

На правах рукописи

МАНУЙЛОВИЧ Иван Сергеевич

**ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В  
КАНАЛАХ И ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре гидромеханики механико-математического факультета и в лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем Института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители: академик РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор В.А. Левин,  
доктор физико-математических наук  
В.В. Марков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
И.С. Меньшов,  
доктор физико-математических наук,  
профессор Н.Н. Смирнов

Ведущая организация: Вычислительный центр  
им. А.А. Дородницына РАН (г. Москва)

Защита состоится 15 октября 2010 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.89 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, г. Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, аудитория 16-24.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” сентября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.501.001.89,  
доктор физико-математических наук



А.Н. Осипов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время в связи с попытками использования детонационного горения в энергетических установках широко исследуются фундаментальные проблемы детонации в многомерных постановках и нестационарных условиях. Основные задачи, которые необходимо решить для практических целей, — инициирование детонации и ее стабилизация в движущейся горючей смеси. В настоящей работе рассматриваются проблемные задачи, которые, в основном, связаны с разработкой современных двигательных систем, реализующих высокоскоростное сжигание топлива. В этой связи несомненный интерес представляют вопросы новых способов инициирования и стабилизации детонации в условиях ограниченного пространства камеры сгорания. Ранее детально не исследовались вопросы инициирования детонации в сверхзвуковом потоке горючей смеси без использования внешних источников энергии применительно к детонационным двигателям. Остались нерешенными фундаментальные вопросы формирования и распространения ячеистой детонации.

Потребность в настоящих исследованиях возникла в связи с практической необходимостью выполнения проектов в рамках РФФИ, научной школы и программ Президиума и отделения ОЭММПУ РАН. Теоретическое исследование потребовалось и в связи с экспериментами, проводившимися в ИОФ РАН, по использованию тороидального электрического разряда для инициирования горения и детонации, поскольку неясными для экспериментаторов оставались наблюдаемые ими эффекты газодинамического и физико-химического характера. Наконец, давно стоял вопрос о моделировании газодинамических процессов в импульсной установке НИИ механики МГУ, предназначенной для исследования функционирования двигательного устройства нового типа, сочетающего в себе возможности сжигания топлива в высокоскоростном режиме и возможности соплового устройства. В проводившихся ранее исследованиях методами вычислительного эксперимента выставлялись звуковые граничные условия на кольцевом радиальном сопле, которые могли приводить к результатам, не соответствующим реальным нестационарным условиям течения.

Эффективно решить сложные задачи газодинамики реагирующих сред можно лишь с использованием современной быстродействующей вычислительной техники и вычислительных комплексов, в которых реализованы виртуальные условия реальных физико-химических процессов. Следует отметить, что в настоящее время воплощается в жизнь

идея компьютерного моделирования вновь создаваемых реальных объектов в реальных условиях их функционирования, в частности, воздушных и морских судов, наземного транспорта и других систем. Предполагается, что в будущем конструкторская разработка, выбор материалов, испытания готового изделия будут проводиться виртуально на высокопроизводительных вычислительных системах. В настоящее время специалистами используются пакеты программ зарубежного производства, в которых содержится устаревшая математическая и вычислительная база. Они, как правило, не позволяют решать задачи, связанные с течениями реагирующих газовых смесей, и моделировать процессы в камерах сгорания современных двигателей и энергетических установок, в которых реализуется эффективный высокоскоростной детонационный режим сжигания топлива. Это может быть связано с опасением производителей программ относительно использования их продукта в военных целях. Так или иначе, но в результате мы не имеем возможности использовать зарубежные продукты в научных исследованиях и для решения конкретных прикладных задач. В ряде случаев, как показывает практика, известные зарубежные программы дают сомнительные результаты, особенно при сложной геометрии исследуемого объекта. В этой связи возникает необходимость в создании отечественных вычислительных комплексов, не уступающих зарубежным аналогам.

**Цель работы** можно сформулировать следующим образом.

- Применить модель бесконечно тонкой волны детонации и модель одностадийной кинетики горения для исследования процессов инициирования, стабилизации и распространения волн детонации.
- Получить данные о влиянии формы цилиндрической камеры сгорания пульсирующего детонационного двигателя на его тяговые характеристики.
- Показать возможность стабилизации волны детонации в сверхзвуковом потоке в каналах переменного сечения.
- Рассмотреть в корректной математической постановке при прямом инициировании процесс формирования ячеистой структуры детонации в плоских каналах постоянной ширины, в каналах с клиновидным расширением и за цилиндрической расходящейся волной детонации в неограниченном пространстве.

- Исследовать возможность и условия инициирования детонации на уступе в сверхзвуковом потоке в камере сгорания конечного размера.
- Рассмотреть в двумерной постановке новые оригинальные методы инициирования детонации, связанные с движением твердых поверхностей, ограничивающих область течения.
- Теоретически исследовать особенности течения инертных и химически активных сред при тороидальном электрическом разряде.
- Рассмотреть течения в замкнутом пространстве экспериментальной установки НИИ механики МГУ для определения реальных нестационарных процессов и дать оценку правомерности использования при численных расчетах звуковых условий на кольцевом сопле.

Для достижения указанных целей возникла необходимость в разработке вычислительного комплекса с удобным интерфейсом, позволяющим оперативно ставить задачи и решать их на персональном компьютере за приемлемое время.

**Научная новизна.** Предложен ряд постановок новых задач и проведено их детальное исследование:

- С использованием модели бесконечно тонкой волны детонации выполнена оптимизация рабочего цикла детонационного двигателя.
- Оригинальным аналитическим методом и численно показана возможность стабилизации бесконечно тонкой волны детонации в сверхзвуковом потоке в канале переменного сечения.
- Впервые в корректной постановке получены результаты по формированию ячеистой детонации в каналах постоянной ширины, в каналах с клиновидным расширением и двумерной расходящейся волны при прямом инициировании.
- Впервые исследован процесс инициирования детонации в сверхзвуковом потоке стехиометрической пропановоздушной смеси, заполняющей поперечное сечение плоского канала частично или полностью, без подвода энергии извне, а за счет уступа или стенки, полностью перекрывающей канал. Получена полная картина

развития процесса, позволившая обнаружить несколько режимов течения и определить критические значения параметров, при которых один режим сменяется другим. В частности, обнаружен неизвестный ранее галопирующий режим распространения слоистой детонации и дано его объяснение.

