

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Сутырин Олег Георгиевич

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН  
В НЕОДНОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
в.н.с. Георгиевский Павел Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Голуб Виктор Владимирович

доктор физико-математических наук,  
Меньшов Игорь Станиславович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Математический институт  
им. В.А. Стеклова РАН (г. Москва)

Защита состоится 9 декабря 2011 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.89 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, аудитория 16-10.

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

Автореферат разослан «    » ноября 2011 года.

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



А.Н. Осипцов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Многим физическим явлениям, связанным с движением газов и других сред, сопутствует формирование и взаимодействие ударных волн. Такие явления имеют широкое распространение в природе и технике, что обуславливает необходимость исследований ударно-волновых процессов. Одним из важнейших направлений исследований является изучение взаимодействия ударных волн с неоднородностями среды различного характера: областями повышенной температуры, границами раздела сред, пылевыми облаками и другими. Примеры таких неоднородностей встречаются в задачах о прохождении отраженной от поверхности земли ударной волны через облако ядерного взрыва, отражении подводной взрывной волны от поверхности океана, взрыве в пузырьковой жидкости, прохождении ударной волны по запыленной шахте.

Наличие неоднородностей перед ударной волной может приводить к качественным изменениям в структуре течения, таким как искривление фронта волны, формирование новых ударных волн, отрыв пограничных слоев, кумуляция струй и ударных волн. Несмотря на большое количество существующих публикаций по данной тематике, многие газодинамические эффекты остаются недостаточно изученными, что обуславливает актуальность фундаментальных задач о взаимодействии ударной волны в газах с неоднородностями различного характера, включая локальные и протяженные области газа пониженной или повышенной плотности.

### Цели работы:

1. Исследовать газодинамику взаимодействия плоской ударной волны с четвертью пространства, занятой газом пониженной или повышенной плотности. Определить режимы и основные качественные характеристики нестационарного двумерного автомодельного течения.
2. Исследовать взаимодействие ударной волны с узким слоем или цилиндрическим каналом газа пониженной или повышенной плотности. Определить динамику течения на больших временных интервалах.
3. Изучить преломление ударной волны на симметричном и несимметричном «газовом клине» повышенной или пониженной плотности. Определить различные режимы течения в зависимости от плотности газа и угла раствора клина, вплоть до очень малых углов.
4. Исследовать распространение ударной волны по газу, содержащему цилиндрическую или эллипсоидальную область газа пониженной или повышенной плотности. Детально изучить процесс кумуляции скачков уплотнения, определить зависимость интенсивности кумуляции от геометрических параметров задачи.

### Научная новизна работы:

1. Изучено преломление ударной волны на четверти плоскости, занятой газом иной плотности. Обнаружены новые газодинамические элементы течения:

высоконапорная струя с волновой внутренней структурой и слоистый вихрь. Предложен метод оценки углов наклона основных скачков и параметров газа за ними, сводящийся к решению системы алгебраических уравнений.

2. Для задачи о взаимодействии ударной волны с узким слоем газа обнаружено замедление роста газодинамического «предвестника» на больших временных интервалах, обусловленное эффектом запираания потока за его фронтом. Обнаружены качественно различные режимы течения, характеризующиеся формированием сверхзвуковой струи газа постоянной ширины или струи с периодической «бочкообразной» структурой.
3. Исследованы регулярные и нерегулярные режимы течения при взаимодействии ударной волны с газовым клином различной плотности и угла раствора. В случае «легкого» газового клина очень малого угла раствора отмечена аналогия со структурой предвестника и обнаружено, что за счет автомодельного расширения ударно-волновой структуры эффект запираания потока не имеет места. В задаче о преломлении ударной волны на несимметричном газовом клине обнаружены новые качественные эффекты: перекося грибовидной вихревой области и формирование проскальзывающих струй.
4. Обнаружены новые режимы взаимодействия ударной волны с газовым эллипсоидом. Исследован эффект кумуляции скачков уплотнения на оси симметрии и выделены режимы кумуляции – внутренние, внешние и пограничные. Определена зависимость параметров газа, достигаемых при кумуляции, от удлинения эллипсоида.

#### **Достоверность результатов.**

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена использованием хорошо известных и апробированных математических моделей и численных методов. Корректность численных процедур была проверена на тестовых задачах с известными точными решениями. Для дополнительного контроля точности проводилось сравнение результатов, полученных различными численными методами.

#### **Научная и практическая значимость работы.**

Новые фундаментальные газодинамические эффекты, полученные в работе, могут быть применены в таких прикладных задачах, как управление сверхзвуковым обтеканием тел за счет взаимодействия головной ударной волны с искусственно созданными неоднородностями или стимуляция горения и инициирование детонации с помощью кумуляции скачков уплотнения.

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты исследования задачи о взаимодействии плоской ударной волны с четвертью пространства, занятой газом пониженной или повышенной плотности: новые элементы ударно-волновой структуры – высоконапорная струя, сформированная чередующимися центрированными волнами сжатия-разрежения, и крупномасштабный слоистый вихрь; метод оценки основных параметров течения.

