

На правах рукописи

Кратова Юлия Владимировна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ
И ДЕТОНАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗОВЗВЕСЕЙ В КАНАЛАХ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2009

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор Федоров Александр Владимирович

кандидат физико-математических наук,
с.н.с. Хмель Татьяна Алексеевна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Прохоров Евгений Степанович

доктор технических наук,
профессор Рычков Александр Дмитриевич

Ведущая организация:

Кафедра волновой и газовой динамики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Защита состоится «30» октября 2009 г. в «10» часов на заседании диссертационного совета Д003.035.02 по присуждению ученой степени кандидата наук в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1)

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

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 630090, Новосибирск-90, ул. Институтская 4/1, ИТПМ СО РАН, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» сентября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

Засыпкин И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В связи с широкой распространенностью пылевзвесей реакционноспособных частиц в природе и технике (например, частиц алюминия, магния, угля и др.) возникают проблемы, связанные с их воспламенением, горением, распространением ударных и детонационных волн и возможностью взрыва при каком-либо силовом воздействии. Поэтому актуальными становятся как вопросы предотвращения взрывных и детонационных явлений, так и перспективы использования этих явлений в технических устройствах, что предполагает управление процессами и предсказание развития течений.

Особую опасность представляют скопления и распылы мелкодисперсной органической или металлической пыли в ограниченных объемах (помещениях, вентиляционных шахтах, закрытых транспортерах). Ударная волна или иной источник воспламенения могут привести к возникновению гетерогенной детонации, ее усилению из-за многократных отражений волн от стенок. Предотвращение подобных явлений требует изучения поведения ударных и детонационных волн в объемах сложной геометрии. Другая область применения задачи распространения ударных и детонационных волн в ограниченных объемах связана с актуальной проблемой разработки двигателей, основанных на использовании явления детонации. Камера сгорания может представлять каналы различной геометрии, например, канал с резким или плавным расширением, с профилированным соплом и т.п.

Наряду с лабораторными физическими исследованиями детонационных процессов (быстропротекающих и высокотемпературных) одним из основных инструментов исследования является также и численное моделирование в рамках верифицированных физико-математических моделей механики гетерогенных сред.

Настоящее исследование проводится на основе модели детонации взвеси частиц алюминия в кислороде. Существование гетерогенной детонации в газозвесах алюминия установлено экспериментально (Strauss W. A., Tulis A.J., Veysierre B., Zhang F.) и исследовалось теоретически в работах Федорова А.В., Фомина В.М., Медведева А.Е., Хмель Т.А., Левина В.А., Борисова А.А., Хасинова Б.А., Veysierre B., Zhang F., Gronig H., Hayashi A. K. и др. В данной работе взята за основу модель Федорова А.В., Медведева А.Е., Фомина В.М. и др., верифицированная по экспериментальным данным Strauss W. A. по зависимости скорости детонации смеси от содержания частиц и согласованная в работах Федорова А.В., Хмель Т.А. по ряду параметров с известными экспериментальными и расчетными данными других авторов.

Исследования двумерных нестационарных течений в реагирующих газозвзвесах проводились также в работах Рычкова А.Д., Кутушева А.Г., Ждан С.А., Прохорова Е.С. и др. Один из механизмов, способствующих распространению детонации в пространстве, связан с поперечными волнами ячеистой детонации. Возможность ячеистой детонации в газозвзвесах частиц алюминия установлена экспериментально в работах Veysierre B., Zhang F. и методами численного моделирования (Федоров А.В., Хмель Т.А., Veysierre B., Хасаинов Б.А., Ingnoli W., Hayashi A. K., Zhang F.).

Список публикаций по анализу двумерных течений газозвзвесей невелик. Исследования, касающиеся поведения волн детонации в ограниченных объемах и каналах сложной геометрии, находятся в зачаточном состоянии. Течения газозвзвесей в каналах могут значительно отличаться от аналогичных течений в незапыленном газе в силу неравновесности смеси, обусловленной процессами тепловой, скоростной и химической релаксации фаз. Картина течения в смесях газ – частицы характеризуется влиянием процессов, масштабы которых определяются размером частиц. Это вносит дополнительный геометрический масштаб в картину течения, что влияет на его развитие в ограниченных пространствах. С этой точки зрения анализ ударно-волновых и детонационных течений в таких средах, помимо практического, представляет и фундаментальный теоретический интерес.

Цели диссертационной работы

Основным направлением работы является исследование ударно-волновых течений реагирующих и инертных смесей типа газ – частицы в областях комбинированной геометрии на основе модифицированного численного метода расчета волновой динамики газозвзвесей. Цели работы включают определение типов:

- отражения наклонной ударной волны в неравновесной газозвзеси от твердой подложки;
- течения и условия распространения плоской и ячеистой гетерогенной детонации в каналах с разрывом сечения.