- Впервые сформулированы и исследованы задачи о детонации пропановоздушной смеси во вращающихся каналах и каналах с изменяющейся формой стенок. Получены детальные картины течения и определены критические условия инициирования детонации. Представлена аналогия, которая дает возможность использовать решения плоских задач при исследовании сверхзвуковых течений в трехмерных каналах специальной формы.
- Впервые изучено инициирование детонации в метанокислородной смеси кольцевым электрическим разрядом. Получены значения критической энергии прямого инициирования, а при докритических энергиях обнаружен высокоскоростной режим распространения горения, связанный с его турбулизацией. Во всех рассмотренных случаях выявлен уникальный режим отражения тороидальных скачков уплотнения от оси симметрии, связанный с формированием высокоскоростной струи.
- Впервые проведено численное моделирование нестационарных волновых процессов в замкнутом пространстве экспериментальной установки НИИ механики МГУ, позволившее выявить особенности развития течения без дополнительного стационарного звукового условия на кольцевом сопле и показать несоответствие этого условия реальному процессу.

Разработан вычислительный комплекс с современным интерфейсом, позволяющий оперативно ставить и решать широкий круг одномерных и двумерных задач газовой динамики химически активных смесей.

**Практическая ценность.** Постановки рассмотренных в работе задач, методики их решения и конкретные результаты могут быть использованы при разработке элементов двигательных систем и изделий в целом, в которых реализуется высокоэффективный детонационный режим сжигания топлива. В частности, это касается устройств для инициирования детонации и ее стабилизации в камере сгорания. Разработанный автором и примененный для решения конкретных задач

вычислительный комплекс может быть использован при решении широкого круга проблем научного и прикладного характера.

**Научная ценность** заключается в разработке метода исследования с использованием современных подходов организации вычислительных процессов на персональных компьютерах и в полученных конкретных результатах по рассмотренным задачам, которые являются определенным вкладом в развитие теории многомерных детонационных волн.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием известных математических моделей, апробированных методов исследований и сравнением результатов, полученных численно и аналитически.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных, всероссийских и отраслевых конференциях: 6-м международном коллоквиуме по непрерывной и пульсирующей детонации ICPCD 2008 (Москва, 2008); 27-м международном симпозиуме по ударным волнам ISSW-27 (Санкт-Петербург, 2009); Международном коллоквиуме по газодинамике взрыва и реагирующих систем ICDERS 2009 (Минск, 2009); Международной конференции “Забабахинские научные чтения” ЗНЧ-2010 (Снежинск, 2010); Всероссийской конференции “Современные проблемы механики сплошной среды”, посвященной памяти академика Леонида Ивановича Седова в связи со столетием со дня его рождения (Москва, 2007); Всероссийской конференции “Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение”, приуроченной к 90-летию академика Л.В. Овсянникова (Новосибирск, 2009); Всероссийской конференции “Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы” (Москва, 2009); Открытой конференции-конкурсе молодых ученых НИИ механики МГУ (2006, 2007, 2009); Научной конференции МГУ “Ломоносовские чтения”, секция механики (2009, 2010); 52-й научной конференции МФТИ — Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (2009); XXXIV академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных-пионеров освоения космического пространства, — “Королёвские чтения” (Москва, 2010); VII международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика М.А. Лаврентьева, — “Лаврентьевские чтения” (Новосибирск, 2010).

Результаты работы обсуждались на двух специализированных научных семинарах: семинаре кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и видеосеминаре ЦАГИ (2010).

**Публикации по теме диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1–11]. Статьи [1–5] опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК на момент публикации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 64 рисунка, 1 таблица и 96 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 133 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представленной работы описана используемая математическая модель течений с ударными и детонационными волнами. Она основана на уравнениях Эйлера в плоской и осесимметричной геометрии для многокомпонентных реагирующих смесей. Используется одностадийная химическая кинетика горения различных углеводородов, по которым имеются надежные экспериментальные данные. Приведены граничные условия, используемые при решении задач. Условие на подвижной детонационной волне, описываемой моделью бесконечно тонкой волны детонации, требует решения автомодельной задачи о распаде разрыва, разделяющего инертный газ и горючую смесь. В первой главе решение этой задачи подробно рассмотрено. В зависимости от начальных условий реализуется одна из пяти возможных конфигураций с детонационной волной, распространяющейся по горючей смеси: с пересжатой волной детонации и ударной волной или волной разрежения в инертном газе; с волной Чепмена-Жуге и ударной волной или волной разрежения в инертном газе; с волной Чепмена-Жуге, волной разрежения в инертном газе и вакуумом между ними.

Во **второй главе** подробно рассмотрен численный метод решения задач, основанный на схеме Годунова первого порядка точности по пространству и времени, и его реализация в вычислительном комплексе, предназначенном для решения широкого круга задач газовой динамики реагирующих газовых смесей.

Численная схема описывается сначала для квазиодномерных течений инертных однокомпонентных сред (§1). Затем изложены принципы построения расчетных сеток, используемых для построения двумерной схемы Годунова (§2). В областях течения сложной формы используются многоблочные сетки, состоящие из криволинейных че-



треугольных блоков. Границы блоков задаются параметрически на единичном отрезке в виде функций координат. Такой подход позволяет производить расчеты течений в областях любой формы. Далее в §3 изложена схема расчетов двумерных течений инертных однокомпонентных сред. Отмечены особенности реализации различных граничных условий. Затем в §4 описываются изменения схемы, необходимые для проведения расчетов многокомпонентных реагирующих смесей.

В §5 второй главы дано краткое описание возможностей разработанного вычислительного комплекса, перечислены основные функции графического интерфейса (рис. 1). В вычислительном комплексе ре-

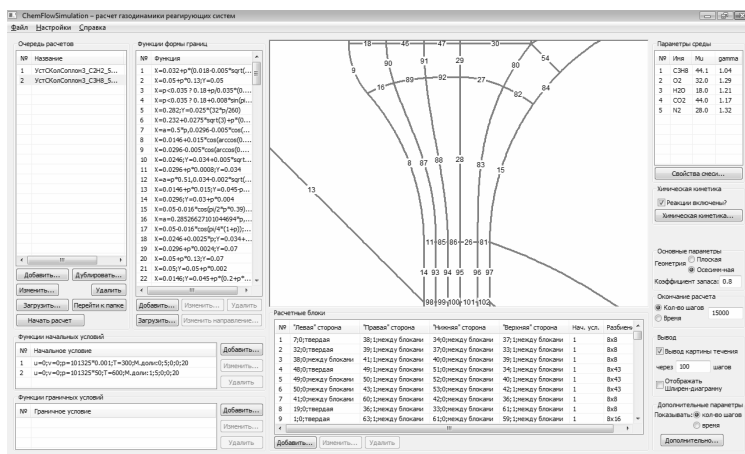


Рис. 1. Интерфейс вычислительного комплекса

ализована возможность задания начальных и граничных условий, а также границ области течения и расчетных блоков в виде математических функций, вводимых пользователем символично в программе. Такой подход значительно расширяет круг решаемых комплексом задач и ускоряет процесс подготовки расчетов и модификации их параметров.

