

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Никитин Алексей Дмитриевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
д.ф-м.н., профессор.

И.С. Никитин

Москва – 2017

Оглавление

Список принятых сокращений и основных обозначений	4
Введение	5
Глава 1. Обзор литературы по теме детонации взрывчатых веществ с алюминием.	10
1. 1 Основные этапы развития взрывчатых веществ.....	10
1.2. О детонации смесей взрывчатых веществ с алюминием.....	11
1.3. Обзор термодинамических методов для математического расчета параметров детонации.	19
Глава 2. Взаимодействие продуктов детонации конденсированных ВВ с окружающим воздухом.....	27
2.1. Постановка экспериментов и основные результаты по метанию оболочек и пластин	27
2.2. Определение оптимального содержания алюминия в смесях с А-IX-1 и окфолом-3,5 для достижения максимальной скорости метания оболочек. 30	30
2.3 Разлет продуктов детонации А-IX-1 и его смесей с дисперсным алюминием.....	31
2.4 Исследования метательной способности взрывчатых составов по методике М-40.....	34
2.5 «Эффект догорания» при двухстороннем инициировании зарядов в стальных оболочках	37
2.6. Электронно-микроскопические исследования частиц алюминия АСД-1 и АСД-4	43
2.7 Изучение профилей давления продуктов детонации алюминизированных ВВ при истечении через щели	47
2.8 Обработка экспериментальных результатов рентгено-импульсной съемки. Определение скоростей разлета трубок.....	49
Глава 3. Обработка экспериментальных результатов с использованием математических методов и алгоритмов интерпретации полученных данных. Математическое моделирование разлета продуктов детонации и метания тел различной конфигурации для взрывчатых веществ и алюминизированных взрывчатых составов.	53
3.1 Численное моделирование взаимодействия частиц алюминия с детонационной волной.	53

3.1.1 Модель разрушения оксидной пленки при ударно-волновом сжатии.	53
3.1.2 Модель для линейной скорости горения частиц алюминия.....	58
3.2 Составления уравнений состояния JWL с учетом эффекта догорания продуктов догорания во времени.	59
3.2.1 Уравнение состояния JWL	59
3.2.2. Уравнения состояния JWL с учетом эффекта догорания продуктов догорания со временем.	61
3.3. Постановка задачи моделирования.	62
3.4. Численное моделирование методики М-40, а также разлета ПД зарядов без оболочки	65
3.5. Численное моделирование с учетом вторичного энерговыделения.	71
Заключение	80
Список литературы	82

Список принятых сокращений и основных обозначений

ВС	-	взрывчатый состав
ОДС	-	объемно-детонирующий состав
АВС	-	алюминий-содержащий взрывчатый состав
ПД	-	продукты детонации
ТБС	-	термобарический состав
МС	-	метательная способность
ВВ	-	взрывчатое вещество
ДВ	-	детонационная волна
ПВ	-	продукты взрыва
ЗХР	-	зона химической реакции
СУВ	-	скорость ударных волн
ВУВ	-	воздушная ударная волна
КБ	-	кислородный баланс
УВ	-	ударная волна
ПА	-	порошок алюминия

Названия химических соединений - компонентов взрывчатых составов

АС	-	аммиачная селитра
БТНЭН	-	бис (2,2,2-тринитроэтил) нитрамин
ОК	-	октоген
ТНТ	-	тротил

Введение

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 взрывчатого вещества (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 (Беляева А.Ф., Гогоули М.Ф., Махова М.Н., Долгобородова А.Ю., Семенова И.С., Давыдова В.Ю., Бекстеда М.В., Ховарда В.М., Фингера М.), посвященных алюминизированным ВВ 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 значимость.

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 определение количества прореагировавшего алюминия при различных условиях протекания реакции.
- Проведено моделирование процессов радиального и торцевого расширения продуктов детонации ПД. 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.
- 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, обеспечивается 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 работы. 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 20 работах, включая 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и в 15 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 102 наименований, изложена на 91 стр., иллюстрируется 45 рисунками, содержит 12 таблиц.

Глава 1. Обзор литературы по теме детонации взрывчатых веществ с алюминием.

1. 1 Основные этапы развития взрывчатых веществ.

Исторически первым и наиболее простым по химическому составу метательным взрывчатым веществом (ВВ), изобретенным в Средневековье в Китае, состоящим из трех компонентов - селитры, древесного угля и серы, стал дымный порох. Появление дымного пороха датируется самое позднее XII веком. Первые 400 лет применялся только в военных целях. Изобретение пороха и применение его в военных целях способствовали совершенствованию вооружения (появлению пушек и ружей). Это стимулировало возникновение новых химических ремесел: приготовление селитры и пороха. Распространение этих ремесел оказало большое влияние на совершенствование естественнонаучных знаний, философских систем и даже развитие цивилизации. По мнению Дж. Мэйоу, *«селитра произвела такой же шум в философии, как и на полях сражений»*. До XIX века дымный порох был единственным ВВ. Следующим важным этапом в развитии взрывчатых веществ явилось получение гремучей ртути в 1800г. При сильном нагреве или ударе гремучая ртуть детонирует, особенно чувствительна она в сухом состоянии. В 1845-1846 гг. были получены нитроглицерин и нитроцеллюлоза. А в 1860х годах Нобель изобрел детонатор на основе гремучей ртути и динамит, представляющий из себя диатомит, пропитанный нитроглицерином. Также Нобелю принадлежит открытие бездымного пороха (баллистит), который состоял из равных частей пороха и нитроглицерина. А позднее Баллистит был модифицирован Фредериком Абелем и Джеймсом Дьюаром в новый состав, названный

кордит. Он также состоит из нитроглицерина и пороха, но использует самую нитрированную разновидность пороха, нерастворимую в смесях эфира и спирта, в то время как Нобель использовал растворимые формы.

Веществом, пришедшим на смену динамиту и вытеснившим его, стал тротил (тринитротолуол, тол). Йозеф Вильбранд, химик из Германии, в 1863 году занимался изучением свойств толуола, побочного продукта коксования угля и крекинга нефти. Ученый подверг толуол обработке азотной кислотой, что привело к образованию нескольких нитро соединений толуола, среди которых присутствовал тринитротолуол ($C_6H_2(NO_2)_3CH_3$). Первое время многие ученые подвергали сомнению его возможность взрываться. Даже выстрел из винтовки по этому веществу не приводил к взрыву. И только использование детонаторов показало истинную мощь нового соединения. С появлением тротила началась новая эпоха развития первичных и вторичных взрывчатых веществ: 1900-1930 гг. электродетонатор и детонирующий шнур примакорд и кордо; 1920-1930 гг. промежуточные детонаторы для инициирования нечувствительных вторичных ВВ; разработка первых взрывчатых смесей нитро-карбо-нитратов - нитрамон (1931г. Керст, Вудберн и Маккой), нитрамон А (1938г. Кук); 1945г. миллисекундное замедление, взрывание с использованием электродетонаторов. Это далеко не весь перечень сделанных с начала века открытий.

1.2. О детонации смесей взрывчатых веществ с алюминием

Конденсированные взрывчатые вещества (ВВ) с металлическими добавками являются важным классом взрывчатых материалов. 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. Первые работы по изучению ВВ, содержащих алюминий, относят к работам по изучению взрывчатых свойств

аммоналов Р. Эскалесом и Г. Кастом в 1899-1901 годах. Аммонал – разновидность промышленных веществ (ВВ). Представляет собой аммонит с добавлением алюминия. К настоящему времени накоплен огромный экспериментальный и теоретический материал по свойствам и детонационным характеристикам смесей на основе различных типов конденсированных ВВ и алюминия [1 - 13]. Однако и сегодня существуют разные точки зрения на механизм и время взаимодействия металла и продуктов детонации.

Использование смесевых и, в первую очередь, алюминизированных ВВ имеют явное преимущество по суммарной энергоемкости состава. Количественно энергоемкость или энергетический потенциал ВВ выражается через величину теплоты взрыва Q . Для сравнения экспериментальное измеренное значение теплоты взрыва для октогена приблизительно равно 5400 кДж/кг, а для смеси ОК с 20% алюминия по массе уже достигает 7500 кДж/кг. Повышение теплоты взрыва положительно сказывается на работоспособности ВВ (его фугасного действия), тогда как скорость детонации, давление продуктов детонации (ПД) в плоскости Чепмена-Жуге(Ч-Ж) и бризантное действие снижаются [13]. Введение алюминия в состав ВВ может снижать параметры детонации сильнее, чем инертные добавки, такие как NaCl, SiC₂, LiF, тальк и др.[1,3,5], [7 - 13]. Эти особенности относятся к мощным бризантным ВВ, однако, стоит сразу отметить, что для неорганических веществ, с положительным кислородным балансом, таких как аммиачная селитра (АС или нитрат аммония — AN), нитрат гидразина (НГ), а также перхлораты аммония и калия, наблюдается повышение (или как минимум сохранение) скорости детонации, а также существенное повышение работоспособности. [1,2,7,14]

Относительно же эффективности алюминизированных ВВ, применительно к метательной способности, среди разных авторов существуют ряд противоположных мнений. Так, к примеру, авторы [15] полностью отрицают возможность повышения МС взрывчатым составом при

введении в его состав алюминия. Другие авторы указывают на повышение МС всего на несколько процентов при относительно высоких степенях расширения продуктов детонации [16]. В работе [17] приводятся экспериментальные результаты, свидетельствующие о значительном повышении скорости радиального метания при 15%-ом содержании алюминия в октогене или гексогене.

Различие в наблюдаемых результатах 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. Это приводит к тому, что разброс данных по МС для аналогичных составов в литературе может составлять несколько процентов и быть сопоставимым с наблюдаемым эффектом от введения добавки. Одно можно утверждать точно, что максимальное выделение энергии, связанной с окислением Al, а вместе с ней и трансформацией 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 базе ещё не исчерпаны [18].

Интересным является вопрос повышения метательной способности взрывчатых веществ за счет добавки металлического горючего разной дисперсности, а также кислородный баланс ВВ-основы. Среди разных авторов в данном вопросе также существуют серьезные противоречия и противоположные точки зрения о перспективе использования нанодисперсного алюминия в составах метательного действия. В [18] исследовали влияние добавок Al разной дисперсности на метательную способность взрывчатого состава. Размер сферических частиц порошков Al составлял 0,1;7;15;40 мкм. Смесь с наноалюминием 0.1 мкм по метательной

способности уступает составам с частицами алюминия размером 7 и 40 мкм в экспериментах по методикам М-40 и Т-20. В других исследованиях было показано, что составы с наноалюминием не превосходят по метательной способности составы с частицами алюминия размером 3,6 мкм. В [19] показано, что причина низкой эффективности составов с наноалюминием заключается в более высокой концентрации оксида Al в исходном порошке в виде оксидной пленки, покрывающей частицы. В статье [20] приводят данные по измерениям теплоты взрыва и расчетам метательной способности алюминизированных композиций, содержащих перспективное взрывчатое вещество CL-20. Показано, что такие смеси по теплоте взрыва и метательной способности значительно превосходят аналоги на основе ОК. В работе отмечается, что создание алюминизированных нанокомпозитов для повышения метательной способности целесообразно лишь в случае, когда содержание оксидной пленки в порошке наноалюминия сведено до минимума вследствие покрытия частиц защитным слоем из активного материала. Нанокомпозит, содержащий CL-20 и описанный в литературе nAl типа "Alex" с частицами, покрытыми диборидом алюминия, превосходит ОК по МС на 10%.

Сложности в сопоставлении результатов различных авторов также связаны с тем, что часто в статьях не указан размер самих зерен ВВ. Как видно из экспериментов [18], в случае с более мелким ВВ МС 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 из-за невозможности прямого наблюдения за процессом окисления алюминия продуктами детонации конденсированных ВВ, а также сложности теоретического описания физико-химических процессов при детонации гетерогенных металлизированных ВВ.

Вследствие чего в литературе существует множество гипотез, связанных с процессом окисления алюминия в продуктах детонации (см. [1, 21], [3]-[13]). Расчёты детонационных свойств алюминизированных ВВ в большинстве литературных источников [14, 22-29], сделаны на основе термодинамического описания состояния ПД в плоскости Ч-Ж и не учитывают реального механизма взаимодействия алюминия с ПД.

Открытым также остается вопрос об определении механизма и времени взаимодействия металлической добавки с ПД. В настоящее время существуют разные точки зрения [5,7,8,9,11,13, 28 - 37]. Большинство исследователей считают, что добавка реагирует в фазе сильного расширения продуктов детонации. Подтверждением этой точки зрения является наблюдаемый в эксперименте прирост скорости метания пластин.[8,9]. Хотя не исключено, что алюминий может просто выступать как катализатор или просто менять ход реакции. Существует и прямо противоположная точка зрения, суть которой в том что алюминий реагирует (по крайней мере, частично) в зоне химической реакции ВВ [14, 27, 30, 34,36]. 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 можно видеть существенно различающиеся значения 0% [33], 3÷15% [31] , 40% [29], 70%[28]. 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. Такого плана работы представлены в следующей литературе [10, 11] и [13,19, 38].

Большая работа в этом направлении была проделана в ИХТ РАН в лаборатории «Физика конденсированных систем» [16, 38, 33, 39]. В этих работах был проведен комплексный анализ влияния добавок порошкообразного алюминия на основные параметры ВС: скорость

детонации, профили давления и температуры (последняя является наиболее чувствительным из доступных для измерения параметром химической реакции), а также данные по МС и теплоте взрывчатого превращения в зависимости от размера, формы и массового содержания частиц алюминия. Из этих работ можно выделить основные результаты. Реакция алюминия с ПД ОК начинается сразу за фронтом волны, и продолжается до времен, превышающих порядки микросекунд. Существует зависимость от размера частиц, однако по мере уменьшения размеров частиц на первую роль выходит содержание именно активного алюминия. Добавление Al к ОК снижает скорость детонации, особенно для наночастиц Al. Исследования тонкой структуры течения за фронтом ДВ показали, что добавление Al также понижает и значения давлений ПД на профилях $p(t)$, получаемых индикаторным методом. Поведение профилей давления $p(t)$ и их зависимость от размеров частиц Al носят сложный характер. В работе [40] измерялась теплота взрывчатого разложения при помощи калориметрической установки. Показано, что добавление Al в состав ВВ приводит к значительному увеличению теплоты взрывчатого разложения. Прирост выше в случае ВВ с положительным кислородным балансом. Так, добавление 40-45% Al к БТНЭН дает повышение на $\approx 100\%$, а добавление к ОК на $\approx 50\%$. При этом составы с БТНЭН/Al(15) превосходят композиции БТНЭН/Al(0,1). А замена Al(15) на Al(0,1) в смесях с ОК (отрицательный кислородный баланс) приводит к дополнительному увеличению теплоты взрывчатого разложения.

В (см. [23, 25, 43]) рассматривается взаимодействие алюминия в ходе вторичных реакций, с точки зрения общего числа молей газообразных компонент ПД, а также конечного состава продуктов детонации. При введении во взрывчатое вещество дисперсных металлических добавок их окисление происходит в ходе вторичных реакций с ПД. При этом вместе с окислением алюминия и выделением дополнительной энергии происходит существенное уменьшение общего числа молей газообразных компонент ПД. Что в свою очередь приводит к снижению давления ПД. Рассмотрению

этого вопроса уделено особое место во второй главе данной диссертации. Рассмотрим некоторые работы, в которых изучался состав продуктов детонации алюминизированных ВВ. В [44] исследовались взрывчатые вещества на основе гексогена, ОК и активных связующих, содержащие 15-20% алюминия Al(4). Содержание CO_2 и H_2O в продуктах детонации существенно снижается при введении в состав алюминия. Сильное влияние на конечный состав продуктов детонации оказывает кислородный баланс исходного состава и условий взрыва. Так при взрыве в аргоне при большом содержании гексогена в исходном составе доля непрореагировавшего алюминия составляла всего несколько процентов, а при подводном взрыве и низком содержании гексогена около 20-30%. В работе [45] проводился анализ продуктов детонации взрывчатого состава на основе тэна с 10 и 20% Al. Было показано что Al_2O_3 (преимущественно γ -модификация) представляет собой сферические частицы, средним размером на 30% больше исходного Al. Самые крупные частицы Al_2O_3 внутри содержали непрореагировавший алюминий. Откуда авторы сделали заключение, что окисление алюминия происходит в конденсированной фазе в диффузионном режиме.

Использование мощных высокобризантных ВВ, таких как гексоген, ОК, CL-20, в современных взрывчатых устройствах, имеющие сложные геометрические формы, затруднено или практически невозможно. Связано это с тем, что данные мощные взрывчатые вещества не обладают литьевыми свойствами. Единственным выходом является использовать данные ВВ совместно с плавкими основами (взрывчатые вещества ТГ, октол и др.). С развитием технологий высокоэнергетических полимеров широкое применение находят системы на основе полимерного связующего, наполненного высокобризантным ВВ. Такая компоновка помогает практически исключить пористость и максимально приблизиться к теоретической плотности смеси [49]. Использование полимерных связующих способных к самостоятельному взрывчатому превращению позволяет создавать рецептуры, сопоставимые с мощными индивидуальными ВВ.

Данный тип композицией носит также название гетерогенных полидисперсных систем. Из-за наличия в ней высокоэластичной дисперсной среды состав обладает низкой механической чувствительностью и некоторыми особенностями детонации. В таких смесях довольно часто используют в том числе и алюминий, поэтому ниже опишем некоторые характерные свойства таких систем.

На сегодняшний день остается открытым вопрос прогнозирования скорости детонации для данных смесей. Существует много физических и математических моделей, основанных на противоречивых экспериментальных результатах. Подробное описание современных методик по определению скорости детонации взрывных смесей данного типа приведено в [50]. Отметим такие интересные экспериментальные результаты, что в зависимости от дисперсности используемого в опытах алюминия от 0,1 до 8 мкм. скорость детонации различается 7600 до 8300 м/с. Авторами данной публикации указывается на возможность инициирования последующих слоев опережающей ударной волной, проходящей по сжатому связующему. На сегодняшний день математического аппарата, способного описать рассмотренные процессы, в доступной литературе не предложено.

В [51] приведено теоретическое исследование полноты реагирования алюминия на детонационные характеристики трех смесевых ВВ: гексоген, ТНТ и NH_4NO_3 салюминием. Показано, что зависимость давления от количества газообразных продуктов более сильная, чем от температуры. Избыточная энергия от образования Al_2O_3 , в основном, представляет тепловую энергию, которая оказывает на давление меньшее влияние, чем потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Было показано, что в условиях полного или частичного реагирования металлического алюминия в смесях на основе мощных нитро- органических ВВ, невозможно увеличить скорость детонации по сравнению с чистым ВВ. Скорость детонации смесей, в которых алюминий инертен, больше скорости детонации тех же смесей, в которых предполагается реакция алюминия с продуктами

детонации. Уменьшение количества газообразных продуктов детонации в ВС происходит из-за уменьшения массовой доли взрывчатой основы в результате реакции алюминия с продуктами детонации.

В [52] показано, что компоненты, образующиеся в результате вторичных реакций, имеют меньший собственный объем. Резко уменьшается общее количество молей газа N_g , из-за образования конденсированных фаз Al_2O_3 и C , и хотя тепловой эффект увеличивается, основные же параметры снижаются. В случае использования нанодисперстных порошков алюминия в смесевых составах наблюдается более существенное уменьшение скорости детонации и давления, что в свою очередь связывают с увеличением прогреваемой массы алюминия. А повышение реакционной способности в случае насыпных ВВ (приводящее к увеличению скорости детонации и давления при положительном кислородном балансе) связано не только с увеличением зоны химической реакции детонационной волны, но и более неоднородным полем массовой скорости, при котором частицы ВВ и продукты его разложения обтекают частицы металла, что резко увеличивает скорость гетерогенной реакции.

1.3. Обзор термодинамических методов для математического расчета параметров детонации.

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 [52 - 58] 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 [59 - 62].

Среди первых работ, направленных на математическое описание детонации взрывчатых веществ с добавлением металлов, можно отметить серию работ в начале 50-х годов в Лос-Аламосской лаборатории. Целью данных работ являлось показать, как влияет добавление инертных и неинертных компонентов на детонационные характеристики взрывчатых веществ. Подробные данные изложены в [14]. Отметим, что полученные расчетные с использованием уравнения состояния ВВК в экспериментах с добавлением алюминия дают удовлетворительное сходство по скорости детонации, однако при этом рассчитанные значения давления Ч-Ж завышаются на 100 кбар. Что в свою очередь свидетельствовало о том, что поведение взрывчатого вещества было идеальным в отношении скорости детонации и неидеальным в отношении давления Ч-Ж. В 60х годах внимание к металлическим добавкам было смещено в сторону изучения взрывчатых веществ с добавлением вольфрама. Расчеты на основе уравнения состояния ВКВ, воспроизводили скорость детонации, но завышали давления Ч-Ж на 100кбар. В [14] было показано, что согласование между экспериментальными и теоретическими значениями скорости детонации не являются существенными, поскольку адиабата Гюгонио слишком крута и скорость детонации меняется слишком медленно, чтобы быть чувствительным параметром. В работе было также предложено, что завышенное значение по скорости детонации взрывчатых веществ с добавками тяжелых металлов появляются в результате опережающего распространения детонации по зернистой структуре взрывчатого вещества между металлическими частицами. Получается, что при приблизительно верно рассчитанных адиабатах Гюгонио, экспериментальные значения параметров состояния на детонационном фронте должны находиться вблизи рассчитанной адиабаты Гюгонио, но при более высоком значении скорости ударного фронта. Отсюда можно было объяснить наблюдаемое заниженное давление детонации.

Также рассматриваются модели, в которых металл не находится в термодинамическом равновесии с продуктами детонации. Полученные для этого предположения результаты подробно изложены в [14].

Широко используемым уравнением состояния для описания поведения продуктов детонации алюминизированных взрывчатых веществ является УРС в форме JWL [63 - 66]. Уравнения Джонсона-Вилкинса-Ли JWL [67] - это эмпирические математические выражения для описания отношения давления и объема продуктов детонации. В 1968 году, Ли и др. [68] предложили алгебраическую форму уравнений состояния для расширяющихся продуктов, ныне известную как JWL. Эти уравнения были продолжением ранее известных уравнений Вилкинса. Эти уравнения определяются при помощи цилиндр - теста [39]. Для численного моделирования процесса детонации алюминизированных взрывчатых веществ в чистом виде уравнение JWL плохо пригодно, поэтому в литературе часто встречаются модернизированные уравнения JWL, самым известным из которых является уравнение состояния JWLB (Джонсона-Вилкинса-Ли-Бейкера) [69], более подробное описание которого будет дано в главе 3. Как и в случае с EOS JWL, параметры для уравнения JWLB получаются из опытов по методике цилиндр-тест. Во второй главе будет подробно показана важность процессов догорания продуктов детонации на воздухе. В случае же вышеописанных уравнений стоит сразу отметить, что методика цилиндр-тест основана на взрыве взрывчатого вещества в медной оболочке, при расширении которой не образуется трещин до очень больших степеней расширения оболочки, и как следствие отсутствует взаимодействие с воздухом. Это, к сожалению, делает данные методики малопригодными для большого спектра рассматриваемых задач в промышленности.