Научная новизна

- Получено аналитическое решение задачи об отражении наклонной ударной волны от плоскости в гетерогенной смеси газ – твердые частицы с учетом объема частиц. Данные расчетов подтверждены результатами численных экспериментов в рамках двумерной нестационарной модели течения газозвзеси. Установлены границы применимости равновесного подхода для определения кривых перехода от регулярного к нерегулярному отражению наклонной ударной волны (УВ) в газозвзесах частиц.

- Выявлен и объяснен механизм формирования ρ -слоя и зоны, свободной от частиц, в процессе дифракции ударных волн на обратном уступе в газовзвесах.
- Установлено три режима распространения при дифракции детонационной волны на обратном уступе в газовзвесах. Построена карта режимов в плоскости параметров: диаметр частиц – ширина выходного канала.
- Численно исследована задача распространения плоской детонации в газовзвесах в канале с разрывом сечения. Выявлены особенности течения, и установлено влияние диаметра частиц на реиницирование.
- Метод численного моделирования двумерных течений газовзвесей адаптирован для расчетов в областях комбинированной геометрии.

Практическая ценность работы

Практическая значимость результатов исследований связана с возможностью их применения для:

- оценки взрывопожаробезопасности пылевзвесей;
- проектирования производственных помещений и технологических устройств, основанных на использовании рабочих тел типа газовзвесей;
- прогнозирования последствий катастрофических взрывов.

На защиту выносятся

- Математическая модель воспламенения частицы алюминия, справедливая в широком диапазоне параметров, используемая для обоснования критерия воспламенения частиц за детонационными волнами.
- Аналитическое решение задачи об отражении наклонной УВ в газовзвеси с учетом объема, занятого частицами (кривые перехода в плоскости: число Маха и угол наклона падающей УВ); границы применимости равновесного подхода для решения задачи отражения УВ в смеси от подложки (диаметр частиц $1 \leq d \leq 10$ мкм, число Маха УВ $M < 2.5$).
- Результаты анализа расчетных данных в проблеме о взаимодействии проходящей ударной волны и слоя газовзвеси с учетом неравновесности: влияние дисперсности на начальный этап формирования вихря, развитие неустойчивости в неоднородных слоях.
- Картины и особенности течения при дифракции ударной волны на обратном уступе в газовзвеси: наличие ρ -слоя и зоны смеси, свободной от частиц.
- Картины течения при распространении гетерогенной детонации в каналах с разрывом сечения, влияние размера частиц на реиницирование, развитие неустойчивости типа Рихтмайера – Мешкова, переход к ячеистой детонации.
- Карта режимов распространения детонации в смеси частиц алюминия и кислорода при дифракции на обратном уступе.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- использованием подходов и верифицированных физико-математических моделей механики гетерогенных сред;
- тестированием применяемых численных технологий, проверкой сходимости решений на последовательности сгущающихся сеток;
- получением предельных переходов в используемых математических моделях к моделям, для которых решения известны или получены другими способами;
- сопоставлением результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были представлены, обсуждались и получили положительную оценку на семинарах ИТПМ СО РАН (Новосибирск, руководитель академик РАН Фомин В.М.) и на следующих конференциях и семинарах: IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006); Международной конференции по методам аэрофизических исследований ISMAR (Новосибирск, 2007, 2008); XVI Всероссийской конференции «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов и решение задач математической физики с приложением к многопроцессорным системам», посвященная памяти К.И. Бабенко (Абрау-Дюрсо, 2006); XXI Всероссийском семинаре «Струйные, отрывные и нестационарные течения» (Новосибирск, 2007); Молодежной конференции «Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей» (Новосибирск, 2008); XV Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, Украина, 2007); Международной конференции «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2007); Всероссийской школе-семинаре «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», ИПМех РАН (Москва, 2007, 2008); XXXIII Дальневосточной математической школе-семинаре им. Е.В. Золотова, (Владивосток, 2008); 7 Международном симпозиуме по проблемам предотвращения и подавления промышленных взрывов ISHPMIE (Санкт-Петербург, 2008); Международном коллоквиуме по динамике взрывов и реагирующих систем ICDERS (Пуатье, Франция, 2007; Минск, Белоруссия, 2009).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в изданиях, рекомендуемых ВАК, 5. Основные результаты представлены в статьях, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

При выполнении работ по теме диссертации диссертант принимал активное участие в постановке задач и обсуждении результатов, представлении докладов на конференциях. Основные результаты диссертации получены автором, им произведены расчеты для всех рассмотренных в работе задач. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографических списков к каждой главе, включающих в общем 116 наименований. Работа изложена на 154 листах машинописного текста, содержит 44 рисунка и одну таблицу. Библиографические ссылки нумеруются по главам.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отмечается актуальность исследуемых проблем, дано описание существующих на данный момент представлений о некоторых механизмах гетерогенной детонации, особенностях численного моделирования задач механики многофазных сред. Обосновывается выбор физико-математических моделей, в частности модели гетерогенной детонации взвеси частиц алюминия, и эффективных методов расчета двумерных ударно-волновых течений в газовзвесах.

В **первой главе** изложены математические модели и методы, используемые для достижения поставленных в настоящей работе целей; приводится описание численной технологии моделирования ударно-волновых и детонационных течений газовзвесей.

