#### Учреждение Российской Академии Наук

#### ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н.Н. СЕМЕНОВА РАН

На правах рукописи

# Долгобородов Александр Юрьевич

# ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Специальность: 01.04.17 - химическая физика, в том числе физика горения и взрыва

### АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Москва 2008

# Работа выполнена в Институте химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Борисов Анатолий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор Губин Сергей Александрович

доктор физико-математических наук Терновой Владимир Яковлевич

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии Наук Объединенный Институт Высоких Температур РАН (ОИВТ РАН)

Защита состоится « » 2009 года в часов в конференцзале ИХФ РАН на заседании диссертационного совета Д.002.012.02 при Институте химической физики им. Н.Н. Семенова РАН по адресу: 119991, Москва, ул. Косыгина 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.002.012.02

д. ф.-м. н.

Фролов Сергей Михайлович

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность работы.

Исследования поведения конденсированных веществ при ударном сжатии и детонации имеют большое значение для решения задач по прогнозированию взрывных воздействий на различные объекты, создают научные основы новых технологий в оборонной технике и промышленности. Ударно-волновые и детонационные явления имеют общие теоретические основы, а также экспериментальные и расчетные методы изучения этих процессов. В обоих случаях одной из основных целей исследований является прогнозируемость действия взрыва, высокоскоростного удара и других интенсивных импульсных воздействий на материалы и конструкции. Изучению состояния веществ при высоких давлениях и температурах посвящено достаточно большое количество исследований. Накопленный объем измерений основных параметров ударного сжатия и детонации позволяет проводить расчетное моделирование различных процессов для широкого круга наиболее распространенных материалов. Однако в ряде случаев ударное сжатие вызывает в веществах различные физико-химические превращения, закономерности которых невозможно предсказать без проведения специальных исследований. Актуальной задачей в настоящее время является переход от простой фиксации основных кинематических параметров к углубленному изучению свойств и закономерностей физико-химических превращений веществ при высоких давлениях и температурах, что невозможно без развития современной экспериментальной техники.

В данной работе рассмотрены две взаимосвязанные актуальные задачи: разработка новых лабораторных методов генерации и диагностики ударных волн в конденсированных веществах и получение на их основе новых экспериментальных данных о распространении и затухании ударных и детонационных волн в ряде веществ и смесей, претерпевающих при ударном сжатии физико-химические превращения. Среди конкретных методических задач решены проблемы взрывного ускорения металлических плоских ударников в диапазоне скоростей до 8 км/с; усовершенствованы пирометрические методы диагностики (индикаторная и методика использования ПВДФметодики); обоснована оконная датчиков для исследований процессов ударно-волнового инициирования; разработана методика исследования горения твердого ракетного топлива при ударно-волновом воздействии.

Кроме того, в диссертации рассмотрен ряд конкретных задач, представляющих научный и практический интерес: закономерности превращений органических соединений при ударном сжатии (на примере галогенпроизводных метана, ацетонитрила и растворов тетрахлорметана с гексаном); влияние структуры образцов на распространение волн разрежения и затухание ударных волн в пористых материалах и смесях твердых веществ.

Особое внимание в работе уделено решению актуальной задачи по исследованию ударно-индуцированных реакций в смесях окислительгорючее, реагирующих с образованием твердых продуктов. Распространение ударных волн в смесях твердых веществ сопровождается процессами, резко ускоряющими протекание химических реакций: разрушение исходной структуры компонентов, взаимное перемещение и перемешивание компонентов и продуктов реакции, сильный разогрев в местах контакта частиц и др. В ходе ударного сжатия в реакционно-способной смеси могут протекать экзотермические реакции со значительным энерговыделением. В результате такой реакции возможно образование сильно нагретых продуктов, которые могут стать своеобразным рабочим телом для дальнейшего сверхзвукового детонационного распространения химической реакции в смеси. Однако скорость реакции в смесях твердых веществ определяется, прежде всего, эффективной поверхностью контакта реагентов и в обычных смесях, состоящих из порошков компонентов микронного размера, недостаточна для осуществления детонации. Задача по повышению реакционной способности может быть решена за счет использования наноразмерных компонентов. В данной работе для ее решения предложен механохимический способ, с помощью которого удалось создать механоактивированные композиты, состоящие из наноразмерных слоев металл-окислитель, обладающие повышенной реакционной способностью и получить детонационные режимы в ряде смесей.

Работа выполнялась в рамках НИР, проводимых по планам ИХФ РАН, Отделения химии и наук о материалах Российской Академии Наук, программы РАН «Теплофизика и механика мощных энергетических воздействий», при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 97-03-32000, 01-03-32729, 03-03-32413, 06-03-32553).

#### Цели работы.

- 1. Разработка методов генерации ударных волн и диагностики состояния конденсированных веществ при ударном сжатии и детонации в диапазоне давлений 0,1-100 ГПа, позволяющих изучать различные физико-химические превращения, протекающие при высоких давлениях и температурах.
- 2. Изучение влияния физико-химических превращений и химических реакций в конденсированных веществах на закономерности распространения и затухания ударных и детонационных волн. Поиск путей получения детонационно-подобных режимов в твердофазных смесях.

**Научная новизна** проведенных исследований заключается в следующем:

- разработаны новые лабораторные методы генерации ударных волн в конденсированных веществах, в том числе: взрывной трубчатый ускоритель для метания до скоростей более 8 км/с;
- разработаны новые экспериментальные методы диагностики ударного сжатия конденсированных веществ для определения скоростей вол-

новых возмущений (скоростей волн разрежения и вторичных ударных волн) и затухания ударных волн с помощью индикаторного метода, обоснована методика использования ПВДФ-датчиков для исследований процессов ударно-волнового инициирования;

- разработана методика исследования горения твердого ракетного топлива при ударно-волновом воздействии;
- впервые обнаружено появление двухпиковой структуры профилей давления в смесях алюминия и октогена;
- получены новые данные по температуре и скоростям звука при ударном сжатии галогенпроизводных метана (тетрахлорметан и бромоформ), с помощью оконной методики получены доказательства протекания диссоциации тетрахлорметана и бромоформа при достижении определенных температур;
- впервые определены ударные адиабаты и зависимости температуры и скорости звука от давления для ацетонитрила и растворов четырех-хлористого углерода и гексана;
- показано существенное увеличение эффективности ослабления амплитуды ударных волн при использовании веществ или смесей, претерпевающих полиморфные превращения или химические реакции с уменьшением удельного объема;
- впервые обнаружено размывание ударных фронтов в смесях компонентов с сильно различающимися сжимаемостями (вольфрам + парафин);
- впервые получен детонационный режим в механоактивированных смесях алюминия и магния с фторопластом.

## Научно-практическая значимость:

- разработанные методы генерации и диагностики ударного сжатия позволяют проводить лабораторные исследования в широком диапазоне динамических давлений;
- разработанный метод исследования горения твердого топлива при ударно-волновом воздействии рекомендован в качестве лабораторного экспресс-метода для проведения испытаний устойчивости горения новых ТРТ при импульсных нагрузках;
- результаты исследований по измерениям скоростей звука и затухания ударных волн в конденсированных веществах и смесях показали существенное увеличение эффективности ослабления амплитуды ударных волн при использовании веществ или смесей, претерпевающих полиморфные превращения или химические реакции с уменьшением удельного объема, что может быть использовании при создании конструкций, предназначенных для защиты объектов от взрывных и ударно-волновых воздействий;
- разработанный способ механохимической активации смесей окислитель-горючее позволяет получать механоактивированные энергетические нанокомпозиты с повышенными скоростями энерговыделения, ко-

торые могут использоваться в качестве компонентов быстрогорящих пиротехнических смесей и взрывчатых составов с высокотемпературными продуктами.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

- 1. Результаты оптимизации взрывных генераторов для разгона металлических ударников до скоростей от 2 до 8 км/с, в том числе взрывной трубчатый ускоритель с метанием ударников продуктами взрыва пересжатой детонации нитрометана, детонирующего в трубчатой оболочке из состава на основе октогена.
- 2. Результаты разработки конструкции фотоэлектрического пирометра и оптимизации пирометрических методов для определения параметров состояния веществ при детонации и ударном сжатии (индикаторная и оконная методики).
- 3. Экспериментальный метод исследования горения твердого топлива при ударно-волновом воздействии.
- 4. Результаты измерений температуры и скорости звука в ударносжатых галогенпроизводных метана, получены доказательства протекания диссоциации за фронтом ударной волны в тетрахлорметане и бромоформе при достижении определенных температур (2600 °K и 2000 °K).
- 5. Результаты измерений ударных адиабат, температуры и скорости звука для ацетонитрила и растворов тетрахлорметана с гексаном.
- 6. Результаты комплексного исследования по измерениям скоростей звука и затухания ударных волн в твердых веществах и смесях. Показано существенное увеличение эффективности ослабления амплитуды ударных волн при использовании веществ или смесей, претерпевающих полиморфные превращения или химические реакции с уменьшением удельного объема. Обнаружено размывание ударных фронтов в смесях компонентов с сильно различающимися сжимаемостями.
- 7. Способ механохимической активации смесей окислитель-горючее для получения механоактивированных энергетических нанокомпозитов с повышенной реакционной способностью.
- 8. Результаты изучения ударно-индуцированных химических реакций и детонации в механоактивированных смесях окислитель-горючее с твердыми конечными продуктами. Механизм распространения детонации в таких смесях развивается эстафетным способом за счет передачи реакции высокоскоростными потоками продуктов взрыва от одного очага к другому.

<u>Личный вклад соискателя</u> заключается: в выборе направления исследований; постановке конкретных задач, разработке новых методов генерации и диагностики состояния веществ при ударном сжатии и детонации. Все основные экспериментальные результаты по ударному сжатию и детонации получены лично автором. Разработка метода исследования го-

рения топлива при ударно-волновом воздействии проведена совместно с В.Н. Маршаковым и Г.В. Мелик-Гайказовым, способ механоактивации смесей окислитель-горючее – совместно с А.Н. Стрелецким и И.В. Колбанёвым.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации докладывались на всесоюзных и российских конференциях и симпозиумах: VIII, IX, X, XII, XIII и XIV Симпозиум по горению и взрыву (Ташкент 1986, Суздаль 1989, Черноголовка 1992, 2000, 2005, 2008); Шестой Всесоюзный Съезд по теоретической и прикладной механике (Ташкент 1986); VII и VIII Всесоюзная конференция по сварке и резке взрывом (Киев 1987, Минск 1990); III Совещание по физике и газодинамике ударных волн (Владивосток 1989); II, III и IV конференция «Энергетические конденсированные системы» (Черноголовка 2004, 2006 и 2008); «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах» (Новый Афон 2005 и 2007), «Успехи в специальной химии и химической технологии» (Москва 2005); XXXIV и XXXV научно-техническая конференция «Проектирование (Москва, систем» МГТУ Н.Э.Баумана 2007 и 2008). На международных конференциях и симпозиумах: XI симпозиум по нелинейной акустике, Россия (ISNA, Новосибирск 1987); IX, XI, XIII, XV, XVII и XIX конференция «Уравнение состояния», Россия (Терскол 1994, 1996, 1998, 2000, Эльбрус 2002 и 2004); X, XII XIV, XVIII и XX конференция «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество», Россия (Терскол 1995, 1997, 1999, Эльбрус Высокоскоростному 2003. 2005); симпозиум ПО (Hypervelocity Impact Symposium, Santa Fe 1994, Huntsville 1998); 3 конференция Поля Вьеля (Troisèmes journées scientifiques Paul Vieille, France, Paris 2000); III, V, VII и IX Харитоновские научные чтения, Россия (Саров 2001, 2003, 2005 и 2007); «Ударное сжатие конденсированных сред-2001», США (Shock compression of condensed matter-2001, Atlanta); «Ударные волны в конденсированных средах» (Минск 1992, Санкт-Петербург 1994, 1996, 1998, 2002, 2004, 2006 и 2008); 11, 12 и 13 симпозиум по детонации, США (International Detonation Symposium, Snowmass 1998, San Diego, 2002, Norfolk 2006); XVII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Россия (Москва 2007); 1, 3, 5 и 7 конференция «New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter» (Россия, Санкт-Петербург 1995, UK, Edinburgh 2002, France, Dijon 2006, Portugal, Estoril 2008); 9 конференция по горению IWCP (Ninth International Workshop on Combustion and Propulsion, Italy, Lerici 2003); «Нанокомпозиты-2004», Россия (Сочи 2004); VIII симпозиум «Использование энергии взрыва для получения материалов с новыми свойствами» Россия (Москва 2006); конференция по высокоэнергетическим материалам («High Energy Materials, Performances and Civil Applications» France, Arcachon 2007); «Europyro – 2007» (France, Beaune 2007); 5 семинар по механизмам горения пиротехники («5-th International Workshop on Pyrotechnic Combustion Mechanisms», France, Beaune 2007); 29, 31, 33 и 34 семинар по пиротехнике, США («International Pyrotechnics Seminar» Westminster 2002, Fort Collins, 2004, 2006 и 2008) и др.

<u>Публикации.</u> Основные материалы диссертации опубликованы в 46 статьях, из них 27 статей в научных журналах (26 из списка ВАК) и 19 статей в сборниках докладов научных конференций, на основании результатов работы получено 2 патента на изобретения, также материалы отражены в более 40 тезисов докладов на конференциях.

<u>Структура и объем работы.</u> Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы (415 ссылок), изложена на 379 стр., в тексте приведено 158 рисунков и 52 таблицы.

#### Основное содержание работы

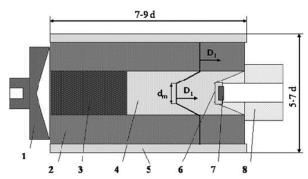
**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации рассмотрены вопросы генерации динамических давлений и диагностики состояния конденсированных веществ. Описаны методики дискретной регистрации скоростей и непрерывного определения профилей давления. Приведены соотношения, используемые для определения состояния при взрывной генерации давлений по известным данным для ВВ и ударным адиабатам стандартных материалов [1,2]. Основное внимание уделено методикам, использованным в работе.