В §6 второй главы приведен результат верификации расчетных алгоритмов на классической задаче о распаде разрыва.

В третьей главе исследуются задачи с ударными и детонационными волнами, описываемыми моделью бесконечно тонкой детонационной волны.

В §1 третьей главы моделируется рабочий цикл пульсирующего детонационного двигателя (рис. 2). В рамках модели бесконечно тонкой волны детонации изучаются автомодельные и неавтомодельные

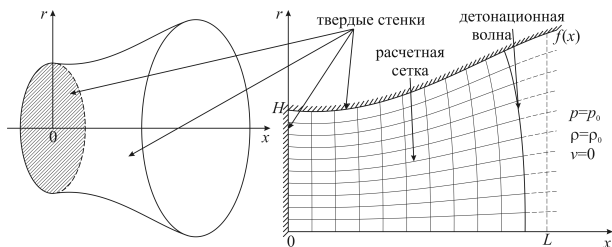


Рис. 2. Схема камеры сгорания детонационного двигателя

течения в осесимметричном канале конечной длины и переменного поперечного сечения, возникающие при распространении детонации от закрытого конца канала. Используются аналитические и численные методы. Исследуются зависимости среднего импульса и среднего удельного импульса от формы боковой стенки канала. Найдены оптимальные формы, отвечающие максимальным тяговым характеристикам рабочего цикла (рис. 3). Для классов конических и клиновидных стенок канала найдены углы полураствора, соответствующие максимуму среднего импульса. Для конуса он составляет  $60^\circ$ , а для клина —  $66.8^\circ$ . Рассмотрена также задача о распространении взрывной ударной волны в конусе и клине. Оказалось, что средний удельный импульс достигает максимума при угле  $\arccos(1/3) \approx 70.5^\circ$  для конуса и  $66.8^\circ$  для клина. Разработанная методика и полученные данные могут использоваться для оценки тяговых характеристик пульсирующего детонационного двигателя.

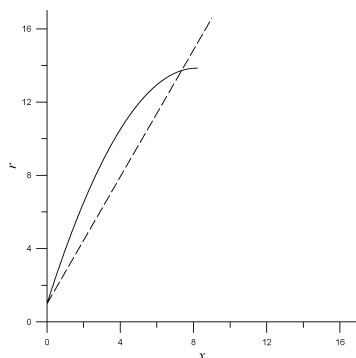


Рис. 3. Оптимальные формы в классах конических и параболических стенок

В §2 третьей главы модель бесконечно тонкой волны детонации с постоянным тепловыделением используется для анализа проблемы стабилизации детонации в сверхзвуковом потоке в канале переменного сечения, который моделирует камеру сгорания. Аналитически и численным методом показана возможность стабилизации волны детонации, т.е. существование устойчивого стационарного течения. Аналитический анализ основан на введении плоскости переменных “площадь сечения – число Маха” (рис. 4) и позволяет выделить целый спектр

положений волны детонации в канале, при которых реализуется стационарное течение. Устойчивость стационарного потока по отношению

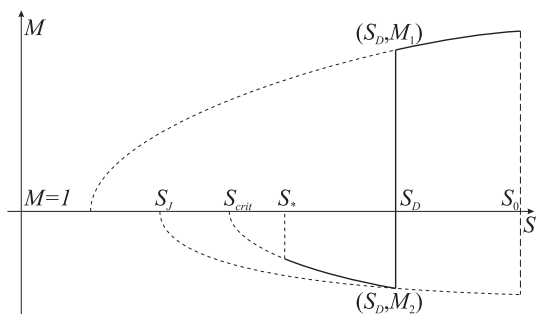


Рис. 4. Диаграмма параметров  $S, M$

к малому возмущению величины тепловыделения проанализирована численно. Показано, что волна устойчива и процесс стабилизируется, если она находится в расширяющейся по потоку части канала (рис. 5).

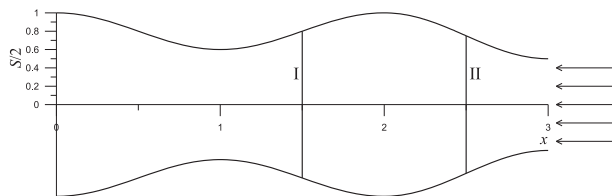


Рис. 5. Схема канала. I — неустойчивое положение детонационной волны, II — устойчивое

В **четвертой главе** рассмотрен ряд задач о структуре, иницировании, стабилизации и распространении детонации с учетом конечной скорости протекания химических реакций в рамках одностадийной кинетики горения. Исследование проводится с использованием оригинального вычислительного комплекса, основанного на схеме Годунова и описанного во второй главе.

В §1 четвертой главы представлены результаты моделирования ячеистой детонации в пропановоздушной смеси. Рассмотрено 3 случая — ячеистая детонация в канале постоянной ширины; детонация в канале, состоящем из участка постоянной ширины и части с клиновидным расширением; двумерное расходящееся течение за цилиндрической волной детонации. В канале постоянной ширины наблюдается

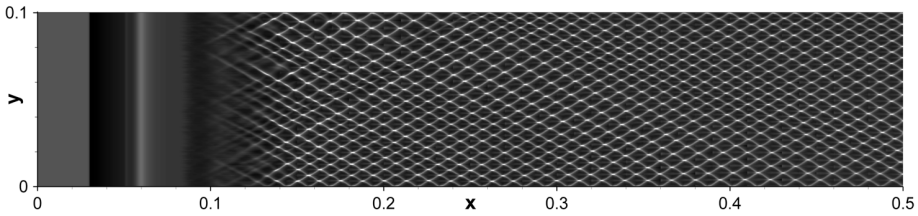


Рис. 6. Следы тройных точек в канале постоянной ширины

регулярная ячеистая структура (рис. 6). Для расширяющегося канала получена нерегулярная ячеистая структура детонации с увеличением числа ячеек поперек канала (рис. 7). В случае цилиндрической волны