В общем случае использовалась модель неравновесного (по температурам и скоростям) приближения механики гетерогенных сред. В некоторых случаях для оценки влияния неравновесных процессов на волновую структуру течения привлекались и модели равновесной газовзвеси.

В **§1 Главы 1** приведены системы уравнений для описания двумерных течений газовзвесей частиц в рамках равновесного и неравновесного подходов, а также замыкающие соотношения для сил межфазного взаимодействия и уравнений состояния двух типов (с учетом и без учета объемной доли частиц в смеси). Приведена полуэмпирическая физико-математическая модель детонации стехиометрической взвеси частиц алюминия в кислороде, основанная на приведенной кинетике горения частицы и феноменологическом температурном критерии воспламенения. Принятая модель развита в работах Фомина В.М., Федорова А.В., Медведева А.Е., Хмель Т.А. и обеспечивает согласование расчетных результатов известным экспериментальным данным по скорости детонации, величине давления в точке Чепмена – Жуге, времени горения частиц алюминия и ряду других параметров.

В §2 на основе математической модели воспламенения одиночной частицы алюминия проведен анализ тепловой истории частицы и обоснован выбор критерия воспламенения в задачах распространения гетерогенной детонации. Рассмотрено уравнение кинетики окисления алюминия типа Аррениуса, в котором предэкспоненциальный множитель представляется как нелинейная функция температуры окружающей среды и радиуса частицы. Определены константы модели, обеспечивающие согласование расчетных результатов и одновременно нескольких групп экспериментальных данных. Дано обоснование используемого в последующих главах критерия воспламенения алюминия в динамических условиях.

В §3 кратко описаны известные численные технологии решения исследуемых задач механики гетерогенных сред. Обосновывается выбор схем для расчетов многомерных ударно-волновых течений реагирующих двухфазных сред типа газ – частицы: схемы SIP для равновесной газозвеси, схемы Джендри – Мартина – Дэйли с разностями против потока для дискретной фазы и схемы TVD для газа в неравновесном приближении. Для преодоления проблем численной реализации двумерной схемы TVD в объеме комбинированной геометрии предложена процедура, имеющая сходство с методом фиктивных областей. Методика заключается в проведении расчета в некоторой охватывающей области (канале максимальной ширины) с переустановкой граничных условий согласно положению границ на каждом временном шаге. Изложены результаты тестовых расчетов на последовательности измельчающихся сеток, подтверждающие сходимость метода.

Вторая глава посвящена проблеме взаимодействия УВ со слоем газозвеси, расположенным на твердой подложке: исследуется влияние частиц на характер отражения УВ внутри слоя и на волновую картину течения газозвеси в целом в рамках неравновесного по скоростям и температурам приближения.

В §1 анализируется картина течения внутри пылевого слоя при стационарном распространении УВ, то есть отражение наклонной ударной волны от твердой подложки в газозвеси. В равновесном приближении (предельном случае неравновесного течения при нулевых временах релаксации) получены кривые перехода от регулярного к нерегулярному отражению УВ в смеси газа и частиц пыли, обобщающие известные критерии отражения в газовых средах. Установлено влияние массовой загрузки и объемного содержания частиц на тип отражения УВ (регулярное или маховское), который для газовых смесей связывается с углом падения ударной волны и числом Маха набегающего потока.

Показано, что влияние частиц на волновую картину и переход от регулярного типа отражения к нерегулярному имеет место как за счет изменения пока-

зателя адиабаты смеси (при изменении массовой загрузки), так и за счет изменения объема, занятого частицами, в общем объеме смеси.

В §2 второй главы на основе численного моделирования распространения УВ вдоль слоя пыли в плоском канале в рамках равновесной и неравновесной моделей механики гетерогенных сред определено влияние размера частиц (определяющего процессы скоростной и температурной неравновесности фаз), а также толщины слоя на волновую картину, параметры течения и характер отражения. Проводится сопоставление ударно-волновых структур, реализуемых в численных расчетах, с полученными аналитически критериями отражения в плоскости: число Маха – смежный угол падения θ УВ (рис. 1). Определены границы применимости равновесной модели (расчетные данные согласуются с «равновесной» кривой только при значениях числа $M < 2.5$). Установлено существенное влияние процессов релаксации на характер отражения УВ в слое газозвеси.

Проанализировано влияние формы переднего края и поперечной неоднородности пылевого слоя на смесеобразование. Установлено, что наличие поперечной неоднородности пылевого слоя способствует развитию неустойчивости на границе слоя и газа. При увеличении концентрации частиц к границе слоя имеет место значительный рост высоты подъема пыли.

Результаты расчетов по неравновесной модели, касающиеся влияния формы облака на высоту подъема пыли, обобщают известные результаты других авторов (Федоров А.В., Федорова Н.Н., Федорченко И.А., Фомин В.М.), полученные в рамках равновесной модели.