2. Результаты исследования задачи о взаимодействии ударной волны с узким слоем газа иной плотности: эффект замедления роста «предвестника» на больших временных интервалах в результате запираания потока за его фронтом; качественно различные режимы течения, характеризующиеся формированием сверхзвуковой струи газа постоянной ширины или струи с периодической «бочкообразной» структурой.
3. Результаты исследования задачи о взаимодействии ударной волны с газовым клином: регулярные и нерегулярные режимы преломления волны; отсутствие эффекта «запираания потока» в случае легкого газового клина малого угла раствора; новые качественные эффекты, имеющие место при преломлении ударной волны на несимметричном газовом клине.
4. Результаты исследования задачи о взаимодействии ударной волны с газовым эллипсоидом: классификация режимов кумуляции скачков уплотнения на оси симметрии; зависимость параметров газа, достигаемых при кумуляции, от удлинения эллипсоида.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты работы были представлены автором на следующих конференциях и совещаниях: 27-я международная конференция по ударным волнам (ISSW27), Санкт-Петербург, 2009; 19-й международный симпозиум по взаимодействию ударных волн (ISIS19), Москва, 2010; X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Нижний Новгород, 2011; конференция «VII Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», Новосибирск, 2010; конференции «Ломоносовские чтения» Москва, 2009, 2010; конференции-конкурсы НИИ механики МГУ, 2007, 2008, 2009, 2010; XVI школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики», Сочи, 2010; VII научно-техническая конференция «молодежь в науке», Саров, 2008; конференция «Новые решения и технологии в газотурбостроении», Москва, 2010; научно-исследовательский семинар кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ под руководством академика РАН А.Г. Куликовского, В.П. Карликова и О.Э. Мельникова, 2011.

#### **Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 18 работ [1-18]. Статьи опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК [1-3], в сборниках докладов конференций [4-10], и в сборниках тезисов докладов [11-18]. Результаты, изложенные в [1,2,6-17], получены в соавторстве с академиком РАН В.А. Левиным и к.ф.-м.н. П.Ю. Георгиевским. В.А. Левину и П.Ю. Георгиевскому принадлежит постановка задач, участие в обсуждении и интерпретации результатов. Все положения, выносимые на защиту, получены автором диссертации лично.

#### **Структура и объем диссертации:**

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и содержит 108 страниц, 170 рисунков, одну таблицу и список литературы из 119 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы. Представлена структура диссертации, дана краткая характеристика ее разделов.

**Первая глава** содержит обзор публикаций по теме диссертации. Дана краткая история развития исследований распространения ударной волны вдоль узкого разогретого слоя газа, сопровождающейся формированием «предвестника» – крупномасштабной ударно-волновой конфигурации, опережающей фронт основной волны. Отмечены характерные эффекты, проявляющиеся при прохождении ударной волны вдоль запыленного слоя или слоя газа повышенной плотности, включающие отрыв слоя от стенки и переход частиц пыли во взвешенное состояние. Представлен набор публикаций, посвященных изучению взаимодействия ударной волны с наклонной границей раздела газов и классификации режимов преломления волны – регулярных и нерегулярных. Приведен ряд работ по изучению прохождения ударной волны по газу, содержащему пузырь газа с иными параметрами, в которых приведены основные конфигурации перестройки течения – «сходящиеся» и «расходящиеся» – и описана динамика развития множественных вихрей.

Во **второй главе** дано описание математической модели и численного метода, примененного в работе. Модель основана на двумерных уравнениях Эйлера движения идеального совершенного газа. В §1 Приведена запись уравнений в декартовой и цилиндрической системах координат. Для численного моделирования используется явный конечно-разностный метод Р.В. Маккормака второго порядка точности по времени и пространству. Скачки и тангенциальные разрывы рассчитываются насквозь; для подавления нефизических осцилляций, характерных для численных схем высокого порядка точности, применяется метод

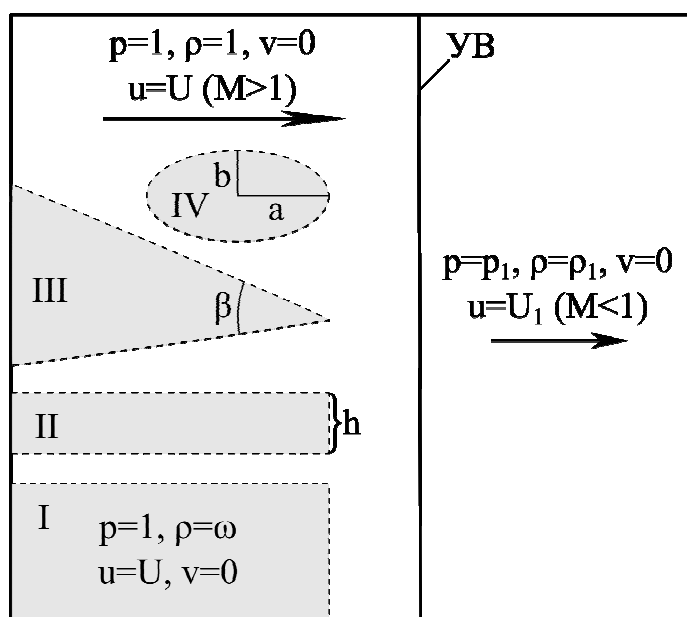


Рис. 1 Общая схема начальных условий

локальной монотонизации. Приведены общие начальные и граничные условия, используемые при решении задач. На рис. 1 изображена схема начальных данных: поток газа направлен слева направо, параметры перед и за ударной волной согласованы из соотношений Рэнкина-Гюгонно. Поток перед волной содержит область газа иной плотности ( $\rho = \omega \neq 1$ ) одного из следующих типов: I – четверть пространства, II – узкий слой, III – клин, IV – эллипсоид.