Для создания ударных волн в исследуемых материалах применялись взрывные генераторы из зарядов штатных ВВ с плосковолновой линзой. Ударные волны в образцах создавались как при контактном подрыве зарядов, так и ударом металлических дисков, разогнанных продуктами взрыва. Поскольку в работе была поставлена цель исследования протекания физико-химических превращений при ударно-волновом нагружении, для их диагностики требовалось разработать генераторы, обеспечивающие сохранение постоянных параметров за фронтом входящих ударных волн в течение времени необходимого для регистрации. Имевшиеся к началу работы взрывные генераторы не обеспечивали требуемые параметры. В частности, разгоняемые стандартными взрывными генераторами, пластины имели большой радиус искривления, что не позволяло создавать плоские ударные волны и затрудняло регистрацию изменения параметров. Была проведена оптимизация схемы метания и отработка генераторов с уменьшенной базой разгона и различными прокладками. Отработана серия генераторов, позволяющая разгонять дюралюминиевые и медные диски толщиной от 1 до 3 мм с центральной плоскостью диаметром 15-25 мм до скоростей 2-5 км/с при небольшой массе основного заряда ВВ (50-100 г). Отработанные генераторы позволяли создавать в исследуемых образцах ударноволновой импульс с постоянными параметрами длительностью 1-3 мкс, что достаточно для регистрации изменения профилей давления при временном разрешении аппаратуры 5-10 нс.

Максимальная скорость, достигаемая при линейном ускорении ударников (дюралюминий 0,9 мм) продуктами взрыва наиболее мощного ВВ (октогена), составляла 6 км/с. Для решения ряда задач необходимо получать более высокие скорости. В литературе описаны способы повышения скоростей метания за счет различных типов кумуляции, однако при этом, как правило, существенно снижается соотношение массы ударника и используемого ВВ, что в ряде случаев не позволяет проводить эксперименты в закрытых взрывных камерах. Для решения этой проблемы был разработан взрывной трубчатый ускоритель с взрывчатым наполнителем (ВТУВ). Основой для разработки были данные по детонации жидких взрывчатых веществ (ЖВВ), помещенных внутрь полых цилиндров из более мощных взрывчатых составов [3]. Эти исследования показали возможность создания в ЖВВ стационарных режимов пересжатой детонации с параметрами, намного превышающими параметры нормальной детонации. При этом можно получить конфигурацию фронта пересжатой детонации в ЖВВ с плоским «маховским» диском. Разработанный ВТУВ позволил при относительно высокой скорости метания металлических дисков значительно снизить вес заряда ВВ по отношению к весу метаемого тела.

Схема ВТУВ показана на рис. 1. ВТУВ состоит из полого цилиндрического заряда мощного ВВ (2), с сердцевиной из составного заряда, состоящего из зарядов «легкого» малоплотного ВВ (ЛВВ, 4), в котором формируется пересжатая детонация с «маховским» диском, и «тяжелого» металлизированного ТВВ (3),



**Рис.1.** Схема взрывного трубчатого ускорителя с взрывным наполнителем

которое препятствует оттоку продуктов в обратном направлении. Весь заряд в целом инициируется капсюлем-детонатором через дополнительную линзу ВВ (1). Метаемое тело — металлический диск (7) диаметром *d* разгоняется в коротком стальном стволе (8), конструкция которого обеспечивает погружение диска внутрь ЛВВ на глубину, при которой «маховский» диск в ЛВВ еще не разрушается из-за волн разгрузки со свободной поверхности заряда МВВ. Для уменьшения повреждающих воздействий метаемое тело помещается в поддон из пластмассы (6). Для дополнительного увеличения скорости метания весь заряд помещается в металлическую оболочку (5). Ускоритель работает следующим образом. После подрыва детонатора с помощью линзы ВВ в ВТУВ создается плоская детонационная волна. По мере распространения по заряду детона-

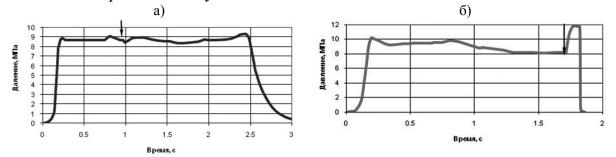
ционный фронт в MBB обгоняет детонацию в сердцевине и обеспечивает создание в ней стационарной конфигурации конически сходящейся детонационной волны с «маховским» диском в центре, распространяющейся со скоростью, равной скорости детонации оболочки. Продукты детонации ЛВВ, представляющие собой газ с относительно низким молекулярным весом, сжатый до высокой плотности в сходящейся волне и дополнительно поджатый продуктами взрыва ТВВ, расширяясь, разгоняют металлический диск, находящийся в стволе.

Были проведены расчеты возможных вариантов и ряд экспериментов по отработке конструкции. При использовании МВВ октоген/тротил 64/36 с каналами диаметром 20 мм и внутренними зарядами ЛВВ из нитрометана и ТВВ - октоген/вольфрам 50/50 удалось получить скорости дисков толщиной 2 мм и диаметром 8 мм из дюралюминия 8 км/с, для стальных дисков - 7 км/с. По сравнению с другими ускорителями ВТУВ обладает достаточно низким соотношением веса ВВ в заряде к весу метаемого тела (менее 500) (полная масса ВВ в заряде не превышала 380 г), что позволяет применять его в условиях небольших лабораторных взрывных камер. На разработанный ВТУВ получен патент.

Далее в главе описаны использованные в работе экспериментальные методики по определению скоростей ударных и детонационных волн с помощью электроконтактных датчиков и профилей давления манганиновыми и ПВДФ датчиками. В работе были использованы как стандартные манганиновые датчики, так и пьезопленочные ПВДФ датчики, изготовленные на основе поливинилиденфторидной пленки производства НПО «Пластполимер» (Санкт-Петербург). В ходе работы была показана применимость упрощенной конструкции ПВДФ датчиков для регистрации процессов ударно-волнового инициирования малопористых взрывчатых веществ.

Отдельный параграф посвящен разработке методики исследования влияния ударно-волнового сжатия на процесс горения твердого топлива. Современные смесевые твердые ракетные топлива (ТРТ) представляют собой композицию на основе частиц окислителя и горючего, которые для обеспечения прочности скреплены органическими связующими. Часто также вводятся высокоэнергетические добавки - твердые ВВ: октоген и гексоген. Подобные топлива, в сущности, представляют собой композитные взрывчатые составы, в которых при ударно-волновых воздействиях могут возникать и развиваться различные процессы: от очагового возгорания до детонации. В процессе работы твердотопливные ракетные двигатели могут подвергаться воздействию внешних нагрузок различного типа, которые могут вызвать нарушения в работе двигателя с катастрофическими последствиями. В частности, при ударно-волновом воздействии при сравнительно низких амплитудах давления в топливе могут развиваться трещины и отколы. Выход ударной волны из слоя топлива на поверхность горения может привести к срыву жидкого горящего слоя с последующим догоранием в камере. В работающем двигателе увеличение общей площади горения может привести к необратимому повышению давления в камере сгорания с последующими разрушениями. Для определения допустимых уровней нагрузок иногда проводят стендовые испытания работающих двигателей, однако подобные испытания весьма сложны, опасны и дорогостоящи. Была поставлена задача разработать лабораторный экспресс-метод, позволяющий исследовать устойчивость горения твердого топлива при ударно-волновом воздействии в диапазоне давлений до 0.3 ГПа.

Для решения этой задачи был создан экспериментальный стенд, моделирующий горение топлива в двигателе с внешним взрывным генератором ударной волны. В экспериментах образец топлива помещался в модифицированную манометрическую бомбу с вкладышем из фрагмента композиционного корпуса ракетного двигателя. С помощью схемы синхронизации в заданный момент времени после зажигания образца топлива производился подрыв заряда ВВ взрывного генератора. Ударная волна входила в ТРТ через вкладыш. За счет изменения диаметра сопла в манометрической бомбе изменялось давление в камере сгорания (1 - 12 МПа). Интенсивность входящей ударной волны изменялась массой заряда ВВ и толщиной слоя воды между зарядом и вкладышем. В экспериментах с помощью ПВДФ датчиков измерялось давление ударной волны в образце ТРТ. Изменение давления продуктов горения в бомбе измерялось стандартными индукционными датчиками.



**Рис. 2.** Диаграммы давления в камере сгорания при ударно-волновом воздействии на горящий образец ТРТ, момент входа ударной волны в образец показан стрелкой; а) давление входящей ударной волны - 135 МПа; б) - 230 МПа.

На рис. 2 показан пример записей давления в бомбе при горении одного из испытанных составов ТРТ, который демонстрирует потерю устойчивости горения данного состава при возрастании давления ударной волны. При давлении 135 МПа ударная волна после выхода на горящую поверхность вызывает частичный срыв размягченного горящего слоя с последующим восстановлением прежнего режима горения. Увеличение давления ударной волны до 230 МПа приводит к резкому росту давления в бомбе с последующим разрушением конструкции вкладыша. Рост давления продуктов горения вызван сочетанием нескольких причин: увеличение общей площади горения за счет трещин и прорыва пламени внутрь образца, отрыв разогретого слоя и откольных фрагментов образца с последующим догоранием в камере. Отработанная методика позволяет оп-

ределять допустимые параметры ударно-волновых импульсов и проводить лабораторные испытания устойчивости горения ТРТ при ударноволновых воздействиях в диапазоне давлений до 300 МПа.

Вторая глава диссертации посвящена описанию способов получения информации о состоянии ударно-сжатых веществ методами оптической пирометрии. Рассмотрены основные элементы оптической пирометрии для проведения измерений температуры по регистрации излучения ударно-сжатых веществ. Приведено описание использованных в работе пирометров: сконструированного автором двухканального фотоэлектрического пирометра и пятиканального пирометра конструкции ИПХФ РАН. Описана процедура градуировки установок и обработки электрических сигналов для определения температуры. Приведены как литературные, так и данные автора по температуре на фронте детонационных и ударных волн в ряде прозрачных веществ. Описана оконная методика для определения температуры в непрозрачных материалах, когда излучение нагретого ударной волной вещества или продуктов детонации регистрируется через другой материал, который сохраняет прозрачность после прохождения ударного фронта. В этом случае можно определить температуру вещества на границе с оконным материалом при давлении за фронтом волны сжатия или разрежения, которая отражается от контактной поверхности с окном. Приведены пределы применимости ряда использованных в работе оконных материалов для определения температуры (LiF, ПММА, вода, глицерин).

Особое внимание в работе уделено развитию индикаторного метода для исследования процессов при ударном сжатии и детонации. Экспериментальные данные показывают, что многие изначально прозрачные вещества при достижении определенных давлений достаточно быстро (за времена порядка 10<sup>-9</sup>-10<sup>-8</sup> c) теряют свою прозрачность и начинают излучать из тонкого слоя на ударном фронте, при этом интенсивность излучения однозначно зависит от давления. При известных ударных адиабатах и зависимостях интенсивности излучения от давления такие вещества могут быть использованы в качестве индикаторов для определения величины давления на контактной границе с образцом исследуемого вещества и изменения давления на фронте ударной волны по мере ее распространения в индикаторе. Также при наличии зависимости скорости звука от давления за ударным фронтом в индикаторе можно определить изменение во времени всех параметров ударного сжатия на контактной границе с образцом. Таким образом, индикаторы могут служить своеобразными датчиками как для определений параметров ударного сжатия по интенсивности свечения ударного фронта, так и для регистрации временных интервалов достижения волновыми процессами фиксированных расстояний. Впервые метод «индикаторной жидкости» был предложен И.М. Воскобойниковым в 1974 г. [4], однако свое развитие получил в более поздних работах при участии автора и М.Ф. Гогули. В диссертации

рассмотрены особенности и ограничения этого метода, а также приведены наиболее важные результаты по его использованию.

Одним из основных достоинств индикаторного метода является его высокая амплитудная чувствительность. Пирометрическими методами для ряда веществ определены зависимости интенсивности спектральной плотности излучения от интенсивности ударных волн, которые показали наличие линейных участков зависимостей температуры от давления T(P) $= a + b \cdot P$ . В зависимости от спектрального диапазона пирометра интенсивность теплового излучения имеет сильную зависимость от температуры  $(b(T) \sim T^4$  - уравнение Стефана-Больцмана для измерений полного излучения во всем спектральном диапазоне, либо экспоненциальную зависимость - приближение Вина, при измерении в спектральных диапазонах). Таким образом, регистрируемый электрический сигнал фотоприемника прямо-пропорциональный интенсивности излучения имеет очень сильную зависимость от амплитуды давления, т. е. незначительное изменение давления на фронте ударной волны вызывает существенное изменение регистрируемого сигнала. Известные зависимости T(P) для ряда веществ и высокая амплитудная чувствительность пирометрических измерений послужили основой для разработки индикаторного метода для получения информации об изменении параметров ударно-волновых процессов, протекающих в исследуемых веществах, образцы которых помещаются в контакте с индикатором.

В качестве индикаторов могут быть использованы любые прозрачные материалы с известными зависимостями интенсивности излучения от давления, однако наибольшее применение в физике ударных волн получили жидкости, поскольку при их использовании удается избежать трудностей, связанных с влиянием упругопластических течений и неоднородностей на контактной границе с исследуемым образцом. В общем случае для индикаторов необходимо наличие известных ударных адиабат, зависимостей изменения интенсивности излучения ударного фронта (температуры) и скорости звука от давления. Кроме того, в диапазоне давлений, где применяется индикатор, он не должен претерпевать какихлибо существенных физико-химических превращений, приводящих к неоднозначности зависимостей излучения и скорости звука от давления.

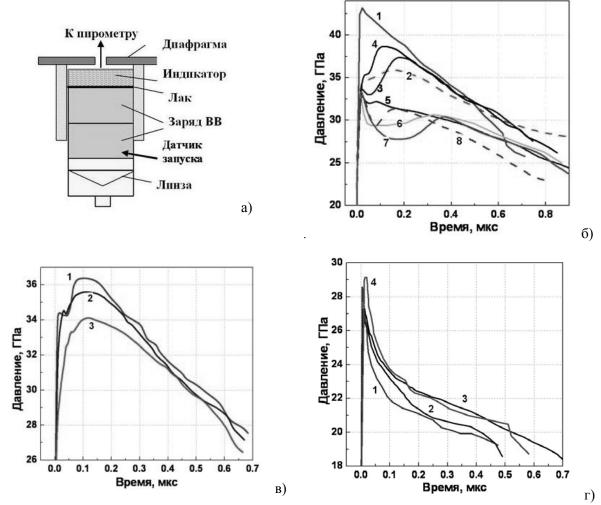
Выбор того или иного индикатора зависит от целей исследований, например, для определения состояний на ударных адиабатах двукратного сжатия или на изоэнтропах разгрузки целесообразно использовать несколько различных по динамической сжимаемости индикаторов. В задачах, где основной интерес представляют процессы, протекающие за фронтом проходящей по исследуемому образцу волне, существенным становится вопрос, связанный с соотношением сжимаемостей исследуемого образца и индикатора, поскольку при выходе волны из образца в зависимости от соотношения сжимаемостей в исследуемый образец могут отражаться волны сжатия или разрежения. Для минимизации влия-

ния отраженных волн необходимо использовать индикатор наиболее близкий по сжимаемости с материалом образца.

