слоя для того, чтобы полученные в ходе численных расчетов результаты по скоростям метания, как оболочек, так и пластин, согласовались с результатами эксперимента. Данные исследования показывают, что выделяющаяся энергия при сгорании алюминия в различных слоях заряда может вносить различный вклад в общую полезную работу взрыва.

Для оценки реакционной способности алюминия также были предложены и проведены следующие опыты: тонкий слой алюминиевого порошка наносился непосредственно на боковую поверхность взрывчатого вещества и помещался в стальную оболочку диаметром 20мм, длиной 80мм и толщиной стенки 2мм. Инициирование заряда осуществлялось с двух сторон. Данная постановка эксперимента, в случае, если считать влияние алюминиевого порошка на кинетику разрушения оболочки несущественной, дает возможность оценить, как влияет сгорание алюминия в верхнем слое заряда на метательную способность. В случае инертности алюминия можно было ожидать замедления оболочки, так как алюминий в данном случае выступает как дополнительная масса, которая ускоряется

разлетающимися продуктами детонации. В случае реакции алюминия с продуктами детонации следовало ожидать небольшого прироста скорости. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

ВВ	Покрытие	M покр, г	ρ , г/см ³	$W_{R\ 1/2L}$, м/с	% в 1/2L
Окфол	-	-	1,76	2041±25	100
Окфол	АСД-1	1,66	1,77	2234±17	109,5

Как видно из полученных результатов, слой из порошка алюминия, нанесенного на заряд, дал прирост в скорости в 9%, что в свою очередь свидетельствует о реакции алюминия с разлетающимися продуктами детонации. Эти опыты особенно интересны тем, что заряд взрывчатого вещества, а также стальная оболочка в обоих случаях были одинаковыми. Различие заключалось лишь в тонком слое алюминия нанесенного на поверхность заряда.

Это позволяет в ходе численного моделирования провести оценку энергии, выделившейся в результате взаимодействия алюминиевого порошка с продуктами детонации. Алюминий в данном случае задавался двумя способами, как слой взрывчатого вещества (случай 1), модель поведения которого описывалось уравнениями состояния JWL, но с нулевой внутренней энергией, или как инертное вещество (случай 2). В данном случае параметры подбирались таким образом, чтобы алюминий вел себя как порошок, а не как монолитный слой металла. Схема численного эксперимента представлена на Рис. 6.

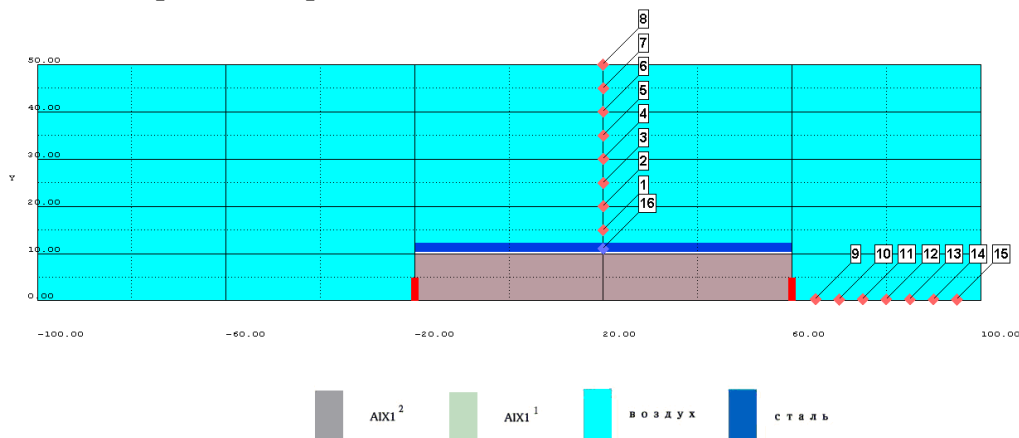


Рисунок 7. Схема численного моделирования детонации цилиндрического заряда AIX1+10% Al, помещенного в стальную оболочку.