Отметим, что методика цилиндр - тест, является дорогостоящей и трудоемкой. Поэтому многие исследователи предлагают свои способы получения уравнений состояния в форме JWL. Отметим некоторые работы: Хамашима и др. [70], основанную на методе описания параметров JWL

неидеальных взрывчатых веществ через подводный взрыв; Юртиев и Хайес [71] представили аналитический подход для прогнозирования параметров JWL для HCNO типа взрывчатых веществ. В работе [72] данный подход был дополнен численным методом, включающим экспериментальные результаты для стандартных алюминизированных взрывчатых веществ.

Уравнения состояния для алюминизированных взрывчатых веществ дают возможность оценить степень реализации энергии от прореагировавшего алюминия в зоне химической реакции. Как было уже показано выше, различными авторами делаются разные оценки реакционной способности алюминия в зоне химической реакции, от инертного поведения до практически полного сгорания в ЗХР. Есть две основные причины этого расхождения. Во-первых, исследователи применяют разные уравнения состояния для описания термодинамики продуктов детонации. Во-вторых, в случае алюминизированных взрывчатых веществ, теория детонации С-Д может стать неприемлемой сама по себе, так как она базируется на термодинамическом равновесии продуктов детонации, что в случае с алюминием может не соответствовать действительности. Это можно ясно видеть на примере нитрата аммония. В данном случае необходимо использовать более сложные теории детонации для моделирования взрывного процесса, как это, например, было сделано в работе Говарда и др. [73]. В данной работе реализуют кинетику Вуд-Кирквуда [74] для медленных химических реакций.

Таким образом, очень трудно или даже невозможно сделать надежный вывод о степени окисления алюминия в ЗХР на основе термодинамических расчётов С-Д. Тем не менее, данные работы проводятся. В работе [75] на основе проведенных численных расчетов, основанных на теории детонации и термодинамическом коде TDS [76], предлагают также проводить дополнительные исследования по обнаружению скачков в наблюдаемых значениях скорости детонации. По мнению авторов, данные скачки могут быть косвенным доказательством начала реакции алюминия в ЗХР.

Комплексное исследование влияния алюминия на детонационные параметры были проведены в [77]. В этой работе проводятся теоретические исследования влияния добавки алюминия марки Alex на детонацию взрывчатого состава на основе ТНТ. Расчеты производились в программе для термохимического счета CHEETAN 2.0 [78]. С-Д детонация считалась с использованием ВКВ уравнений состояния. Расчеты кинетики производились на основе теории детонации Wood-Kirkwood [74]. Зависимость давления была откалибрована с использованием экспериментальных данных. Для вычисления теплоты взрыва был принят подход, описанный в работах [28,79], в котором предполагается, что часть алюминия остается "замороженной" или инертной во фронте детонации. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает, что около 66% от алюминия реагирует с продуктами детонации для 30% содержания алюминия во взрывчатом составе на основе ТНТ. Ниже приводится также серия работ по теоретическому описанию зависимостей параметров детонации для АВС.

В [80] проведен анализ влияния содержания Al и плотности заряда на расчетные параметры детонации его смесей с ВВ с применением термодинамической программы SD [35]. Содержание алюминия во взрывчатом составе составлял до 50%, плотность изменялась от 1 до 1,8 г/см³. Расчет производился для двух случаев, в которых алюминий вступал в реакцию с образованием оксида $Al_2O_3(1)$, а во втором случае вел себя инертно (2). Было проведено сравнение результатов расчета параметров детонации с экспериментальными данными. В качестве взрывчатой основы были использованы в разных опытах гексоген, ОК, ТНТ и др. Показано, что степень отклонения расчетных значений скорости детонации зависит от взрывчатой основы, содержания алюминия, плотности заряда и размера частиц алюминия. Отмечено, что небольшие отличия в скорости детонации при использовании различных способов расчета не дают возможности дать однозначную оценку о доли прореагировавшего алюминия. Хотя данная

программа для термодинамического счета дает возможность прогнозировать параметры детонации смесей ВВ с алюминием.

В [81] изложены результаты расчетов параметров детонации смесей ВВ с металлами. Предложены следующие возможные причины снижения скорости детонации: уменьшение показателя политропы в уравнении состояния продуктов детонации, вызванное наличием в них конденсированной фазы Al_2O_3 [82]; образование в детонационной волне низших окислов алюминия в газообразном состоянии [5,83]; неполное превращение алюминия в зоне химической реакции детонационной волны. В программе расчета предполагалось, что в точке Чепмана-Жуге продукты детонации находятся в термодинамическом равновесии, а скорости движения и температура газовой и конденсированной фаз равны. Объемом конденсированной фазы пренебрегали. Газовая фаза подчинялась уравнению идеального газа. Термодинамические функции для расчета равновесного состояния взяты из [84]. В ходе расчетов было показано, что скорость детонации алюминизированных ВВ монотонно уменьшается с ростом количества алюминия в смеси, а скорость потока продуктов детонации проходит через максимум. Температура при этом растет. При введении алюминия в состав смеси, обращает на себя внимание его слабое влияние на скорость детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом. В ходе расчётов было показано, что в алюминизированных ВВ с небольшой плотностью заряда, при отрицательном кислородном балансе основы, максимальное увеличение скорости детонации составляет 2-5%, а в смесях алюминия с окислителем 10-30%. Авторы статьи отмечают, что полученные результаты нельзя непосредственно распространять на детонацию ВВ с высокой плотностью, но считают возможным такой вариант, что характер влияния металлов на скорость детонации ВВ будет аналогичным.

Подведем некий итог. Необходимость прогнозирования детонационных характеристик взрывчатых веществ инициирует развитие теоретических методов расчета параметров детонации. Прогнозирование

давления детонации традиционно осуществляется через условие Чепмана-Жуге (С-*J*) термодинамической теории детонации. Эта теория подразумевает, что термодинамическое равновесие достигается мгновенно. Существуют термодинамические компьютерные коды, такие как *BKW* [14], *RUBY* [85], *TIGER* [28], *CHEQ* [86], и *CHEETAH* [78] (в *C* версии *TIGER*), *AUTODYN*, *LS-DYNE*, позволяют найти параметры детонации отдельных взрывчатых веществ с хорошей точностью. Они используют соответствующее эмпирическое уравнение состояния (УРС), такие как Бейкер-Кистяковский-Вилсон (*BKW-EOS*) [14], Джейкобс-Копертвайта-Звислера (*JCZ-EOS*) [87] и Кихара-Хакита-Танака (*КНТ-EOS*) [88], *JWL*, *JWLB*, которые были установлены на экспериментальных данных конкретных взрывчатых веществ. Предполагая, что все химические уравнения, всех возможных видов продуктов реакции, рассчитаны правильно. Выдвинутые предположения на основе термохимических аналогов являются верными. Можно оценить изоэнтропическое расширение находящихся в равновесии газовых продуктов детонации в соответствии с уравнениями Ренкина-Гюгонио. Эти уравнения состояния могут довольно точно отражать термодинамические свойства многокомпонентных смесей в процессе расширения продуктов реакции. *BKWC-EOS* [78], *BKWR-EOS* [89] и *BKWS-EOS* [90] - три различных параметризации *BKW-EOS*, которые могут быть использованы для расчета детонации свойства взрывчатых веществ. Поскольку достаточно трудно количественно оценить полноту химических реакций, происходящих в детонационной волне для смеси взрывчатого вещества с алюминием, остается большим вопросом до какой степени окисляется алюминий в точке Чепмана-Жуге. Численные термодинамические расчеты параметров детонации, 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 [90]. 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 $C_aH_bN_cO_dAl_e$ [91]. Подобные методы являются перспективным, но требуют сложных компьютерных кодов, и хорошего понимания происходящего в зоне химических реакций процессов. Среди подобных кодов отметим [92] компьютерный код (EDPHT), способный, как утверждают разработчики, предсказывать скорость детонации, давление, теплоту взрыва, температуру детонации, скорость Гарни, адиабаты и удельные импульсы взрывчатых веществ с общей формулой $C_aH_bN_cO_d$. Также он может быть использован для прогнозирования скорости детонации и давления смесевых ВВ, имеющих общую формулу $C_aH_bN_cO_dAl_e$. Как указывается в работе, данный код не требует прогнозирования степени окисления алюминия в ЗХР.

Глава 2. Взаимодействие продуктов детонации конденсированных ВВ с окружающим воздухом.

2.1. Постановка экспериментов и основные результаты по метанию оболочек и пластин

Для изучения радиального и торцевого метания разрушающихся стальных оболочек и пластин, была проведена серия экспериментов. Схема экспериментов представлена на рис.1, рис.2

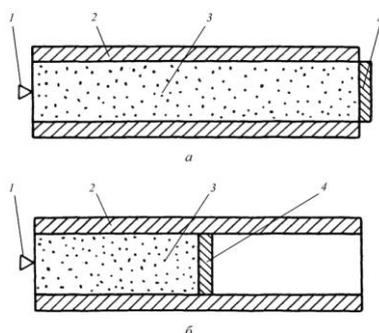


Рис.1 Схемы экспериментов по регистрации скоростей метания стальных оболочек и пластин: 1- электродетонатор; 2- оболочка; 3- ВВ; 4-пластина

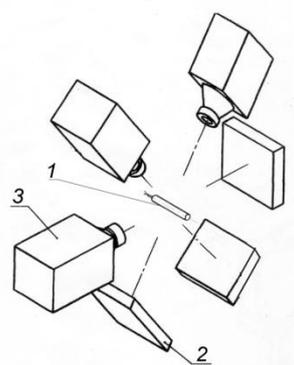


Рис.2 Схема постановки экспериментов по регистрации скоростей разлета стальных оболочек и пластин на рентгеноимпульсной установке: 1 – исследуемая сборка; 2 – контейнер с рентгеновской пленкой; 3 – рентгеновский аппарат ПИР-600А

В качестве взрывчатого вещества использовали А-IX-1, а также смесь А-IX-1 с 10% и 15% порошка алюминия АСД-4. Диаметр зарядов составлял 20 мм и высота 40, 80 и 120 мм в разных сериях эксперимента. Толщина стенок составляла $\delta = 2, 5$ и 10 мм. Скорости пластин и расширения оболочек измеряли методом трехкадровой рентгено-импульсной съемки. Время срабатывания рентгеновских трубок контролировали с точностью не хуже 10 нс. Типичные рентгенограммы представлены на рис 3 (а, б, в). Погрешность измерения скорости, связанной с отклонением вектора скорости расширения оболочек от нормали к ее оси в данных экспериментах оценивали в 4-6%, что является по сравнению с аппаратурной погрешностью пренебрежимо малой величиной.

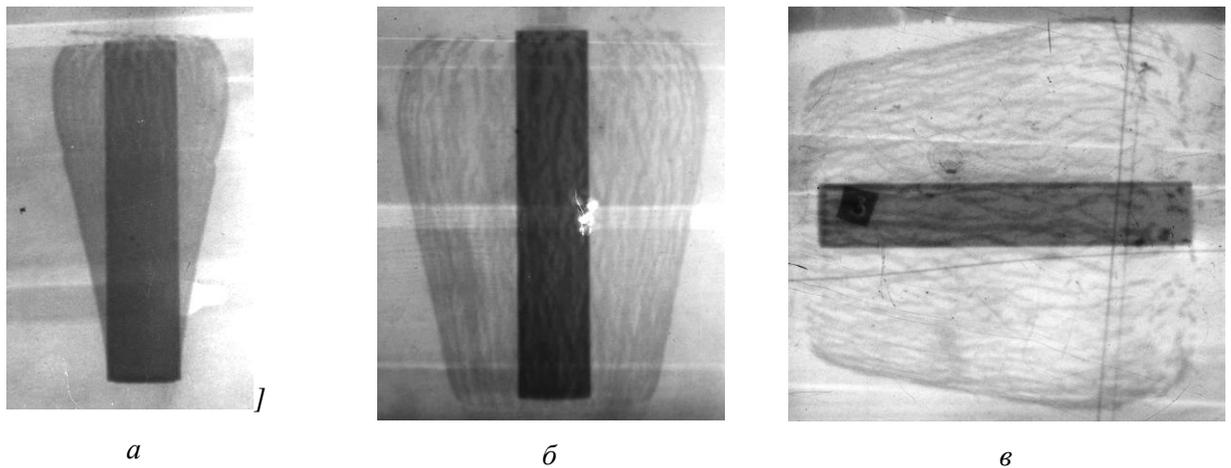


Рис.3 Рентгенограммы разлета стальной оболочки в момент времени а) 17,90 мкс, б) 29,60 мкс, в) 40,53 мкс.

X-t диаграммы скоростей движения среднего сечения стальных оболочек разной толщины имели вид прямых, что свидетельствовало, что к моменту регистрации процесс ускорения оболочек закончился. Полученные скорости полета стальных оболочек и пластин представлены в таблице 1

Таблица.1 Скорости полета стальных пластин и оболочек

ВВ	Плотность, кг/м ³	Оболочка		Высота пластины, мм	Схема рис.	Скорость оболочки, м/с	Относительная скорость, %	Скорость пластины, м/с
		длина, мм	толщина, мм					
A-IX-1	1665	40	2	2	а	1380	100	1820
A-IX-1 + 10% Al	1718	40	2	2	а	1610	117	1760
A-IX-1	1661	80	5	5	а	860	100	960
A-IX-1 + 10% Al	1718	80	5	5	а	980	114	920
A-IX-1	1653	120	10	10	а	605	100	-
A-IX-1 + 10% Al	1722	120	10	10	а	670	111	-
A-IX-1 + 15% Al	1742	120	10	10	а	680	112	-
A-IX-1	1649	120	2	2	б	920	100	2120
A-IX-1 + 10% Al	1727	120	2	2	б	1060	115	2110

Как видно из таблицы 1, для среднего сечения заряда ВВ наблюдается прирост скорости в 11, 14 и 17% для оболочек толщиной 10, 5 и 2 соответственно. Таким образом, с увеличением толщины оболочки эффект от добавки Al 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 (рис.4). В то же время, эффект от добавки Al по скорости разлета снижается с 17 до 11% (табл.1). Таким образом, увеличение времени отбора энергии в 5 раз, с 3 до 15мкс, снижает прирост скорости и энергии оболочек.

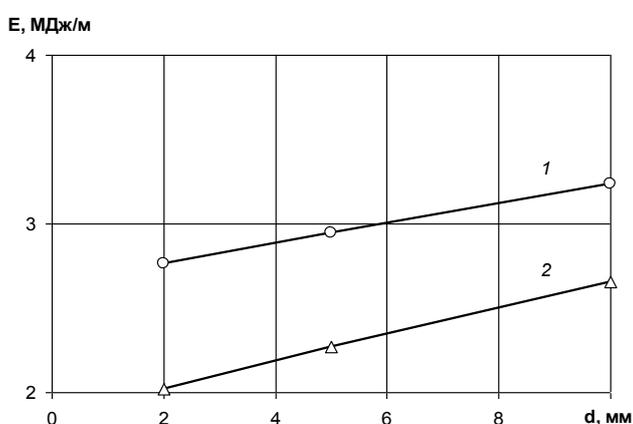


Рис.4. Зависимость энергии оболочки E , отнесенной к единице ее длины, от толщины оболочки d : 1- А-IX-1+10%Al; 2- А-IX-1.

Также из таблицы видно, что введение Al приводит к уменьшению скоростей метания пластины на 3-5%. Данные результаты можно связать с отставанием зоны реакции Al от фронта детонационной волны. Данный эффект может затруднить передачу энергии при метании падающей детонационной волной из области пониженного в волне Тейлора давления в область фронта ДВ. Другое объяснение, основанное на физико-математическом моделировании данного процесса, подробно описано в следующей главе.

2.2. Определение оптимального содержания алюминия в смесях с А-IX-1 и окфолом-3,5 для достижения максимальной скорости метания оболочек

Исследования влияния содержания дисперсного Al в смеси с А-IX-1 на скорость метания стальных оболочек проводили с использованием сборки (рис.5) и макета (рис.6.) Скорости цилиндрических оболочек регистрировались методом рентгено-импульсной съемки. Трубка имела длину 120 мм и толщину стенки 5мм, а толщина метаемой пластины составляла 2 мм. Метание осуществлялось зарядами ВВ $\varnothing 20 \times 120$ мм, имевшими относительную плотность $\approx 0,95$. В этих экспериментах в качестве добавки Al использовали алюминиевый порошок АСД-1[13]. В другом варианте испытывали макеты с камерой $\varnothing 35 \times 80$ мм, с толщиной боковой стенки 6мм, дна и крышки толщиной 10мм (рис.6). В этих экспериментах в качестве добавки Al использовали алюминиевую пудру ПАП-2.

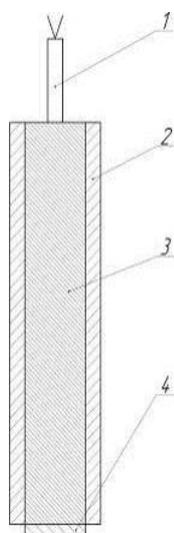


Рис.5 Сборка:
1 – электродетонатор,
2 – стальная трубка,
3 – ВВ,
4 – пластина.

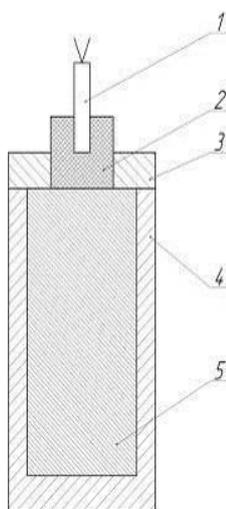


Рис. 6. Макет:
1 – электродетонатор,
2 – промежуточный детонатор,
3 – крышка
4 – оболочка, 5 – ВВ

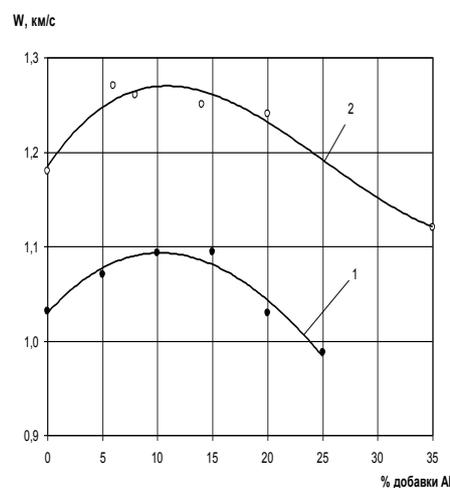


Рис. 7. Зависимости скорости разлета оболочек:
1 – трубки (рис.5),
2 – макета (рис.6), измеренные методом рентгено-импульсной съемки в среднем сечении

Как видно из кривых 1 и 2 на рис.7 оптимальное количество добавки Al в А-IX-1 составляет 10...15%, а не 20%, как в промышленно применяемом взрывчатом составе А-IX-2. Также были проведены испытания по схеме

рис.5 смесей окфола-3,5 с АСД-1. Оптимальное содержание алюминия для этой смеси составляет 10..15%.

Показано, что энергия от сгорания Al, реализуемая в работу метания, зависит в основном от газодинамических условий совершения работы взрыва. Эффект от добавки алюминия тем больше, чем меньше толщина оболочки. Естественным было изучить влияние алюминия на скорость разлета ПД, т.е. при отсутствии оболочки.

2.3 Разлет продуктов детонации А-IX-1 и его смесей с дисперсным алюминием

Исследования проводились на зарядах диаметром 20мм, длиной 200мм. В качестве добавки использовали порошок АСД-4. Регистрацию осуществляли с помощью камеры ВСК-5 на воздухе и СФР-2М для барокамеры, с давлением 10кПа. Обработку проводили с помощью компьютерного прибора Quantimet-900. Полученные результаты представлены на рис. 8.

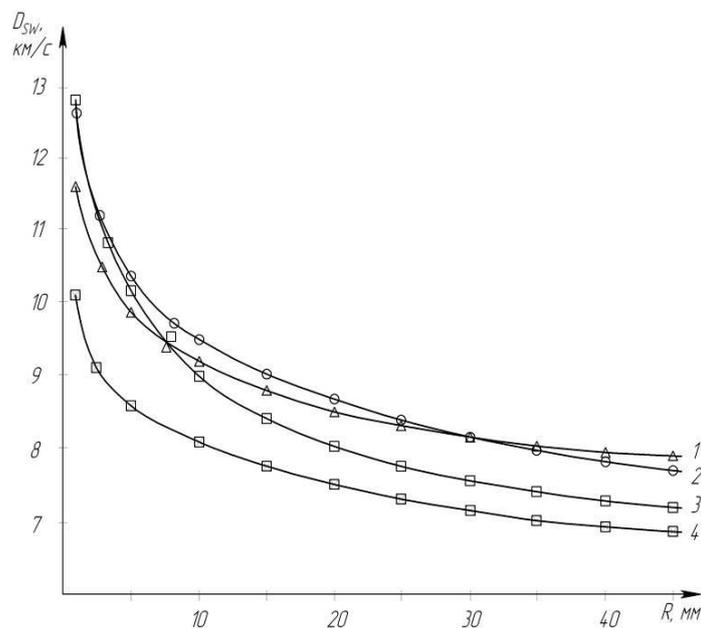


Рис.8 Зависимость скорости ударной волны, образующейся при срыве ПД с торца заряда от расстояния: 1 – А-IX-1+10%Al в барокамере; 2 – А-IX-1 в барокамере; 3 – А-IX-1+10%Al в воздухе; 4 – А-IX-1 в воздухе.

Из графика хорошо видно, 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 (кривая 2). 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 воздушной ударной волны для смеси А-IX-1+10% алюминия выше на всем участке наблюдения.

Пользуясь значениями скоростей ударных волн (СУВ) из ударных адиабат [93], были получены массовые скорости на контактной границе ПД-воздух и температуры воздушной волны. Полученные результаты представлены в таблице 2:

Таблица.2 Разлет ПД при срыве с торца заряда.

ВВ	Среда	D_{sw} , км/с	U, км/с	P, атм.	$T \times 10^3$ К
А-IX-1	Барок.	13,84 (0,56)*	12,72	300	21
А-IX-1 +10%Al	Барок.	11,74 (0,17)*	10,78	220	17
А-IX-1	Воздух	10,31 (0,27)*	9,43	1190	15
А-IX-1 +10%Al	Воздух	12,78 (0,70)*	11,64	1700	21

*В скобках указаны статистические ошибки определения D_{sw} .