Наиболее часто в качестве индикаторов используются галогенпро- изводные метана и некоторые органические жидкости. Некоторые из них обладают достаточно высокой плотностью (например, бромоформ  $\rho_0 = 2,89\ e/cm^3$ ), что позволяет минимизировать влияние отраженных волн на процессы в мишени. Диапазоны применимости индикаторов определяются наличием однозначной зависимости (например, близкой к линейной) температуры ударного фронта от давления и быстрым нарастанием излучения ударного фронта до максимального значения за счет поглощения в тонком слое ударного фронта, препятствующее регистрации излучения из объема вещества за фронтом. Последнее обстоятельство необходимо для обеспечения хорошего временного разрешения. В данной работе в качестве индикаторов наиболее часто использовались бромоформ и тетрахлорметан, для которых были уточнены зависимости температуры и скорости звука от давления.

Далее в работе рассмотрены методические аспекты применения индикаторного метода для определения скоростей звука и вторичных ударных волн в различных ударно-сжатых материалах. Для определения скоростей звука использовался метод догоняющей разгрузки в экспериментах с ударом плоской пластиной. Рассмотрены варианты одинаковых и различных материалов ударника и исследуемого образца, прозрачных и пористых образцов.

В ходе работы была проведена отработка применения индикаторного метода для определения профилей давления в составах ВВ – алюминий, которые позволили обнаружить ряд особенностей, связанных с развитием химической реакции продуктов взрыва с алюминием. Определение профиля изменения давления продуктов детонации (ПД) зарядов конденсированных ВВ представляет одну важных задач физики взрыва, имеющих как научное, так и практическое значение для построения моделей детонации и оценки работоспособности ВВ. На рис. 3 приведена постановка экспериментов и вид профилей давления в продуктах взрыва. Детонационная волна создавалась в исследуемом ВВ генератором плоского фронта. Диаметр зарядов 40 мм, вес зарядов исследуемых ВВ, как правило, составлял 100 г при высоте 44-50 мм. Слой индикатора (бромоформа или тетрахлорметана), составлял около 20 мм. Использование более толстых слоёв индикатора нецелесообразно из-за влияния боковых волн разрежения. Во избежание влияния на регистрацию собственного свечения детонации поверхность зарядов покрывается слоем непрозрачного лака или туши толщиной 5÷15 мкм. Регистрация свечения индикатора проводится из центральной части заряда через диафрагму (обычно диаметром 5 мм). Для регистрации используется двухканальный оптический пирометр, разработанный автором.



**Рис. 3.** Постановка экспериментов (а) и профили давления в продуктах детонации: б) октоген/Al (АСД-1(15)) при весовом содержании Al: 1- 0%, 2-3%, 3 - 4,5 %, 4 – 5%, 5 – 7,5%, 6 – 10%, 7 – 15%, 8 - 25%; в) БТНЭН/Al 85/15 при различных размерах частиц Al: 1-БТНЭН , 2- АСД-1(15), 3 – наноAl (0,1); г) НГ/Al 85/15: 1- НГ, 2- АСД-1(15), 3 – пудра ПАП-2, 4 - наноAl (0,1). (пористость зарядов 5%)

Полученные записи свечения ударного фронта в индикаторе позволяют определить профили давления в ПД с использованием известных зависимостей. Использованный метод позволил обнаружить ряд неизвестных ранее особенностей. В качестве примера на рис. 36-г приведен ряд полученных профилей давления для трех различных типов ВВ: октонитрогуанидина  $(H\Gamma)$ бис(2,2,2-тринитроэтил)-нитрамина гена, И (БТНЭН) и некоторых составов с добавками алюминия. Октоген,  $C_4H_8O_8N_8$ , - мощное BB с отрицательным кислородным балансом КБ = – 21,6%. HГ, CH<sub>4</sub>O<sub>2</sub>N<sub>4</sub>, - BB с высоким содержанием водорода, КБ = -30,8%. БТНЭН,  $C_4H_4O_{14}N_8$ , - BB - окислитель,  $K\overline{b}$  = +16,5%. Для прессованных зарядов (пористость около 5%) октогена и БТНЭН получены монотонно спадающие профили без каких-либо особенностей, которые позволили бы выделить «химпик», однако нарастание давления для БТНЭН имеет характерную «ступеньку», после которой давление несколько подрастает. Наиболее вероятной причиной такой особенности является проявление двухстадийного процесса химического разложения БТНЭН за фронтом ударной волны. Для более слабого ВВ – НГ на профиле в про-

дуктах детонации прорабатывается область повышенных давлений, которую можно отнести к зоне химической реакции. Выбор точки перегиба на профилях давления, по которой можно определить положение плоскости Чепмена-Жуге (Ч-Ж) достаточно субъективен. Для НГ можно выделить некоторую область 22,1 - 21,6 ГПа, которой можно приписать «плоскость Ч-Ж». Зарегистрированные профили давления позволили выявить качественные отличия в структуре детонационных волн, связанные с физико-химическими свойствами различных типов ВВ. С помощью индикаторного метода также были выявлены некоторые особенности детонации составов с добавками порошков А1 различной дисперсности. Характер изменения давления для составов октоген/А1 качественно отличается от профилей давления для чистого BB и BB с инертными добавками. Большинство составов октоген/Al имеют «двухпиковую» структуру профилей с характерным вторичным подъемом давления. Кроме того, это давление при содержании Al до 15% через 0,5-0,7 мкс превосходят давления в зарядах октогена.

Полученные результаты показывают трансформацию профиля давления в зависимости от процентного содержания Al, которая может быть обусловлена совокупным действием нескольких процессов. Анализ показал, что наиболее вероятной причиной появления двухпиковой структуры является взаимодействие Al с продуктами, интенсивность которого зависит от активности порошков Al и эффективной поверхности контакта компонентов. Причем аналогичные профили были также выявлены для другого нитрамина, сходного с октогеном по молекулярной структуре – гексогена, для BB с другой молекулярной структурой подобные профили не наблюдались.

В работе рассмотрено также еще одно из приложений пирометрических методов – исследование процесса инициирования гомогенных прозрачных ВВ. В этом случае используется комбинация как индикаторного метода для определения состояния во входящей ударной волне, так и регистрация излучения продуктов химической реакции ударно-сжатого ВВ. При ударно-волновом инициировании происходит сжатие вещества в ударной волне с последующей химической реакцией. Часто инициирование детонации гомогенных ВВ рассматривают с позиций механизма адиабатического теплового взрыва, когда химическая реакция начинается с некоторой задержкой за фронтом ударной волны. На начальной стадии под действием инициирующей ударной волны в течение некоторого времени (периода индукции т) образуется слой ударно-сжатого нагретого ВВ. Согласно закону Аррениуса повышение температуры ускоряет процесс химического разложения, и через определенное т в некотором слое вещества происходит взрывное разложение. Если эти представления справедливы, то взрывное превращение должно начаться, прежде всего, в том слое ударно-сжатого вещества, который раньше всего был подвержен ударному сжатию. Вблизи контактной границы образуется сверхскоростная детонационная волна, распространяющаяся вслед инициирующей ударной волне по частично разложившемуся сжатому ВВ, и только затем формируется нормальная детонация. В соответствии с утверждениями А.Н. Дремина [5] нормальная детонация в гомогенных ВВ всегда возникает из пересжатой (сильной) детонации. Была проведена проверка справедливости такой схемы процесса инициирования ударными волнами в диапазоне 7-15 ГПа для различных типов жидких ВВ: бис(2-фтор-2,2-динитроэтил)формаля -  $C_5H_6N_4O_{10}F_2$  (ФК), изопропил-(СН<sub>3</sub>)<sub>2</sub>СНООО<sub>2</sub> (ИПН) и 1.6-диазидо-2-ацетоксигексана N<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH(OCOCH<sub>3</sub>)CH<sub>2</sub>OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>N<sub>3</sub> (ДА) в постановке экспериментов, предложенной И.М. Воскобойниковым. Ударные волны создавались в ЖВВ взрывными генераторами через слой индикатора (CHBr<sub>3</sub> или CCl<sub>4</sub>). При такой постановке последовательно наблюдаются яркость свечения ударного фронта в индикаторе, свечение индикатора вблизи контактной границы с ЖВВ, остающейся до взрыва прозрачной за ударным фронтом, и, наконец, свечение детонации ЖВВ. Предполагается, что ЖВВ остается прозрачным до момента резкой интенсификации химической реакции и формирования детонационного процесса. Это обстоятельство позволяет получать информацию о состоянии на ударной адиабате исследуемого ЖВВ по изменению интенсивности излучения индикатора в отраженной волне. В такой постановке были получены записи излучения, которые имеют качественные отличия в зависимости от типа ВВ. Так для ДА наблюдается картина близкая к классической, и при давлении 13,1 ГПа задержка развития химической реакции после входа ударной волны составляет 0,25 мкс. Для более мощных ВВ (ИПН и ФК) в большинстве опытов собственное излучение возникает сразу после входа ударной волны. Для ФК начало активной химической реакции наблюдалось во всем диапазоне входящих давлений без задержки.

В целом результаты для трех ЖВВ показали, что в зависимости от физико-химических свойств ЖВВ могут наблюдаться различные по характеру картины, как близкие к ожидаемым из классических представлений, так и совершенно отличные, свидетельствующие о начале активной химической реакции сразу за фронтом инициирующей УВ. Процесс разложения ЖВВ (особенно при низких давлениях УВ) последовательно развивается во времени, а механизм инициирования зависит от молекулярной структуры вещества.

Таким образом, результаты, приведенные во второй главе, демонстрируют методические возможности оптической пирометрии для получения информации не только по температуре, но по скоростям звука и профилям давления в ударно-сжатых веществах. Причем с использованием одних и тех же условий проведения опытов и оборудования, что позволяет получать разнообразную информацию о протекании превращений за фронтами ударных волн.

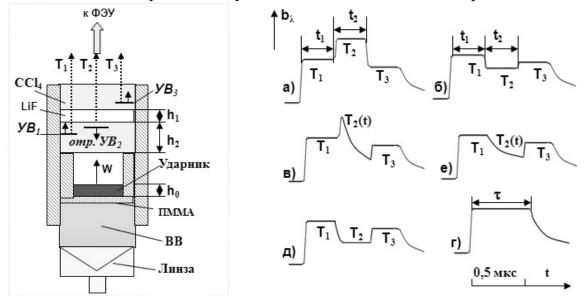
Третья глава диссертационной работы посвящена экспериментальному исследованию превращений органических соединений при ударном сжатии. За фронтом достаточно сильной ударной волны органические соединения претерпевают химические превращения с изменением удельного объема и температуры, причем диапазон давлений, при которых наблюдается превращение, связан с достижением некоторой температуры на ударном фронте, определяемой наличием в молекуле соединения тех или иных химических связей и групп. Ранее это было показано при исследовании ударного сжатия различных углеводородов [6] и др. соединений. Основными объектами исследований в данной работе были галогенпроизводные метана - тетрахлорметан и бромоформ, ацетонитрил и растворы тетрахлорметана и н-гексана.

В большинстве работ по ударному сжатию наличие физикохимических превращений за фронтом ударной волны определяется по изменению хода ударных адиабат. Однако такие наблюдения позволяют фиксировать начало превращений, если они сопровождаются заметным изменением удельного объема уже на фронте ударной волны. Если превращение протекает за фронтом, то фиксация превращений, например плавления или полиморфного фазового превращения, может быть проведена с помощью измерений скорости звука или профиля давления в ударно-сжатом веществе. Использование методов оптической пирометрии позволяет проводить комплексное измерение ряда параметров в ударно-сжатом веществе при одних и тех же условиях ударно-волнового нагружения. В данной работе для исследованных веществ было проведено определение скоростей ударных волн, температуры ударных фронтов, температуры на контактной границе с оконными материалами за фронтом отраженных волн и скоростей звука при одних и тех же интенсивностях входящих ударных волн.

Галогенпроизводные метана представляют интерес не только, как объект исследований превращений при ударном сжатии, но и, как указано ранее, широко используются в технике ударно-волнового эксперимента в качестве индикаторов для определения состояния и профилей давления в других веществах. Диапазоны применимости индикаторной среды определяются наличием однозначной зависимости изменения температуры с давлением и большим значением коэффициента поглощения ударно-сжатого вещества, что необходимо для обеспечения хорошего временного разрешения. В случае наличия в индикаторе превращений за ударным фронтом зависимости температуры и скорости звука от давления могут иметь изломы и приводить к неоднозначности определяемых параметров. Поэтому крайне важно определить пределы их применимости при использовании в различных диапазонах давлений.

Данные по температуре ударного сжатия для  $CCl_4$  показывают, что в области давлений до 20-21 ГПа рост температуры с давлением происходит почти по линейной зависимости, при более высоких давлениях 20-27

ГПа наблюдается изменение зависимости со снижением роста. Эта аномалия связывалась с фазовым переходом или с термическим разложением  $CCl_4$  при достижении определенных давлений. В качестве одной из возможных причин этих особенностей указывалась диссоциация молекул вследствие высоких температур разогрева вещества при динамическом сжатии. В данной работе получены доказательства этого предположения.



**Рис. 4.** Постановка опытов и вид осциллограмм записи излучения в зависимости от интенсивности волны, материала окна и толщины слоя жидкости: (a) и (б) —  $T_1$  и  $T_2 < T^*$ ; (в) и (е) - $T_2 > T^*$ ; (д) –  $T_1 > 3100$  К. Материал окна LiF (а, в, д) и ПММА (б, е); (г) – вид записи в опыте без окна - тыльная волна догоняет ударный фронт в жидкости через время  $\tau$ .

Для получения экспериментальных данных была использована оригинальная постановка экспериментов (рис. 4). Плоские ударные волны в жидкостях создавались ударом металлических пластин, разогнанных продуктами взрыва до скоростей W=1 - 6 км/с. Для предотвращения повреждений тыльной поверхности ударника продуктами взрыва между ним и зарядом помещался тонкий (1-1,5 мм) экран из ПММА. Жидкость помещалась в стакан с тонким (20 мкм) дном из алюминиевой фольги. В части опытов слой жидкости ограничивался сверху прозрачным экраном из «оконного» материала, сохраняющего прозрачность за фронтом ударной волны. В опытах регистрировалось изменение во времени спектральной яркости свечения в ходе распространения ударной волны по слою жидкости и при выходе волны на контактную границу с окном. В качестве оконных материалов использовали пластины из LiF и полиметилметакрилата (ПММА) с толщиной от 1,5 до 10 мм, в некоторых опытах также использовалась вода.