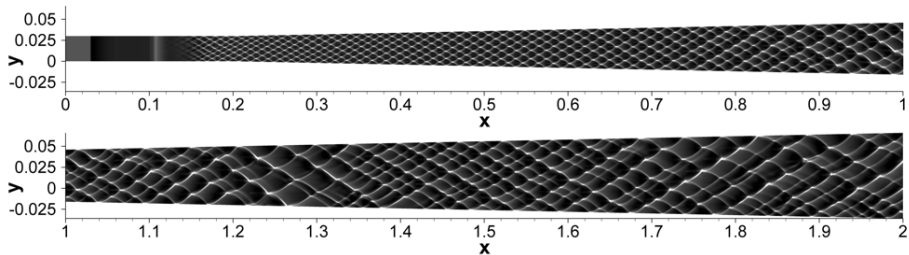
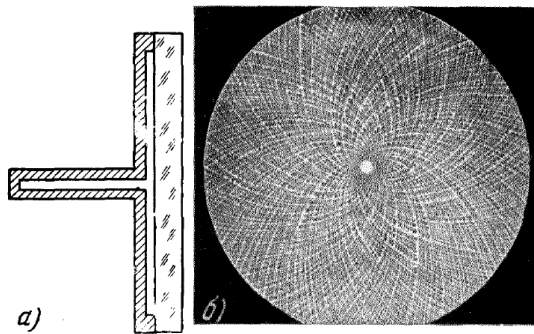


Рис. 7. Следы тройных точек в расширяющемся клиновидном канале с углом раствора  $2.3^\circ$

детонации моделируется процесс инициирования детонации в узком зазоре между пластинами, куда через круглое



отверстие проникает плоская волна детонации, сформированная в трубке, присоединенной под прямым углом к пластине (рис. 8а). Такое инициирование имело место в эксперименте, проведенном Р.И. Солоухиным. Возникающая при этом ячеистая структура детонации (рис. 8б) полностью смоделирована в проведенных расчетах. Как в

Рис. 8. Схема и результат эксперимента

экспериментах, так и в расчетах наблюдалась однородная и неоднородная ячеистая структура. На рис. 9 представлена однородная картина следов тройных точек, полученная в расчете. Видно хорошее соответствие с ячеистой структурой, полученной в эксперименте и представленной на рис. 8б.

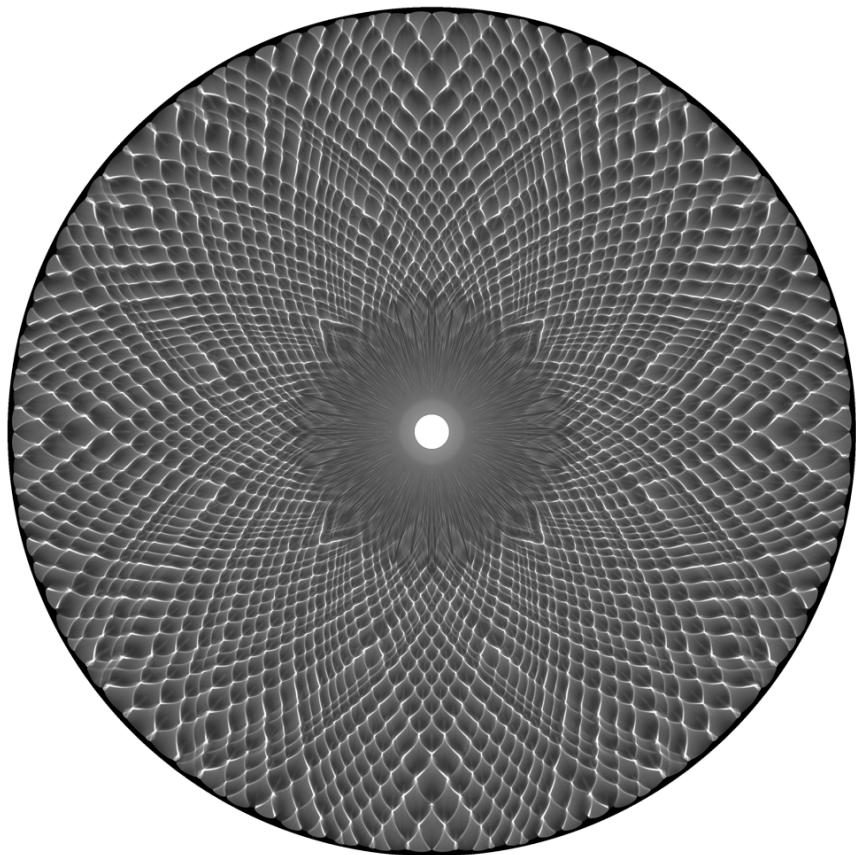
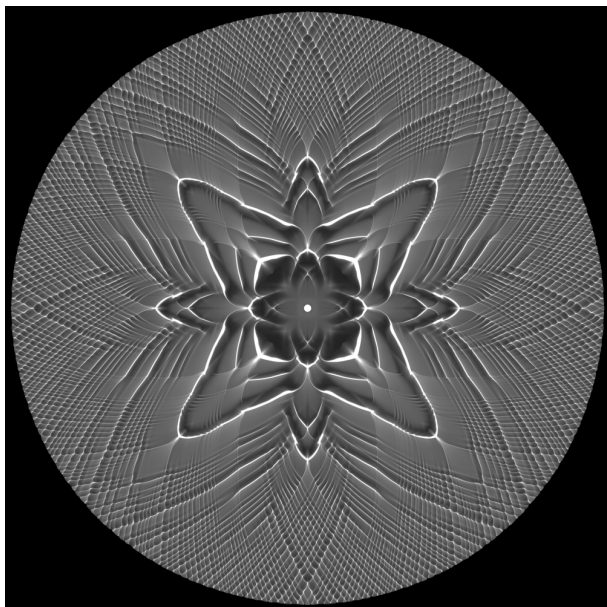
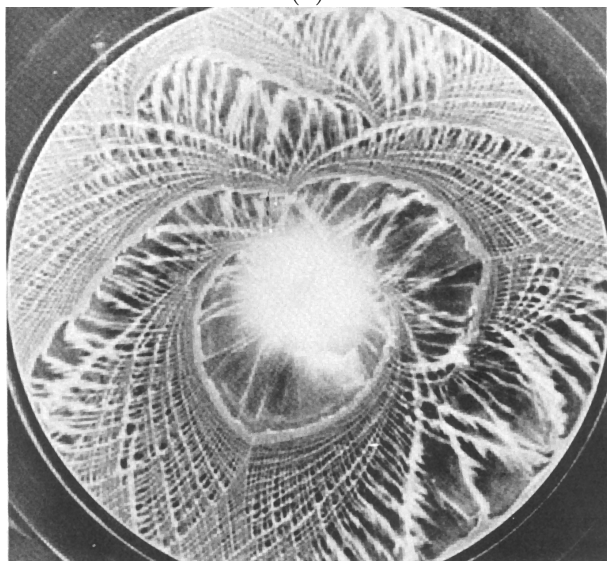


Рис. 9. Следы тройных точек за расходящейся цилиндрической волной детонации при численном моделировании

При недостаточной интенсивности волны детонации в трубке расходящаяся цилиндрическая детонация на начальной стадии имеет тенденцию к затуханию, о чем свидетельствует неоднородная следовая картина. Затем детонация переходит в самоподдерживающийся режим с ячеистой структурой. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 10, где представлены следовые картины, полученные в расчете и эксперименте.