В третьей главе исследовалась задача о выходе ударной волны в газозвеси за обратный прямоугольный уступ. Численный расчет проводился в рамках неравновесной модели механики гетерогенных сред, при этом анализировалось влияние процессов релаксации фаз на волновую картину.

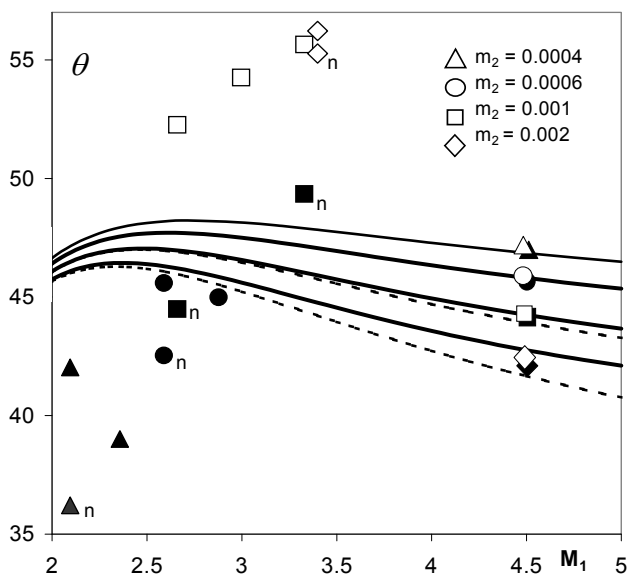


Рис. 1. Отражение УВ в газозвеси.

Линии – аналитические кривые перехода (сплошные – без учета объемной доли частиц, штриховые – с учетом); значки – расчетные данные (незаполненные – регулярное отражение, черные – нерегулярное).

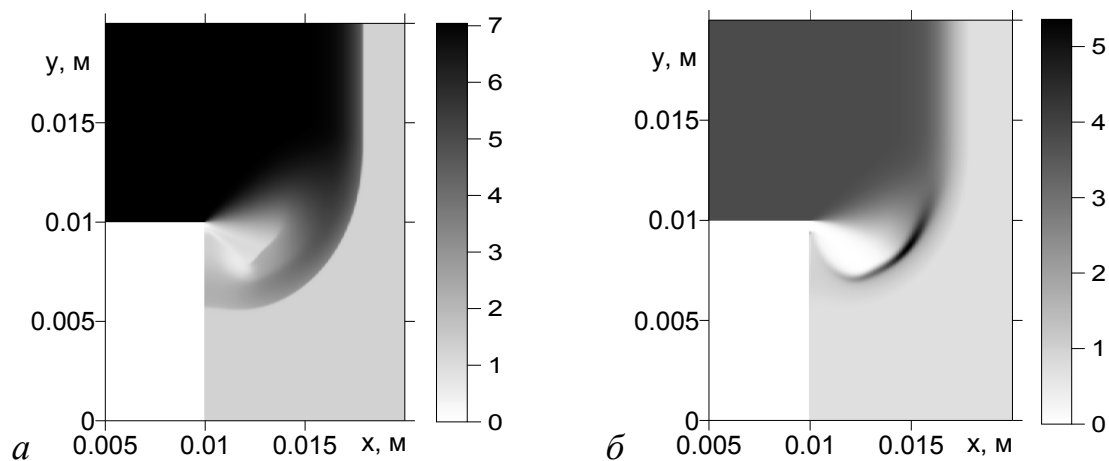


Рис. 2. Дифракция ударной волны на обратном уступе в газозвеси с частицами размером 1 мкм.

a – поле плотности газа, b – частиц; $M = 3$, $t = 16$ мкс.

Сравнением полученных данных для смеси и чистого газа установлено, что в целом волновые картины течения подобны и содержат те же элементы структуры: вихрь, вторичный скачок и волну разрежения (рис. 2, a). Однако присутствие частиц существенно влияет на форму и размеры структур течения и обуславливает появление дополнительных феноменов. В частности, за уступом образуется зона разрежения, практически свободная от частиц (средняя плотность частиц меньше 0.05 кг/м^3) и слой повышенной плотности частиц, примыкающий к контактной поверхности (средняя плотность частиц достигает значения 5.36 кг/м^3) (рис. 2, b).

Дано физическое объяснение этому эффекту сепарации частиц, которое основано на инерционных свойствах частиц в потоке с резкими изменениями параметров несущего газа. Обсуждается отличие наблюдаемого ρ -слоя (который формируется вблизи контактного разрыва) от известных из литературы ρ -слоев (Коробейников В.П., Марков В.В. и др.), образующихся при распространении ударных и детонационных волн.