Схема процесса распространения волн в исследуемой жидкости показана на рис. 4. На начальном этапе по слою жидкости распространяется ударная волна, созданная ударом подлетающей пластины (УВ<sub>1</sub>). Излучение ударно-сжатого вещества проходит через слой еще неохваченного сжатием прозрачного вещества и регистрируется фотоприемником (яркостная температура  $T_1$ ). После выхода волны на контактную границу с окном назад распространяется отраженная волна (отр.  $YB_2$ ) (ударная волна в случае LiF или волна разрежения в случае ПММА и воды). При этом через прозрачное окно регистрируется излучение (яркостная температура  $T_2$ ) вещества из слоя, непосредственно прилегающего к контактной границе, поскольку излучение из остальной части жидкости экранируется нагретым до температуры  $T_2$  слоем. Изменение  $T_2$  вещества вблизи контактной границы регистрируется в течение некоторого времени, пока на границу не приходят волны разгрузки или ударная волна не выйдет из окна. Когда в жидкость помещали тонкие пластины LiF или ПММА, то после выхода волны из них регистрировалось излучение (яркостная температура  $T_3$ ) на фронте проходящей по верхнему слою жидкости волне ( $YB_3$ ).

На рис. 4 также показаны примеры различных видов осциллограмм в зависимости от интенсивности волн, оконного материала и толщины слоя исследуемой жидкости. При давлениях входящих ударных волн до 17 ГПа наблюдались записи типа (а) и (б) с постоянной в течение некоторого интервала времени температурой на контактной границе  $T_2$ . С увеличением интенсивности волны сначала наблюдалось уменьшение  $T_2$  во времени (осциллограммы типа (в) и (е)), а затем - резкое падение  $T_2$  до некоторого значения, меньшего  $T_1$  даже в случае LiF (материала с большей динамической жесткостью по сравнению с  $CCl_4$  - осциллограммы типа (д)).

Скорость ударных волн в исследуемых жидкостях определяли по измерениям времени  $t_1$  свечения ударного фронта при прохождении слоя  $h_1$  между дном стакана до границы оконного материала  $D_1 = h_1/t_1$ .

Полученные данные по  $T_1$  позволили уточнить зависимость T(P) температуры на ударном фронте в  $CCl_4$ . В диапазоне давлений от 8,5 до 21 ГПа все имеющиеся данные по температуре ударного фронта можно описать линейной зависимостью  $T(P)=(258,5\pm28,5)+(130,5\pm1,7)$  P(T) в градусах K, P в ГПа, корреляция R=0,998). При давлении более 21 ГПа наблюдается излом зависимости T(P) со снижением роста температуры с давлением.

Зависимости скорости звука C(P), так же, как и T(P) имеет особенности. При достижении P=20-21 ГПа происходит существенное снижение скорости звука. Значения скорости звука в области отсутствия превращения могут быть описаны зависимостью  $C(P)=0.917+0.302\cdot P-2.19\cdot 10^{-3}\cdot P^2$ , при увеличении давления выше 21 ГПа средняя скорость звука может отличаться от мгновенных значений для состояний вещества на различном удалении от ударного фронта.

При выходе ударной волны в жидкости на контактную границу с оконным материалом наблюдается изменение температуры исследуемой жидкости: как в отраженной волне вследствие различия динамических сжимаемостей жидкости и оконного материала, так и из-за возможных химических превращений вещества. Для  $CCl_4$  в данной работе впервые

было обнаружено «ударное охлаждение» при достижении некоторых давлений и температур. При сравнительно низких температурах и давлениях после выхода ударной волны на контактную границу с более жестким экраном LiF на контактной границе давление возрастает за счет сжатия в отраженной волне, в соответствии с этим наблюдается рост температуры до некоторого постоянного значения  $T_2$  (записи типа (a) рис. 4). При повышении давлений в прямой волне выше 17 ГПа и  $T_1 > 2600$  °K, характер записей изменяется. Несмотря на рост давления в отраженной волне наблюдается снижение  $T_2$  вплоть до значений существенно ниже  $T_{1}$ . Если температура ударного фронта и температура на контактной границе для  $CCI_4$  не превосходят  $T^* = 2600$  °K, то яркость излучения на контактной границе практически не меняется во времени. При этом на контактной границе с LiF наблюдается прирост температуры,  $\Delta T = T_2 - T_1$ > 0, а на контактной границе с ПММА и водой — ее спад ( $\Delta T < 0$ ) в соответствии с увеличением или падением давления в *CCl*<sub>4</sub> при прохождении волны через границу с материалами различной сжимаемости. С увеличением интенсивности волны при превышении величинами  $T_2$  или  $T_1$ температуры  $T^*$  яркость свечения  $CC1_4$  на контактной границе уменьшается во времени. С дальнейшим увеличением интенсивности волн при  $P_1$  $> 23~ \Gamma\Pi a$  и  $T_1 > 3100~ {\rm K}$  для времена достижения конечных состояний за фронтом и на контактной границе значительно уменьшаются. При этом обнаружено резкое падение температуры вещества вблизи контактной границы с LiF. Спустя 20 нс после выхода волны на границу  $T_2$  становится ниже температуры ударного фронта  $T_1$  хотя ударная адиабата LiF на диаграмме давление — массовая скорость расположена выше ударной адиабаты СС14.

Наиболее вероятной причиной такого характера изменения температур на контактных границах является диссоциация  $CC1_4$ . Такие виды превращений, как диссоциация или деструкция вещества, не происходят мгновенно. Соответствующее их протеканию изменение температуры за фронтом волны происходит в течение некоторого промежутка времени, определяемого температурой и энергией разрыва связи. С ростом температуры процесс диссоциации ускоряется во времени. С этим связаны зафиксированные изменения в температуре  $CC1_4$  на контактной границе с окнами при увеличении давления и температуры.

Полученные данные с использованием допустимых приближений позволили оценить кинетические характеристики диссоциации  $CCI_4$  в области температур 2900-3300 °K и давлений 17-25 ГПа.

Таким образом, на основании полученных данных об изменении температуры и скорости звука за ударными фронтами получено подтверждение химическому превращению  $CCl_4$  с поглощением энергии, наиболее вероятной причиной, которого является диссоциация, которая должна протекать и при ударноволновом сжатии других галогенпроизводных метана. Начало превращения связано с достижением некоторой

температуры (для  $CCl_4$  — 2600 °K), которая, определяется энергией связи C - Cl.

Для  $CHBr_3$ , также как и для  $CCl_4$ , в опытах с одним и тем же ударником были проведены одновременные измерения скоростей ударных волн и температур ударных фронтов, определены скорости звука за фронтом ударной волны и параметры состояния в отраженных от различных оконных материалов — давление и температура на контактной границе с оконным материалом. Основные результаты получены в диапазоне давлений 10 - 55 ГПа и температуре 1400 - 5700 К.

В отличие от  $CCl_4$  явные превращения для бромоформа обнаруживаются при более низких давлениях и температурах, что согласуется с более низкой энергией разрыва связи C - Br. (Энергия разрыва связи C -*Hal* у бромоформа 237 - ниже, чем у  $CCl_4$  - 307 кДж/мол). Поэтому можно ожидать, что диссоциация должна происходить при достижении более низких температур. Причем, если по зависимости T(P) не видно особых отклонений от линейной зависимости в диапазоне от 10 до 45-50 ГПа, то снижение скорости звука C(P) наблюдается уже при P>15 ГПа и температуре 2000 К. В диапазоне 10 - 50 ГПа уточненная зависимость T(P)может быть записана в линейном виде  $T(P) = 220.8 \pm 33.5 + (113.3 \pm 1.2) P$ (коэффициент корреляции R = 0.998). Зависимость C(P) в отличие от предложенной ранее квадратичной зависимости в диапазоне 15-45 ГПа описывается линейным уравнением C(P)= $3.02\pm0.08$  $(5,85\pm0,26)\cdot10^{-2}$  Р (R = 0,980). При дальнейшем повышении давления P>45 ГПа как на C(P), так и T(P) зависимостях наблюдается отклонение от линейных зависимостей со снижением, что можно связать с дальнейшим процессом разложения.

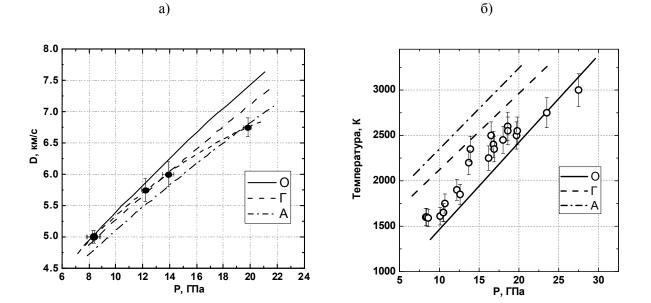
Измерения температуры на контактной границе  $T_2$  с различными оконными материалами проведены для  $CHBr_3$  в той же постановке, что и для  $CCl_4$ . Увеличение  $T_2$  на границе с более жестким окном из LiF до постоянного значения наблюдалось при  $P_1 = 13.2 \, \Gamma \Pi a$  (записи типа рис. 4a), при более высоких давлениях наблюдается снижение  $T_2$  со временем. Для  $CHBr_3$  можно указать критическое значение температуры  $T^*=2000$ К, выше которой наблюдаются особенности, которые можно связать с диссоциацией молекул. При давлениях на ударном фронте  $P_1 > 16$  ГПа  $T_1$  $>2000~K~T_2$  не остается постоянной во времени, а уменьшается, что свидетельствует об изменении температуры во времени за ударным фронтом вследствие частичной диссоциации вещества. Примерно при том же давлении меняется наклон  $T_I(P_I)$  – зависимостей, и наблюдается перегиб на зависимости скорости звука от давления. Уменьшение роста  $T_1$  с давлением в области превращения происходит без резких изменений, что можно объяснить экранировкой конечного состояния вещества излучением еще недиссоциированных слоев непосредственно за ударным фронтом.

Помимо чистых  $CHBr_3$  и  $CCl_4$  аналогичные эксперименты проведены с их раствором в весовом соотношении 30/70. Изменение временного профиля температуры на контактных границах с LiF и ПММА для раствора происходит выше  $T^*=2000$  К, как и для  $CHBr_3$ . Это согласуется с предположением о том, что начало превращения определяется разрывом слабейшей связи в молекуле одного из компонентов при достижении определенной температуры.

В целом полученные данные по измерению скоростей звука, температуры ударных фронтов и температур в веществе за отраженными волнами сжатия и разрежения для  $CCl_4$ ,  $CHBr_3$  и их раствора показали, что особенности изменения регистрируемых параметров с ростом давления можно объяснить химическим превращением с поглощением энергии. Наиболее вероятной причиной этого превращения является диссоциация за ударным фронтом при достижении определенной температуры, значение которой, по-видимому, определяется энергией связи C - Hal. Полученные данные позволили определить пределы применимости  $CCl_4$  и  $CHBr_3$  в качестве индикаторов для исследований ударного сжатия других материалов. Для простого определения амплитуды, создаваемого на начальном этапе давления, можно использовать зависимости  $T_1(P)$  по экспериментальным данным во всем диапазоне давлений. Однако если для исследуемого вещества требуется определить изменение параметров состояния со временем, то следует использовать индикатор с однозначными и плавными зависимостями скорости звука и температуры от давления.

В работе также было проведено комплексное измерение параметров ударного сжатия ацетонитрила, в молекуле которого наряду со связями C—H и C—C имеется связь  $C \equiv N$ . При разных интенсивностях ударных волн проведены измерения температуры и скорости распространения ударных волн, а также скорости звука за фронтом ударной волны.

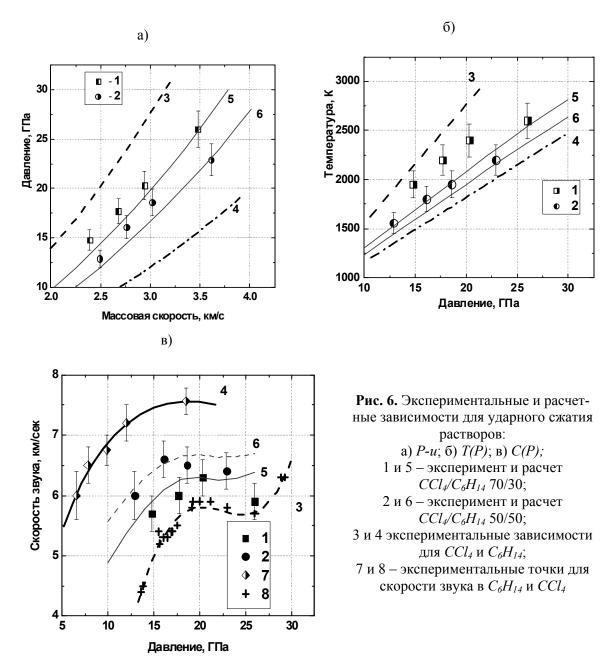
На рис. 5 показаны экспериментальные и расчетные данные по скоростям ударных волн и температурам ударного сжатия. Обобщенная ударная адиабата для органических соединений без превращений для ацетонитрила имеет вид  $D=1,304+2\cdot u-(0,1/1,304)\ u^2$ . Снижение скорости ударной волны по отношению к обобщенной зависимости начинается уже при 8 ГПа и с дальнейшим повышением интенсивности постепенно возрастает. Что же касается данных по температуре ударного сжатия и скорости звука, то здесь данные не имеют монотонной зависимости с давлением ударной волны. Наблюдаются особенности, которые можно связать со специфическими особенностями превращения нитрильных соединений при ударном сжатии.



**Рис. 5.** Экспериментальные и расчетные зависимости для ударного сжатия ацетонитрила: а) D(P); б) T(P); О — расчеты по обобщенной ударной адиабате без превращения, Г — в предположении образования углерода в фазе графита, А — то же в фазе алмаза.