Инициирование осуществлялось с двух сторон. Полученные результаты для разных энергий, заданных в слое алюминия, а также случай, когда алюминий задан как инертное вещество, представлены в Таблицах 4-5:

Таблица 4

	Эксперимент		Численное моделирование		
	окфол	окфол+ покр АСД-4	окфол	окфол + покр АСД-4 (случай 1)	окфол + покр АСД-4 (случай 2)
$v_{\text{оболочки}}$, м/с	860±30	980±50	880	980	870

Таблица 5

$E/E_{\text{полн.}}$	10%	30%	60%	80%	100%
$v_{\text{оболочки}}$, м/с	880	930	980	1020	1050

Как видно из Таблицы 5, лучшая сходимость с экспериментальными данными соответствует энергии 18МДж/кг, которая соответствует 60% от полной энергии сгорания алюминия. Данный метод позволяет оценить энергию, которая выделяется в самом верхнем слое взрывчатого состава и непосредственно участвует в трансформации энергии ВС в полезную форму работы взрыва.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование процессов детонации алюминизированных взрывчатых веществ. Изучено влияние металлических добавок с широким диапазоном физико-химических свойств на параметры детонации ВВ с отрицательным, нулевым и положительным кислородным балансом.

2. Показано существенное влияние процессов догорания продуктов детонации (ПД) в воздухе на метательное действие и скорость расширения ПД. Установлено, что с увеличением скорости движения ПД в воздухе эффект догорания проявляется сильнее.

3. Исследованы зависимости скорости детонации D от плотности заряда ρ для смесей Окфола-3,5 и А-IX-1 с дисперсным Al различных марок при различном массовом содержании добавок α . Показано, что зависимости $\partial D/\partial \rho(\alpha)$ имеют максимумы при $\alpha = 10...15\%$, положение которых совпадает с положением максимумов зависимостей метательной способности от α .

4. Предложена модель разрушения оксидной пленки на поверхности частиц алюминия при прохождении по ним детонационной волны. Численно смоделирован процесс прохождения детонационной волны по частицам алюминия. Показано, что при этом происходит разрушение и снос оксидной пленки. На основе полученных данных была разработана численная модель детонации для смесового ВВ с энергетической добавкой, включающая в себя уравнение кинетики сгорания металлической добавки. Для моделирования процессов детонации

алюминизированных взрывчатых составов было предложено модифицированное уравнение состояния JWL.

5. Проведена численная оценка влияния эффектов сгорания добавок алюминия на метательное действие зарядов, а также оценка количества прореагировавшего алюминия при различных условиях протекания реакции.

6. Предложена модель, согласно которой определяющую роль в наблюдаемых скоростях расширения продуктов детонации играют множественные кумулятивные струи, образующиеся на поверхности прессовых зарядов ВВ в процессе разлета ПД.

7. Проведено численное моделирование процессов детонации зарядов А-IX-1 и А-IX-1 + 10% Al с учетом дополнительного энерговыделения и его влияния на метательное действие оболочек и пластин. Показано, что расчетные данные по скорости метания пластин и оболочек сильно зависят от времени выделения дополнительной энергии в продуктах детонации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Давыдов В.Ю., Воронков С.И., Клименко В.Ю., Никитин А.Д. Особенности метания оболочек макетов ТБС при двустороннем инициировании // Вопросы обороны и техники. Изд-во СО РАН. 2014. Серия 14. Вып. 2. С. 18-22.
2. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Никитин А.Д., Потапов И.В. Об измерении скоростей разлета осколков в лабораторных и полигонных условиях // Вопросы обороны и техники. Изд-во СО РАН. 2014. Серия 14. Вып. 2. С. 23-27.
3. Никитин А.Д., Никитин И.С. Численное моделирование детонации с учетом вторичного энерговыделения // Научные технологии. 2015. № 6. С. 5-9
4. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Никитин А.Д., Потапов И.В., Григорьев Г.С. Влияние «эффекта догорания» на скорости метания пластин, осколков и давление воздушных ударных волн. // Вопросы обороны и техники. М.:НТЦ «Информтехника, 2015. Серия 14. Вып. 2. С.98-103
5. Давыдов В.Ю., Загрядцкий Ф.С., Никитин А.Д. Численное моделирование разлета продуктов детонации и метания пластин для флегматизированных гексогена и октогена с учетом образования микрокумулятивных струй. // Вопросы обороны и техники. М.:НТЦ «Информтехника, 2015. Серия 14. Вып. 2. С.151-158