Варьированием параметров смеси и УВ определено влияние интенсивности УВ, массовой загрузки смеси частицами и их размера на характеристики течения в газозвеси. Показано, что наиболее выраженное отличие картин течения пылевзвесей от газовых смесей имеет место в интервале времен, когда характерные размеры образующихся структур сопоставимы с масштабами зон релаксации

В главе 4 исследуется процесс дифракции плоской детонационной волны в однородной стехиометрической взвеси мелких частиц алюминия в кислороде на обратном уступе плоского канала. Ранее в газовых смесях экспериментально

и теоретически найдены три режима распространения детонации за уступом, которые классифицируются как докритический, критический и закритический. Переход от одного режима к другому в одной и той же газовой смеси зависит от геометрических параметров канала. В настоящей главе для тестирования метода расчета проводится сравнение полученных для газозвеси численных результатов с расчетными картинами детонации газовых смесей, представленными в работе Arienti M., Shepherd J.E. При этом получено удовлетворительное согласование. В общем случае анализируется влияние размера частиц, обуславливающего масштабы зон скоростной, тепловой и химической релаксации, а также геометрических параметров канала на волновую картину и режимы распространения.

Представлены результаты расчетов для частиц диаметром от 1 до 3.5 мкм и значений ширины канала H_1 от 0.01 м до 0.15 м. Показано, что и в газозвесьях можно выделить три режима распространения детонации: с полным срывом, с частичным срывом и с непрерывным распространением детонации за уступом.

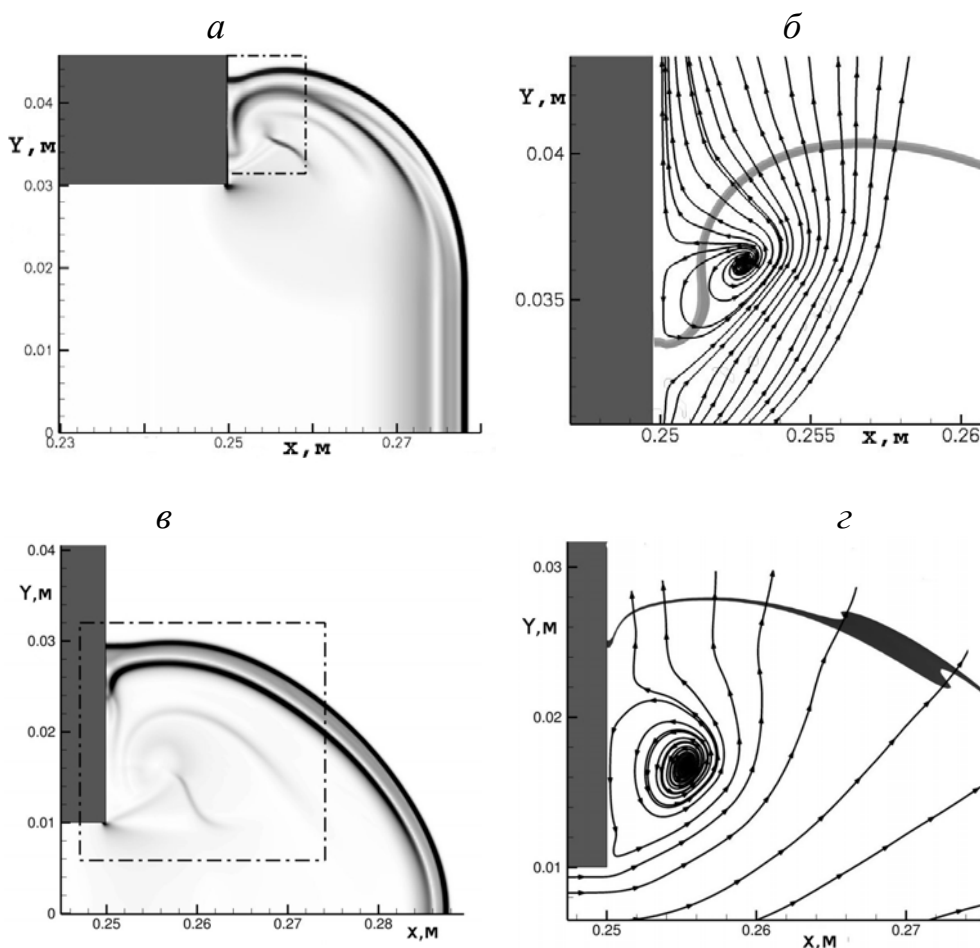


Рис. 3. Влияние вихря на форму фронта горения.

$d = 3.5$ мкм, $H_1 = 0.03$ м, $t = 0.14$ мс (*а*, *б*); $d = 2$ мкм, $H_1 = 0.01$ м, $t = 0.14$ мс (*в*, *з*);
а, *в* – численные шпирен-картины; *б*, *з* – линии тока и фронт горения.

Установлены существенные отличия волновой картины в докритических режимах от аналогичных детонационных течений в газах, определяемые влиянием процессов релаксации фаз. Показано, что в зависимости от размера частиц могут значительно различаться форма фронта и структуры течения в пристенной области. Различные конфигурации фронта горения в области за уступом обусловлены взаимодействием релаксационных зон и формирующегося вихря. В смеси крупных частиц обширная зона между фронтом лидирующей УВ и фронтом горения частично перекрывается с областью, занятой вихрем. Это приводит к изгибу фронта горения и развороту его пристенного участка в сторону угла расширения (рис. 3, *a, б*). При уменьшении размера частиц вихревая зона и комплекс лидирующей УВ с примыкающей зоной релаксации и горения в пристенной области развиваются отдельно, в результате чего фронт горения не попадает под влияние вихря и упирается в стенку (рис. 3, *в, г*). Данный результат представляет практический интерес, поскольку форма фронта горения оказывает влияние на температуру потока в пристеночной области и нагрев стенки.