Таблица. 3 Разлет ПД в радиальном направлении.

ВВ	Плотность, г/см ³	Скорость детонации, км/с	D_{sw} (U), км/с (воздух)	D_{sw} (U), км/с (барок.)
А-IX-1	1,66	8,37	6,79 (6,15)	9,88 (9,14)
А-IX-1 +10%Al	1,72	8,15	-	9,33 (8,65)
А-IX-1 +20%Al	1,76	7,92	7,75 (7,10)	-

Из таблицы 2 видно, что значения для массовой скорости для А-IX-1+10% алюминия в экспериментах в барокамере ниже на 15%, чем для А-IX-1. В воздухе же наоборот наблюдается повышением массовой скорости на 23%. Напомним, что скорость метания пластин снижалась на несколько

процентов. Это может быть свидетельством активной реакции частиц алюминия со свободным кислородом воздуха, что в случае с пластиной происходит позднее, из-за естественной защиты продуктов детонации от кислорода воздуха в виде металлической пластины.

Схожие результаты были получены и для разлета продуктов детонации в радиальном направлении, хотя различия в параметрах оказались не столь существенными (табл. 3). Скорости разлета продуктов детонации в радиальном направлении ниже, чем для торцевого разлета. Можно предположить, что в данном случае медленнее происходит их перемешивание со свободным кислородом воздуха, что и приводит к наблюдаемому результату.

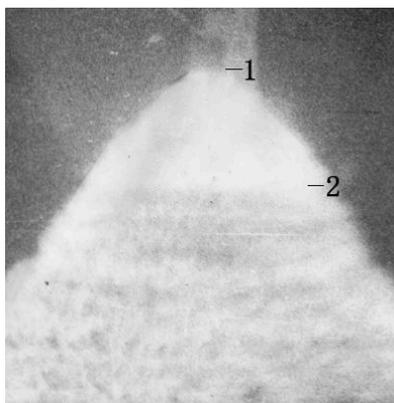


Рис.9 Детонация комбинированного заряда. 1- детонационный фронт; 2-граница раздела между ПД А-IX-1 (внизу) и смеси с алюминием А-IX-1+20%Al. Выше детонационного фронта видна не сдетонировавшая часть заряда, подсвеченная ПД. На дальнем плане - рейка, на которой крепился заряд

Таким образом, в экспериментах по разлету продуктов детонации показано, что реакция алюминия со свободным кислородом воздуха вносит большой вклад в наблюдаемые в экспериментах параметры скорости воздушной ударной волны, массовой скорости и др. Важным оказывается не только наличие или отсутствие кислорода на контактной границе ПД-внешняя среда, но и кинетика взаимодействия продуктов детонации с воздухом.

Были также проведены исследования детонации комбинированного заряда, который состоял из двух равных частей А-IX-1 и А-IX-1+20%Al

длиной 100мм каждая. Целью было показать переход детонационной волны из А-IX-1 в А-IX-1+20%Al. Из рис. 9 хорошо видно, что для детонации алюминизированного состава наблюдается резкое повышение яркости свечения продуктов детонации. Более интенсивное свечение фронта свидетельствует о начале реакции алюминия сразу за фронтом детонационной волны.

2.4 Исследования метательной способности взрывчатых составов по методике М-40

Как было показано в предыдущем разделе, с увеличением скорости движения ПД в атмосфере, эффекты от добавок алюминия проявляются сильнее. Это связано с эффектом догорания алюминия при взаимодействии со свободным кислородом воздуха. Большой интерес представляют опыты, в которых есть возможность варьирования скорости движения продуктов детонации. К таким опытам можно отнести эксперименты с изменением плотности заряда. Осуществлять варьирование времени контакта ПД с воздухом можно за счет регистрации скоростей метания на различных расстояниях ускорения метаемого тела. Одним из таких способов является измерение скоростей метания пластин на различных участках их ускорения при детонации зарядов различной плотности и химического состава.

Эксперименты по метанию пластин проводили по методике М-40, в которой заряд ВВ диаметром 40 мм и длиной 40 мм, помещали в толстостенную стальную оболочку, и осуществляли метание стальной пластины толщиной 4 мм (рис. 10). Процесс ускорения пластины регистрировали с помощью восьми электроконтактных игольчатых датчиков, удаленных от пластины на расстояние от 10 мм до 40 мм. Время регистрации составляло примерно 20 мкс. В соответствии с этой методикой МС ВВ оценивалась по скорости пластины на расстоянии 40 мм от ее первоначального положения (W_{40}).

Погрешность определения скоростей метания пластин оценивалась в 1%. Зависимости скоростей метания пластин от плотности зарядов определяли для флегматизированного октогена (окфола-3,5), бис-(2,2,2-тринитроэтил) нитрамина (БТНЭНА) [94], а также их смесей с 15% (масс.) алюминиевого порошка АСД-4.

Скорости метания пластин $W(x)$ определяли на расстояниях $10 \div 40$ мм от первоначального положения пластины (рис. 11).

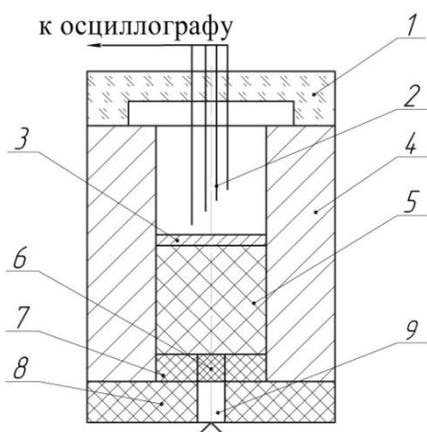


Рис. 10. Схема определения метательной способности по методике М-40:

1 – верхняя крышка, 2 – игольчатые датчики, 3 – пластина, 4 – оболочка, 5 – заряд ВВ, 6 – промежуточный детонатор, 7,8 – центрирующие втулки, 9 – электродетонатор.

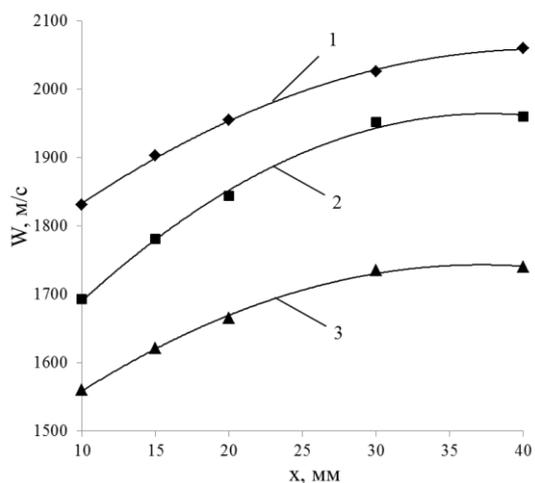


Рис. 11. Зависимости скоростей пластин, метаемых зарядами Окфола-3,5 различной плотности, от расстояния регистрации. Плотности зарядов: 1 – 1,759 г/см³, 2 – 1,690 г/см³, 3 – 1,482 г/см³.

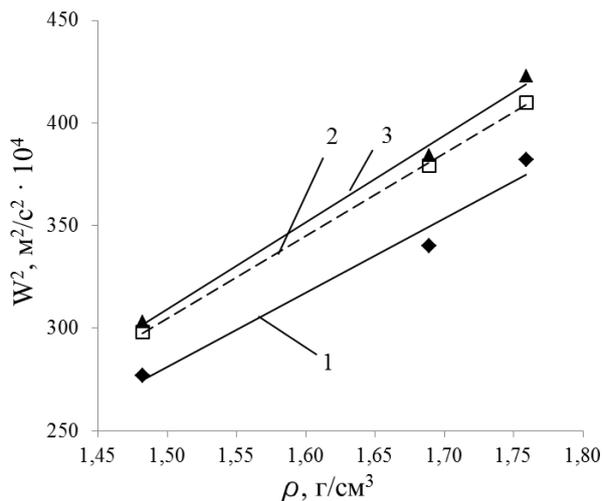
В случае дополнительного выделения энергии при догорании ПД в воздухе можно было бы ожидать, что угол наклона $\partial(W^2)/\partial\rho$ зависимостей удельной энергии пластины от плотности заряда $W^2(\rho)$ по мере увеличения расстояния регистрации будет возрастать, поскольку с увеличением плотности и расстояния возрастает скорость движения и время контакта ПД с воздухом. Полученные в экспериментах зависимости $W^2(\rho)$, представленные на рисунке 3, аппроксимировались линейными функциями.

Проведенные эксперименты показали, что для окфола-3,5, молекула которого имеет недостаток кислорода (примерно 33%), при возрастании расстояния ускорения пластины с 20 мм до 30 мм и с 20 мм до 40 мм происходит

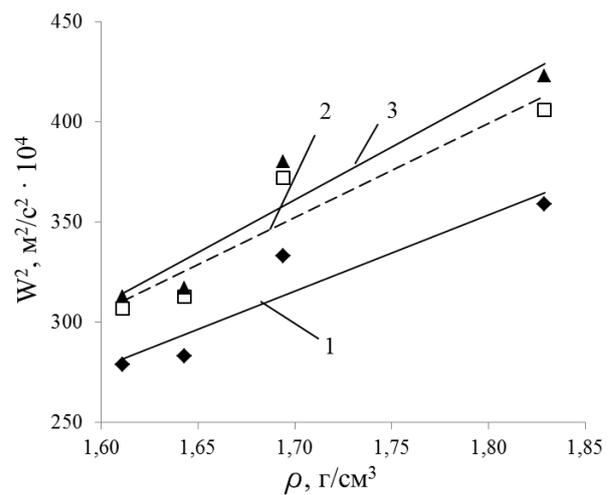
возрастание $\partial(W^2)/\partial\rho$ на 11% и 26% соответственно. В то же время, для БТНЭНА, имеющего 40% избыточного кислорода, такое же возрастание расстояния полета пластины практически не оказало влияния на параметр $\partial(W^2)/\partial\rho$.

Его изменение составило +4% и -3% для x равного 30 мм и 40 мм соответственно. При этом угол наклона $\partial(W^2)/\partial\rho$ для БТНЭНА в 1,6 раза меньше, чем для окфола-3,5. Последнее, вероятно, связано с образованием эндотермичных окислов азота при разложении ВВ-окислителя БТНЭНА [17]. Что касается алюминизированных смесей, то значение $\partial(W^2)/\partial\rho$ возрастает для смеси с окфолом-3,5 на 23% и 38%, а для смеси с БТНЭНА на 25% и 55% при увеличении расстояния ускорения пластины с 20 мм до 30 мм и с 20 мм до 40 мм соответственно. Большой эффект для смесей с БТНЭНА, по всей видимости, связан с большим тепловым эффектом реакции окисления Al со свободным кислородом, что ранее обсуждалось в работе [95].

Обнаруженное увеличение угла наклона зависимостей $W^2(\rho)$ с ростом расстояния ускорения пластины для Окфола-3,5, имеющего отрицательный кислородный баланс (-33%), по нашему мнению, связано с догоранием ПД на воздухе.



Окфол-3,5



Окфол-3,5 + 15% Al

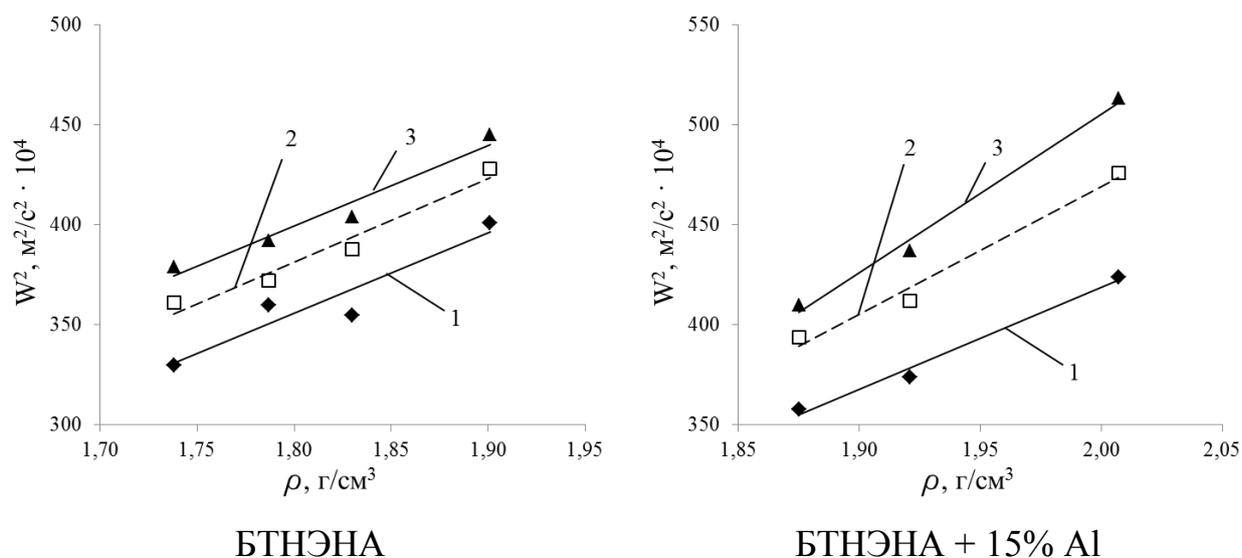


Рис. 12. Зависимости удельной энергии пластин от плотности зарядов для Окфола-3,5, БТНЭНА и их смесей с алюминием. Расстояния ускорения пластин: 1 – 20 мм, 2 – 30 мм, 3 – 40 мм.

Отсутствие этого эффекта для БТНЭНА, молекула которого имеет 40% избыточного кислорода, подтверждает этот вывод. Возрастание эффекта при добавлении к ВВ дисперсного алюминия очевидно 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.

Таким образом, на основании анализа зависимостей $W^2(\rho)$ получено подтверждение возможности реакции ПД с воздухом как для ВВ с отрицательным кислородным балансом без добавок алюминия, так и для ВВ, содержащих добавки алюминия. «Эффект догорания» возрастает с увеличением скорости и времени контакта ПД и для алюминизированных ВВ проявляется сильнее.

2.5 «Эффект догорания» при двухстороннем инициировании зарядов в стальных оболочках

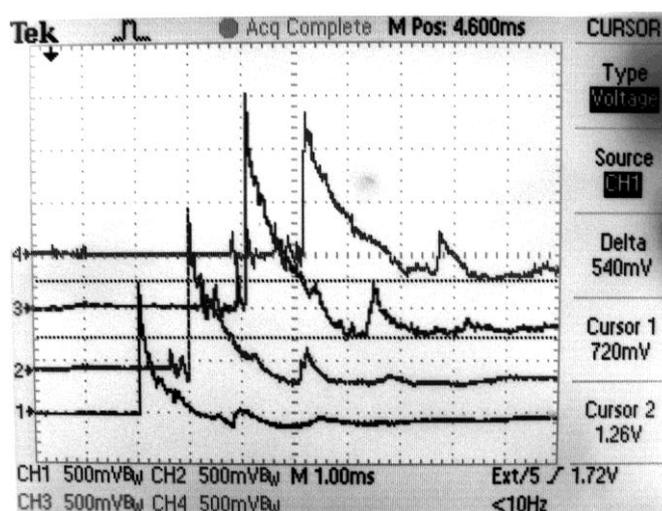
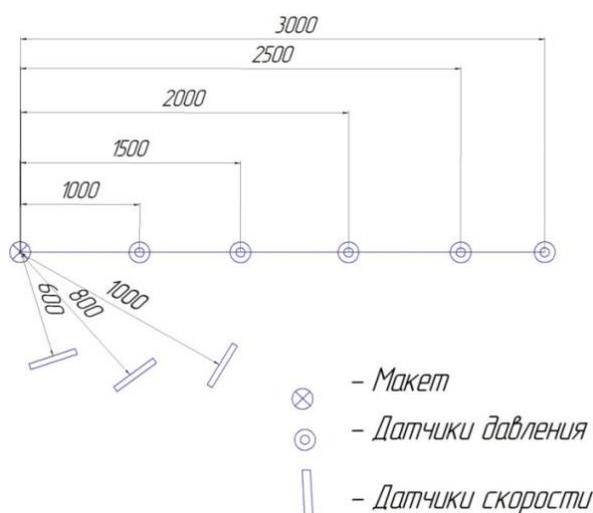


Рис. 13. Схема проведения эксперимента. Рис. 14. Типичные осциллограммы регистрации изменения давления за фронтом ВУВ.

Как было показано выше, "эффект догорания" возрастает с увеличением скорости движения ПД в воздухе и наиболее заметен для алюминий содержащих ВВ. Естественно ожидать, что он проявится при сравнении результатов измерений, полученных при одностороннем и двухстороннем инициировании зарядов как для ВВ, содержащих добавку дисперсного алюминия, так и для ВВ без добавки. Для выявления «эффекта догорания» провели эксперименты по измерению давления воздушных ударных волн (ВУВ) и скоростей осколков при одностороннем и двухстороннем инициировании осколочных макетов №12 [96], наполненных прессованными зарядами $\varnothing 40 \times 160$ мм из Окфола-3,5 и А-IX-2 (рис. 16). Иницирование осуществляли электродетонаторами ЭД-202 с одновременностью срабатывания не хуже 1 мкс. Измерения давления ВУВ проводили с помощью пьезоэлектрических датчиков Kistler на расстояниях от 1 м до 3 м. Измерение скоростей осколков производили с помощью электроконтактных датчиков, изготовленных из алюминиевых фольг, разделенных трансформаторной бумагой, и размещенных на стальных подложках толщиной 10 мм. Данные с датчиков регистрировали на осциллографах Tektronix. Схема экспериментов представлена на рисунке 13.

На рис. 14 показаны типичные осциллограммы, полученные при подрыве осколочного макета.

Погрешность измерения давления ВУВ, оцененная по воспроизводимости результатов, составляет ~6%. Аппаратурная погрешность измерения скорости осколков не превышает 10 м/с. В то же время, учитывая сложность регистрации скоростей эшелонированного потока осколков, фактическая погрешность измерения была значительно выше. Анализируя результаты измерения скоростей осколков, необходимо отметить высокий разброс результатов между параллельными измерениями и предварительный характер абсолютных значений скоростей. Тем не менее, сравнительные результаты представляются убедительными.

Таблица 4 Результаты проведения сравнительных испытаний осколочных макетов

ВС Схема инициирования	Плотность, г/см ³ (относительная)	Давление ВУВ, bar на расстоянии, м					Скорость осколков, м/с
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
А-IX-2 1-стороннее	1,715 (94%)	8	2,12	1,52	0,951	0,714	920
А-IX-2 2-стороннее		9,67 +21%	2,33 +10%	1,843 +21%	-	0,76 +6%	990...1090
Окфол-3,5 1-стороннее	1,77 (97%)	-	2,093	1,241	0,699	0,512	>1300
Окфол-3,5 2-стороннее		-	1,795 -14%	0,945 -14%	0,71 +2%	0,635 +24%	1130

Полученные результаты приведены в таблице 4. Зарегистрировано заметное (~13%) повышение скоростей осколков для А-IX-2 при двухстороннем инициировании по сравнению с односторонним инициированием. В то же время, для Окфола-3,5 наблюдается обратный эффект – столь же существенное (>13%) снижение скоростей осколков при

двухстороннем инициировании. Зависимость максимального избыточного давления от расстояния графически представлена на рисунке 15.

Как видно из данных таблицы и графиков рис.15 схожие результаты наблюдаются при измерении давления ВУВ. При двухстороннем инициировании для макетов, наполненных А-IX-2, наблюдается повышение давления ВУВ на всех расстояниях регистрации в среднем на 15%. В то же время, для макетов, наполненных Окфолом, для расстояний 1,5 м и 2 м при двухстороннем инициировании происходит снижение давления ВУВ на 14% по сравнению с односторонним инициированием. На расстоянии 2,5 м происходит выравнивание давлений, а на расстоянии 3 м эффект от двухстороннего инициирования становится положительным.

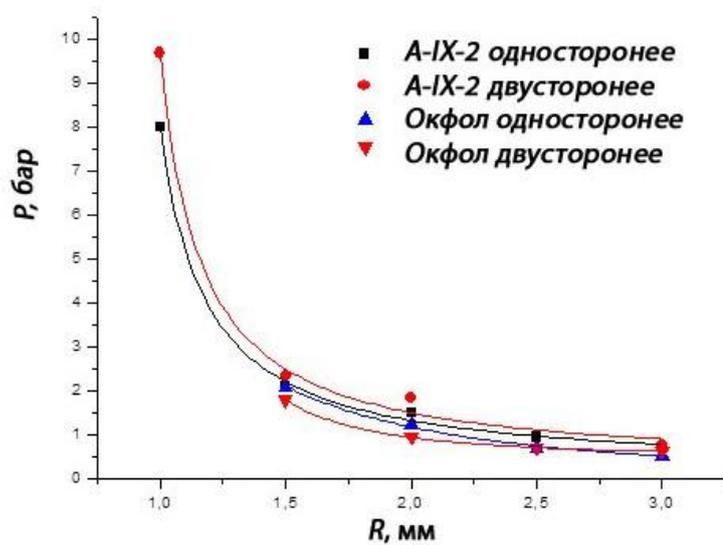


Рис. 15. Максимальное избыточное давление ВУВ для макетов, наполненных А-IX-2 и Окфолом-3,5 при одностороннем и двухстороннем инициировании, в зависимости от расстояния

Для дополнительного изучения эффекта догорания ПД методом 3-х кадровой рентгено-импульсной съемки были проведены измерения скоростей метания стальных оболочек. Оболочки имели толщину 2 мм и метались зарядами Окфола диаметром 20мм и высотой 80мм при 1-стороннем и 2-стороннем инициировании (рис.15) как в среде воздуха с атмосферным давлением, так и в барокамере с остаточным давлением воздуха $\leq 0,1$ атмосферы. Относительная к диаметру заряда толщина трубки

в 2,5 раза меньше, чем относительная толщина боковой стенки макета. С помощью рентгенограмм (рис.17) получали x-t диаграммы движения среднего сечения оболочки. Скорость оболочки получали, обрабатывая результаты методом наименьших квадратов. Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5. Скорости разлета 2мм стальных трубок при 1- и 2- стороннем инициировании

ВВ, Иницирование	Среда	Плотность, г/см ³	Скорость расширения трубки в среднем сечении, м/с	Относительная скорость, %
Окфол-3,5, 2-стороннее	Барокамера	1,76	2112±22	109
Окфол-3,5, 2-стороннее	Воздух	1,76	2041±25	106
Окфол-3,5, 1-стороннее	Воздух	1,76	1931±31	100

Как видно из данных таблицы 5 в этих условиях испытаний скорость метания оболочки на воздухе зарядом Окфола при 2-стороннем инициировании не снижается, а возрастает на 6%. Для сравнения скоростей метания на воздухе и в вакууме обратимся к данным работы [97]. Было показано, что для заряда из А-IX-1 того же диаметра (20 мм), помещенного в стальную оболочку той же толщины 2 мм, при 1-стороннем инициировании разность в результатах по скорости метания барокамера - воздух составила +24%.