Экспериментальные данные сравнивались расчетами, проведенными в различных предположениях механизма превращения за фронтом волны и продуктов этого превращения при двух вариантах протекания реакции  $CH_3CN \rightarrow NH_3 + 2C$  и  $CH_3CN \rightarrow 0,75CH_4 + 1,25C + 0,5N_2$  по схеме близкой к описанной в [6]. При этом для углерода рассматривалась возможность образования, как в фазе графита, так и алмаза. В предположении отсутствия превращения ударная адиабата ацетонитрила записывалась в обобщенной форме, а уравнение состояния — в форме Ми-Грюнайзена.

Расчетные значения для случая превращения ацетонитрила с образованием метана, азота и углерода приведены на рис. 5. Расчеты по другому варианту, когда предполагается образование аммиака и углерода, дают сильно завышенные значения температуры и скорости звука (более чем в 2 раза) по сравнению с экспериментом. Сравнение полученных данных с результатами расчетов не позволяет однозначно отдать предпочтение какому-либо одному из использованных выше предположений. Наиболее вероятным представляется следующее. До достижения за фронтом волны температуры 1700 - 1800 К и давления 11 - 12 ГПа ацетонитрил не претерпевает превращения. При температурах за фронтом выше 1800 К происходит разложение ацетонитрила, по-видимому, на метан, азот и углерод, что находит свое отражение в небольшом изменении хода зависимости температуры от интенсивности волны, а также радикальном изменении скорости звука за фронтом. Когда температура за фронтом волны превышает 2300—2400 К, изменяется наклон зависимости температуры и скорости звука от интенсивности волны, что можно связать с частичной диссоциацией метана.



Одним из путей оптимального выбора индикатора под конкретную цель исследования является использование растворов жидкостей с известными ударными адиабатами и T(P) зависимостями. Изменением содержания компонентов в растворе можно регулировать динамическую сжимаемость и таким образом уменьшать влияние отраженных волн на исследуемые процессы. На практике наиболее часто для описания состояния растворов, компоненты которых при растворении не взаимодействуют и не образуют комплексов, используют аддитивное приближение. В данной работе была проведена проверка возможности использования такого предположения на примере ударного сжатия растворов  $CCl_4$  с н-гексаном  $C_6H_{14}$  в двух весовых соотношениях 50/50 и 70/30.

Растворы приготавливались простым смешиванием химически чистых  $CCl_4$  и  $C_6H_{14}$ . Исходная плотность компонентов составляла 1,59 и 0,66 г/см<sup>3</sup> соответственно. Начальные плотности растворов  $\rho_0$  составляли

1,12 и 0,93 г/см<sup>3</sup> и равны плотностям, рассчитанным по аддитивности удельных объемов без учета возможного взаимодействия компонентов во время растворения.

Эксперименты проводились по схеме рис. 4. Экспериментальные данные по определению ударных адиабат и зависимостей температуры и скоростей звука приведены на рис. 6. На графиках также приведены экспериментальные зависимости для  $CCl_4$  и  $C_6H_{14}$  и расчетные зависимости для растворов. Определение C(P) для гексана проводилось в отдельных экспериментах.

В целом, как и ожидалось, экспериментальные данные для растворов лежат в промежутке между данными для исходных компонентов. Зависимости T(P) и C(P) для  $CCl_4$  имеют перегиб при достижении 20-21  $\Gamma\Pi$ а со снижением роста T и C, что, как показано выше, связано с развитием процесса диссоциации. В гексане снижение роста C(P) наблюдается при приближении к 20 ГПа. В растворах также при P около 20 ГПа наблюдается снижение T и C. Вместе с тем следует отметить отличия, касающиеся, прежде всего, данных по двукратному сжатию. Для  $CCl_4$  при достижении давления в прямой волне  $P_1$  более 17 ГПа и  $T_1$  более 2600 К, температура в отраженной волне  $T_2$  на контактной границе с LiF начинает постепенно снижаться за счет диссоциации за ударным фронтом, а при более высоких давлениях становится гораздо ниже  $T_1$ . Похожее поведение CCl<sub>4</sub> ожидалось и в растворах. Однако в этом случае всегда наблюдается рост  $T_2$  по отношению к  $T_1$  . Т.е. при одинаковом давлении снижение температуры от введения гексана или его влияние на межмолекулярном уровне изменяет характер превращения  $CCl_4$ .

На графиках помимо экспериментальных данных приведены также расчетные зависимости для растворов. В расчетах использовались экспериментальные ударные адиабаты, T(P) и C(P) зависимости для компонентов. Предполагалось, что при ударном сжатии раствора отсутствует межмолекулярное взаимодействие компонентов, и соотношение аддитивности сохраняется. Объемы компонентов в растворе равны таким объемам компонентов при сжатии по своим ударным адиабатам, для которых выполняется аддитивность холодных энергий  $E_{xi}$  и удельных теплоемкостей  $C_{Vi}$  (индекс i означает компонент раствора,  $\alpha$  — весовое содержание):  $\Delta E_x = \sum_i \alpha_i \Delta E_{xi}$ ;  $C_V = \sum_i \alpha_i C_{Vi}$ . В расчетах также использова-

лось предположение, что для компонентов, как при сжатии в растворе, так и индивидуально справедливо уравнение состояния типа Ми-Грюнайзена. Для давления на ударной адиабате:  $P = P_x(V_i) + C_{VI} \Gamma_i T/V_i$ , где  $C_{VI}$  - межмолекулярная теплоемкость,  $\Gamma$  - коэффициент Грюнайзена.

Сравнение с экспериментом показывает, что в целом расчетные зависимости больше смещены в сторону экспериментальных данных для гексана. Но если для P(u) зависимостей это смещение ненамного превышает ошибку измерений, а по C(P) зависимостям трудно сделать сравнение из-за достаточно большой ошибки определения скорости звука, то по

температуре расчет дает явно заниженные значения (для раствора 70/30 экспериментальные точки превышают расчет более чем на 500 K). При P > 20 ГПа T(P) согласуется с экспериментом, но скорее всего за счет снижения T из-за превращения в  $CCl_4$ , которое не учитывалось в расчетах. Для более точных расчетов температуры предположение аддитивности теплоемкостей, по-видимому, непригодно, и необходимо учитывать межмолекулярное взаимодействие компонентов при ударном сжатии в растворах

В четвертой главе приведены экспериментальные данные по измерениям скорости звука в ряде материалов, а также данные по передаче динамических давлений и затуханию ударных волн в различных сплошных, пористых и смесевых системах, полученные с помощью индикаторного метода. Исследования структуры волн разрежения и определение скоростей волновых возмущений в ударносжатых материалах представляют большой интерес при изучении прочностных свойств веществ при высоких давлениях, для описания затухания ударных волн, а также при проектировании конструкций для защиты от взрывных воздействий.

На первом этапе было проведено определение скоростей волн разрежения и вторичных ударных волн в основных материалах, использованных в работе для изготовления ударников и экранов - дюралюминии Д16 и меди М1 (из листового проката). В опытах по определению продольных скоростей звука  $C_l$  металлические пластины разгонялись продуктами взрыва на базе 5-6 мм до скорости W и ударяли по мишеням различной толщины из того же материала. По изменениям времени постоянного свечения в индикаторе определялись толщины мишеней, на которых тыльная волна разрежения догоняет ударный фронт. Для основного материала ударников – дюралюминия Д16 в диапазоне давлений 25-70 ГПа было получено соотношение  $C_l/C_s = 1,16$  (где  $C_s = (D + bu$ - $2du^2$ )(D-u)/D - изоэнтропическая скорость звука в предположении «зеркальности» ударной адиабаты и изоэнтропы разгрузки в координатах давление — массовая скорость (P - u) при записи ударной адиабаты в виде  $D = C_0 + bu - du^2$ ). Это соотношение использовалось в дальнейшем при определении скоростей звука в других материалах.

Скорости вторичных ударных волн определялись в опытах с нагружением тонких экранов продуктами взрыва. Полученные скорости оказались близки к  $C_l$ , что позволяет проводить расчеты времен циркуляции ударных волн в тонких экранах с использованием значений продольных скоростей звука.

В дальнейшем с помощью индикаторного метода были проведены измерения скоростей звука в ряде различных по структуре и физико-химическим свойствам материалах, представляющих интерес для создания различных защитных конструкций. В таблице 1 приведены данные по измерениям скоростей звука за ударными фронтами в различных материалах (обозначения в таблице:  $\rho_0$  - начальная плотность;  $\varepsilon$  — порис-

тость; W - скорость дюралюминиевого ударника (медного в случае меди), u - значение массовой скорости в материале образца, P - давление,  $C_l$  - измеренное значение скорости звука (средняя ошибка измерений  $\Delta C = 0,3$  км/с),  $C_s$  - расчетное значение изоэнтропической скорости звука в предположении "зеркальности" в P-u координатах). Данные для смесей получены с использованием ударных адиабат, рассчитанных в предположении аддитивности удельных объемов.

Таблица 1. Скорости звука в ряде ударносжатых твердых материалах

<b>Таблица 1.</b> Скорости звука в ряде ударносжатых твердых материалах.							
Материал	$ ho_0$	3	W	и	P	$C_l$	$C_l/C_s$
	г/см <sup>3</sup>	%	км/с	км/с	ГПа	км/с	
			1,94	0,97	45,7	6,60	1,20
Cu (M1)	8,93	0	3,54	1,77	104,4	7,25	1,10
<u> </u>			3,66	1,83	109,4	7,55	1,10
Al (Д16)	2,78	0	2,70	1,35	26,8	8,40	1,16
			4,58	2,29	52,3	9,70	1,16
			5,44	2,72	68,0	10,21	1,16
Al (АСД-1)	2,17	20	4,80	2,77	44,4	8,30	1,02
	1,87	31	4,80	2,98	37,2	7,60	0,97
VI	2.00	1	3,20	1,89	26,0	4,20	1,03
KI	3,08		4,80	2,72	47,3	5,00	1,03
Al(АСД-1)/KI 50/50	2,89	0	3,20	1,77	28,9	5,90	1,02
			4,80	2,58	51,6	7,10	1,04
Al(160-280	2,84	84 2	3,20	1,77	29,0	6,00	1,04
мкм)/КІ 50/50	2,04		4,80	2,58	51,5	7,20	1,05
	2,03	2	3,30	2,06	24,1	6,24	1,10
S			3,61	2,23	27,4	7,17	1,21
			4,51	2,74	38,1	8,28	1,26
Парафин	0,91	0	5,04	3,65	28,1	10,0	1,23
ВНЖ/Парафин 96,6/3,4	10,0	6	3,80	1,30	59,5	5,6	1,09
W/Фторопласт 69/31	5,50	3	3,20	1,48	36,5	5,3	1,13
W/KI 62/38	5,80	9	3,20	1,48	36,7	4,7	1,23
$Al_2O_3$	3,92	1	3,64	1,36	52,8	16,2	1,63
B <sub>4</sub> C	2,50	1	3,64	1,65	44,4	18,8	1,65
SiC	3,09	4	3,64	1,60	46,0	16,6	1,95

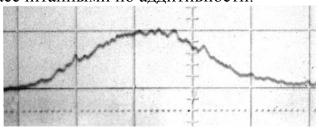
В работе были рассмотрены особенности распространения и затухания ударных волн в керамических образцах. Проведенные измерения скоростей звука в образцах керамики горячего прессования - корунда, карбида бора и карбида кремния показали сохранение их высоких прочностных свойств в волнах разгрузки при динамическом нагружении до 50-60 ГПа. Волны разрежения в этих материалах распространяются, со скоростями продольных волн, а значительная часть спада давления происходит в упругих волнах.

В работе также рассмотрены особенности передачи динамических давлений через прессованные пористые образцы металлов — алюминия и магния. Проведенные экспериментальные исследования по передаче динамических давлений через тонкие (2-4 мм) слои пористых металлов показали, что использование традиционных соотношений для ударного сжатия пористых материалов не может описать некоторые особенности их поведения, в частности при нагружении «жесткими» медными ударниками обнаружено, скорость ударной волны может быть ниже, чем в случае нагружения «родным» ударником при одном и том же передаваемом давлении. Показано, что в ряде случаев процесс передачи давления через прессованные пористые образцы может моделироваться на основе достаточно упрощенной слоистой модели пористого вещества, однако для полного описания требуется разработка более точных моделей, учитывающих реальную реологию пористых материалов и сложные процессы при взаимном перемещении отдельных частиц.

Для решения ряда практических задач необходимо получение информации о распространении ударных волн в смесях твердых материалов различной сжимаемости (например, высоконаполненные композиты металл - связующее). В большинстве опубликованных работ по ударному сжатию смесей определение параметров ударных волн проводилось на основе измерений скоростей ударных волн D в образцах при известных параметрах волн в экранах перед образцами или скоростях ударников. Интерпретация первичных данных была такой же, как при определении ударных адиабат однородных веществ. При этом не проверялась и, как правило, даже не рассматривалась возможность существования особенностей в распределении массовых скоростей за фронтами волн из-за различия плотности и сжимаемости веществ частиц различных компонентов. Хотя ударные адиабаты многих смесей удавалось с приемлемой точностью рассчитывать по известным ударным адиабатам компонентов без рассмотрения каких-либо особенностей сжатия смесей, справедливость такого подхода требует экспериментальной проверки, особенно для смесей из сильно отличающихся по плотностям компонентов. В данной работе было предположено, что в зависимости от содержания и дисперсности компонентов смеси можно ожидать появления особенностей в поведении вещества за фронтом волны. При малых содержаниях плотного компонента с невысокой дисперсностью частиц и наличии градиента скоростей между частицами легкий компонент может достаточно легко обтекать плотные частицы, постепенно вовлекая их в поток. При большом объемном содержании плотного компонента с образованием его частицами каркасной системы более вероятно многократное сжатие легкого компонента с затрудненной фильтрацией через каркасную систему. Достижение гидродинамического равновесия между компонентами за фронтом волны может происходить за времена, сравнимые со временами наблюдения процесса.

Была предпринята экспериментальная проверка этих предположений. С помощью индикаторного метода были определены профили давления за фронтом плоской ударной волны в малопористых бинарных смесях в диапазоне давлений 10-60 ГПа, соответствующих условиям контактного взрыва зарядов мощных ВВ. Исследовались смеси как близких по сжимаемости материалов (Al c KI, S), так и сильно отличающихся компонентов (W и ВНЖ (90% W, 7% Ni, 3%Fe) с парафином, фторопластом и йодистым калием). Был выявлен ряд особенностей, связанных с характеристиками исходных компонентов, которые мало соответствуют обычным представлениям о структуре ударных волн в рассматриваемом диапазоне давлений. Для смесей компонентов с близкими ударными адиабатами выявлено влияние формы и размера частиц. На начальном этапе имеется некоторый период установления гидродинамического равновесия. Однако основные параметры динамического сжатия для подобных смесей хорошо согласуются с рассчитанными по аддитивности.