Также выявлены такие особенности течения газозвесей (общие с газовыми смесями) как: развитие поперечных волн на всей протяженности фронта при распространении детонационных волн в закритическом режиме; восстановление детонации после временного

разделения фронта на два участка в результате формирования на границе участков поперечной волны и ее отражения от боковой стенки.

Из анализа данных многочисленных расчетов получена карта режимов распространения детонации при дифракции на обратном прямоугольном уступе в плоскости параметров: ширина выходного канала – размер частиц (рис. 4). Установлено, что переход от одного режима к другому в газозвеси определяется как геометрией выходного канала, так и размером частиц.

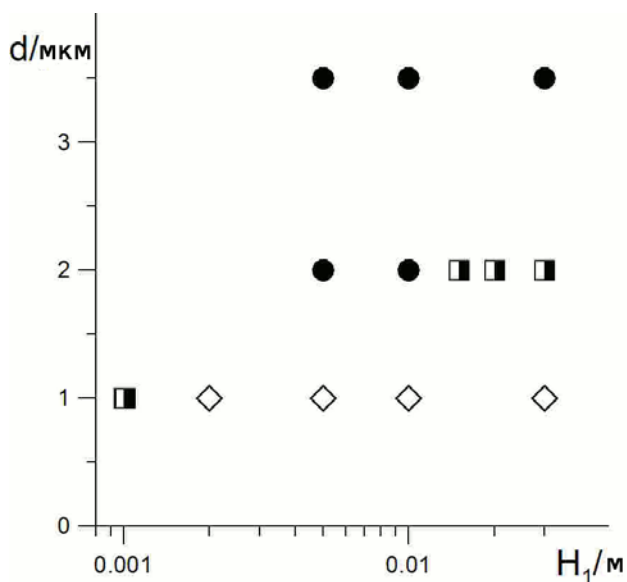


Рис.4. Карта режимов распространения детонации при дифракции на обратном уступе.

Незаполненные символы обозначают закритический режим, наполовину заполненные – критический, заполненные – докритический.

В пятой главе рассматривается задача о распространении детонации в газовзвесьях в плоских каналах с разрывом сечения.

Исследованы режимы перехода детонации из узкой части канала в широкую часть при варьировании геометрических параметров канала и размеров частиц. Найдены возможные варианты развития течения после отражения дифрагированной волны от стенки широкой части канала в различных режимах, описанных в четвертой главе.

Показано, что в закритическом и критическом режимах присутствие стенки широкой части канала не приводит к смене режима, но влияет на период формирования регулярной ячеистой структуры.

В докритическом режиме развитие течения определяется местоположением стенки широкой части канала.

При значительном расстоянии между ударной волной и фронтом горения в момент отражения дифрагированной волны от стенки воспламенения частиц в пристеночной области не происходит, детонация не развивается (рис. 5). При этом отраженная УВ индуцирует развитие неустойчивости типа Рихтмайера – Мешкова вдоль всей линии фронта горения.

Восстановление детонации под воздействием отраженной волны (рис. 6) возможно при уменьшении размера широкой части канала H_2 (как и в газовых смесях). После восстановления детонации формирование вторичной поперечной волны, а затем и развитие ячеистой детонации аналогично случаям закритических и критических режимов.