При двустороннем инициировании зарядов из Окфола \varnothing 20x80мм (рис.16), помещенных в 2мм стальную оболочку, когда скорость метания оболочки и скорость истечения ПД при соударении встречных детонационных волн возрастает (рис. 17), разница в скоростях в барокамере и на воздухе сократилась до +3% (табл.5).

Подведем итоги: при односторонней детонации в составе А-IX-2 алюминий не полностью реагирует с ПД и окружающим воздухом за времена ускорения фрагментов оболочки и формирования ВУВ. В то же время, при двусторонней детонации возрастают скорости истечения ПД и возникают

более благоприятные условия для догорания алюминия и передачи

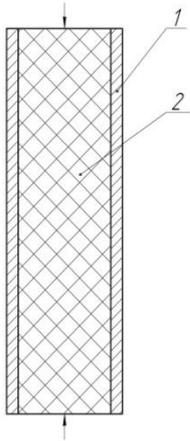


Рис.16 Схема сборки:
1-трубка; 2-ВВ

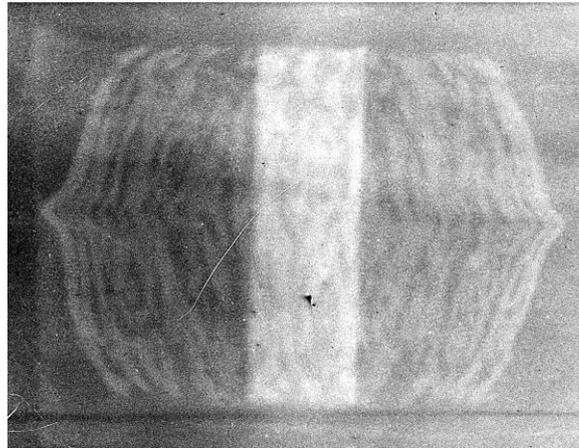


Рис.17 Рентгенограмма расширения трубки через 28,58 мкс после двустороннего инициирования

выделившейся энергии окружающей среде.

По этой причине, как скорости осколков, так и давления ВУВ при двухстороннем инициировании А-IX-2 возрастают на всех базах измерения. Условия для догорания ПД Окфола при двухстороннем инициировании также улучшаются, что проявилось в возрастании давления ВУВ на последней базе измерения.

Снижение скоростей осколков и давления ВУВ на ближних базах измерения при 2-стороннем инициировании для макетов, наполненных Окфолом, вероятно, связано с более ранним разрушением оболочки при двустороннем инициировании вследствие соударения встречных детонационных волн и связанным с этим ухудшением условий энергообмена между ПД и окружающей средой (оболочкой и воздухом). При двустороннем инициировании раньше возникает волна разгрузки и энергообмен между ПД и оболочкой, вероятно, завершится при меньшей степени расширения ПД V_0/V . Это в свою очередь означает, что меньшая часть общей энергии взрыва трансформируется в полезные формы работы взрыва, в том числе в кинетическую энергию осколков оболочки. Последнее вытекает, например, из выражения для идеальной работы взрыва [3]:

$$A = Q \left[1 - \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\gamma-1} \right], \quad \text{где } Q - \text{теплота взрыва, а } \gamma - \text{показатель адиабаты,}$$

V_0/V – степень расширения ПД. Наложение положительных и отрицательных факторов при двухстороннем инициировании для различных ВВ определяет результат измерений.

В то же время, изменение знака эффекта (с отрицательного на положительный), полученного от 2-стороннего инициирования заряда Окфола при метании трубки, рис. 16, вероятно, подтверждает общую тенденцию увеличения «эффекта догорания» с уменьшением толщины метаемой оболочки и увеличением скорости движения ПД, которая была продемонстрирована в [97] и ранее для алюминий-содержащих ВВ [98].

Таким образом, измерения параметров ВУВ и скоростей осколков при инициировании ВВ с одной и с двух сторон показали существенное влияние «эффекта догорания» на результаты измерения показателей фугасного и осколочного действия взрыва. Полученные результаты, в частности, означают, что оптимальные содержания добавок алюминия в ВВ для зарядов с двухсторонним инициированием, вероятно, сместятся в область больших содержаний добавки по сравнению с зарядами с односторонним инициированием.

2.6. Электронно-микроскопические исследования частиц алюминия АСД-1 и АСД-4 .

Для последующего численного моделирования взаимодействия детонационной волны с частицами алюминия, было проведено микроскопическое исследование порошков АСД-1 и АСД-4. Определены размеры частиц, толщины оксидных пленок, а также пространственные структуры частиц алюминия в порошке.

Микроскопические исследования частиц алюминия АСД-1 и АСД-4 проводились на сканирующей электронной микроскопе (СЭМ).

Сканирующий электронный микроскоп - микроскоп, измеряющий интенсивность квантов, испускаемых образцом, при облучении его электронным пучком. СЭМ позволяет работать в широком диапазоне увеличений до 10^6 крат, что в 500 раз превышает предел увеличения лучших оптических микроскопов.

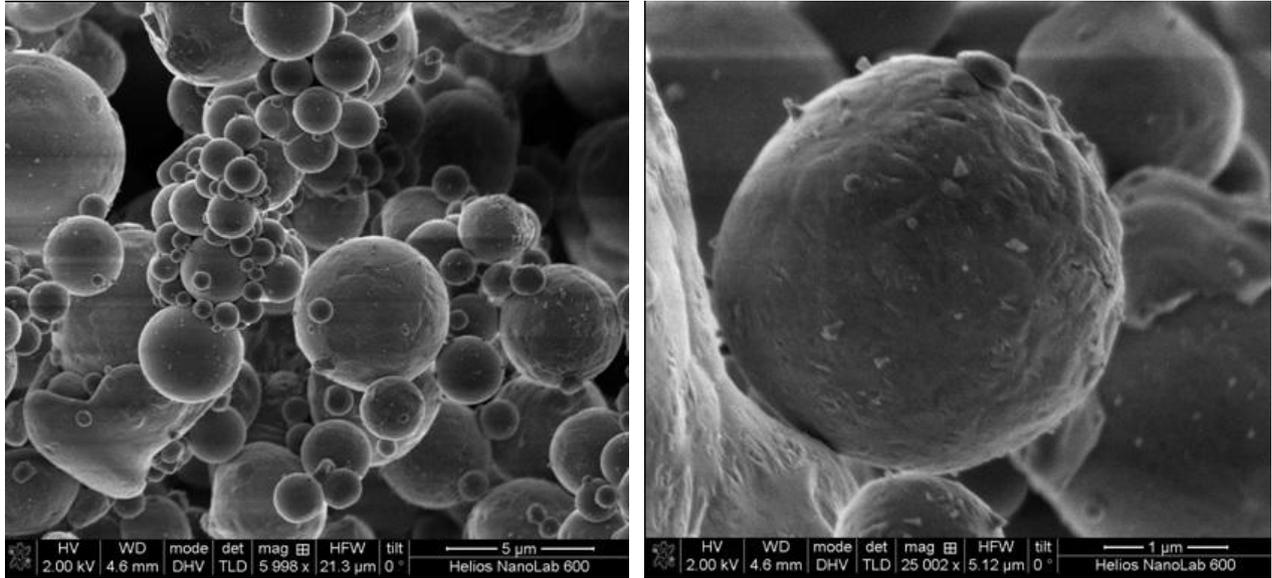


Рис. 18 Электронно-микроскопический снимок для частиц алюминия АСД-4

На рис.18 и рис.19 представлены электронно-микроскопические изображения для порошков АСД-1 и АСД-4. Полученные изображения имеют хорошее пространственное разрешение. Частицы алюминия сферические, средний размер частиц 7,4 мкм, среднемассовый размер частиц 18,3 мкм. На снимке видно, что частицы алюминия различного размера образуют плотноупакованные цепочки.

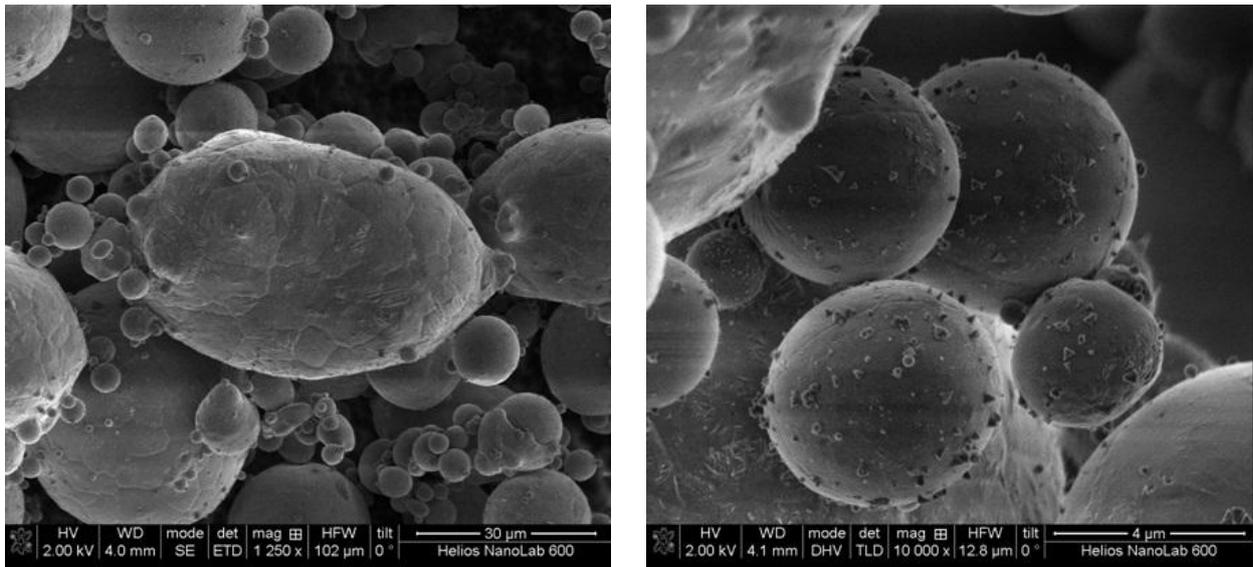
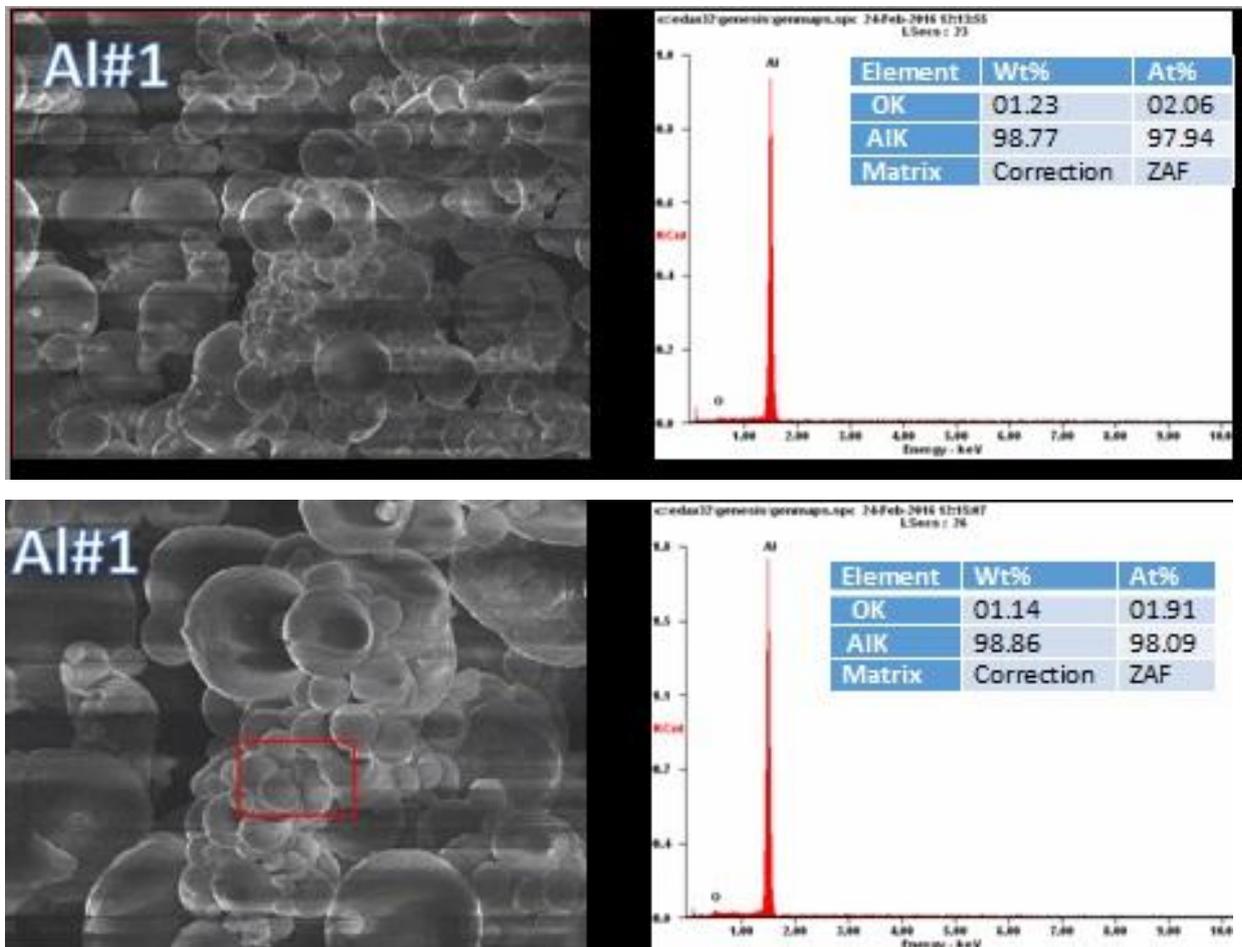


Рис. 19 Электронно-микроскопический снимок для частиц алюминия АСД-1

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, порошков АСД-1 и АСД-4, была проведена на микрозонде РНИ Quanterra SXM. На рис.20 представлены данные анализа химического состава, взятого с областей, выделенных на рисунках красным квадратом.



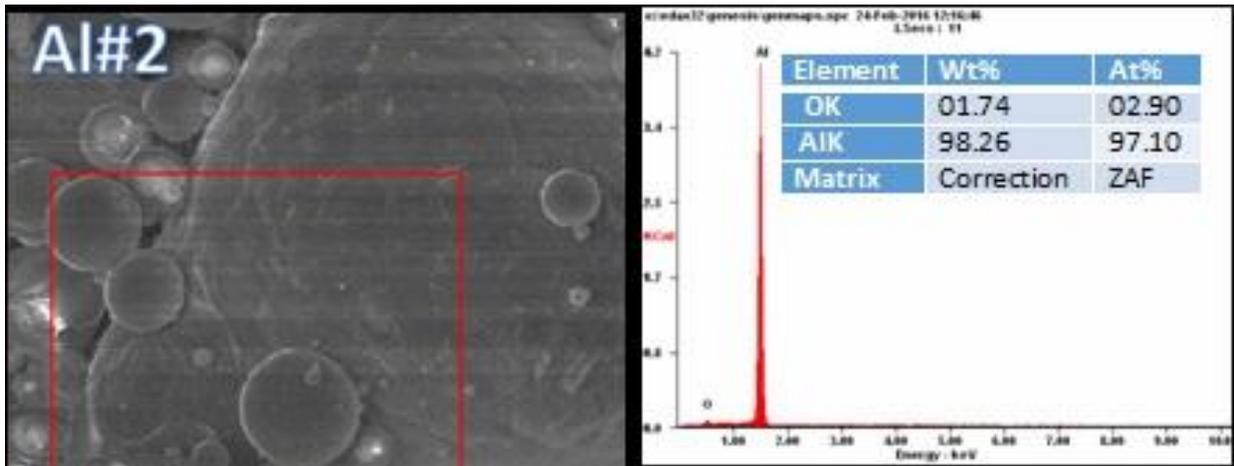


Рис.20 Спектральный анализ химического состава

Для порошка АСД-4 массовая доля оксида алюминия в рассмотренных зонах составляет от 1,14 до 1,23%, атомарная доля составляет от 1,91 до 2,06%. Для порошка АСД-1 массовая доля оксида алюминия составляет 1,74%, атомарная доля 2,90%.

Исследования толщин оксидных пленок на поверхности частиц алюминия были проведены с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Просвечивающий электронный микроскоп - устройство для получения изображения ультратонкого образца путем пропускания через него пучка электронов. ПЭМ позволяет увидеть и изучить строение отдельных молекул, кристаллических решеток, материалов и т.д.

На рис. 21 представлен срез единичной частицы, выполненный ионным пучком. Предварительно на поверхность частицы осуществляется напыление защитного слоя из платины.

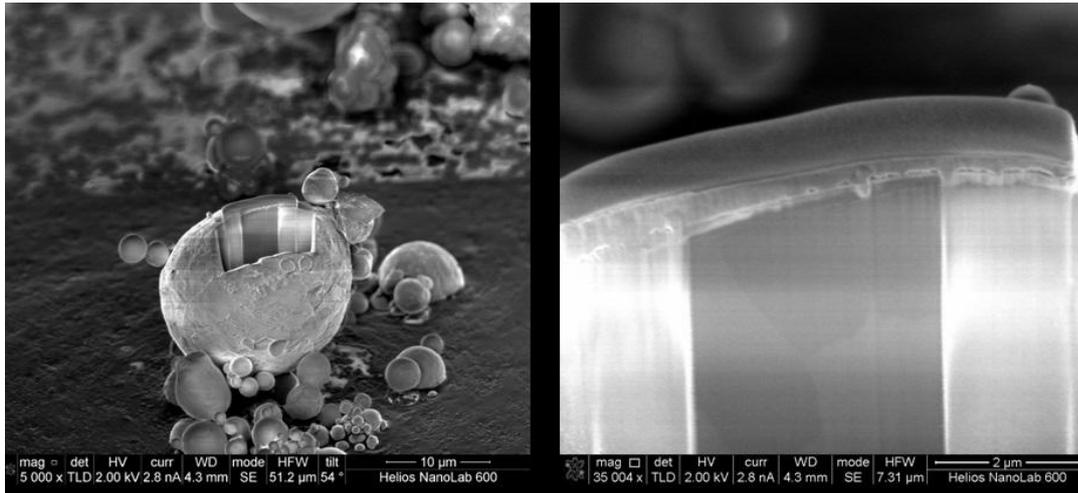


Рис.21. Изготовление тонкого образца для ПЭМ

На рис. 22 представлено ПЭМ-изображение поперечного среза частицы алюминия. Отчетливо видны линии кристаллической решетки алюминия и платины. Между платиной и алюминием находится керамическая пленка из оксида алюминия, толщина которой составляет от 3 до 8 нм.

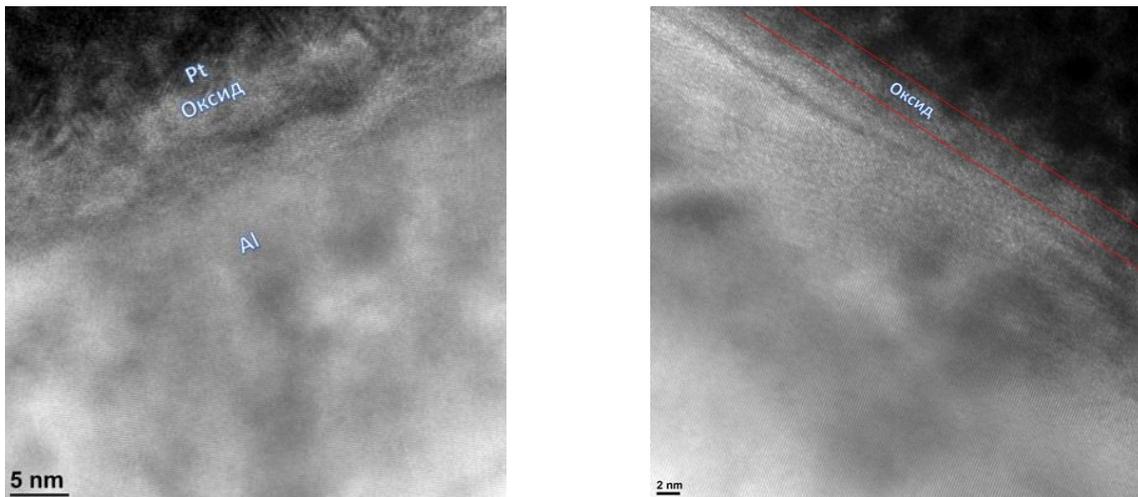


Рис. 22. ПЭМ- изображение поперечного среза частицы алюминия.

2.7 Изучение профилей давления продуктов детонации алюминизированных ВВ при истечении через щели

Изучение процессов, происходящих при истечении продуктов детонации через щели при разрушении оболочки, времени реакции алюминия, а также и профилей давления представляют большую сложность, так как моделирование такого процесса должно включать в себя модель

разрушения стальной оболочки и теорию турбулизации. Поэтому для моделирования истечения ПД через щели в стальной оболочке были предложены опыты по схеме, представленной на рис. 23. В данном случае, истечение продуктов через фильеру схоже с истечением ПД через щели, образующиеся при разрушении стальных оболочек.

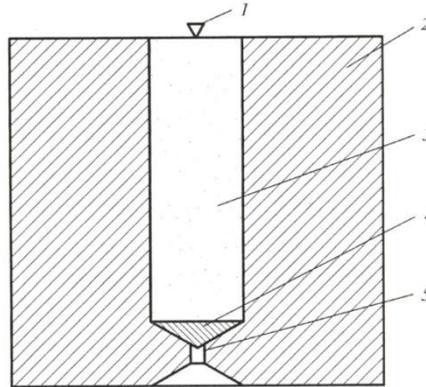


Рис.23. Схема эксперимента по взрывной экструзии алюминия: 1 –электродетонатор, 2 – стальной корпус, 3 –ВВ, 4 – конус из экструдированного металла, 5 – фильера

В первой серии экспериментов были проведены опыты по взрывной экструзии алюминия, в которых с помощью пьезодатчиков регистрировали профили давления ударных волн, образующихся при горении диспергированного в результате экструзии алюминия в воздухе [99]. Экструзия компактного алюминия через фильеру и горение дисперсных частиц с воздухом похожи на истечения ПД алюминизированных ВВ через щели в оболочке. Во второй серии экспериментов, для более полного моделирования истечения ПД через щели, алюминиевый конус 4 был удален, фильеру заткнули пластилином, а весь канал заполнили смесью ТНТ с 23% порошка алюминия (ТА-23). Датчики давления фиксировали ударные волны, образующиеся при истечении ПД через фильеру. На рис. 24 представлены полученные результаты. Видно, что при детонации ТГ-50 происходит плавный спад давления. При экструзии алюминия датчики фиксировали резкие скачки давления, рис. 24- а, б, в. По оценкам, эти скачки связаны

только с процессом горения алюминия и никак не связаны с реверберацией ударной волны по экструдированному образцу.