При исследовании ударноволнового сжатия смесей с сильно отличающимися по плотности компонентами выявлены особенности, которые существенно отличаются от традиционных представлений о структуре ударной волны. В смеси из относительно



**Рис.7.** Осциллограмма записи излучения в индикаторе после выхода УВ из образца смеси W/Парафин 84,5/15,5.

легкого и подвижного парафина и существенно более тяжелых частиц вольфрама или ВНЖ, занимающих значительный объем, но не образующих достаточно плотного каркаса, наблюдается «размывание» ударной волны. При малом объемном содержании тяжелого компонента передаваемое через образец в индикатор давление в начальный момент близко к тому, которое передавалось через парафин, а затем возрастает до несколько большего значения, зависящего от толщины образца. На рис.7 показана осциллограмма свечения ударной волны в индикаторе, прошедшей через образец W/Парафин (3 мм) после удара по нему дюралюминиевой пластиной (2 мм). Вместо быстрого нарастания давления до постоянного значения с последующим спадом в тыльной волне разгрузки (трапецеидальный профиль) наблюдается куполообразный профиль с медленным нарастанием без резкого ударного фронта с последующим переходом в волну разгрузки. Размывание ударных волн в таких смесях можно объяснить затянутым во времени вовлечением тяжелых частиц в поток, причем процесс зависит от содержания и соотношения сжимаемостей компонентов, размеров тяжелых частиц и, по-видимому, вязкости и других свойств легкого компонента. В случае смесей с объемным содержанием тяжелого компонента 20% и менее данный процесс приводит к зависимости конечного состояния от толщины образцов. Появляется некоторое расслоение компонентов, часть парафина как бы выдавливается

из смеси, а частицы тяжелого компонента накапливаются вблизи границы образец-ударник. В целом результаты по размыванию ударного фронта для ряда смесей показали, что при использовании композиционных смесевых материалов нужно всегда учитывать соотношения сжимаемостей и плотностей компонентов, размеры, форму частиц и другие реологические характеристики. Простое определение ударных адиабат таких систем на основе только измерений волновых скоростей может приводить к неверным результатам и должно сопровождаться исследованиями распределения массовых скоростей и давлений во времени за фронтом волны.

В ходе дальнейших исследований было проведено определение эффективности ослабления ударных волн различными материалами. Было выбрано два направления исследований. В рамках первого направления исследовалось влияние пористости, сжимаемости и наличия физико-химических превращений за фронтом ударной волны в индивидуальных материалах. Второе направление связано с исследованием затухания ударных волн в смесях различных компонентов.

В данной работе были выполнены исследования затухания плоских УВ в различных материалах в одной и той же постановке с целью определения перспективных направлений для наиболее эффективного ослабления амплитуды ударных волн. Ударные волны малой длительности в образцах создавались детонацией короткого заряда мощного взрывчатого вещества (МВВ - октоген, гексоген или ТГ), в качестве инициатора использовался заряд ТНТ с пониженной плотностью 1,35 г/с $^{-3}$  высотой 50 мм, который в свою очередь инициировался генератором плоско-



**Рис. 8.** Постановка экспериментов по определению затухания плоских ударных волн.

го фронта (рис.8). Длительность сохранения повышенных параметров в ударно-сжатом образце задается высотой заряда МВВ, которая в большинстве опытов составляла 10 мм при диаметре заряда 40 мм. Спад параметров состояния за фронтом детонационной волны в заряде МВВ вне зоны бокового разлета определяется центрированной волной разрежения от контактной границы между зарядами МВВ и ТНТ пока не достигаются состояния, связанные с параметрами детонации заряда ТНТ. Временной профиль массовой скорости за фронтом волны близок к треугольному, причем характерные длины области центрированной волны разрежения на конце заряда МВВ составляют 0,7 - 1,0 мм. Исследуемые образцы помещались на свободной поверхности заряда МВВ. Величина давления передаваемого через образцы измерялась индикаторным методом с использованием индикаторов  $CCl_4$  и  $CHBr_3$ . Такая постановка опытов позволяла создавать в исследуемых средах плоские ударные волны, эффек-

тивно затухающие на толщинах в несколько мм, и исключить влияние боковых волн разгрузки и плосковолнового генератора на начальной стадии затухания длительностью до 2-3 мкс, что позволяет сравнивать полученные данные по затуханию с простыми одномерными расчетами.

Эффективность ослабления определялась как по относительному снижению передаваемого давления в опытах с одинаковыми толщинами исследуемых образцов, так и по коэффициентам затухания амплитуды ударной волны с увеличением толщины образцов. В таблице 2 приведены данные по коэффициентам затухания.

**Таблица 2.** Экспериментальные данные по затуханию ударных волн в различных материалах. ( $\rho_0$ , плотность образцов,  $\varepsilon$  - пористость, данные обработки затухания амплитуды давления в индикаторе с толщиной образцов под экспоненциальную зависимость  $P(x) = P_0(exp\ (-\alpha\ x))$ , где  $\alpha$  – коэффициент затухания на толщину,  $\alpha_{\rm m}$  - коэффициент затухания на удельную массу). Индикатор -  ${\rm CCl}_4$ , (\*) -  ${\rm CHBr}_3$ 

Материал	ρ <sub>0</sub> , г/см <sup>3</sup>	ε, %	Р₀, ГПа	α, 10 <sup>-1</sup> мм <sup>-1</sup>	$\alpha_{\rm m},10^2~{\rm \Gamma/MM}^2$		
Различные материалы							
Al (Д16)	2,78	0	21,3	$0,48 \pm 0,06$	0,17		
Al (ACД-1)	1,89	30	21,4	0,83±0,10	0,44		
KI	3,10	0	20,7	0,71±0.09	0,23		
	2,17	30	21,3	$0,84\pm0,06$	0,39		
TTN 43-4-4	1,18	0	24,4	0,68±0,07	0,58		
ПММА	0,83	30	24,1	0,85±0,12	1,03		
BN	1,57	30	21,8	1,01±0,11	0,64		
Пенополистирол	0,73	30	23,1	0,99±0,09	1,36		
CCl <sub>4</sub>	1,59	0	20,2	0,76±0,02	0,47		
$C_6H_6$	0,88	0	18,5	0,85±0,21	0,98		
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,87	0	18,8	0,86±0,12	0,99		
$C_6H_{14}$	0,68	0	19,0	0,94±0,10	1,38		
$C_6H_{12}$	0,77	0	18,4	1,47±0,40	1,92		
$C_6H_{10}$	0,81	0	17,8	1,47±0,10	1,81		
SiC	3,09	4	18,8	1,39±0,04	0,45		
B <sub>4</sub> C	2.50	1	20,0	1,70±0,02	0,68		
A1.O	3,92	1	17,6	1,71±0,02	0,44		
$Al_2O_3$	2.51	35	20,9	1,40±0,12	0,56		
		См	еси		•		
Al/CCl <sub>4</sub> 50/50	1,99	0	22,3	$0,72 \pm 0,09$	0,36		
Al/ПММА 50/50	1,15	30	22,7	0,82 ±0,16	0,71		
Al/KI	2.89	0	21,8	$0,68 \pm 0,05$	0,22		
50/50	2.02	30	20,6	$0,86 \pm 0,13$	0,43		
ВНЖ/Парафин 96,6/3,4	10,00	6	14,8	$0,46 \pm 0,07$	0,05		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ΠΜΜΑ							
90/10	2,20	30	21,0	$1,26 \pm 0,12$	0,57		

70/30	1,90	18	23,9	$1,38 \pm 0,13$	0,73
50/50	1,58	12	24,2	$1,28 \pm 0,47$	0,81
Сферопласты					
Сферопласт 1	1,02	1	22,3	$0,92 \pm 0,14$	0,90
Сферопласт 2	0,98	1	21,9	$0,91 \pm 0,14$	0,92
Mg/SiO <sub>2</sub>					
40(МПФ-3)/60	1,01	50	28,8*	1,71±0,27	1,71
40(МПФ-1)/60	1,28	40	32,5*	1,56±0,38	1,22
Mg/TiO <sub>2</sub>					
32(МПФ-3)/68	2,05	30	31,2*	1,43±0,39	0,70
32(МПФ-1)/68	2,05	30	33,5*	1,39±0,20	0,68
Mg/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
69(МПФ-3)/31	1.96	10	23,4	1,01±0,18	0,51
31(МПФ-1)/69	2,32	28	23,6	1,47±0,34	0,63
Al/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 35(ACД-1)/65	2,79	30	22,8	1,40±0,43	0,50

В ряде материалов могут происходить достаточно быстрые физикохимические превращения с изменением удельного объема, которое в свою очередь сопровождается аномальным увеличением скоростей звука и соответственно к более быстрому затуханию амплитуды ударной волны за счет тыльных и боковых волн разгрузки. Было исследовано два вида превращений: полиморфное превращение кристаллических соединений, протекающее с изменением кристаллической структуры по типу перехода графит-алмаз и химические реакции в ударных волнах с образованием продуктов, имеющих меньший удельный объем, чем исходное вещество. При этом важным был не только факт протекания такого превращения, но и его кинетика, поскольку для эффективного ослабления УВ необходимо, чтобы существенная доля вещества успела претерпеть это превращение за времена воздействия менее 1 мкс. По второму типу превращений рассматривались химические соединения на основе углерода, имеющие в своем молекулярном составе различные типы химических связей и группировок, в которых при воздействии сильных УВ протекает превращение, связанное с диссоциацией или деструкцией молекул, а также термитные смеси, реагирующие с образованием плотных продуктов. Показано, что превращения, протекающие в непредельных углеводородах, приводят к существенному повышению коэффициентов затухания при давлениях выше 10-15 ГПа, при более низких давлениях их использование не имеет преимуществ по сравнению с другими материалами. Протекание реакции в пористых термитных смесях также позволяет получать аномально высокие коэффициенты затухания, однако при снижении пористости скорость реакции замедляется, и эффективность ослабления падает.

В рамках второго направления проводилось исследование особенностей распространения и затухания ударных волн в различных по со-

ставу и содержанию компонентов смесях, которые могут служить прототипом новых перспективных композиционных материалов. По составу компонентов исследованные смеси можно разделить на три группы: а) смеси компонентов с несильно отличающимися по плотности и сжимаемостям компонентов (типа алюминий-плексиглас), б) смеси с сильно различающимися компонентами (типа вольфрам-парафин) и в) смеси керамического компонента с органическим связующим. Результаты для смесей первого типа показали отсутствие сильных особенностей в распространении и затухании ударных волн. При изменении содержания компонентов в таких смесях наибольшее влияние оказывает содержание в смеси более сжимаемого компонента. Для описания ослабления ударных волн в таких композитах вполне применимы разработанные ранее теоретические модели и схемы расчетов, основанные на предположении аддитивности удельных объемов. Наибольший интерес с точки зрения эффективной защиты вызывают две другие группы. Для смесей группы б) при соответствующем соотношении содержания и размеров частиц наблюдается размывание ударных волн с очень медленным нарастанием давления и расслоением компонентов. При использовании в слоистых защитных конструкциях композитов с такими компонентами этот эффект может значительно снизить вероятность откольных повреждений. Для смесей группы в) установлено сохранение высоких коэффициентов затухания, характерных для керамики, при значительном увеличении массовых коэффициентов, что позволяет рассчитывать на значительное уменьшение массы защитных экранов при использовании композитов с керамическими наполнителями.

Таким образом, в работе был проведен комплекс исследований по измерениям скоростей звука и затухания ударных волн в твердых веществах и смесях, включающий исследования влияния физико-химических превращений в веществах при ударном сжатии и эффективности ослабления ударных волн в композиционных материалах при изменении содержания наполнителей и связующих в диапазоне амплитуды давлений 10-60 ГПа.

**Пятая глава** диссертационной работы посвящена изучению ударноволнового инициирования химических реакций в смесях металлических горючих с различными окислителями. Также существенное внимание уделено различным способам повышения реакционной способности твердых смесей окислитель-горючее.

Распространение ударных волн в смесях твердых веществ сопровождается процессами, резко ускоряющими протекание химических реакций: разрушение исходной структуры компонентов, взаимное перемещение и перемешивание компонентов и продуктов реакции, сильный разогрев в местах контакта частиц, пластические деформации и деформации сдвига с освобождением свежих поверхностей, фазовые переходы и др. В ходе ударного сжатия в реакционно-способной смеси могут протекать

экзотермические реакции со значительным энерговыделением. В результате такой реакции возможно образование сильно нагретых продуктов, которые могут стать своеобразным рабочим телом для дальнейшего самоподдерживающегося распространения химической реакции в смеси. Если скорость реакции будет достаточно высокой, то могут быть созданы условия для осуществления «твердофазной» («тепловой» или «безгазовой») детонации.

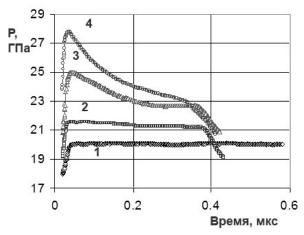
На основе анализа имеющихся данных для экспериментального исследования были выбраны смеси металлов с окислителями, обладающие высоким экзотермическим эффектом и образующие твердые конечные продукты. В качестве основных металлических горючих были выбраны Аl и Mg, дающие в смесях с окислителями наибольший энергетический эффект. Также в ряде смесей использовались титан, цирконий, железо и бор. Из окислителей в большинстве экспериментов использовались сера, оксид молибдена и фторопласт-4 (тефлон, Tf).

Смеси готовились на основе порошков компонентов с различными формой и размерами исходных частиц от долей микрона до 200 мкм. После перемешивания в мельнице образцы исследуемых смесей изготавливались холодным прессованием до плотности 75-95% от теоретической максимальной плотности (TMD), либо использовались образцы насыпной плотности с ручной подпрессовкой до плотности 20-50% TMD.

Ударно-индуцированные реакции исследовались с помощью методов оптической пирометрии. Ударные волны в образцах создавались ударом пластины или контактным подрывом зарядов ВВ. В опытах регистрировалась яркостная температура на контактной границе с оконным материалом и профиль давления в индикаторах. Для плотных образцов смесей Al/S и Al/MoO<sub>3</sub> было установлено существенное повышение яркостных температур на контактной границе с LiF по сравнению с расчетными температурами для нереагирующих смесей. Так для смеси Al/S температура превышала 3200 °К уже за десятые доли мкс (давление УВ 35 ГПа). При этом для Al/S также было обнаружено появление детонационно-подобных профилей давления.