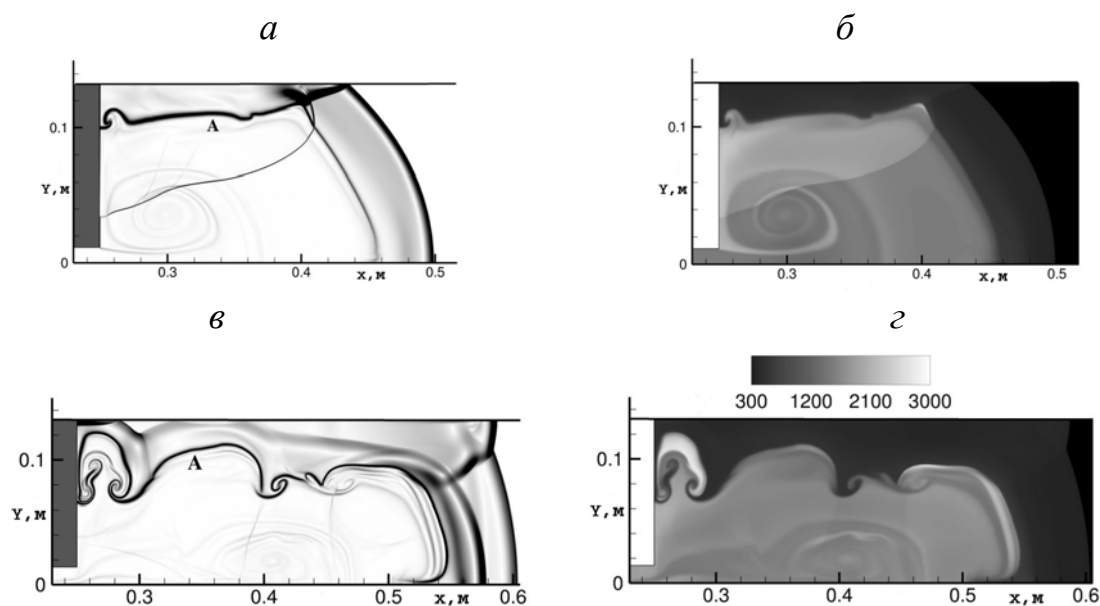


Рис. 5. Затухание детонации в докритическом режиме при $H_2 = 0.132$ м.
 $t = 0.42$ мс (*a*, *б*), 0.7 мс (*в*, *з*); *a*, *в* – численные шлирен-картины, *б*, *з* – поля температуры газа.

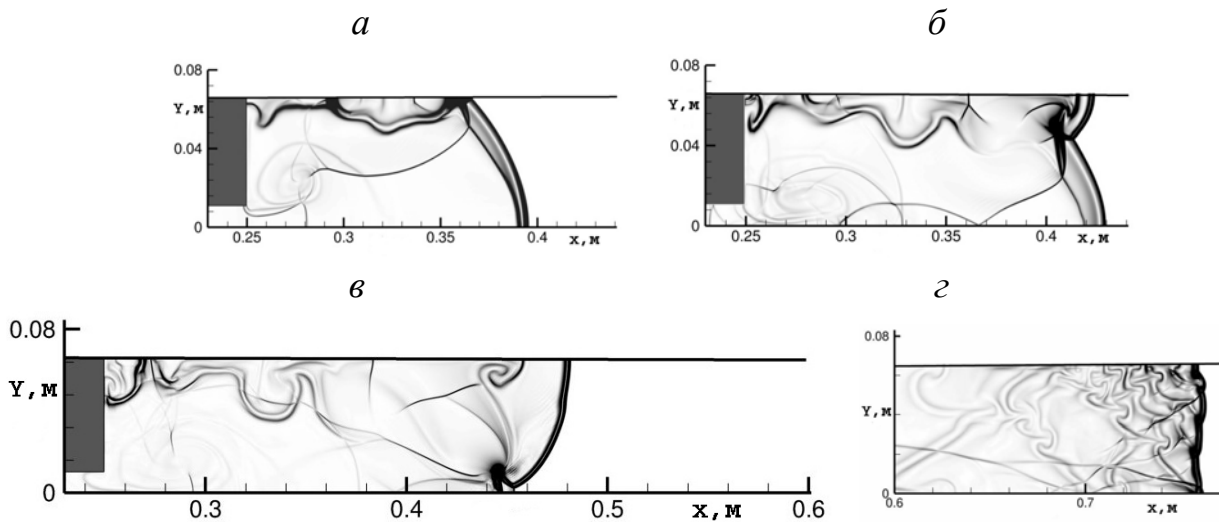


Рис. 6. Восстановление детонационного процесса при докритическом режиме.
 $H_2 = 0.066$ м, $t = 0.24$ (а), 0.28 (б), 0.32 (в), 0.5 мс (г).

Сформированные за разрывом сечения ячеистые структуры детонации сравнивались со структурами, которые получены при численном моделировании в плоских каналах из развития малых возмущений на фронте плоской детонации (Федоров А.В., Хмель Т.А.). Во всех рассмотренных режимах размер ячейки в каналах с разрывом сечения несколько превышает размер ячейки при формировании в соответствующем плоском канале. Выдвинута гипотеза об определяющем влиянии сильной поперечной волны, образующейся при отражении дифрагированной волны от стенки широкой части канала, на структуру течения за фронтом детонации и расстояние между формирующимися вторичными поперечными волнами.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Выводы

- На основе методов механики гетерогенных сред получено аналитическое решение задачи об отражении наклонной ударной волны от плоскости в гетерогенной смеси газ – твердые частицы с учетом объема частиц. На его основе определены кривые перехода от регулярного к нерегулярному типу отражения, справедливость которых подтверждена результатами численных расчетов в рамках двумерной нестационарной модели течения газозвеси. Путем расчетов установлено, что границы применимости равновесного подхода для определения кривых перехода находятся в диапазоне параметров: диаметр частиц $1 \leq d \leq 10$ мкм, число Маха УВ $M < 2.5$.