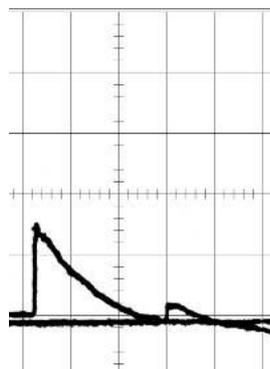


Рис.24-а.
Осциллограмма
давление-время при
подрыве заряда из ТГ-50
массой 160г.

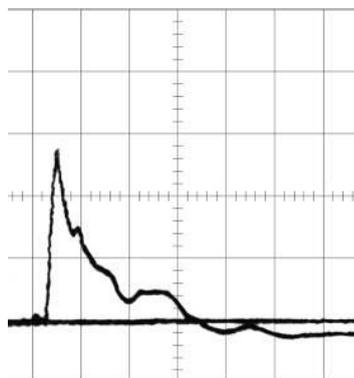


Рис.24-б.
Осциллограмма давление-время
при экструзии алюминия
массой ~1,5г. ВВ:18,5 г ТА-23.
Развертка 100 мкс/деление.

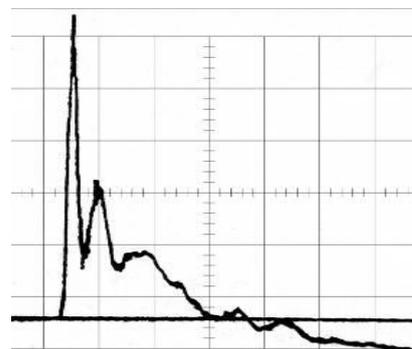


Рис.24-в.
Осциллограмма давление-
время при истечении через
фильеру ПД ТА-23.
Развертка 100 мкс/деление.

Наконец, в опытах, максимально приближенных к реальному процессу истечения ПД через щели, рис. 24-в, были зафиксированы скачки давления с периодом 50-100мкс. Отметим также, что на рис. 24-б,в наблюдаются значительные отрицательные фазы давления, что свидетельствует о реакции горючих материалов с воздухом. Таким образом, в этих экспериментах показано существенная роль процессов, происходящих на контактной границе ПД с воздухом. По данным этих экспериментов, можно судить о характерном времени догорания алюминия, а также о том, что этот процесс носит скачкообразный характер. Данные результаты крайне важны при моделировании процессов детонации алюминизированных взрывчатых веществ.

2.8 Обработка экспериментальных результатов рентгено-импульсной съемки. Определение скоростей разлета трубок.

Для определения скоростей разлета оболочек под действием детонационной волны применялась компьютерная обработка рентгеновских снимков, сделанных в определенные моменты времени после начала процесса разлета.

Для обработки рентгеновских снимков были написаны две программы ПОРС-1, ПОРС-2 (программа обработки рентгеновских снимков) на языке программирования C++. ПОРС-1 полностью автоматическая, ПОРС-2 требует от пользователя выделения вручную границ репера и оболочки. Ниже, коротко изложены алгоритмы данных программ.

Алгоритм программы ПОРС-1: создается копия изображения, размывается Гауссовым размытием с ядром 41 (данное значение было получено эмпирически). Гистограмма изображения выравнивается и делается бинаризация изображения.



*Рис.2. Бинаризация изображения с жестким порогом чувствительности – а, б).
Изображение а), после применения оператора Canny – в)*

После бинаризации, используя оператор Canny, оставляются только границы линий.

Как видно из рис. 25-в, применение оператора Canny не дает четких границ, поэтому пишется функция подбора параметров Canny через медиану изображения.

```

# compute the median of the single channel pixel intensities
v = np.median(image)
# apply automatic Canny edge detection using the computed median
lower = int(max(0, (1.0 - sigma) * v))
upper = int(min(255, (1.0 + sigma) * v))
edged = cv2.Canny(image, lower, upper

```

С помощью алгоритма Хафа находятся прямые линии изображения. После применения алгоритма Хафа, на выходе получаем массив отрезков прямых различной длины и наклона. Набор данных прямых фильтруется по углу наклона. Максимальное отклонение по углу задавалось в шестьдесят градусов. Остальные прямые отбрасывались. Вычисляется средний угол отклонения от вертикали, после чего изображение поворачивалось на данный угол относительно центра. Поворот происходит через матрицу поворота аффинного преобразования. Получается множество отрезков, в ходе их объединения на выходе получают два отрезка Рис. 26.

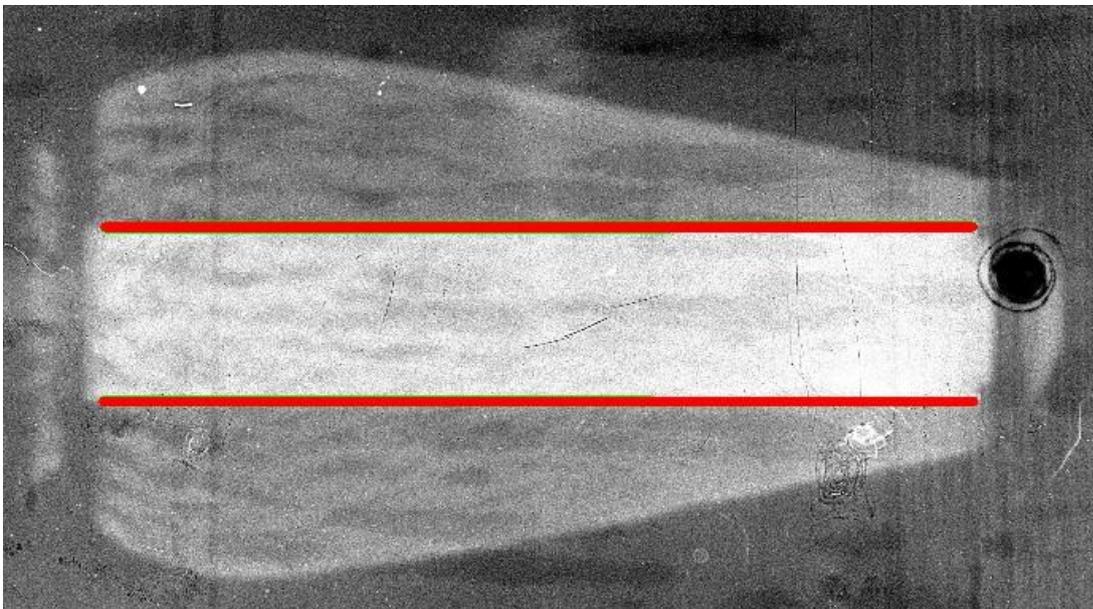


Рис.26 Нахождение границ репера программой ПОРС-1

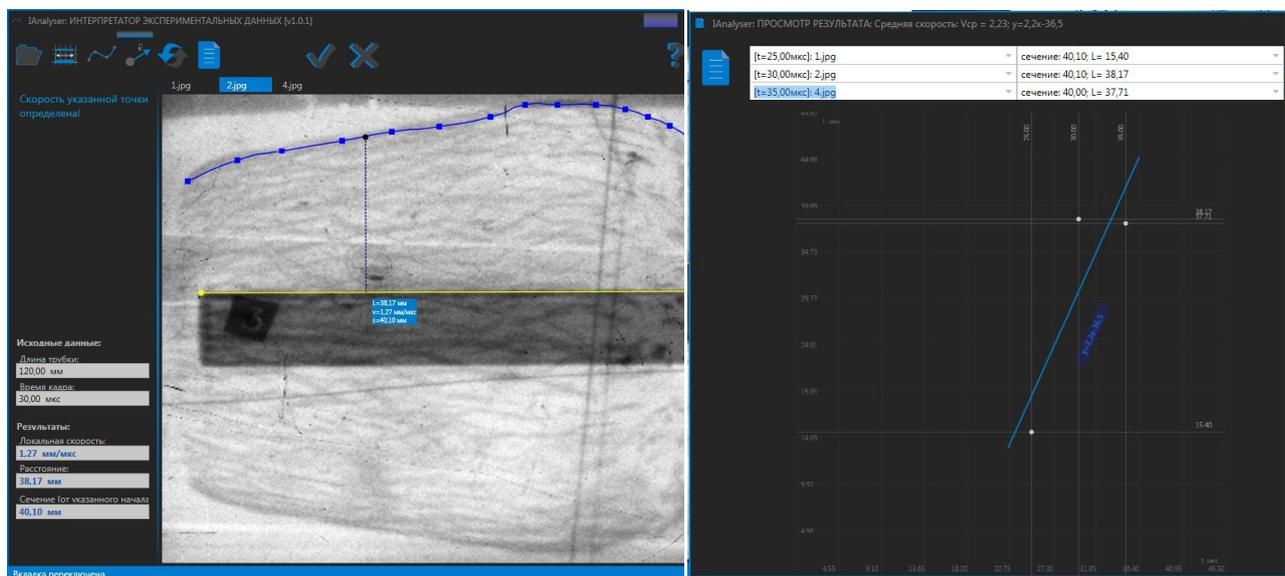
На следующем этапе работы программы второе изображение изменяется относительно первого так, чтобы ширина реперных прямоугольников была одинаковой. Далее, два репера выравниваются и

центрируются. Аналогично первому этапу находятся границы фронта. В ходе работы получают точки, которые потом аппроксимируются сплайном.

Далее задается сечение, в котором требуется посчитать скорость расширения оболочки и время задержки включения рентгеновского аппарата.

Недостатком данной программы является настраиваемый порог чувствительности, который для каждого отдельного изображения может быть различен. Края в отличие от репера не являются ярко выраженными и их тон близок к тону шума.

Алгоритм программы ПОРС-2:



а

б

Рис. 27. а) масштабирование и выделения границы разлетающейся оболочки в программе ПОРС-2. б) построение X-t диаграммы в программе ПОРС-2

Для того, чтобы сделать масштабирование изображений, необходимо задать длину репера в окне "длина трубки". После чего последовательно выделить начало и конец большей грани трубки.

Граница разлетающейся оболочки задается последовательным проставлением точек по краю деформированной области. ПОРС-2 строит кривую Безье третьего порядка через заданные точки.

Для определения расстояния, на которое сместилась оболочка за заданное время, необходимо на кривой выделить точку в заданном сечении. Значение сечения выводится чуть ниже курсора мыши.

В подменю "Построение результата" необходимо выделить данные, соответствующие требуемому сечению, после чего программа строит X-t диаграмму и выводит значение скорости.

Глава 3. Обработка экспериментальных результатов с использованием математических методов и алгоритмов интерпретации полученных данных. Математическое моделирование разлета продуктов детонации и метания тел различной конфигурации для взрывчатых веществ и алюминизированных взрывчатых составов.

Несмотря на то, что экспериментальные исследования играют ключевую роль в изучение процессов детонации алюминизированных взрывчатых веществ, теоретический анализ и математическое моделирование помогают лучше понять природу процессов, протекающих при детонации данных взрывчатых составов. Кроме того, трудности связанные с проведением экспериментальных исследований диктуют необходимость существенного сокращения количества испытаний. В этой связи существенно возрастает значение и практическая ценность исследований, проводимых на основе численных методов механики сплошной среды, которые предъявляют повышенные требования не только к качеству физико-математических моделей, но и уровню разработанных на их основе алгоритмов.

3.1 Численное моделирование взаимодействия частиц алюминия с детонационной волной.

3.1.1 Модель разрушение оксидной пленки при ударно-волновом сжатии.

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 характерные времена $t_l = 1...10$ 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. Оценки градиента массовой скорости между ВВ и частицами металла показывают, что его значение для алюминия находится в пределах $10^2 \dots 10^3$ м/с для диапазона давлений от 3 до 30 ГПа. Обтекание частицы алюминия размером 1...10 мкм взрывчатým веществом с указанными скоростями должно приводить к сносу первоначальной окисной пленки за время $t_2 = 10 \dots 100$ нс. При сгорании алюминия, вследствие перераспределения энергии между упругой и тепловой в пользу последней, с увеличением полноты сгорания Al скорость детонации должна снижаться.

Было проведено математическое моделирование сноса оксидной пленки с поверхности алюминия. Схема вычислительного эксперимента приведена на рис. 28.

Численное моделирование проводилось в системе RUSS-2D.

В этой системе расчет деформирования и разрушения твердых тел производится на основе численной схемы Уилкинса [103], газовая динамика и распространение детонационных волн рассчитываются с использованием метода Годунова.

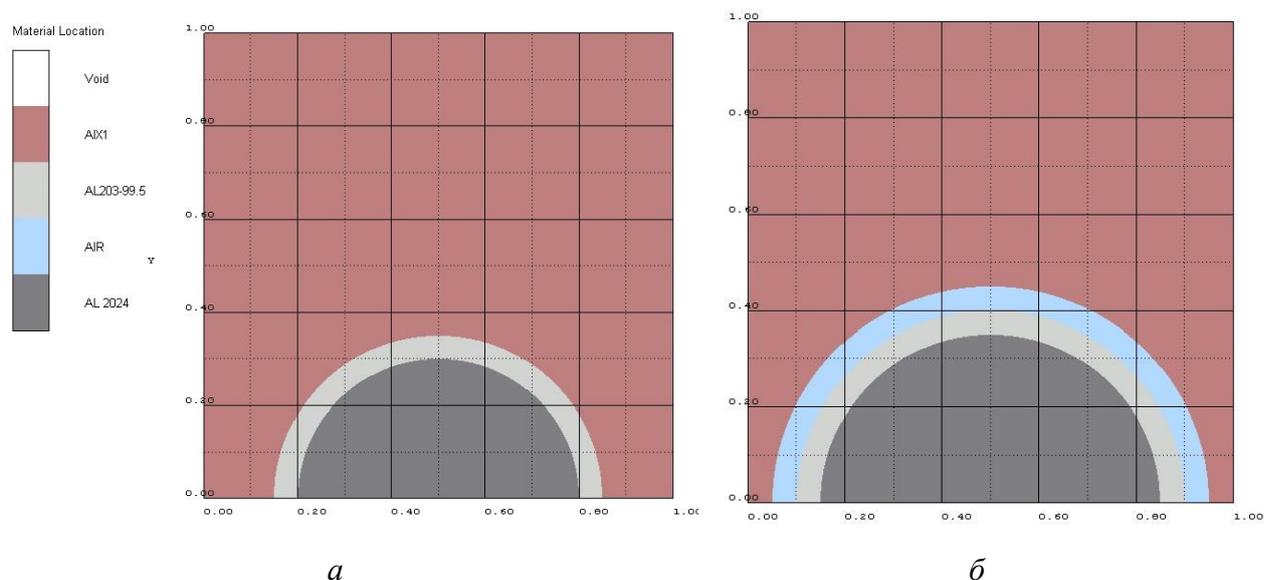


Рис. 28 Общая схема расчета: а – частица, плотно прилегающая к ВВ, б - между частицей и ВВ слой воздуха.

Максимальные значения давления в детонационной волне значительно превосходят значения давления, при котором происходит разрушение керамики Al_2O_3 . Однако следует учитывать время зарождения и распространения трещин в материале и возникающее упрочнение материала при действии высоких давлений. Необходимо продолжительное воздействие на материал, чтобы он разрушился. Для моделирования динамического деформирования хрупких материалов используется модель Джонсона-Холмквиста (Johnson-Holmquist) [102]. В данной модели предел прочности для хрупкого материала меняется в процессе его разрушения от предела прочности неповрежденного материала σ_0 до предела прочности полностью разрушенного материала σ_p . Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p) \quad (1)$$

где D - поврежденность ($0 \leq D \leq 1$).

Поврежденность определяется как относительная накопленная пластическая деформация: $D = \sum \Delta \varepsilon_{пл} / \varepsilon_{пл}^p$, где $\Delta \varepsilon_{пл}$ - элементарная пластическая деформация, $\varepsilon_{пл}^p$ - условная предельная пластическая деформация при постоянном давлении p , при котором материал разрушается. При вычислении предельной пластической деформации учитывали, что действие сжимающих напряжений приводит к упрочнению хрупких материалов, а также что керамика может разрушаться под действием растягивающих напряжений:

$$\varepsilon_{пл}^p = D_1 (P + T_p)^{D_2} \quad (2)$$

где $P = p/Y$ - безразмерное давление, Y - предел упругости Гюгонио (предел упругости на ударной адиабате материала); $T_p = T_p^*/Y$ - безразмерное максимальное напряжение всестороннего растяжения, которое материал может выдержать без разрушения; T_p - максимальное напряжение на растяжение при гидростатическом воздействии; D_1, D_2 - постоянные.

Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материала зависят от текущих значений давлений и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$:

$$\sigma_0 = A(P + T_p)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_0 = BP^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (4)$$

Здесь A, N, C, B, M - постоянные; $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0c^{-1}$.

Предел прочности разрушенной керамики ограничен сверху значением $\sigma_{p\max} = gY$, где g - постоянная.

Гидростатическое давление определяют по уравнению

$$p = K_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right) - K_2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^2 + K_3 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^3 + \Delta p \quad (5)$$

в котором K_1, K_2, K_3 - постоянные. После того как материал начинает разрушаться ($D > 0$), давление в материале увеличивается на Δp вследствие превращения высвобождающейся упругой энергии в потенциальную энергию сжатия. При $D=1$ вся упругая энергия из-за потери материалом сдвиговой прочности превращается в потенциальную энергию всестороннего сжатия.

Значения постоянных в модели Джонсона-Холмквиста для керамики Al_2O_3 : $E=379 ГПа$, $Y=3,76 ГПа$, $T=0,16 ГПа$, $A=0,98$; $B=0,35$; $C=0$; $M=1,0$; $N=0,39$; $D_1=0,0070$; $D_2=1,24$.

В качестве ВВ был выбран состав А-IX-1. Для частиц алюминия $d < 2 \mu m$ разрушение керамической пленки Al_2O_3 происходит сразу же во фронте детонационной волны. Это наглядно видно на рис. 30. Для частиц большего диаметра во фронте наблюдается небольшая зона, в которой долгое время сохраняется область неразрушенной оксидной пленки. Сразу же за разрушением пленка, превратившаяся в порошок, сдувается с поверхности частицы алюминия набегающим потоком газов (продуктов взрыва). Перепад скорости на границе частицы равен, примерно 700 м/сек.

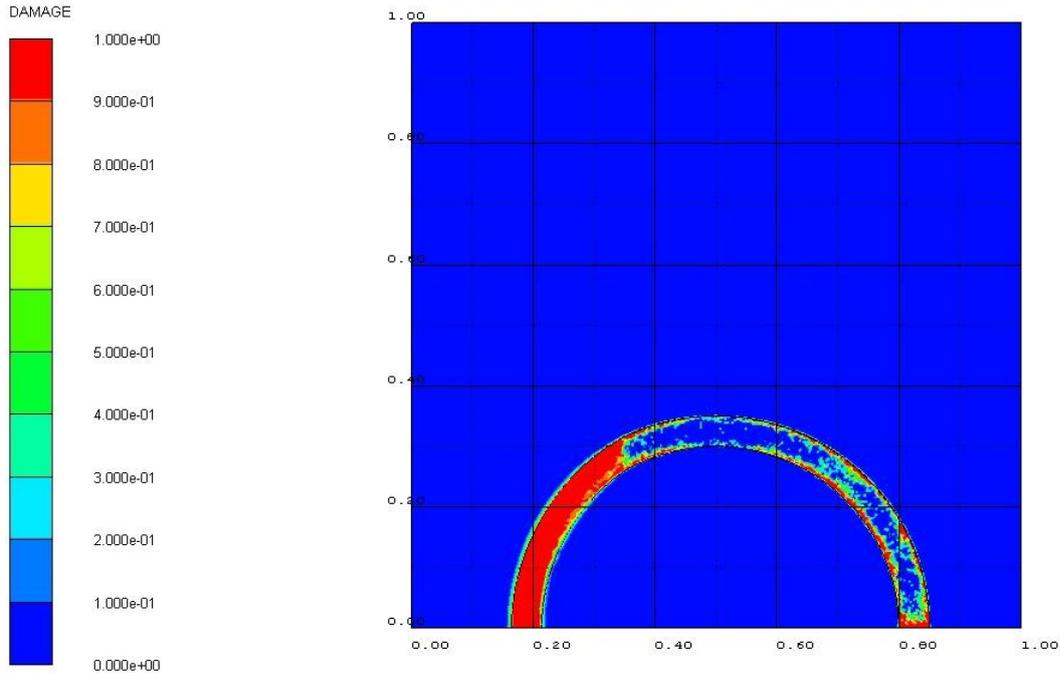


Рис.29 Степень поврежденности оксидной пленки для времени $t = 0,54$ мкс

Предел текучести для керамики Al_2O_3 перед детонационной волной равен 38 кбар, а сразу же за фронтом падает до нуля, т.е. керамическая пленка разрушается.

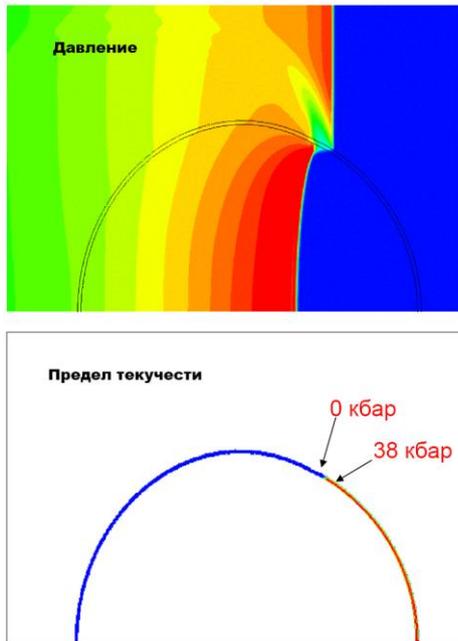


Рис. 30. Разрушение оксидной пленки во фронте детонационной волны

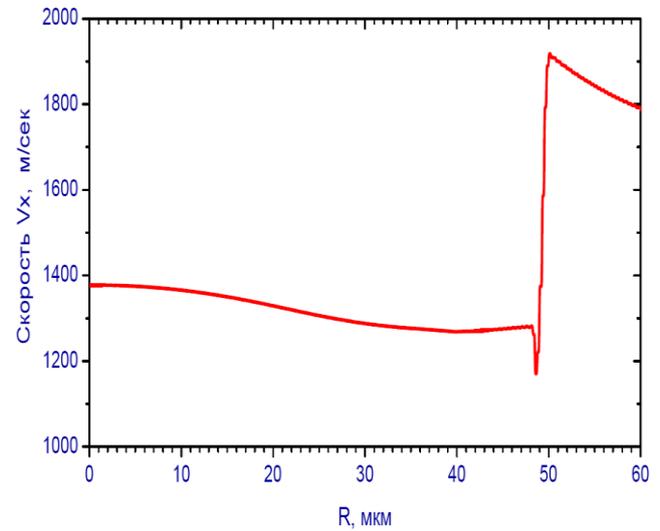


Рис. 31. Перепад скорости на фронте детонационной волны.