(a)



(б)

Рис. 10. Следы тройных точек за расходящейся цилиндрической волной детонации при тенденции затухания на начальной стадии. Результаты расчета (а) и эксперимента (б)

В §2 рассматриваются задачи об инициировании детонации в сверхзвуковом потоке стехиометрической пропановоздушной смеси, заполняющей плоский канал в поперечном направлении частично или полностью. Иницирование в потоке происходит за счет уступа или стенки, полностью перекрывающей канал. Обнаружен неизвестный ранее механизм распространения детонации, связанный с наличием горючей смеси в пристеночном слое под слоем инертного газа. Он обусловлен сложной волновой структурой течения, для которой характерно проникновение ударной волны, формирующейся в слое инертного газа, в слой горючей смеси перед волной детонации, в результате чего смесь прогревается и воспламеняется. Процесс в целом носит периодический характер, отличный от обычной ячеистой детонации в однородной среде. Новый режим распространения детонации определен как галолирующая слоистая детонация. Установлено существование критических значений числа Маха набегающего потока, от которых зависит качественная и количественная картина течения. В случае, когда горючая смесь втекает по всему входному сечению, получены два различных режима детонации — один со стационарной волной на уступе, а другой — с волной, распространяющейся ко входному сечению канала. В случае слоя горючей смеси в зависимости от числа Маха набегающего потока реализуются три режима детонации. Один — со стационарной волной на уступе

(рис. 11, на котором 1 — детонационная волна, 2 — примыкающая к ней ударная волна в воздухе, 3 — отраженная от верхней стенки ударная волна, 4 — маховская ножка, 5 — отраженная от нижней стенки ударная волна, 6 — граница струи), а два других — с волной, распространяющейся ко входному сечению канала в виде либо стационарного волнового комплекса (рис. 12, на котором 1 — детонационная волна, 2 — примыкающая к ней ударная волна в воздухе, 3 — ударная волна, распространяющаяся за головным фронтом, 4 — граница струи), либо в режиме галолирующей слоистой детонации (рис. 13). Если все сечение канала перекрывается плоской стенкой,

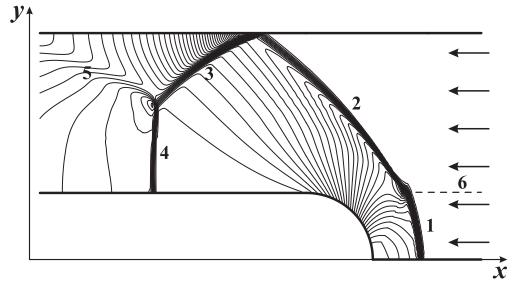


Рис. 11. Изобары при стационарной детонации для  $M = 7.6$

то наблюдаются те же режимы распространения детонации (рис. 14), за исключением стационарного. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что галопирующая слоистая детонация реализуется

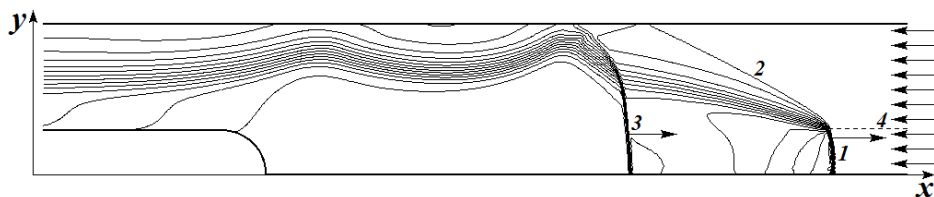


Рис. 12. Изотермы при распространении стационарного волнового комплекса для  $M = 5$

только благодаря ограниченности канала в поперечном направлении.

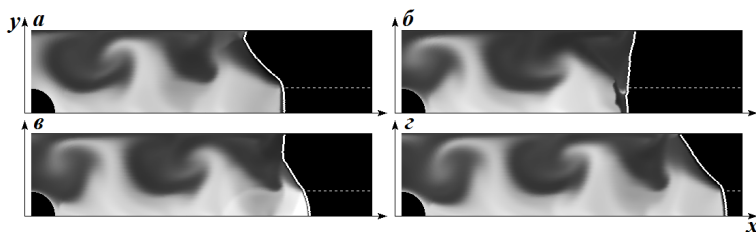


Рис. 13. Фронты волн и поля температуры в несколько моментов времени, иллюстрирующие фазы галопирующей детонации в канале с уступом

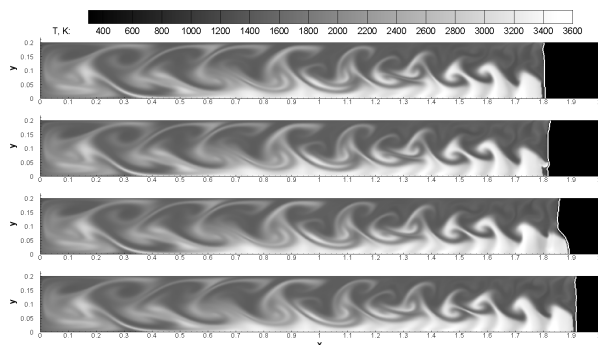


Рис. 14. Поля температуры при галопирующей детонации в перегородженном канале



В §3 четвертой главы рассматривается ряд задач об иницировании детонации во вращающихся каналах и каналах с изменяющейся формой стенок:

- формирование детонации в пропановоздушной смеси, находящейся внутри вращающегося эллиптического цилиндра (рис. 15);

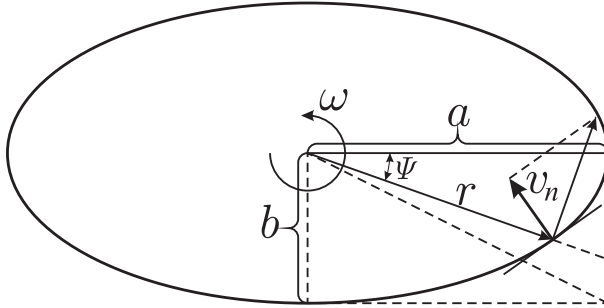


Рис. 15. Схема, иллюстрирующая постановку задачи о детонации внутри вращающегося эллиптического цилиндра

- детонация смеси вне вращающегося эллиптического цилиндра, заключенного в круговой цилиндр (рис. 16);