- Численно исследованы процессы дифракции ударных волн на обратном уступе в газозвесах. Выявлены и объяснены механизмы формирования за обратным уступом ρ -слоя и зоны, свободной от частиц. Установлено критическое значение массовой загрузки частиц, равное 0.1, выше которой в смеси необходимо принимать во внимание наличие частиц.
- Установлено, что при дифракции детонационной волны на обратном уступе в газозвесах можно выделить три режима распространения. Смена режима определяется как геометрией канала, так и размером частиц. Построена карта режимов в плоскости параметров: диаметр частиц – ширина выходного канала. Установлена возможность реализации двух различных конфигураций фронта горения за уступом.
- Численно исследована задача распространения плоской детонации в газозвесах в канале с разрывом сечения. Выявлены такие особенности течения как: развитие неустойчивости типа Рихтмайера – Мешкова, формирование системы поперечных волн, переход к ячеистой детонации. Установлено влияние диаметра частиц на реиницирование детонации в отраженной ударной волне.
- В рамках физико-математической модели механики реагирующих / инертных гетерогенных сред метод численного моделирования двумерных нестационарных течений газозвесей адаптирован для расчетов в областях комбинированной геометрии.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Федоров А.В., Харламова¹ Ю.В. Воспламенение частицы алюминия // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 5. С. 65–68.
2. Харламова Ю.В. Об отражении ударной волны, скользящей вдоль облака пыли // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов, Т. 2. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. С. 179.
3. Федоров А.В., Харламова Ю.В., Хмель Т.А., Отражение ударной волны в облаке пыли // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 1. С. 121–131.
4. Fedorov A.V., Kharlamova Yu.V., Khmel T.A. Characteristic properties of shock wave diffraction in a variable-area channel in gas-particle mixtures // Int. Conference on the Methods of Aerophysical Research: Proceedings, Part III. Novosibirsk: Publishing House “Parallel”, 2007. P. 156–161.

¹ Ныне Кратова Ю.В.

5. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Численное исследование процессов дифракции ударных и детонационных волн на разрыве сечения плоского канала в газозвеси // *Материалы XV Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам*, 25–31 мая 2007 г., Алушта, Украина. М.: Изд-во Вузовская книга, 2007. С. 304–306.
6. Кратова Ю.В. Взаимодействие ударной волны с неоднородными пылевыми слоями // *Струйные, отрывные и нестационарные течения: Тезисы докладов XXI Всероссийского семинара*. Новосибирск: Параллель, 2007. С. 139–141.
7. Федоров А.В., Хмель Т.А., Кратова Ю.В. Дифракция ударных и детонационных волн в газозвесах // *Забабахинские научные чтения: Тезисы докл. Международной конференции*. Снежинск, 2007. С. 85–86.
8. Кратова Ю.В. Численное моделирование распространения детонационной волны в газозвесах в каналах сложной геометрии // *VIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям: Тезисы докл.* Новосибирск, 2007. С. 54–55.
9. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Численное исследование дифракции ударных волн в каналах // *Физика горения и взрыва*. 2008. Т. 44, № 1. С. 85–95.
10. Fedorov A.V., Khmel T.A., Kratova Yu.V. Shock and Detonation Wave Diffraction at a Sudden Expansion in Gas-Particle Mixtures // *Shock Waves*. 2008. Vol. 18. P 281–290.
11. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А., Фомин В.М. Распространение ударных и детонационных волн в каналах различной геометрии в газозвесах // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике* 2008. Т. 7. (Электронный журнал, номер государственной регистрации 0420700013, ISSN 1991-6396.) <http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2008-09-01-006.pdf>.
12. Fedorov A.V., Khmel T.A., Kratova Yu.V. Numerical modeling of detonation propagation in gas- particle mixtures in the duct with a cross-sectional breakdown // *International Conference on Methods of Aerophysical Research*. Novosibirsk, 2008. CD ROM Proceedings (ISBN 978-5-98901-040-0), Section IV, No. 4, P. 1–9.
13. Fedorov A.V., Khmel T.A., Kratova Yu.V. Cellular Detonation Formation and Propagation in Polydisperse Mixtures // *Seventh International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions: Proceedings*, Vol. II. St. Petersburg, 2008. P. 238–249.
14. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Особенности поведения детонационных волн в газозвеси на разрыве сечения канала // *XXXIII Дальнево-*

сточная математическая Школа-семинара им. Е.В. Золотова: Тезисы докл. Владивосток, 2008. С. 208–209.

- 15.Кратова Ю.В. Влияние процессов межфазного взаимодействия при дифракции детонационных волн в газовзвесьях // X Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики»: Тезисы докл. Новосибирск, 2008. С. 92–93.
- 16.Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Распространение детонационных волн в каналах изменяющейся геометрии в газовзвесьях 1. Дифракция на обратном уступе // Физика горения и взрыва. 2009. Т.45, № 5, 95–107.
- 17.Fedorov A.V., Khmel T.A., Kratova Yu.V. Cellular Detonation Diffraction in Gas – Particle Mixtures // The 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems: Proceedings. Minsk, 2009 (ISBN 978-985-6456-65-0).

Ответственный за выпуск Ю.В. Кратова
Подписано в печать 15.09.2009

Формат бумаги 60×84 / 16. Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз., Заказ № 15

Отпечатано в типографии ООО «Нонпарель»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1