На рис. 31 показан профиль скорости в сечении, проходящем через центр частицы алюминия.

Расчеты показали, что сдвиг оксидной пленки заканчивается сразу после прохождения детонационной волны. Таким образом, у частиц в ЗХР происходит снос оксидной пленки. Наличие свободной от оксидной пленки поверхности частицы может приводить к значительному энерговыделению за счет процесса горения.

3.1.2 Модель для линейной скорости горения частиц алюминия.

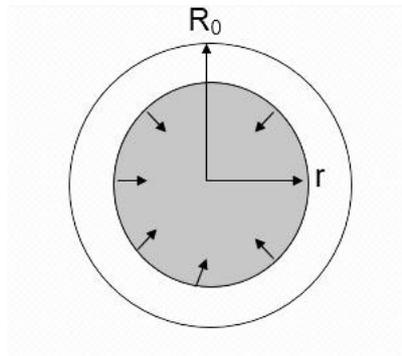


Рис. 32 Изменение размера частицы. R_0 – начальный радиус частицы, r – текущий радиус частицы, λ – сгораемый объем частицы.

$$\lambda = 1 - \frac{V_{\text{осман}}}{V_0} \Rightarrow \frac{V_{\text{осман}}}{V_0} = 1 - \lambda \Rightarrow \frac{4/3\pi r^3}{4/3\pi R_0^3} = 1 - \lambda \Rightarrow \frac{r^3}{R_0^3} = 1 - \lambda \Rightarrow r = R_0(1 - \lambda)^{1/3}$$

$$-\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{V_0} \frac{dr}{dt} S = \frac{1}{V_0} \frac{dr}{dt} 4\pi r^2 = \frac{1}{V_0} \frac{dr}{dt} 4\pi R_0^2 (1 - \lambda)^{2/3} = \frac{1}{4/3\pi R_0^3} \frac{dr}{dt} 4\pi R_0^2 (1 - \lambda)^{2/3}$$

$$\frac{dr}{dt} = aP^n \quad - \quad \text{классическое выражение для линейной скорости горения,}$$

$$-\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{4/3\pi R_0^3} aP^n 4\pi R_0^2 (1 - \lambda)^{2/3} = KP^n (1 - \lambda)^{2/3} \quad (9)$$

где K , n – калибровочные параметры.

Для гомогенного процесса будем использовать простую кинетическую форму, которая обладает достаточной точностью в наших расчетах.

$$\left(\frac{d\lambda}{dt}\right)_{\text{hom}} = Z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(1-\lambda) \quad (10)$$

где Z – константа, E – энергия активации. Ниже приведены калибровочные параметры: $I=0,264$ нс, $V=48.1$ Мбар², $n=2$, $Z=5.5e+4$ нс⁻¹, $E=9.6$ ккал/мол.

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, после чего будет дальше прогреваться до достижения температуры, при которой происходит его сгорание. По сравнению со скоростью прохождения детонационной волны это долгий процесс, требующий больших энергетических затрат. В тот момент, когда алюминий «готов» реагировать с кислородом, в продуктах детонации свободного кислорода практически не остается, поэтому реакция становится маловероятной,



Алюминий может реагировать только с ПД ВС. Это менее эффективная энергетика:



Когда частицы алюминия выходят из области газообразной фазы ПД ВС, они интенсивно начинают догорать с кислородом воздуха.

3.2 Составления уравнений состояния JWL с учетом эффекта догорания продуктов догорания во времени.

3.2.1 Уравнение состояния JWL

В данной части работы для определения поведения продуктов детонации используются уравнения состояния в форме JWL. Уравнения

состояния в форме Джонсона – Уилкинса – Ли позволяют с большой точностью описывать свойства ПД в различных тестах.

$$p_{JWL} = A_{BB} \left(1 - \frac{\omega_{BB}}{r_1 V} \right) \exp(-r_1 V) + B_{BB} \left(1 - \frac{\omega_{BB}}{r_2 V} \right) \exp(-r_2 V) + \frac{\omega_{BB}}{V} e \quad (11)$$

где $V = \rho_0 / \rho = \nu / \nu_0$ – относительный удельный объем, $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ – эмпирические (подгоночные) константы; E – внутренняя энергия на единицу объема.

В состоянии Жуге

$$E_H = E_0 + \frac{P_H}{2} (1 - V_H) \quad (12)$$

где E_0 – нормализованная величина, включающая энергию химических связей и определенная из термохимического эксперимента или данных термодинамического расчета.

В первом приближении

$$E_0 = \rho_0 (E_0 + Q)$$

Уравнению JWL соответствует $p_s(V)$ – изоэнтропа:

$$p_s = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (13)$$

При этом изменение энергии на изоэнтропе описывается зависимостью

$$E_s = \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 V) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2 V) + \frac{C}{\omega} V^{-\omega} \quad (14)$$

Для определения констант уравнения JWL, берутся экспериментальные параметры Жуге (p_H, ρ_H, E_H), что дает два уравнения $p_s = p_H$ и $E_s = E_H$, и условие касания изоэнтропой (10) прямой Михельсона в точке Жуге. Это позволяет разрешить уравнения (10) и (11) относительно параметров A, B, C и найти коэффициенты при известной величине E_0 и задаваемых (варьируемых) параметрах R_1, R_2, ω . Эти подгоночные параметры, в свою очередь, подбираются на основе решения модельной задачи так, чтобы закон движения медной цилиндрической оболочки, получаемый путем численного

двумерного газодинамического расчета, совпадал с экспериментальным законом движения оболочки. В данной работе были использованы два набора параметров уравнений состояний, полученные на основе решения модельных задач.

Таблица. 6 (УРС для гексогена)

JWL 1	JWL 2
Уравнение состояния для АИХ1	Уравнение состояния для АИХ1
$P_{\text{ВВ}} = 1,65 \text{ г/см}^3, D_{\text{ВВ}} = 8,1 \text{ км/с}, A=1157,56,$	$P_{\text{ВВ}} = 1,65 \text{ г/см}^3, D_{\text{ВВ}} = 8,1 \text{ км/с}, A=$
$B= 43.87 \text{ Гпа}, R_1= 5.476, R_2= 1.756, \omega=$	$946.6354, B= 15.1454 \text{ Гпа}, R_1= 4.92684, R_2=$
$0.3367, E= 8,29 \text{ кДж/м}^3, P=27.6 \text{ ГПа}$	$1.1855, \omega= 0.33586, E= 8.4187 \text{ кДж/м}^3,$
	$P=28.1 \text{ ГПа}$

Таблица 7.(УРС для окфола)

JWL 1	JWL 2
Уравнение состояния для окфола	Уравнение состояния для окфола
$P_{\text{ВВ}} = 1,85 \text{ г/см}^3, D_{\text{ВВ}} = 10,3 \text{ км/с}, A=843,3$	$P_{\text{ВВ}} = 1,75 \text{ г/см}^3, D_{\text{ВВ}} = 8,6 \text{ км/с}, A=1138, B=$
$B= 10.076 \text{ Гпа}, R_1= 4.7, R_2= 1.24$	$42.7 \text{ Гпа}, R_1= 5.46, R_2= 1.67, \omega= 0.27, E= 9,2$
$\omega= 0.3, E= 10,52 \text{ кДж/м}^3, P=46 \text{ ГПа}$	$\text{кДж/м}^3, P=32.36 \text{ ГПа}$

Уравнения состояния JWL1 и JWL2 отличаются друг от друга тем, что были получены при различных условиях. УРС JWL1 получен для движения медной цилиндрической оболочки в атмосфере воздуха. Для УРС JWL 2 параметры определялись не для медных трубок, которые долго тянутся и препятствуют перемешиванию ПД с кислородом воздуха, а для стальных трубок в разреженной атмосфере. Стоит отметить, что и первый и второй набор параметров уравнений состояний в проведенных численных расчетах дают схожие результаты.

3.2.2. Уравнения состояния JWL с учетом эффекта догорания продуктов догорания со временем.

Для учета дополнительного энерговыделения разработаны два различных метода, первый из них основан на использовании уравнения состояния для поведения продуктов детонации в следующем виде

$$P = P_{\lambda=0} + \frac{\omega}{V} \Delta E \quad (15)$$

$$P_{\lambda=0} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (16)$$

представляет собой базовое уравнение состояния JWL для нулевого сгорания алюминия, а ΔE представляет собой энергию, выделяемую при реакции алюминия, и она равна

$$\Delta E = \lambda Q$$

Здесь Q – энергия полного сгорания алюминия.

Таким образом, уравнение (16) явно зависит от дополнительной энергии, выделившейся при сгорании 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.

3.3. Постановка задачи моделирования.

Численное моделирование проводилось в системе RUSS-2D . В этой системе расчет деформирования и разрушения твердых тел производится на основе численной схемы Уилкинса, газовая динамика и распространение детонационных волн рассчитываются с использованием метода Годунова.

Данная система предоставляет большой спектр возможностей расчета быстропротекающих процессов. Моделирование поведения оболочек и пластин производилось с позиции механики деформируемого твердого тела. Система исходных уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v^i = 0 \quad (17)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_j \sigma_i^j \quad (18)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma^{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (19)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i) \quad (20)$$

$$\frac{ds_{ij}}{dt} + 2G\lambda s_{ij} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \delta_{ij} \right) \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{3}{2Y^2} \sigma^{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} \quad (22)$$

$$p = p(\rho, e) \quad \sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + s_{ij} \quad (23)$$

Здесь ρ – плотность; p – давление; e – удельная внутренняя энергия; v_i – компоненты вектора массовой скорости среды; δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = 1$ при $i=j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; s_{ij} – компоненты девиатора напряжений. Далее $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}$ – соответственно, компоненты тензора скоростей деформаций и его пластическая составляющие; $D(\dots)/Dt$ – производная Яуманна; G – модуль сдвига; Y – динамический предел текучести среды; λ – скалярный множитель, определяемый удельной мощностью пластической деформации. В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса и энергии, кинематические соотношения, уравнения пластического течения Прандтля – Рейса, представленные в общем виде уравнения состояния среды, взаимосвязь компонент тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими.

При условии $Y = \text{const}$ система соответствует модели идеальной упругопластической среды. В этом случае использовались соотношения, представляющие собой закон Гука в дифференциальной форме и условие пластического течения Мизеса, реализуемое посредством известной процедуры приведения напряжений на круг текучести:

$$\frac{ds_{ij}}{dt} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \delta_{ij} \right) \quad (24)$$

$$s^{ij} s_{ij} \leq \frac{2}{3} Y^2$$

Моделирование в системе проводилось на равномерной неподвижной «эйлеровой» сетке. В качестве условий на границе сетки во всех расчетах было принято условие свободного вытекания материала за границы сетки.

Система уравнений газовой динамики для адиабатного движения среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad \frac{\partial V}{\partial t} + (V \nabla) V + \frac{1}{\rho} \text{grad} p = F \quad (25-28)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + (V \text{grad} E) - \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + (V \text{grad} \rho) \right) = 0$$

$$p = p(\rho, E)$$

Здесь t – текущее время; ρ – плотность; p – давление; E – внутренняя энергия, F – вектор массовой силы;

Для осесимметричных адиабатных движений среды в цилиндрических координатах, т.е. когда все параметры зависят от координаты z , отсчитываемой вдоль оси симметрии, и от координаты r , отсчитываемой в направлении, перпендикулярном к оси симметрии, уравнения движения имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial r} u + \frac{\partial u}{\partial z} v + \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (29-33)$$

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

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

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

$$p = p(\rho, E)$$

Поведение продуктов детонации определялось при помощи двух наборов уравнения JWL [91] (JWL1, JWL 2). Поведение воздуха описывалось уравнением политропы с показателем 1,40. Физическое поведение стали и меди описывались с использованием ударной адиабаты в форме Ми-Грюнайзена [91]. Механическое поведение стали описывалось с использованием модели Джонсона-Кука (Jonson-Cook).

3.4. Численное моделирование методики М-40, а также разлета ПД зарядов без оболочки

Постановка задачи моделирования методики М-40 представлена на рис. 33.

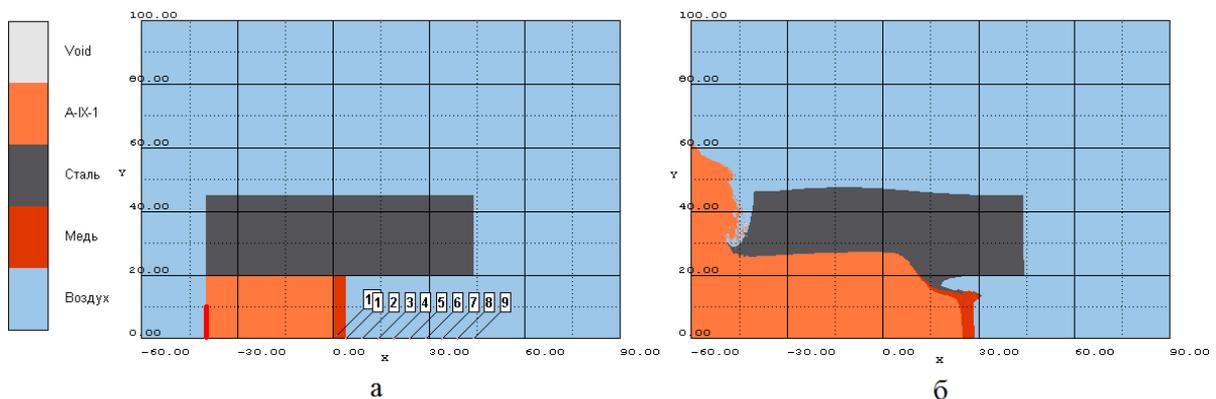


Рис. 33. Численное моделирование методики М-40 при временах: а – 0 мкс; б – 20 мкс

Шаг равномерной неподвижной сетки был принят равным 0,2 мм, таким образом, полное количество ячеек расчетной сетки составило 135751. Красной линией выделено «пятно» инициирования, представляющее собой площадку соответствующего промежуточному детонатору диаметра. Скорость разгона пластины определялась с использованием виртуальных датчиков. Использовались 9 датчиков (обозначены номерами 1-9 на рис. 33), зафиксированных в узлах расчетной сетки на одинаковом расстоянии друг от друга. По скачку плотности, зарегистрированному на датчике, определялось время прихода к нему материала пластины. На основании полученных времен прихода и известных расстояний между датчиками вычислялись скорости пластины в заданных интервалах расстояний.

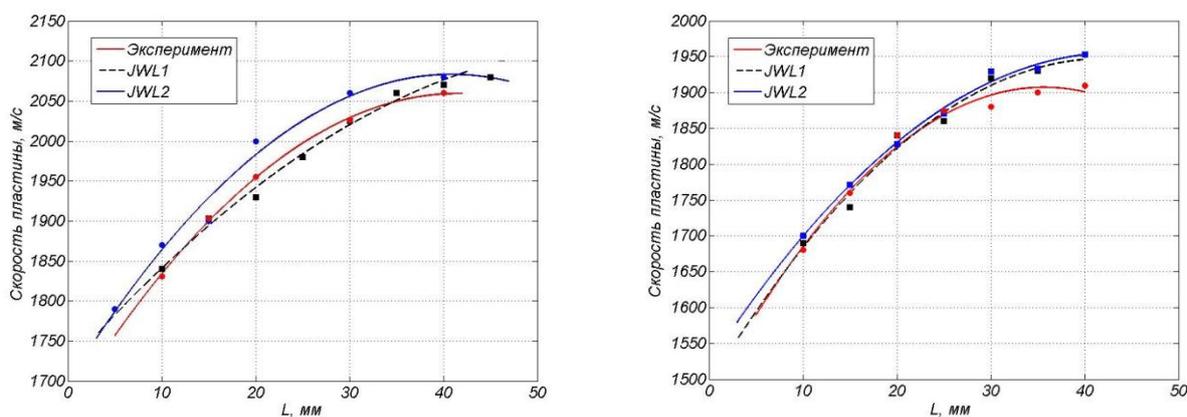


Рис. 34. Сравнение скоростей полета пластины по методике M-40 определенных экспериментально и численно для: а – окфола-3,5 ($\rho=1,75 \text{ г/см}^3$); б – А-IX-1 ($\rho=1,65 \text{ г/см}^3$)

На рис. 34. представлены графики зависимостей полученных в результате численного моделирования, а также экспериментальных данных для зарядов окфола-3,5 с плотностью $1,75 \text{ г/см}^3$ (а) и для зарядов из А-IX-1 с плотностью $1,65 \text{ г/см}^3$ (б). На рис. 34. заметно, что скорости метания пластины, а также динамика разгона для уравнений JWL1, JWL2 и экспериментальных данных различаются незначительно (не более 3%).

На следующем этапе работы моделировалось расширение ПД при детонации цилиндрического заряда А-IX-1 ($\rho=1,65 \text{ г/см}^3$) ф20х40 в воздухе и в барокамере (остаточное давление 0,1 атм). Расчет проводился в двумерной осесимметричной постановке на неподвижной «эйлеровой» сетке с шагом 0,1

мм. В качестве граничного условия также выступало свободное вытекание материала за границы сетки. В заряде детонация инициировалась по всей поверхности плоского торца заряда, что обеспечивало моделирование плоского детонационного фронта. Схема постановки задачи представлена на рис. 35.

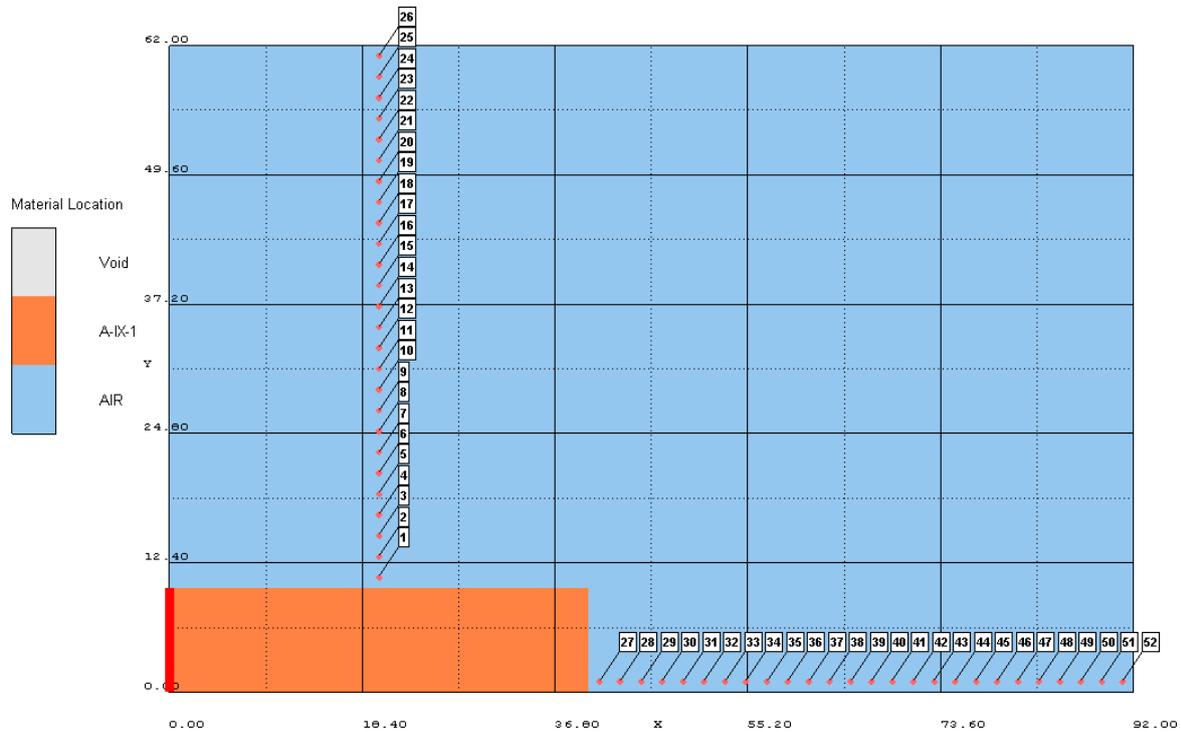


Рис. 35. Схема постановки задачи численного моделирования детонации цилиндрического заряда A-IX-1 ($\rho=1,65\text{г/см}^3$)

Определение скорости проводилось с использованием неподвижных датчиков аналогично расчетам по методики М-40. Датчики устанавливались на расстоянии 2 мм друг от друга.

Графики зависимости скорости продуктов детонации от расстояния представлены на рис. 36, 37. Из представленных рисунков видно, что расчетные данные по скорости расширения ПД как для JWL1, так и для JWL2 существенно занижены по сравнению с экспериментальными результатами (до 3,3 раз).