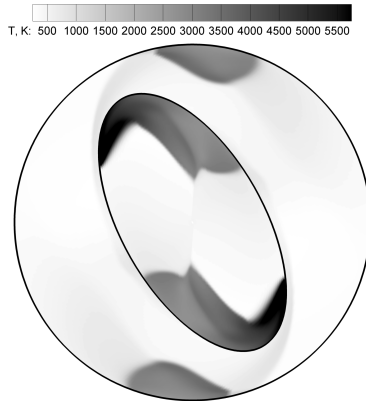


Рис. 16. Поле температуры при детонации внутри и вне вращающегося эллиптического цилиндра, заключенного в круговой цилиндр

- инициирование детонации внутри вращающегося кругового цилиндра с уступами параболической формы, равномерно распределенными по его внутренней границе (рис. 17);

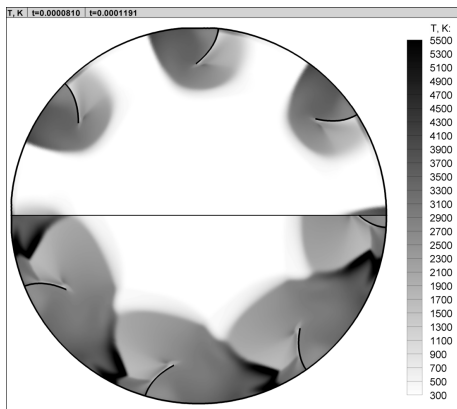


Рис. 17. Поле температуры во вращающемся круговом цилиндре с препятствиями параболической формы, равномерно распределенными по его внутренней границе

- возникновение детонации внутри кругового цилиндра за счет вращения вокруг его оси звездообразной фигуры с лучами параболической формы (рис. 18);

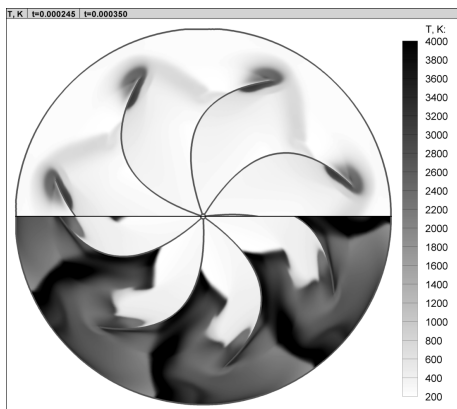


Рис. 18. Поле температуры в круговом цилиндре, внутри которого вращается звездообразная фигура

- формирование детонации при деформировании стенки канала параболической формы по синусоидальному закону (рис. 19);

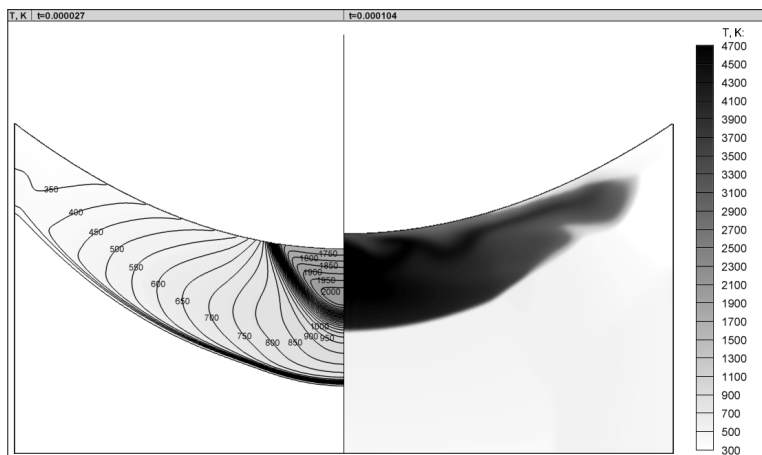


Рис. 19. Поле температуры и изотермы в области с параболической стенкой, испытывающей гармонические колебания

- детонация в квадратной и круглой камерах, размер которых изменяется по гармоническому закону (рис. 20).

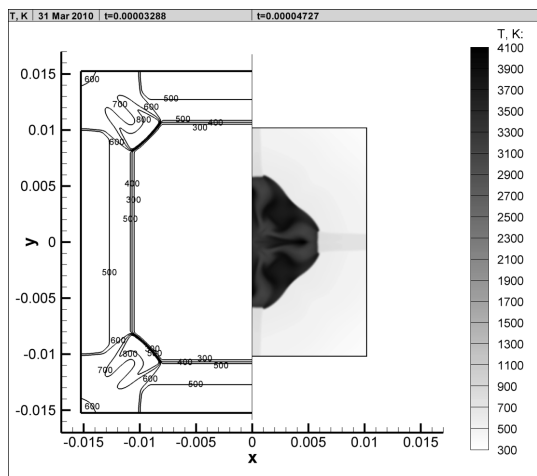


Рис. 20. Поле температуры и изотермы в квадратной области с изменяющейся по синусоидальному закону длиной стороны

Во всех рассмотренных задачах определены значения критических параметров, при которых формируется детонация, и получена детальная картина течения, позволяющая выявить особенности возникновения детонации при движении границ области, содержащей горючую смесь. Представлена аналогия, которая дает возможность использовать решения перечисленных плоских задач при исследовании сверхзвуковых течений в трехмерных каналах специальной формы, получаемой при вращении или деформировании границы области течения и ее одновременном перемещении вдоль оси, перпендикулярной плоскости границы. В случае вращения соответствующий трехмерный канал имеет винтовую форму. Отмеченная аналогия, основанная на гипотезе плоских сечений, применима, если шаг винта канала много больше размеров его поперечного сечения, т.е. размеров соответствующей плоской области.

В §4 рассматривается задача об инициировании детонации кольцевым электрическим разрядом в метанокислородной смеси. При расчетах течения, возникающего при различных энергиях разряда, найдена величина критической энергии прямого инициирования. Согласно расчетам, при отражении от оси симметрии первоначального тороидального скачка, представляющего собой детонационную волну при сверхкритической энергии разряда и ударную волну при докритической энергии, формируется течение с высокоскоростной струей у оси симметрии, перед которой как перед движущимся с большой скоро-