На рис. 9 приведен пример записи давления на ударном фронте в  $CCl_4$ , расположенном за образцами Al/S 45/55. При нагружении образцов чистых серы и алюминия в индикаторах наблюдается постоянное свечение, соответствующее постоянному давлению до тех пор, пока ударный фронт в индикаторе не догонит волна разрежения с тыльной стороны пластины-ударника. Измеряемые величины давлений в пределах погрешности измерения (<5%) совпадают с расчетными. Профили давления в случае смесей имеют существенные отличия. В общем случае передаваемые через образцы Al/S давления превышают давления от инертных систем, причем записи имеют четко выраженный пик в начале регистрации, который зависит от дисперсности Al. Для смесей серы с другими металлами подобные профили не наблюдались.

Повышение давления и детонационно-подобные профили можно связать с реакцией образования сульфида Al<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, который в нормальных условиях имеет меньшую плотность, чем исходная смесь. Совместный анализ измерений яркостных температур и профилей давления позволяет сделать вывод, что в пределах первых 0.5 мкс образуется  $Al_2S_3$ . в количестве достаточном для повышения температуры смеси приблизительно на 500° и повышения давления на 1 - 5 ГПа.



**Рис. 9.** Профили давления в  $CCl_4$  после образцов Al/S 45/55 - 3 и 4 (ударник дюраль W = 3,61 км/с), для сравнения также приведены записи для образцов алюминия (1) и чистой серы (2).

Высокие температуры, а также тот факт, что при реакции в смеси Al/S образуется  $Al_2S_3$  с более низкой плотностью, чем плотность смеси компонентов должно приводить к существенному увеличению объема в ходе химического превращения. В дальнейшем это позволяло надеяться на получение самоподдерживающегося детонационного режима в этой смеси. Был выполнен ряд экспериментов по измерению скоростей распространения процесса в смесях разной плотности. Опыты с плотными образцами смеси и мощным инициированием показали затухание процесса распространения реакции. При сильном инициировании мощной ударной волной реакция не успевает пройти на достаточную глубину, и волны разгрузки разбрасывают непрореагировавшие компоненты.

В последующих экспериментах по распространению ударноиндуцированных реакций как в Al/S, так и других составах исследовались в основном высокопористые образцы. При этом чтобы избежать переуплотнения смеси и замедления реакции на начальной стадии, исследования проводились при слабом инициировании. Заряды приготавливались порционной засыпкой предварительно перемешанных порошкообразных смесей в металлические или пластиковые трубы. Для измерений скоростей использовались электроконтактные датчики, в ряде экспериментов в параллель с датчиками в исследуемую смесь также внедрялись световоды для регистрации свечения продуктов реакции. В конце трубы помещалась пластина свидетель, которая позволяла оценивать суммарное воздействие реагирующей системы. В ряде экспериментов также использовались составные пластины из различных материалов с заделанными ПВДФ - датчиками давления.

Для высокопористых смесей Al/S, Al/MoO<sub>3</sub>, Mg/MoO<sub>3</sub> были получены затухающие детонационно-подобные режимы при диаметрах зарядов до 30 мм. Скорость реакции в этих системах оказалась недостаточной для получения устойчивого самоподдерживающегося процесса. Был

проведен поиск различных способов повышения реакционной способности смесей. Активация базового состава достигалась несколькими путями: использованием ультрадисперсного порошков металлов; введением крупных частиц Al и Fe для увеличения градиента массовых скоростей и т.д. Наилучший эффект был получен при использовании предварительной механохимической обработки исходных смесей, что вызвало необходимость проведения специальных исследований процесса механоактивации смесей окислитель-горючее.

Совместно с А.Н. Стрелецким и И.В. Колбаневым был разработан метод механоактивации смесей окислитель-горючее. Суть метода заключается в совместной обработке компонентов в механохимическом активаторе, в результате чего происходит их измельчение, перемешивание и активация. Степень активации регулируется изменением интенсивности и времени обработки. Режимы подбираются таким образом, чтобы добиться максимально возможной активации и однородности смеси без протекания химической реакции между компонентами при обработке. С помощью этого метода удается создать реакционно-способные композиции с высокой поверхностью контакта реагентов, перемешанные на нано-уровне. Кроме того, деформация и разрушение исходных частиц в процессе активации приводит к созданию дефектов кристаллической структуры, что также увеличивает реакционную способность смесей. Разработанный метод позволяет получать механоактивированные энергетические композиты (МАЭК) состоящие из субмикронных или наноразмерных слоев окислитель-горючее, механически связанных между собой. Реакционная способность МАЭК значительно возрастает по сравнению с обычными смесями, что позволяет получать существенно более высокие скорости горения и ударно-индуцированных реакций.

Исследования структуры МАЭК в зависимости от дозы активации проводилось с помощью оптической, электронной (сканирующей и просвечивающей) и атомно-силовой микроскопии. Реакционная способность смесей исследовалась с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии. Для самораспространяющихся процессов горения и детонации измерены скорость процессов и яркостные температуры продуктов реакции.

Исследования показали, что структура МАЭК при одинаковой дозе обработки зависит как от типа частиц исходного металла, так и окислителя. Если при активации смесей металл – фторопласт, получаемый композит представляет собой чешуеобразные частицы из фторопластовой матрицы с субмикронными фрагментами металлических частиц, то при активации Al + MoO<sub>3</sub> структура в значительной степени зависит от формы исходных частиц металла. Так для композитов Al/MoO<sub>3</sub> со сферическими частицами алюминия (АСД-6) сохраняются частицы алюминия микронного размера, которые покрыты частицами MoO<sub>3</sub>. В случае «плоского» Al(ПАП-2) структура композита «обратная»: частицы MoO<sub>3</sub>

покрыты слоем Al. Реакционная способность при термическом окислении смесей с пластинчатым Al заметно выше, чем для образцов с АСД-6. При термическом нагреве смесей с одной и той же дозой активации в первом случае происходит полное окисление Al, а во втором реакция протекает лишь частично, что определяется структурой активированных смесей. В первом случае в результате механической активации образуется композит со слоями Al и MoO<sub>3</sub>, перемешанными на субмикронном и нано - уровне, а во втором случае сохраняются частицы Al микронного размера. Для менее прочных частиц Mg процесс активации происходит значительно быстрее. В ходе работы были определены оптимальные условия активации для ряда смесей.

Для МАЭК Al и Mg с MoO<sub>3</sub> были проведены исследования как ударно-индуцированных реакций, так и процессов горения. Для пористых образцов получены высокие скорости взрывного горения, достигающие 400 м/с. В прессованных образцах скорости горения составляют 1-20 см/с в зависимости от дозы обработки и исходных порошков. Яркостная температура продуктов горения МАЭК достигает 3000-4000 °К. При инициировании ударноволнового процесса наблюдается затухающий детонационный процесс с переходом во взрывное горение. Распространение ударно-волнового процесса носит неустойчивый характер. В ряде опытов наблюдалось увеличение скорости на отдельных базах измерения с последующим затуханием. Повышение реакционной способности для этих смесей за счет механоактивации оказалось недостаточным для получения детонационно-подобного процесса с постоянной скоростью.

**В шестой главе** приведены результаты по изучению ударноиндуцированных реакций и возможности детонации в смесях на основе фторопласта. Смеси Al и Mg с фторопластом-4 (Tf) существенно превосходят другие термитные смеси по энергетическому эффекту. Кроме того, анализ имеющихся данных позволял предполагать, что системы на основе смесей металл-фторопласт при ударном сжатии могут подвергаться достаточно быстрому химическому превращению со значительным энерговыделением, возможно также существование детонационно-подобных режимов, однако экспериментального подтверждения возможности стационарного процесса в этой системе до проведения данной работы получено не было. Особенности разложения фторопласта показывали, что наиболее вероятно получение такого режима в пористых смесях.

Эксперименты по измерению скоростей распространения ударноиндуцированных реакций в насыпных образцах МАЭК проводились в стальных, дюралюминиевых, медных или плексигласовых трубах различного диаметра (рис. 10). Для измерения скоростей использовались электроконтактные датчики, в ряде опытов в параллель с датчиками помещались световоды, внедренные в смесь. Свечение реагирующей смеси регистрировалось с помощью фотодиодов. Помимо измерений скоростей в некоторых опытах также измерялось давление в пластине-свидетеле.

Зафиксированный режим распространения реакции в пористых МАЭК Al/Tf и Mg/Tf имеет все признаки детонации. Он имеет сверхзвуковую скорость, которая не меняется в пределах ошибок измерения на длине заряда, превышающей 10 диаметров (скорость звука по ультразвуковым измерениям менее 100 м/с). Максимальный тепловой эффект в смеси Al/Tf достигается при весовом соотношении компонентов 26,5/73,5. С приближением к этому соотношению скорость детонации увеличивается, а длина участка выхода на стационар уменьшается. Для смесей 35/65, 30/70 и 25/75 скорость в стационарной области составляла 1050 м/с, 1110 м/с и 1280 м/с соответственно. На рис. 11 представлена зависимость скорости стационарной детонации

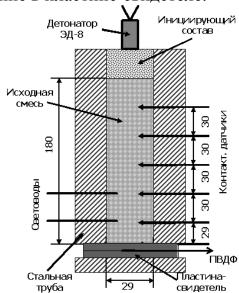
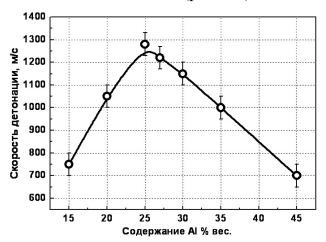
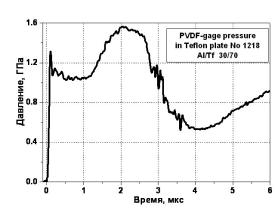


Рис. 10. Схема постановки экспериментов по измерению скорости детонации в МАЭК. Инициирование капсюлем-детонатором с промежуточным зарядом из смеси перхлората аммония с полиметилметакрилатом.

от содержания Al в смеси (плотность - 0,55 г/см<sup>3</sup>). Наибольшая скорость детонации соответствует максимально возможному для системы Al/Tf энерговыделению, отвечающему условию завершенности реакции в смеси стехиометрического состава. Этот факт свидетельствует о высокой степени взаимодействия компонентов MAЭК Al/Tf в зоне химической реакции детонационного комплекса. Продукты детонации создают в пластинах-свидетелях ударные волны с амплитудой 0,5-2,0 ГПа (в зависимости от состава смеси (рис. 12).



**Рис. 11.** Зависимость скорости детонации от содержания Al в MAЭК Al/Tf (доза активации 6 кДж/г).

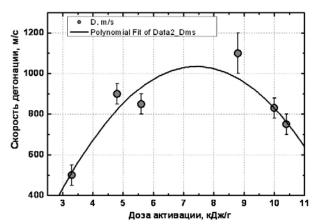


**Рис. 12.** Профиль давления в пластинесвидетеле из сплошного фторопласта после детонации Al/Tf 30/70.

Для выяснения влияния кислорода воздуха, находящегося в порах образца, был проведен опыт в условиях заполнения пор смеси Al/Tf гелием, который показал отсутствие влияния газовой среды на процесс.

В опытах с различными типами и диаметрами оболочек выявлено отсутствие их влияния. При диаметрах зарядов от 10 до 40 мм конечная скорость определяется только составом исходной смеси и дозой активации МАЭК.

Для МАЭК Mg/Tf получены максимальные скорости 1000-1100 м/с для смесей по весовому составу близких к стехиометрической смеси (32,5/67,5). В зависимости от дозы активации для МАЭК Mg/Tf одинакового состава происходит увеличение скорости, а затем - снижение. Оптимальная доза активации составляет 7-9 кДж/г. Результаты измерений скоростей при различных дозах активации



**Рис. 13.** Зависимость скорости детонации от дозы активации для MAЭК Mg/Tf 35/65

приведены на рис. 13. Данные по скоростям детонации согласуются с измерениями яркостной температуры в режиме взрывного горения. Механоактивация сначала приводит к увеличению реакционной способности, а затем, при превышении некоторой критической дозы, - к снижению. Наиболее вероятная причина снижения — образование продуктов частичного взаимодействия (фторида магния) уже при обработке. Однако рентгенофазовый анализ не показывает наличие таких продуктов, они могут образовываться в аморфной фазе. В то же время наличие этих продуктов может существенно влиять на протекание исследуемых процессов в образцах МАЭК.

Отпечатки на пластинах-свидетелях свидетельствуют, что механизм распространения взрывной реакции в этих смесях имеет струйный характер, в экспериментах удалось оценить средние скорости струй в режиме взрывного горения, которые превышают скорости детонации в соответствующих смесях.

Таким образом, в проведенных исследованиях была изучена возможность детонации в смесях алюминий-фторопласт и магний-фторопласт с образованием твердых конечных продуктов. Для низкоплотных смесей впервые получен детонационный режим с выходом на постоянную скорость с максимальными значениями 1100-1300 м/с. Скорость детонации значительно превышает скорость звука в пористых смесях и не зависит от газа в порах. Механизм распространения детонации имеет гетерогенный характер и развивается эстафетным способом за счет передачи реакции высокоскоростными потоками продуктов взрыва от одного очага к другому.