Публикации в других изданиях:

6. Davydov V. Yu., Zagryadckiy F.S., Nikitin A.D. Numerical modeling of detonation product's expansion and plate acceleration by phlegmatized hmx and rdx. Abstracts of the 10th Seminar on New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter. Pardubice. Chech. Rep. 2014. P.8
7. Давыдов В.Ю., Воронков С.И., Клименко В.Ю., Никитин А.Д. и др. Особенности метания оболочек макетов ТБС при двустороннем инициировании. Сборник докладов VIII научной конференции «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров. 2014. С. 22-26
8. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Никитин А.Д., Потапов И.В., Григорьев Г.С. «Эффект догорания» при двустороннем инициировании осколочных макетов. Материалы XLI Научно-технической конференции «Проектирование систем». Т.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, М.,2014, С.106 – 108.
9. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Никитин А.Д., Потапов И.В., Григорьев Г.С. О методах оценки фугасного действия взрыва. Материалы XLI Научно-технической конференции «Проектирование систем». Т. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, М.,2014, С.103 – 105.

10. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Загрядцкий Ф.С., Никитин А.Д., Потапов И.В. «Эффект догорания» продуктов детонации в зависимостях метательной способности от плотности заряда. Материалы 42й Научно-технической конференции «Проектирование систем», МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2015, (в печати)

11. Давыдов В.Ю., Загрядцкий Ф.С., Никитин А.Д. Численное моделирование разлета продуктов детонации и метания пластин для флегматизированных гексогена и октогена. Материалы 42й Научно-технической конференции «Проектирование систем», МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2015, (в печати)

12. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Никитин А.Д., Потапов И.В. «Эффект догорания» продуктов детонации в зависимостях метательной способности от плотности заряда. Сборник тезисов XII Международной конференции «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск. 2014. С.86 (<http://vniitf.ru/meropriyatiya/zababakhinskie-nauchnye-chteniya/znch-2014-xii-mezhdunarodnaya-konferentsiya/1723-trudy-znch-2014>)

13. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Никитин А.Д., Потапов И.В., Григорьев Г.С. Влияние «эффекта догорания» при двустороннем инициировании зарядов в стальной оболочке. Сборник тезисов XII Международной конференции «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск. 2014. С.110 (<http://vniitf.ru/meropriyatiya/zababakhinskie-nauchnye-chteniya/znch-2014-xii-mezhdunarodnaya-konferentsiya/1723-trudy-znch-2014>)

14. Давыдов В.Ю., Загрядцкий Ф.С., Никитин А.Д. Численное моделирование разлета продуктов детонации и метания пластин для флегматизированных гексогена и октогена, Сборник тезисов XII Международной конференции «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск. 2014. С.90 (<http://vniitf.ru/meropriyatiya/zababakhinskie-nauchnye-chteniya/znch-2014-xii-mezhdunarodnaya-konferentsiya/1723-trudy-znch-2014>)

15. Губин А.С., Загрядцкий Ф.С., Никитин А.Д., Потапов И.В. Зависимость метательной способности от плотности заряда на различных расстояниях регистрации. Журнал «Успехи химии и химической технологий» (в печати)