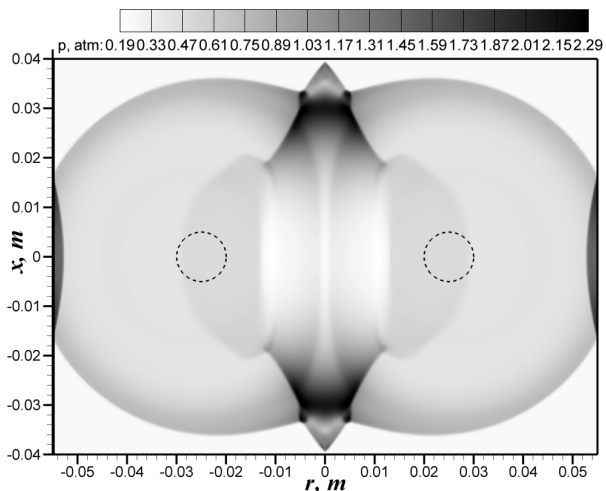


Рис. 21. Поле давления при отражении волны от оси симметрии

стью телом распространяется присоединенная коническая детонационная или ударная волна. Фронты волн, отделяющие область течения от покоящейся горючей смеси, образуют комплекс, состоящий из падающей тороидальной волны и диска Маха, из которого выступает конический скачок (рис. 21). В ограниченном пространстве цилиндрической трубы конечного размера при докритической энергии кольцевого разряда обнаружен высокоскоростной режим распространения горения, наблюдаемый в экспериментах (рис. 22). Это явление объясняется

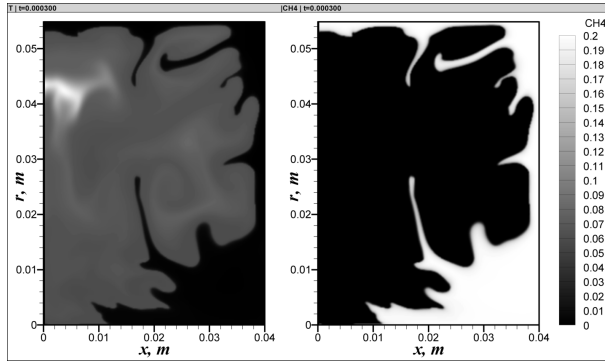


Рис. 22. Поле температуры (слева) и массовая доля метана (справа) на последней стадии горения

турбулизацией горения, связанной с воздействием на его фронт системы ударных волн, возникающих благодаря осевой симметрии камеры сгорания и ее ограниченности в радиальном и осевом направлениях. Фронт воспламенения, разделяющий газы с значительно отличающимися плотностями, сильно деформируется, и распространение горения приобретает турбулентный характер.

В §5 четвертой главы представлены результаты численного моделирования нестационарных волновых процессов в замкнутом пространстве экспериментальной установки НИИ механики МГУ (рис. 23), состоящей из шарообразного реактора, подводящего кольцевого канала, кольцевого сопла, полузамкнутой резонаторной полости, выходного сопла и резервуара большого объема для выхлопа рабочего газа. В вычислительных экспериментах форма и размеры расчетной области полностью соответствовали реальной модели, что потребовало построения сложной многоблочной расчетной сетки. Используемый при расчетах вычислительный комплекс позволил за приемлемое машинное время на персональном компьютере получить в динамике неста-

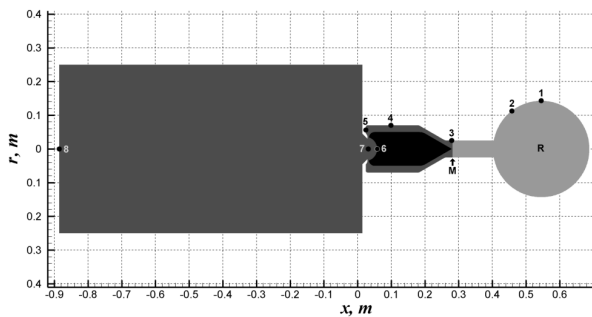


Рис. 23. Схема установки

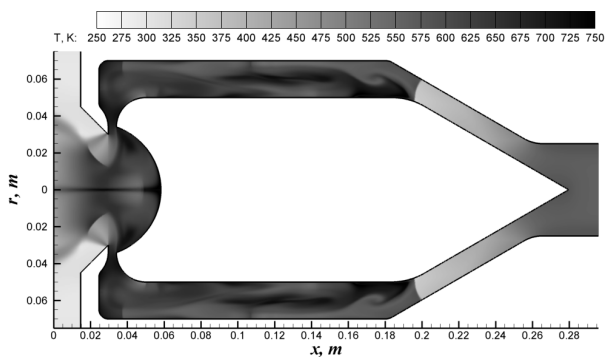


Рис. 24. Поле температуры при  $P_* = 50$  атм,  $T_* = 600$  К для пропановоздушной смеси

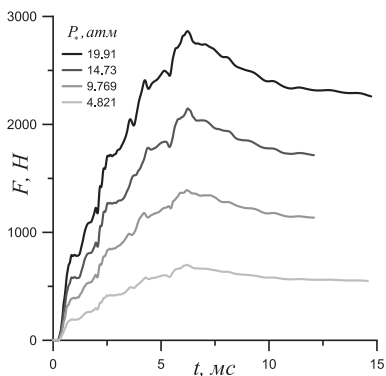


Рис. 25. Сила тяги как функция времени при четырех значениях начального давления в реакторе  $P_*$

ционарную картину течения: изменение со временем полей параметров потока (рис. 24), их зависимости от времени в заданных фиксированных точках, а также интегральные характеристики, такие как сила, действующая на определенные элементы внутренней поверхности (рис. 25), в частности, на тяговую стенку установки. Установлено, что использование звукового условия на кольцевом сопле не соответствует реальному процессу, поскольку звуковая линия изменяет свое положение (рис. 26).

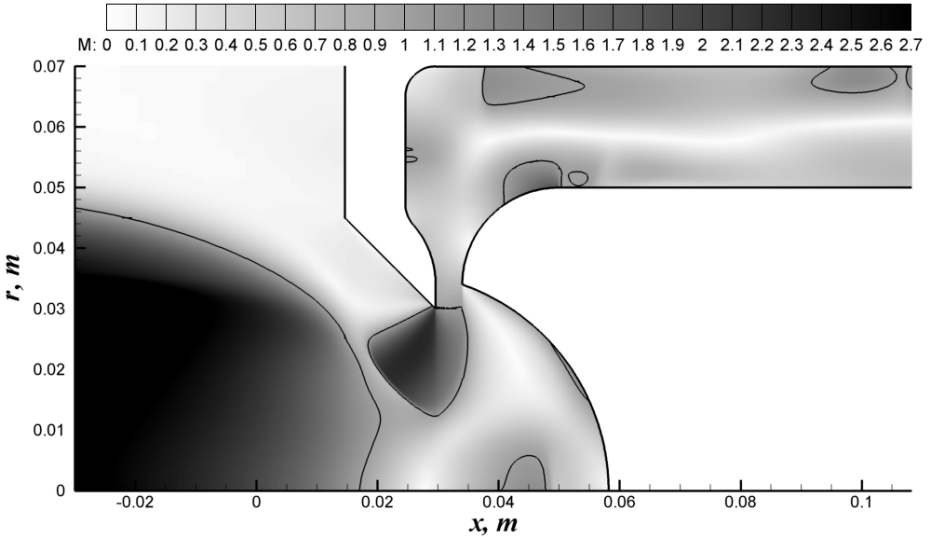


Рис. 26. Поле чисел Маха и звуковые линии при  $P_* = 50$  атм,  
 $T_* = 600$  К для пропановоздушной смеси

В **заклучении** диссертации подведены итоги работы и сформулированы основные результаты и выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Проведено аналитическое и численное исследование течений с волнами детонации в рамках модели бесконечно тонкой детонационной волны и с учетом одностадийной кинетики горения.
- Для численных расчетов сложных нестационарных течений разработан оригинальный вычислительный комплекс с современным интерфейсом, который позволяет на персональном компьютере за приемлемое машинное время моделировать двумерные течения многокомпонентной инертной и реагирующей среды в открытом пространстве

и каналах со сложной геометрией.