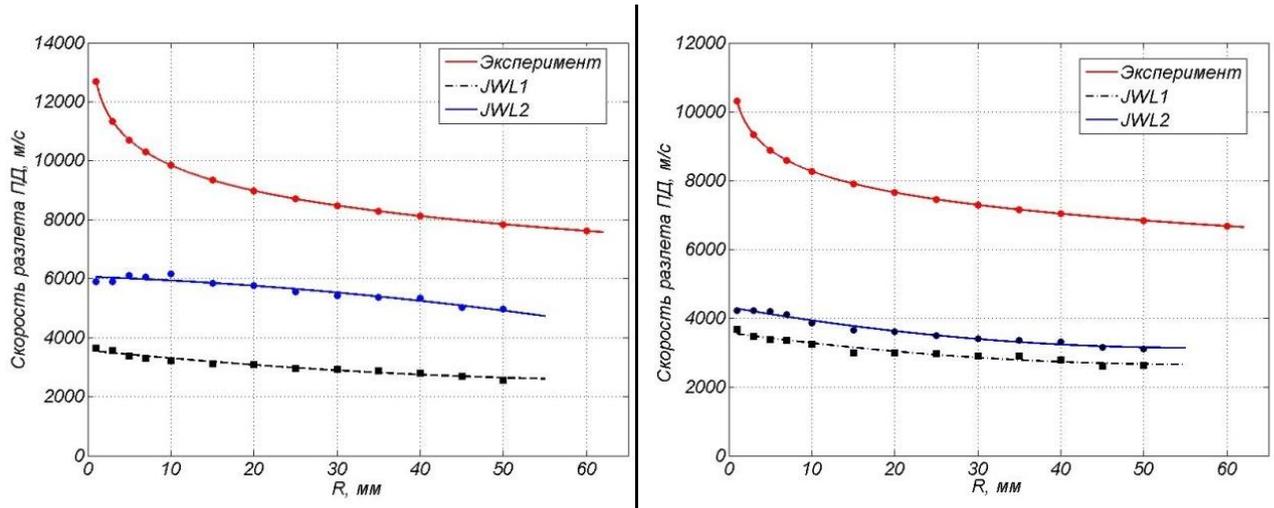


Рис. 36. Скорость радиального расширения продуктов детонации А-IX-1 ($\rho=1,65\text{г/см}^3$) при детонации заряда в: а – барокамере (с остаточным давлением 0,1 атм); б – воздухе

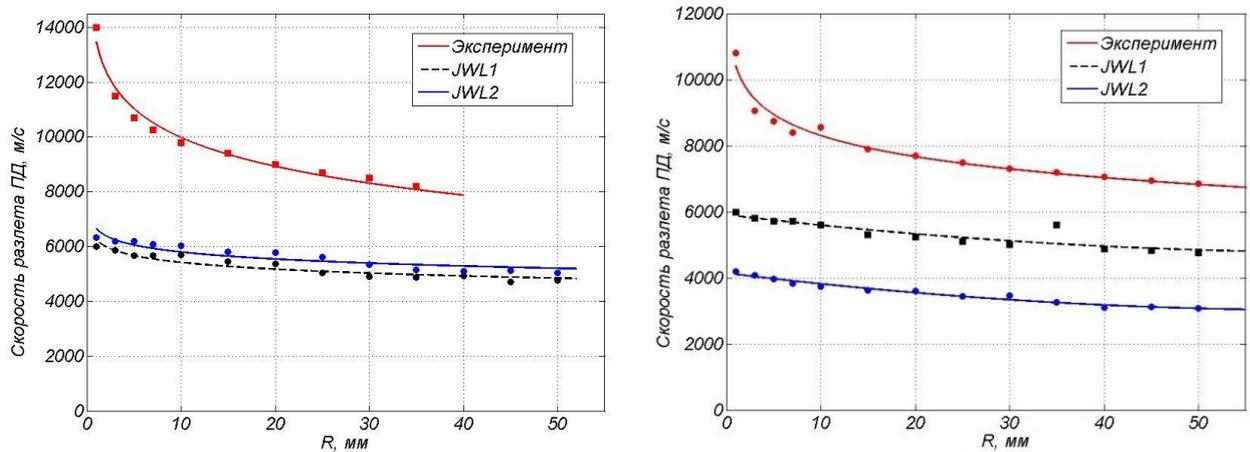


Рис. 37. Скорость расширения продуктов детонации А-IX-1 ($\rho=1,65\text{г/см}^3$) в торцевом направлении при детонации заряда в: а – барокамере (с остаточным давлением 0,1 атм); б – воздухе

Причиной такого несоответствия могут являться микрокумулятивные струи, обнаруженные в работе [100]. Микрокумулятивных струи порождаются микродефектами в приповерхностном слое заряда и являются неизбежным следствием технологии прессования ВВ. Было выдвинуто предположение, что скорость данных струй может значительно превышать скорость окружающих продуктов детонации, что фиксировалось в опытах. Для проверки данного предположения была предпринята попытка

моделирования процесса детонации заряда с приповерхностными дефектами различных конфигураций.

Моделирование зарядов с микропорами

Проводилось моделирование зарядов из А-IX-1 ($\rho=1,65\text{г/см}^3$), содержащих на своей торцевой поверхности микропоры различной конфигурации. Решался ряд двумерных плоскосимметричных задач на неподвижной «эйлеровой» сетке.

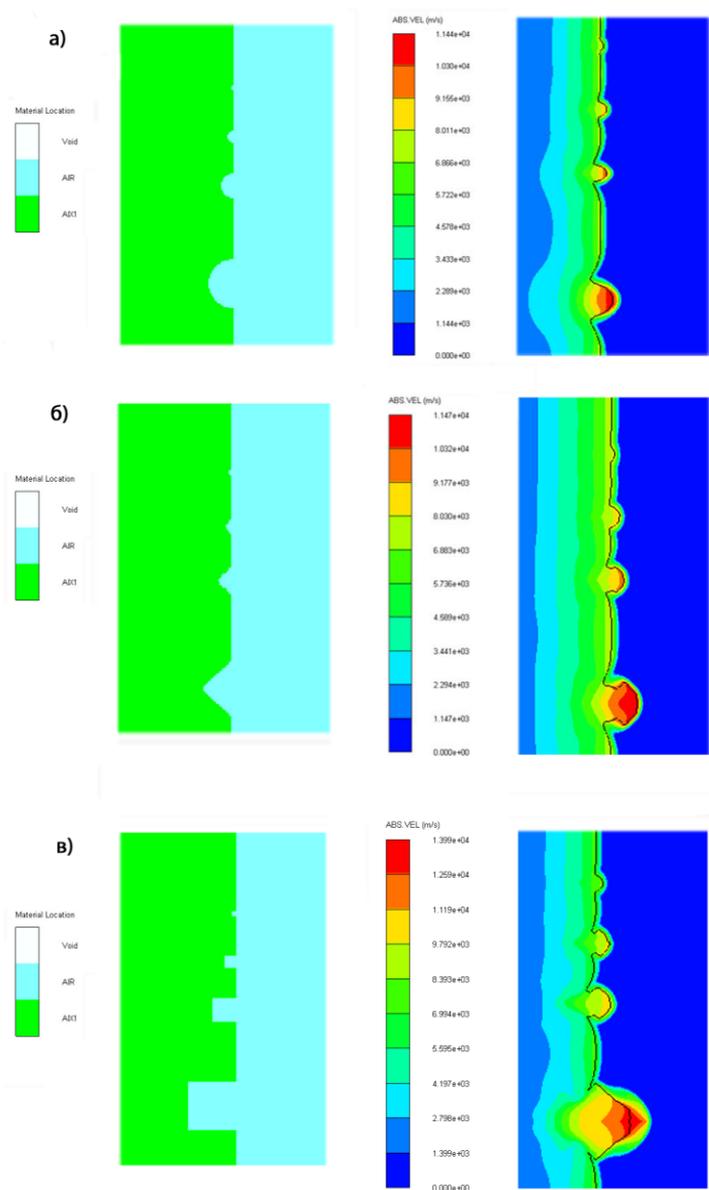


Рис. 38. Моделирование микропор различных конфигураций в поверхностном слое

Схемы постановки задач представлены на рис. 38. Микропоры рассматривались трех видов (по форме проекции на плоскость симметрии): круглые (рис. 38-а), треугольные (рис. 38-б) и прямоугольные (рис. 38-в), с характерными размерами 1; 0,5; 0,25; 0,1 мм. Пористый слой нагружался плоским детонационным фронтом.

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 плотности 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.

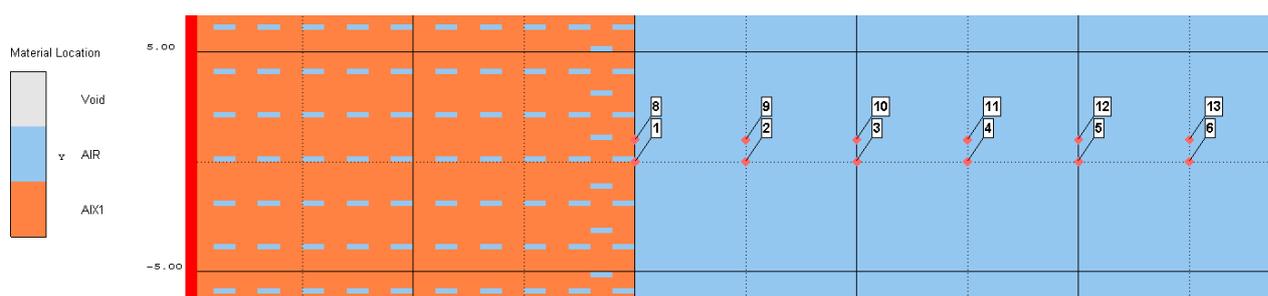


Рис. 39. Схема моделирования детонации заряда с объемнораспределенными микропорами

Также был проведен численный расчет процесса детонации заряда ВВ, содержащего поры прямоугольного поперечного сечения, распределенные по всему объему и имеющие шахматное расположение в приповерхностной зоне. Схема постановки и результаты моделирования представлены на рис. 39.

При моделировании в качестве уравнения состояния А-IX-1 было выбрано УРС JWL2. Из графиков, представленных на рис. 40, видно, что скорость расширения продуктов детонации в торцевом направлении, при моделировании зарядов с порами согласуется с экспериментальными данными, хотя расчетная кривая и лежит несколько ниже.

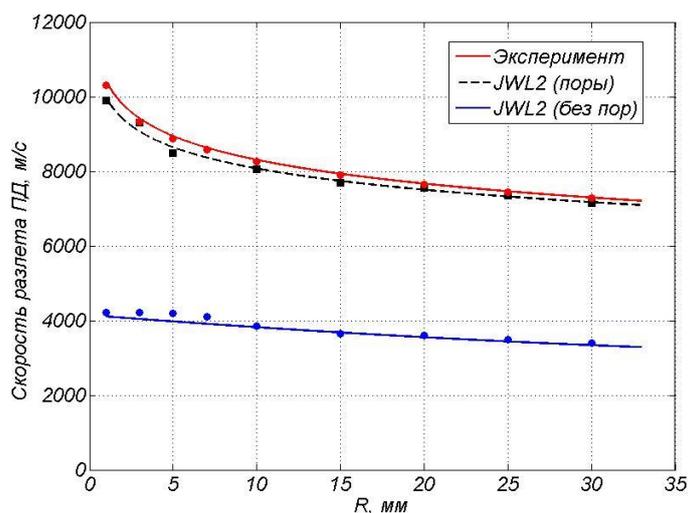


Рис.40. Скорость разлета ПД при срыве с торца пористых и беспористых зарядов А-IX-1 ($\rho=1,65\text{г/см}^3$)

Занижение скорости расширения ПД при моделировании пористых зарядов может быть связано с неучтенным фактором догорания ПД взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом на воздухе при турбулизации потока, обеспеченной микрокумулятивными струями.

3.5. Численное моделирование с учетом вторичного энерговыделения.

В ПД удельная теплота реакции окисления алюминия сильно зависит от газовой фазы, окружающей частицу. Данная величина вычисляется с учетом теплоты реакций алюминия с CO , CO_2 , H_2O , O_2 и др. и концентраций данных соединений в ПД. К примеру, для ТНТ удельная теплота реакции окисления алюминия с ПД оценивается в 14,1 МДж/кг, в то время как для сгорания в кислороде воздуха, эта величина составляет 31МДж/кг [93]. С учетом предположений о многостадийном горении алюминия, основанных, в том числе и на численном счете, было высказано предположение, что характерные времена догорания алюминия в кислороде воздуха зависят от его местоположения в начальный момент в заряде. Слои взрывчатого вещества, которые находятся ближе к месту инициирования и к оболочке смогут раньше вступить во взаимодействие с кислородом воздуха, чем слои, которые находятся в центре, и в них раньше произойдет вторичное

выделение энергии за счет догорания алюминия или конденсации субокислов AlO или Al_2O в Al_2O_3 . Характерное время данного процесса составляет от нескольких миллисекунд до ста миллисекунд [101].

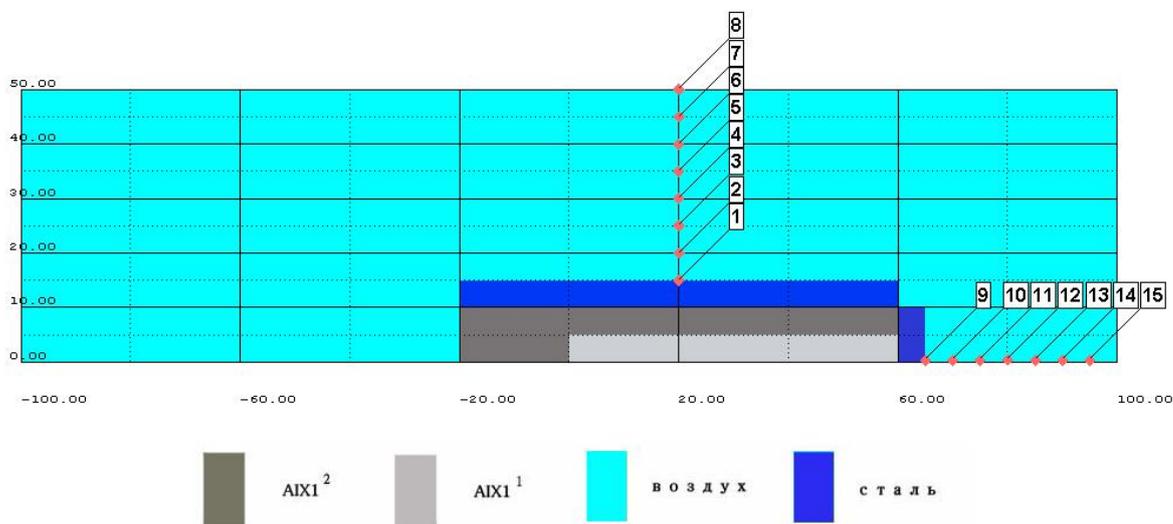


Рис. 41 Схема численного моделирования детонации цилиндрического заряда $AlX1+10\% Al$, помещенного в стальную оболочку.

Описанная выше модель горения алюминия с ПД и со свободным кислородом воздуха, а также полученные в работе [98] данные, легли в основу численного моделирования. Подробное описание схемы эксперимента и результаты численных расчетов представлены ниже. Численное моделирование проводилось для трубок длиной 80 и 120 мм, толщиной 2 и 5 мм, толщина пластины 2 и 5 мм. Постановка задачи моделирования данной методики представлена на Рис. 41.

Шаг равномерной неподвижной сетки был принят равным 0,33 мм. Таким образом, полное количество ячеек расчетной сетки составило 90 000. 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. 41),

зафиксированных в узлах расчетной сетки на одинаковом расстоянии друг от друга.

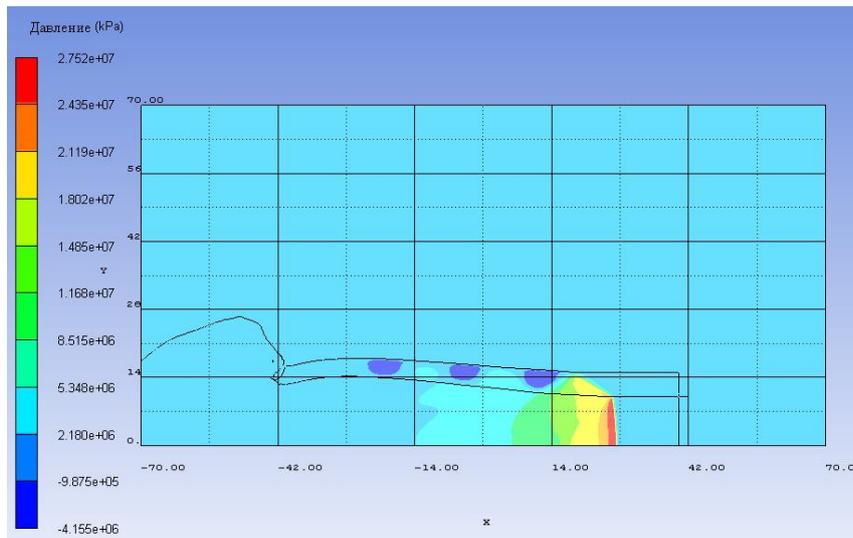


Рис 42. Распределение давления в цилиндрическом заряде.

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 расстояниях между датчиками вычислялись скорости пластины и оболочки в заданных интервалах расстояний.

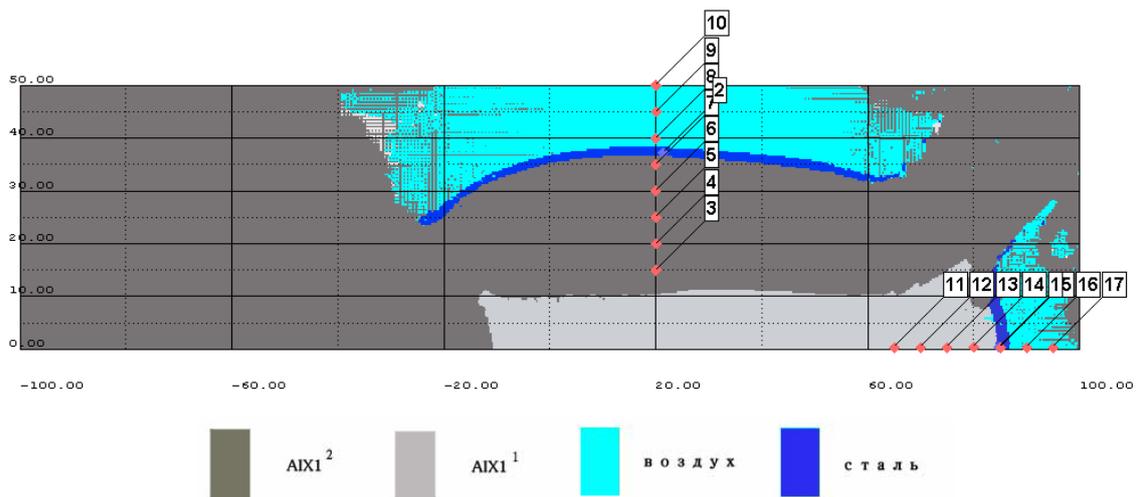


Рис.43. Численного моделирование детонации цилиндрического заряда $AIX1+10\% Al$, помещенного в стальную оболочку для времени $t=52,4\text{ мкс}$.

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 $AIX1^1$, $AIX1^2$, как показано на Рис.43. В первом случае время начала дополнительного энерговыделения в этих двух областях было одинаковым. Во второй серии 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 $AIX1^2$ время энерговыделения длилось от 1 мкс до 100 мкс, а в области $AIX1^1$ 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 8. 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 правильно выбранных задержек по времени, скорость оболочки растет, в то время как скорость пластины незначительно снижается.

Таблица 8.

	Эксперимент		Численное моделирование		
	AIX1, эксп.	AIX1+ 10%Al, эксп.	AIX1,	AIX1 ¹ + 10%Al, AIX1 ² +10%Al, t=1÷100мкс	AIX1 ¹ + 10%Al, t=1÷100мкс AIX1 ² +10%Al, t=0,1÷100мс
<i>l = 80 мм., δ=5мм</i>					
Скорость пластины, u, м/с	960±30	920±60 4%↓	1060	1170 +10%↑	990 -7%↓
Скорость оболочки, v, м/с	860±30	980±50 +14%↑	910	1010 +10%↑	970 +6%↑
<i>l = 120 мм., δ=10мм</i>					
Скорость оболочки, v, м/с	605±20	670±30 +11%↑	640	810	700

Таким образом, с помощью варьирования времени дополнительного энерговыделения можно численно моделировать эффект, наблюдаемый в эксперименте. Показано, что при моделировании детонации взрывчатых веществ, содержащих в своем составе алюминий, необходимо отдавать отчет в том, что уравнения состояния, описывающие поведение продуктов детонации, должны быть различными для различных слоев заряда. В описанном выше случае не стояло задачи определения геометрических размеров областей заряда, в которых характер выделения энергии от сгорания частиц алюминия в воздухе резко различается от внутренних слоев. Была показана возможность моделирования эффектов, наблюдаемых в эксперименте. В ходе проведенной работы, также сделана серия численных расчётов, в которых производилось варьирования 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%АI для значительного диапазона по времени меньше, чем даже для АIX1. Проведенные исследования в первую очередь направлены на то, чтобы показать влияние толщины внутреннего и внешнего слоя на общую закономерность поведения наблюдаемых скоростей. Полученные данные приведены в таблице 9.

Таблица 9.

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

Из этих данных видно, что крайне важно правильно теоретически 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. Дальнейшие исследования в этой области также должны быть направлены на детальное изучение метания тел различной геометрии и конфигурации и варьирование условий взаимодействия алюминия в составе заряда с ПД и свободным кислородом воздуха. Большой интерес представляют опыты с заменой свободного кислорода воздуха на другие газы, такие как азот или углекислый газ. Также необходимо проведение опытов для других взрывчатых смесей, имеющих в своем составе алюминий, в том числе ВВ с положительным кислородным балансом. Данные исследования показывают, что выделяющаяся энергия при сгорании алюминия в различных слоях заряда может вносить различный вклад в общую полезную работу взрыва. Перспективной является работа по созданию взрывчатых составов, в которых содержание энергоемких материалов, таких как алюминий, в различных слоях заряда будет разной.

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 несущественным, 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 10.

Таблица 10

ВВ	Покрытие	М 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 выделившейся в результате взаимодействия алюминиевого порошка с продуктами детонации энергии. 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 (энергия задавалась только как дополнительная); 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 эксперимента представлена на рис. 44.

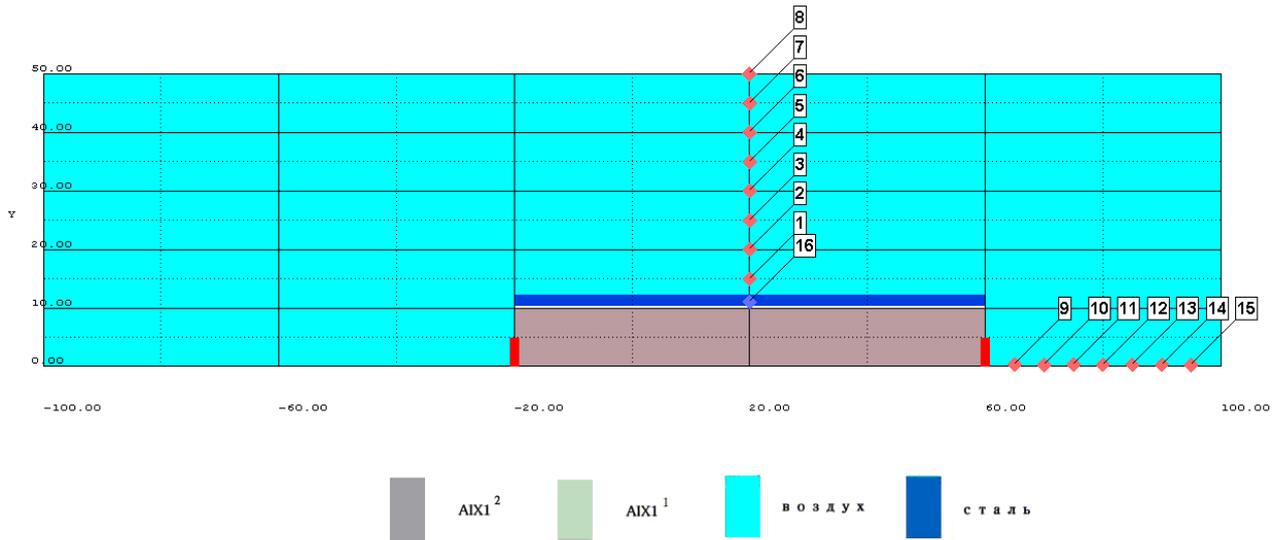


Рис 44. Схема численного моделирования детонации цилиндрического заряда AIX1+10% Al, помещенного в стальную оболочку.