#### Основные результаты и выводы

Проведен комплекс экспериментальных исследований, включающий разработку новых лабораторных методов генерации ударных волн и диагностики состояния при ударном сжатии и получение новых экспериментальных данных по закономерностям физико-химических превращений конденсированных веществ в ударных и детонационных волнах.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения работы:

- 1. Разработаны новые лабораторные методы генерации и диагностики состояния конденсированных веществ при ударном сжатии, в том числе: взрывной трубчатый ускоритель для метания до скоростей более 8 км/с; усовершенствованы пирометрические методы диагностики (индикаторная и оконная методики), обоснована методика использования ПВДФ-датчиков для исследований процессов ударноволнового инициирования. Разработана методика исследования горения твердого ракетного топлива при ударно-волновом воздействии.
- 2. На основе разработанных методов получены новые данные по температуре и скоростям звука при ударном сжатии галогенпроизводных метана, получены доказательства протекания диссоциации четыреххлористого углерода и бромоформа при достижении определенных температур. Впервые определены ударные адиабаты и зависимости температуры и скорости звука от давления для ацетонитрила и растворов четыреххлористого углерода и гексана. При исследовании детонационных волн в смесях различных ВВ с алюминием обнаружено появление двухпиковой структуры профилей давления в смесях алюминия и октогена.
- 3. Проведен комплекс исследований по измерениям скоростей звука и затухания ударных волн в твердых веществах и смесях. Показано существенное увеличение эффективности ослабления амплитуды ударных волн при использовании веществ или смесей, претерпевающих полиморфные превращения или химические реакции с уменьшением удельного объема. Впервые обнаружено размывание ударных фронтов в смесях компонентов с сильно различающимися сжимаемостями.
- 4. Методами оптической пирометрии изучено ударно-волновое инициирование химических реакций в смесях металлов с окислителями. Выявлена определяющая роль эффективной поверхности контакта

реагентов при распространении детонационно-подобных процессов. Для повышения реакционной способности смесей разработан способ механохимической активации, позволяющий получать механоактивированные энергетические композиты (МАЭК), состоящие субмикронных слоев окислитель-горючее. Реакционная способность МАЭК значительно возрастает по сравнению с обычными смесями, что приводит к существенному увеличению скоростей распространения как детонационно-подобных ударно-волновых процессов, так и скоростей горения.

- 5. При изучении ударно-индуцированных химических реакций в смесях окислитель-горючее с твердыми конечными продуктами впервые получен детонационный режим в МАЭК алюминия и магния с фторопластом. Механизм распространения детонации в таких смесях имеет эстафетный характер за счет передачи реакции высокоскоростными потоками продуктов взрыва от одного очага к другому. Конечные продукты представляют собой твердые вещества, однако на промежуточных стадиях не исключено образование газообразных и жидких полупродуктов.
- 6. На основании результатов работы может быть сделан практически важный вывод механохимическая активация смесей окислительгорючее позволяет получать механоактивированные энергетические композиты, которые могут рассматриваться как новые энергетические материалы широкого круга применения.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору Игорю Михайловичу Воскобойникову, доктору физ.-мат. наук, Маршакову Владимиру Николаевичу, доктору хим. наук Стрелецкому Андрею Николаевичу, кандидатам физ.-мат. наук Гогуле Михаилу Федоровичу и Махову Михаилу Николаевичу за помощь в организации исследований и обсуждение результатов работы, а также научному сотруднику ИХФ РАН Колбаневу Игорю Владимировичу за проведение ряда экспериментов по механоактивации смесей.

#### Цитируемая литература:

- 1. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. *Физи-ка взрыва*. М.: Наука, 1975.
- 2. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. 446 с.
- 3. Гогуля М.Ф., Воскобойников И.М., Демченко Н.Г. Маховское взаимодействие детонационных волн в нитрометане // ФГВ. 1981. Т.17. № 1. С. 153-155.
- 4. Воскобойников И.М., Кирюшкин А.Н., Афанасенков А.Н., Воскобойникова Н.Ф. Два новых способа измерения динамических давлений. // Доклады I Всесоюзн. симпоз. по импульсным давлениям. М.: ВНИИФТРИ, 1974. Т.1. С. 42-49.
- 5. Дремин А.Н. *К теории детонации* // Химическая физика. 1995. Т. 14. №12. С. 22-40
- 6. Воскобойников И.М. *К превращению углеводородов за ударными фронтами* // Химическая физика. 1986. Т. 5. № 2. С. 697-701.

#### Основное содержание диссертации изложено в работах:

- 1. Воскобойников И.М., Гогуля М.Ф., Долгобородов А.Ю. *Детонация жидких ВВ в оболочках из более мощных составов* // Физика горения и взрыва. 1981. №5. С.133-135.
- 2. Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю., Гогуля М.Ф. *Передача динамических давлений через пористые образцы* // Физика горения и взрыва. 1982. №5. С.117-121.
- 3. Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю., Афанасенков А.Н. *Исследование затухания ударных волн малой длительности в конденсированных веществах* // Физика горения и взрыва. 1983. №5. С.135-138.
- 4. Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю. *Затухание ударных волн в гетерогенных средах* // Детонация и ударные волны. Черноголовка: ИХФ АН СССР. 1986. С. 9-13.
- 5. Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М. *Скорости волновых возмущений за фронтом ударной волны в алюминии* // Физика горения и взрыва. 1989. №1. С.88-93.
- 6. Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю. *Скорости звука и температуры на изоэнтропах ударно-сжатых ССІ* $_4$  *и СНВг* $_3$  // Детонация. Черноголовка: ОИХФ АН СССР. 1989. С.91-94.
- 7. Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М. *Ударное сжатие ацетонитрила* // Химическая физика. 1989. №6. С.1118-1123.
- 8. Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М., Толстов И.К. *О диссоциации гало-генпроизводных метана при ударном сжатии* // Химическая физика. 1991. №5. С.679-686.
- 9. Воскобойников И.М., Гогуля М.Ф., Долгобородов А.Ю., Дорохов Н.С., Бражников М.А. *Взаимодействие серы с металлами при ударном нагружении* // Химическая физика. 1991. №3. С.429-431.

- 10. Гогуля М.Ф., Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю., Дорохов Н.С., Бражников М.А *Взаимодействие серы и алюминия за ударными фронтами* // Химическая физика. 1992. №2. С.244-247.
- 11. Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М., Толстов И.К., Судариков А.В. *Особенности распространения ударных волн в смесях* // Физика горения и взрыва. 1992. №3. С.106-111.
- 12. Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М. *Скорости звука в ударно-сжатых корунде, карбиде бора и карбиде кремния* // Журнал технической физики. 1993. Т.63. вып.2. С.203-208.
- 13. Гогуля М.Ф., Долгобородов А.Ю. *Индикаторный метод исследования ударных и детонационных волн* // Химическая физика. 1994. №12. С. 118-127.
- 14. Долгобородов А.Ю. Взрывной трубчатый ускоритель для высокоскоростного метания // Химическая физика. 1995. Т.14. №1. С. 27-32.
- 15. Долгобородов А.Ю., Колдунов С.А., Набатов С.С. *Применение ПВДФ-датчиков для исследования ударно-волнового инициирования ВВ* // Химическая физика. 1995. Т.14. №4. С. 161-164.
- 16. Dolgoborodov A.Yu. *On propagation of shock waves in liquid solution and mixtures of different solids* // 4<sup>e</sup> Symposium International Hautes Pressions Dynamiques (IV-HDP), (5–9 juin 1995 Tours, France) 1995. P. 11-16.
- 17. Долгобородов А.Ю. *Взрывной трубчатый ускоритель*: Патент РФ RU №2072501 // Б.И. 1997. №3.
- 18. Гогуля М.Ф., Бражников М.А., Долгобородов А.Ю., Душенок С.А. *Исследование инициирования жидких взрывчатых веществ методом оптической пирометрии* // Химическая физика. 1998. Т.17. №12. С. 62-68.
- 19. Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A., Baudin G. *Detonation Waves in HMX/Al mixtures (Pressure and Temperature Measurements) //* Eleventh International Detonation Symposium. Snowmass, Colorado. ONR 33300-5. 1998. P. 979-988.
- 20. Гогуля М.Ф., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А. *Тонкая структура детонационных волн в смесях октогена с алюминием* // Химическая физика. 1998. Т.17. №1. С. 41-44.
- 21. Долгобородов А.Ю. Затухание ударных волн в смеси окиси алюминия и плексигласа // Химическая физика. 1998. Т.17. №5. С. 102-108.
- 22. Долгобородов А.Ю. Ударное сжатие растворов четыреххлористого углерода и гексана // Химическая физика. 1998. Т.17. №12. С. 49-57.
- 23. Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A. *Investigation of Shock and Detonation Waves by Optical Pyrometry* // Int. Journal of Impact Engineering. 1999. V.23. №1. P. 283-293.
- 24. Гогуля М.Ф., Бражников М.А. Долгобородов А.Ю. *Особенности детонации прессованных зарядов октогена* // Физика горения и взрыва. 2000. Т.36. №4. С.83-86.
- 25. Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A., Dushenok S.A. *Shock Wave Initiation of Liquid Explosives //* Shock Compression of Condensed Matter –

- 1999 / Eds. M.D. Furnish, L.C. Chhabildas, and D.S. Hixon. AIP Conf. Proc. V.505. P. 903-906.
- 26. Dolgoborodov A.Yu., Marshakov V.N. *Investigation of Shock Wave Impulse Influence on Solid Propellant Combustion* // Shock Compression of Condensed Matter 2001 / Eds. M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie. AIP Conf. Proc. V.620. P. 868-871.
- 27. Gogulya M.F., Brazhnikov M.A., Dolgoborodov A.Yu., Makhov M.N., Arkhipov V.I. *Aluminised Explosive Composition Based on NQ and BTNEN //* Shock Compression of Condensed Matter 2001 / Eds. M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie. AIP Conf. Proc. V.620. P. 962-965.
- 28. Dolgoborodov A.Yu., Gogulya M.F., Brazhnikov M.A., Makhov M.N., and Fortov V.E. *Detonation-Like Phenomena in Al/S Mixture //* Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar / Ed. F.J.Schelling. Westminster: IPS USA. 2002. P. 557-563.
- 29. Gogulya M.F., Makhov M.N., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A., Shchetinin V.G. *Detonation Performance of Aluminized Compositions Based on BTNEN //* Twelfth International Detonation Symposium, San Diego. ONR 333-05-2. 2002. P. 249-255.
- 30. Долгобородов А.Ю., Маршаков В.Н., Ананьев А.В., Мелик-Гайказов Г.В., Гафаров Б.Р., Милехин Ю.М. *Горение твердого топлива при ударно-волновом воздействии*. // Химическая физика. 2002. Т.21. №8. С. 58-61.
- 31. Долгобородов А.Ю. *Исследования ударного сжатия и детонации конденсированных веществ пирометрическими методами* // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. / Под. ред. А.Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. С. 300–306.
- 32. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Гогуля М.Ф., Стрелецкий А.Н., Колбанев И.В., Фортов В.Е. *Влияние механической активации на детонационную способность смесей окислитель-горючее* // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях / Под ред. А.Л. Михайлова, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. С. 273-278.
- 33. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Колбанев И.В., Стрелецкий А.Н. *Состав пиротехнический механоактивированный*: Патент РФ RU №2235085 // Б.И. 2004. №24.
- 34. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Стрелецкий А.Н., Колбанёв И.В., Гогуля М.Ф., Фортов В.Е. *О возможности детонации в механоактивированном композите алюминий-фторопласт* // Химическая физика. 2004. Т.23. №9. С. 85–88.
- 35. Гогуля М.Ф., Махов М.Н., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А., Архипов В.И., Щетинин В.Г. *Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ* // Физика горения и взрыва. 2004. Т.40. №4. С. 82-95.
- 36. Махов М.Н., Гогуля 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.

- 37. Dolgoborodov A.Yu., Makhov M.N., Streletskii A.N., Kolbanev I.V., Gogulya M.F., Brazhnikov M.A., Fortov V.E. *Detonation-Like Phenomena in Non-Explosive Oxidizer-Metal Mixtures* // Thirty-First Intern. Pyrotechnics Seminar / Ed. F.J. Schelling. Fort Collins: IPS USA. 2004. P. 569-573.
- 38. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Колбанев И.В., Стрелецкий А.Н., Фортов В.Е. *Детонация в смеси алюминий-фторопласт* // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т.81. Вып. 7. С. 395-398.
- 39. Долгобородов А.Ю., Колбанев И.В., Махов М.Н., Стрелецкий А.Н., Фортов В.Е. *Детонация в механоактивированном композите алюминий-фторопласт* // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. / Под. ред. А.Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. С. 43–48.
- 40. Gogulya M.F., Makhov M.N., Dolgoborodov A.Y., Brazhnikov M.A., Leipunsky I.O., Jigatch A.N., Kuskov M.L., Laritchev M.N. *Aluminised Nanocomposites Based on HMX* // Energetic Materials. Performance and Safety. 36-th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar. Karlsruhe: ICT. 2005. P.65 (1-11).
- 41. Dolgoborodov A.Yu., Kolbanev I.V., Makhov M.N., Streletskii A.N., Fortov V.E. *Detonation of Teflon-Based Mechanoactivated Energetic Composites* // Thirty-Third International Pyrotechnics Seminar / Ed. F.J. Schelling. Fort Collins: IPS USA. 2006. P. 535-540.
- 42. Гогуля М.Ф., Махов М.Н., Бражников М.А., Долгобородов А.Ю. *Скорость детонации композиции БТНЭН/АІ* // Физика горения и взрыва. 2006. Т.42. №4. С. 125-130.
- 43. Dolgoborodov A.Y., Makhov M.N., Kolbanev I.V., Streletskii A.N., Fortov V.E. *Detonation in Metal-Teflon Mechanoactivated Composites* // Thirteenth International Detonation Symposium, Norfolk. ONR 351-07-01. 2006. P. 137-144.
- 44. Gogulya M.F., Makhov M.N., Brazhnikov M.A., Dolgoborodov A.Yu., Arkhipov V.I., Jigatch A.N., Leipunsky I.O. *Explosive Performance of Aluminized HMX-based Nano-Composites* // Europyro 2007 34-th IPS. Proceedings. GTPS. Beaune: IPS. AFP. France. 2007. Vol.1. P. 51-65.
- 45. Долгобородов А.Ю., Стрелецкий А.Н., Махов М.Н., Колбанёв И.В., Фортов В.Е. *Взрывчатые составы на основе механоактивированных смесей металлокислитель* // Химическая физика. 2007. Т.25. № 12. С.40-45.
- 46. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Бражников М.А., Гогуля М.Ф., Стрелецкий А.Н., Колбанев И.В. *Взрывчатые составы на основе смесей тефлон металл* // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. / Под. ред. А.Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007. С. 111-115.
- 47. Гогуля М.Ф., Махов М.Н., Бражников М.А., Долгобородов А.Ю., Архипов В.И., Жигач А.Н., Лейпунский И.О., Кусков М.Л. *Взрывчатые характеристики алюминизированных нанокомпозитов на основе октогена* // Физика горения и взрыва. 2008. Т.44. №2. С. 85-100.
- 48. Dolgoborodov A.Yu., Streletskii A. N., Kolbanev I. V., Makhov M. N. *Influence of Particle Sizes on the Properties of Mechanoactivated Al/MoO*<sub>3</sub> *Thermite Mixtures //* Thirty-Fifth International Pyrotechnics Seminar / Ed. F.J. Schelling. Fort Collins: IPS USA. 2008. P. 169-173.