- В рамках модели бесконечно тонкой волны детонации рассмотрены две задачи.
  - В первой задаче проведена оптимизация рабочего цикла пульсирующего детонационного двигателя. Найдены оптимальные формы камеры сгорания, отвечающие максимальным тяговым характеристикам рабочего цикла двигателя. Для классов конических и клиновидных стенок найдены углы полураствора, соответствующие максимуму среднего импульса. Для конуса он составляет  $60^\circ$ , а для клина —  $66.8^\circ$ . Рассмотрена также задача о распространении взрывной ударной волны в конусе и клине. Показано, что средний удельный импульс достигает максимума при угле  $\arccos(1/3) \approx 70.5^\circ$  для конуса и  $66.8^\circ$  для клина. Разработанная методика и полученные данные могут использоваться для оценки максимально возможных тяговых характеристик пульсирующего детонационного двигателя.
  - Во второй задаче оригинальным аналитическим методом и численно показана возможность стабилизации детонационной волны в сверхзвуковом потоке в канале переменного сечения. Аналитический анализ основан на введении плоскости переменных “площадь сечения–число Маха” и позволяет выделить целый спектр положений волны детонации в канале, при которых реализуется стационарное течение. Устойчивость стационарного потока по отношению к малому возмущению величины тепловыделения проанализирована численно. Показано, что волна устойчива и процесс стабилизируется, если она находится в расширяющейся по потоку части канала.
- В рамках одностадийной кинетики горения пропано- и метановоздушных смесей решен ряд задач о взрывных и детонационных волнах.
  - Получена ячеистая структура двумерной цилиндрической расходящейся волны детонации и волны детонации в каналах постоянной ширины и с клиновидным расширением.
  - Рассмотрены задачи об иницировании детонации в сверхзвуковом потоке стехиометрической пропановоздушной смеси, заполняющей плоский канал в поперечном направлении частично или полностью. Иницирование происходит за счет уступа или стенки, полностью перекрывающей канал. Обнаружено несколько режимов течения и получены значения критических параметров, разделяющие их. В частности, обнаружен неизвестный ранее галопирующий режим



распространения слоистой детонации и дано объяснение его механизма.

- Рассмотрено несколько задач о детонации во вращающихся каналах и каналах с изменяющейся формой стенок:
  - \* формирование детонации пропановоздушной смеси, находящейся внутри вращающегося эллиптического цилиндра;
  - \* детонация смеси вне вращающегося эллиптического цилиндра, заключенного в круговой цилиндр;
  - \* инициирование детонации внутри вращающегося кругового цилиндра с уступами параболической формы, присоединенными к его внутренней границе;
  - \* возникновение детонации внутри кругового цилиндра за счет вращения вокруг его оси звездообразной фигуры с лучами параболической формы;
  - \* детонация при деформировании со временем по синусоидальному закону стенки камеры, имеющей форму параболы;
  - \* детонация в квадратной и круглой камерах, размер которых изменяется со временем по гармоническому закону.

В результате численных расчетов получены детальные картины развития детонации и соответствующие им критические условия.

- Исследованы течения, возникающие при кольцевом электрическом разряде в метанокислородной смеси. Обнаружен наблюдающийся в экспериментах уникальный режим отражения ударных и детонационных волн от оси симметрии. Получены значения критической энергии прямого инициирования детонации. В случае докритических значений энергии разряда, происходящем в ограниченном объеме, получен высокоскоростной режим распространения горения, связанный с его турбулизацией.
- Проведено численное моделирование нестационарных волновых процессов в замкнутом пространстве экспериментальной установки института механики МГУ. При различных значениях определяющих параметров исследована динамика формирования течения и получены временные зависимости газодинамических параметров в заданных точках, соответствующих положению датчиков в эксперименте, а также интегральные характеристики, такие как сила, действующая на определенные элементы внутренней поверхности. Установлено, что звуковое условие на кольцевом сопле не соответствует реальному процессу, поскольку звуковая линия изменяет свое положение.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Новые эффекты слоистой газовой детонации // Докл. акад. наук. 2010. Т. 430. № 2. С. 185–188.
2. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Формирование детонации во вращающихся каналах // Докл. акад. наук. 2010. Т. 432. № 6. С. 775–778.
3. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Оптимизация тяговых характеристик пульсирующего детонационного двигателя // ФГВ. 2010. № 4. С. 56–63.
4. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Инициирование детонации при вращении эллиптического цилиндра внутри кругового цилиндра и деформировании стенок канала // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 4. С. 17–25.
5. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Особенности галопирующей детонации в сверхзвуковом потоке горючей смеси под слоем инертного газа // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 5. С. 166–174.
6. Мануйлович И.С. Распространение волны детонации в двумерном канале переменного сечения // Труды конференции-конкурса молодых ученых, под редакцией Г.Г. Черного, В.А. Самсонова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. С. 175–181.
7. Левин В.А., Мануйлович И.С. Оптимизация рабочего цикла пульсирующего детонационного двигателя // Тезисы докладов научной конференции “Ломоносовские чтения”, секция механики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 102–103.
8. Левин В.А., Мануйлович И.С. Распространение волны детонации в канале переменного сечения // Труды всероссийской конференции “Современные проблемы механики сплошной среды”, посвященной памяти академика Л.И. Седова в связи со столетием со дня его рождения. 2007. С. 119–120.
9. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Стабилизация детонационной волны в сверхзвуковом потоке в каналах переменного сечения // Тезисы докладов международной конференции

“Забабахинские научные чтения”. Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010. С. 80–81.

10. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Слоистая галопирующая детонация // Тезисы докладов международной конференции “Забабахинские научные чтения”. Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010. С. 112–113.
11. V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov. Optimization of the PDE operating regime // Proceedings of the 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Minsk, 2009. CD paper.