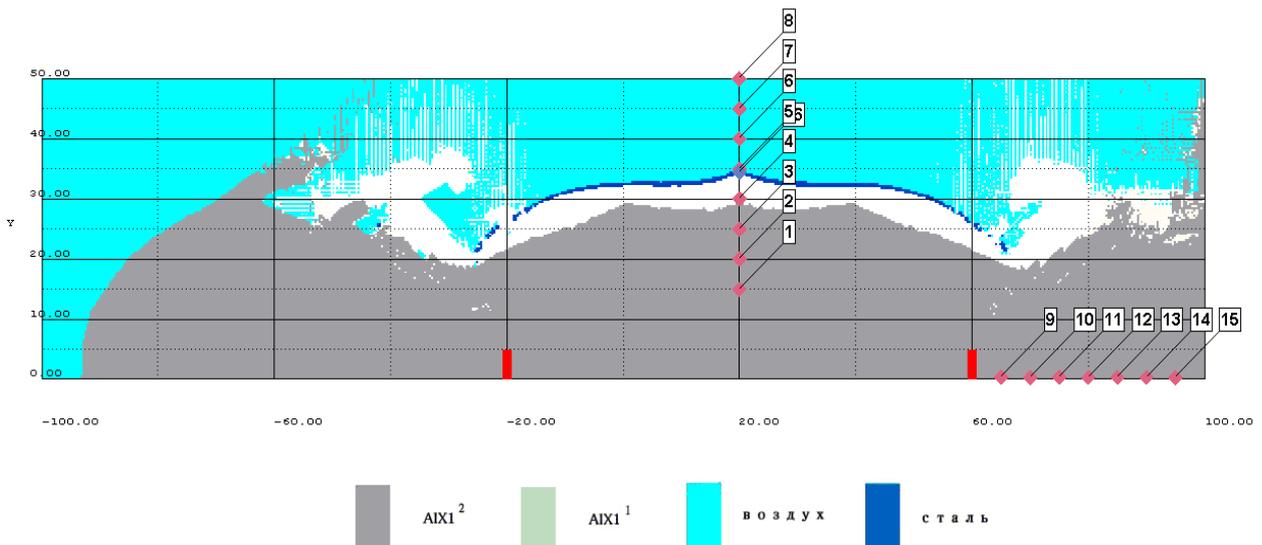


Рис.45. Схема численного моделирования детонации цилиндрического заряда AIX1+10% Al, помещенного в стальную оболочку.

Постановка задачи моделирования аналогична предыдущим расчетам, за исключением того, что инициирование в данном случае осуществлялось с двух сторон. Полученные результаты для разных энергий, заданных в слое алюминия, а также для случая, когда алюминий задан как инертное вещество, представлены в таблице 11.

Таблица 11

	Эксперимент		Численное моделирование		
	окфол	окфол+ покр АСД- 4	окфол	окфол + покр АСД-4 (случай 1)	окфол + покр АСД-4 (случай 2)
Скорость оболочки, v , м/с	860±30	980±50	880	980	870

Таблица 12

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

Как видно из таблицы 12, 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.

Заключение

В работе 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.

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.

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 $\alpha = 10 \dots 15\%$, положение которых совпадает с положением максимумов зависимостей метательной способности от α .

В работе 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.

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

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.

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 литературы

1. Cook M.A. The Science of High Explosive. N.-Y.: Reinhold publishing corporation 1958. Перевод: Наука о промышленных взрывчатых веществах, - М.: Недра, 1980. - 407 с.
2. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988.-с.360.
3. Беляев А.Ф., Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. -М.: Наука,1968. -с.255
4. Похим П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов и активных средах. -М.:Наука,1972.-с.317.
5. Дремин А.Н., Похил П.Ф., Афинов М.И. Влияние алюминия на параметры детонации тротила // Докл.АН СССР-1960-Т.131, №5-с.1140-1142.
6. Соснова Г.С. О горении бора и алюминия до их высших окислов при высоких давлениях и температуре // Горение и взрыв: Материалы III Всес. симпозиума по горению и взрыву - М.: Наука, 1972 - С.455-458.
7. Афанасенков А.Н., Богомолов В.М., Воскобойников И.М. Расчет параметров детонационной волны смесей взрывчатых веществ с инертными добавками // Физика горения и взрыва.-1970.-Т.6, №2. с.182-186.
8. M. Finger, H. C. Hornig, E. L. Lee, and J. W. Kury Metal acceleration by composite explosive // Fifth Symp. (Int.) on Detonation - Annapolis, 1970-p.55-63
9. Vjarnholt G. Effect of aluminum and eithium fluoride ad mixtures on metal acceleration ability of comp.B // Sixth. Symp. (Int.) on Detonation. - Coronado, 1976-p.510-521
10. Анискин А.И., Шведов К.К. Влияние алюминия и магния на детонационные характеристики в смесях с гексогеном // Детонация.

Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах - Черноголовка, 1978. с.26-30.

11. Анискин А.И. Детонация смесей взрывчатых веществ с алюминием // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация и ударные волны: Материалы VIII Всес. симп. по горению и взрыву. - Черноголовка, 1986. - с.26-32.
12. Воскобойников И.М., Гоголя М.Ф., Димза Г.В. Влияние сжимаемости материала добавки на скорость детонации смесевых зарядов // Физика горения и взрыва. - 1993. Т.29, №2.-С.115-117.
13. Гришкин А.И., Дубнов Л.В., Давыдов В.Ю. и др. Влияние добавок порошкообразного алюминия на параметры детонации мощных ВВ // Физика горения и взрыва.-1993.-Т.29, №2.-С.115-117.
14. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации: Пер. с англ. - М.: Мир, 1985.
15. Пепекин В.И., Губин С.А. МС органических взрывчатых веществ и их пределы по мощности и скорости детонации // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т.43, №1. – С. 99-111.
16. Гоголя М.Ф., Махов М.Н., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А., Архипов В.И., Щетинин В.Г. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных ВВ // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 82-95
17. Давыдов В. Ю., Губин А. С. О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками. // Химическая физика. - 2011. - Т. 30, N 7. - С. 62-67
18. Гоголя М. Ф., Бражников М. А., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Любимов А.В., Соколова И.Л. Влияние алюминия на метательную способность смесевых составов на основе штатных взрывчатых веществ // Химическая физика, 2012, том 31, №11, с.33-47

19. Гоголя М.Ф., Махов М.Н., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А. Взрывчатые характеристики алюминизированных нанокompозитов на основе октогена // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, №2. – С. 85
20. Van der Heijden A.E.D.M., Boumal R.H.B., Carton E.P. et al. // Proc. Conf. Shock Compression of Condensed Matter-2005./ Eds. Furnish M.D., Elert M., Russel Th.P., White C.T.N.Y.: American Institute of Physics, 2005. Part 2. P.1121.
21. Троцюк А.В. Численное моделирование структуры двумерной газовой детонации смеси H_2-O_2-Ar // Физика горения и взрыва. 1999, Т.35, №5 с.93-103
22. Губин С.А., Одинцов В.В., Пепекин В.И. Термодинамический расчет идеальной и неидеальной детонации // Физика горения и взрыва, - 1987, Т.23, №4. - с.75-84.
23. Имховик Н.А., Соловьев В.С. Термодинамический расчет параметров детонации смесей ВВ с алюминием // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация: Материалы IX Всес. симпозиума по горению и взрыву. - Черноголовка, 1989.-С.33-36.
24. Имховик Н.А., Соловьев В.С. Термодинамический расчет параметров детонации многокомпонентных смесевых взрывчатых составов // Вестник МГТУ. Сер. "Машиностроение" - 1994 - №3. - С.50-65
25. Imkhovik N.A., Solov'ev V.S. Oxidation of Aluminium Particles in the Products of Condensed Explosive Detonation // Proc. of XXI Intern. Pyrotechnics Seminar - Moscow, 1995 - p.316-331.
26. Cheret R. Le code ARPEGE : application a l'etude d'etude d'un explosif a l'aluminium // Acte Astronautica - 1974.-№1. - p.893-898.
27. McGuire R.R., Ornellas D.L., Helm F.H. e.a. Detonation chemistry: an investigation of fluorine as an oxidizing moiety in explosives // Seventh Symp. (Intern.) on Detonation-Maryland, 1981 - p.847-857.

28. Cowperthwaite M. Nonideal Detonation in a Composite CHNO Explosive Containing Aluminium // 10-th Symp. (Intern.) on Detonation-Boston, 1993-p.656-664.
29. Hobbs M.L., Baer M.R., Calibrating the BKW-EOS with A Large Product Species Data Base and Measured C-J Properties // 10-th Symp. (Intern.) on Detonation-Boston, 1993.-p.409-418.
30. Goldstein S., Johnson J. N. Aquarium tests on ahiminized ANFO // 7th Symp. (Intern.) on Detonation, Annapolis. 1981. P. 1016-1023.
31. Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Феодоритов И. И. Экспериментально-теоретическое исследование окисления алюминия в детонационной волне // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 124-128.
32. Имховик Н.А., Соловьев В.С. Окисление дисперсного алюминия в продуктах детонации конденсированных ВВ // Proc. 21th Intern. Pyrotechnics Scm. M.: IChP RAS, 1995. P. 316-331.
33. Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A., Baudin G. Detonation waves in HMX/A1 mixtures (pressure and temperature measurements) // Proc. 11th Symp. (Intern.)on Detonation. 1998. P. 979-988.
34. Miller P. J., Bedford C D., Davis J. J. Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives // Ibid. P. 214-220.
35. Ермолаев Б.С, Хасаинов Б.А., Боден Ж., Прель А.Н. Поведение алюминия при детонации вторичных ВВ. Сюрпризы и интерпретации // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 6. С. 60-69.
36. Brousseau P., Dorsett H. E., Cliff M. D., Anderson C. J. Detonation properties of explosives containing nanometrie aluminum powder // 12th Symp. (Intern.) on Detonation, San Diego, California, '2002; ONR 333-05-2. P. 11-21.
37. Гогоуля М.Ф., Махов М.Н., Долгобородов А.Ю. и др. Механическая чувствительность на параметры детонации алюминизированных

- взрывчатых веществ // Физика, горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82-95.
38. Гоголя М.Ф., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А. Тонкая структура детонационных волн в смесях октогена с алюминием // Химическая физика. - 1998.-Т.17, JVH.-С. 41-44.
39. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.-704 с.
40. Махов М.Н., Гоголя М.Ф., Долгобородов А.Ю., Бражников М. А., Архипов В.И., Пепекин В.И. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, №4. – С. 96-105
41. Lefrancois A., Baudin G., Le Gallic C., Boyce P., Coudoing J.-P. Nanometric aluminum powder influence on the detonation efficiency of explosives // Twelfth Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California. Electronic version at the server: <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technical Program.htm>
42. Гилев С.Д., Анисичкин В.Ф. Исследование взаимодействия алюминия с продуктами детонации // Физика горения и взрыва, 2006, т.42 №1
43. Имховик Н.А., Соловьев В.С. Численное моделирование влияния времени сгорания частиц алюминия за фронтом детонационной волны на эволюцию процесса в разрядах смесевых взрывчатых веществ // Тезисы докладов Всес. симпозиума по газодинамике взрывных и ударных волн, детанационного и сверхзвукового горения. - Новосибирск, 1991.-с.84-85.
44. Volk F.,Schedlbauer F. //Proc.Tenth Intern. Detonation Sympos.Boston: ONR 33395-12, 1993. P.601
45. Deiter G.S., Wilmot G.B.//Proc.Tenth Intern. Detonation Sympos. Boston: ONR 33395-12, 1993, P.675
46. Brosseau P., Anderson C.J. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2002. V.27. №6. P.300.

47. Ritter H., Braun S. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001. V.26. №6. P.311.
48. Collet Ch., Dervaux M., Lacroix G., Le Roux B. // Proc.13th (Intern.) Detonation Sympos. Norfolk, Virginia: ONR 351-07-01, 2007. P.1228.
49. Komarov V.F., Sakovich G.V., Kazutin M.V., Popok N.I., Zhenikhov A.B. Design of compo-site explosive (CEM) with borderline detona-tion rate // Energetic Materials. Performance and Safety. 36th Inter. Annual Conf. of ICT. – Karlsruhe, 2005. P.59.
50. Казутин М.В., Комаров В.Ф., Сакович Г.В., Попок Н.И. Особенности детонации гетерогенных систем литьевого типа Ползуновский № 3 2008, стр. 70-75
51. Чернявский Л.И., Сапрыкина Е.А., Яковлев И.И., Козмерчук В.В. Влияние полноты реагирования алюминия на детонационные характеристики смесевых ВВ// ... стр 34-39.
52. Brousseau P., Dorsett H. E., Cliff M. D., and Anderson C. J. Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder // Twelfth Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California. Electronic version at the server: <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technical Program.htm> Covan R.D., Fickett W. // J. Chem. Physics. 1956 V.1. № 24. P. 932.
53. Finger M., Lee E., Helm F.H. et al. // Proc. Sixth Sympos. (Intern.) on Detonation, ACR-221. USA, 1976.P.710.
54. Mader C.L. Numerical Modeling of Explosives and Propellants (Second Edition). CRC Press, Boca Ration, NY, 1998.
55. Kelvey G.I.// Proc.9th Sympos. (intern.) on Detonation. Portland, USA, 1989. P.195
56. Hobbs M.L., Baer M.R. // Proc. Tenth Sympos. (Intern.) on Detonation, Boston, USA, 1993. P.409.

57. Губин С.А., Одинцов В.В., Пепекин В.И. Термодинамические расчеты детонации конденсированных веществ. Препринт. Черногловка: ЩИХФ АН СССР, 1986
58. Имховик Н.А. Соловьев В.С. // Вести МГТУ. Серия «Машиностроение», 1993. Т.11.№2 С.53
59. Анискин А.И. // Детонация и ударные волны. Химическая физика процессов горения и взрыва. Черногловка: ЩИХФ АН СССР, 1986. С.26
60. Charet R. // Acta Astronautica. 1974. V.1. P.893
61. Имховик Н.А., Соловьев В.С. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1989. С.33.
62. Cowperthwaite M. // Proc. 10th Sympos. (Intern.) on Detonation. Boston, USA, 1993. P.656.
63. Souers P C, Garza R, Vitello P. Ignition & Growth and JWL__Detonation Models in Coarse Zones. Propellants Explos Pyrotech, 2002, 27: 62–71
64. Souers P C, Anderson S, McGuire E, et al. JWL++: A simple reactive flow code package for detonation. Propellants Explos Pyrotech, 2000, 25: 54–58
65. Littlefield D L, Baker E L. Implementation of a high explosive equation of state into an Eulerian hydrocode. AIP Conf Proc USA, 2004, 706: 375–378
66. Vandersall K S, Tarver C M, Garcia F, et al. On the low pressure shock initiation of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine based plastic bonded explosives. J Appl Phys, 2010, 107: 094906
67. Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50422, 1968 9 Lee E L, Hornig H C. Equation of state of detonation product gases. In: Combustion Inst, 12th Symposium (International) on Combustion, 1969. 12: 493–499
68. Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products. Lawrence Radiation Laboratory Report No. UCRL-50422, 1968

69. Baker E.L., Capellos C., Stiel L.I. Generalized Thermodynamic Equation of State for Reacting Aluminized Explosives // 13th International Detonation Symposium, Norfolk, USA, 2006, pp. 1161-1170.
70. Hamashima H, Kato Y, Itoh S. Determination of JWL parameters for non-ideal explosive. AIP Conf Proc (USA), 2004, 706: 331–334
71. Urtiew P A, Hayes B. Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products. Combust Explos Shock Waves, 1992, 27: 505– 514
72. Zhang Qi , Xiang Cong & Liang HuiMin Prediction of the explosion effect of aluminized explosives Science Chine Physics, Mechanics & Astronomy May 2013 Vol.56 No.5: 1004–1009
73. Howard W.M., Fried L.E., and Souers P.C. «Modeling of non-ideal aluminized explosives», In Shock Compression of Condensed Matter, 1999; AIP, 2000, pp. 389–392.
74. Wood W.W. and Kirkwood J.G. «Diameter Effect in Condensed Explosives», J. Chem. Phys., Vol. 22, 1954, pp. 1920–1924.
75. Victorov S.B. The Effect of Al₂O₃ Phase Transitions on Detonation Properties of Aluminized Explosives // 12th Int. Detonation Symp., San Diego, California, USA. August 11– 16, 2002. Office of Naval Research, Arlington, Virginia 22217- 5660, ONR 333-05-2. — P. 369–376.
76. Victorov, S.B., Gubin, S.A., Maklashova, I.V. and Revyakin, I.I. «Thermodynamic TDS code: Application to detonation properties of condensed explosives». In Energetic Materials, Ignition, Combustion and Detonation. 32nd Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2001, pp. 69/1–69/15.
77. Jing Ping Lu, Helen E. Dorsett, Mark D. Franson and Matthew D. Cliff Near-field Performance Evaluations of Alex Effect in Metalized Explosives// DSTO-TR-1542 1-23
78. Fried L.E., Howard W.M. and Souers P.C. (1998). CHEETAH 2.0 User's Manual. UCRL - MA - 117541 Rev. 5, Lawrence Livermore National Laboratory, August.

79. Anderson C.J. and Katsabanis P. (2000) Evaluation of Heats of Detonation, Final Report (Contract Number W7701-9-1483) Prepared for Mr. P. Brousseau (Defence Research Establishment Valcartier, 2459 Boul, Pie Xi North, Val Belair, Wuebec, G3J 1X5) By Mining Resource Engineering Ltd., Canada.
80. Веприкова А.А., Райкова В.М. Термодинамический расчет параметров детонации смесей взрывчатых веществ с алюминием // Успехи в химии и химической технологии. Т. 21. 2007. №; 84-87.
81. Стесник Л.Н.. Расчет параметров детонации ВВ, содержащих металлы, с использованием уравнения состояния идеального газа. //??? стр.111-117
82. Светлов Б.Я.. Сб «Взрывное дело», № 52/9 ., М., Госгортехиздат, 1963.
83. Харитон Ю.Б., Ратнер С.Б. ЖФХ, 1946,20,2
84. Справочник «Термодинамические свойства индивидуальных веществ». М. Изд. АН СССР, 1962.
85. Levine H.B., Sharples R.E., Operator's Manual for RUBY, Lawrence Livermore Laboratory report UCRL-6815, Livermore, CA, 1962.
86. Nichols A.L., Ree F.H., CHEQ 2.0 User's Manual, UCRL-MA-106754, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1990.
87. Jacobs S.J., Proceedings of the Twelfth Symposium (International) on Combustion, Pittsburg, PA, Combustion Institute, 1969, pp. 502–511., M. Cowperthwaite, W.H. Zwisler, Proceedings of the Sixth Symposium (International) on Detonation, Coronads, CA, Washington, DC, Office of the Chief of Naval Operations, 1976, pp. 162–172.
88. Tanaka K., Proceedings of the Sixth Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, New Mexico, Washington, DC, Office of the Chief of Naval Operations, 1985, pp. 548–557.
89. Fringer M., Lee E., Helm F.H., Hayes B., Hornig H., McGuire R., Kahara M., Gudiry M., Proceedings of the Sixth Symposium (International) on

- Detonation, Coronads, CA, Washington, DC, Office of the Chief of Naval Operations, 1976.
90. Hobbs M.L., Baer M.R., Proceedings of the Tenth Symposium (International) on Detonation, Boston, MA, 1993.
91. Mohammad H. K., Reza T.M., Karim E. P., Arash S., Abbas Z., Mohammad H.Y. Determination of performance of non-ideal aluminized explosives Journal of Hazardous Materials A137 (2006) 83–87
92. Mohammad H.K.Hadi M., Reza M., Hamid R.N., Jamshid A. A new computer code to evaluate detonation performance of high explosives and their thermo chemical properties, part I Journal of Hazardous Materials 172 (2009) 1218–1228
93. Физика взрыва; в 2 кн. Под ред. Л.П. Орленко. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002. Кн.1.823с.
94. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. Б. П. Жукова. – М.: Янус-К. 2000
95. Давыдов В. Ю., Губин А. С. О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками. 1. Метательное действие по методике М-40 // Химическая физика. – 2011. – Т. 30, № 6. – С. 49-56.
96. Одинцов В.А. Моделирование процессов фрагментации с помощью унифицированных цилиндров.- М.: Изд-во. МГТУ, 1991.
97. Давыдов В.Ю., Губин А.С., Загрядцкий Ф.С., Потапов И.В. О догорании в воздухе продуктов детонации ВВ с избытком горючих компонентов // Труды межд. конференции «Ударные волны в конденсированных средах», Киев, 2012. С. 334-338
98. Давыдов В.Ю., Козмерчук В.В., Мурышев Е.Ю., Головлев И.Д. Влияние добавок порошкообразного алюминия на энергию ВВ, передаваемую в осевом и радиальном направлении // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, №3. С. 96–99.

99. Гришкин А.М., Давыдов В.Ю., Козмерчук В.В. // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, №6. С. 107.
100. Давыдов. В.Ю. Разлет продуктов детонации флегматизированного гексогена и его смесей с дисперсным алюминием // Химическая физика. 2008. Т. 27, № 8. С. 57–60.
101. Arnold W., Rottenkolber E. Thermobaric Charges: Modelling and Testing // Proc. 38th Intern. Annual Confer. of ICT, Karlsruhe. FRG. 2007.
102. Holmquist T.J., Johnson G.R., Grady D.E. High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass. Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel, 1995.
103. Уилкинс М. Л. // В кн. Вычислительные методы в гидродинамике. М., Мир. 1967.