В §2 проведена верификация

метода на одномерной задаче Римана о распаде разрыва, отмечена быстрая сходимость численного решения к точному при увеличении количества узлов расчетной сетки. Обсуждается влияние метода монотонизации на сглаживание профилей ударных волн и контактных разрывов, а также зависимость масштаба развития неустойчивости тангенциальных разрывов от выбора размера шага разностной сетки. Отмечено, что основные газодинамические элементы течения – положение и углы наклона ударных волн, параметры газа за ними и крупномасштабные вихревые образования – не зависят от выбора расчетной сетки.

В §3 описывается метод построения многоуровневых расчетных сеток, применяющихся для более точного расчета течений вблизи оси или плоскости симметрии задачи. Метод основан на двухступенчатом кратном уменьшении шага сетки и применении билинейной интерполяции для замыкания разностного шаблона на границах сеток. Обсуждаются вносимые им локальные погрешности и эффективность метода по сравнению с применением равномерных сеток при фиксированном объеме вычислительных ресурсов.

**Третья глава** содержит решение задачи о взаимодействии сильной ударной волны (скачка уплотнения) с четвертью пространства, занятой газом повышенной или пониженной плотности. В §1 приведена постановка задачи (рис. 1, тип I), даны определяющие параметры задачи: число Маха  $M \geq 1.5$  набегающего потока газа, отношение плотностей газа  $\omega = \rho_T / \rho_0 \neq 1$  и показатель адиабаты Пуассона  $\gamma = 1.4$ .

При фиксированном  $M$  в зависимости от дефекта плотности  $\omega$  реализуются качественно различные режимы течения – регулярные и нерегулярные. Если параметр  $\omega$  близок к единице, имеет место регулярное преломление скачка, характеризующееся сопряжением всех основных скачков и тангенциальных разрывов в единственной точке.

В §2 описан нерегулярный режим преломления, имеющий место при  $\omega < 0.8$ . На рис. 2 приведены изолинии плотности для случая  $M = 3$ ,  $\omega = 0.3$ . У нижней границы расчетной области имеет место одномерный распад газодинамического разрыва: налево распространяется лидирующий скачок В, направо – волна разрежения J, между ними – контактный разрыв Н. У верхней границы расчетной области расположен невозмущенный участок DG исходного скачка. Основная часть расчетной области занята сложной ударно-волновой структурой, включающей косой скачок АС, соединяющий лидирующий и исходный скачки, преломленный тангенциальный разрыв АЕ и внутренний скачок СЕ. За внутренним скачком формируется высоконапорная струя, разворачивающаяся под действием разницы давлений на верхнем и нижнем тангенциальных разрывах. В центральной области течения образуется крупномасштабный вихрь и слабый скачок уплотнения F, распространяющийся со скоростью, сравнимой со скоростью лидирующего скачка В. На участке CD имеет место искривление фронта исходного скачка и формирование второй тройной точки G, обусловленное его интерференцией с косым скачком АС.

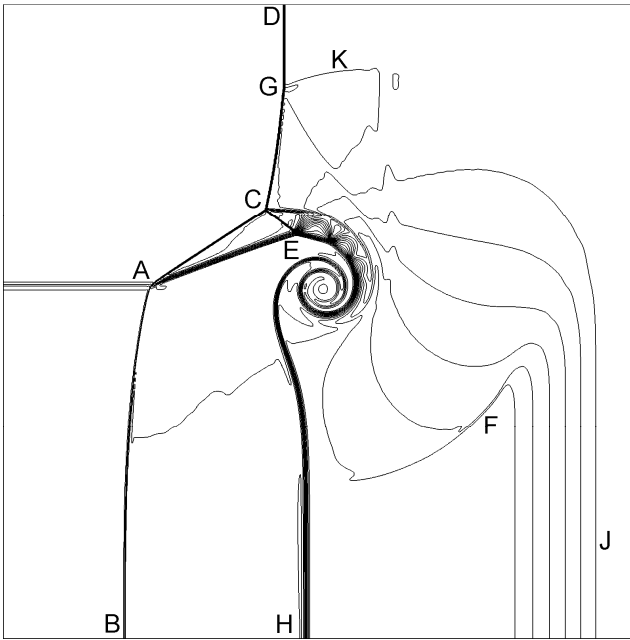


Рис. 2 Нерегулярное преломление скачка на четверти пространства при  $M = 3$ ,  $\omega = 0.3$

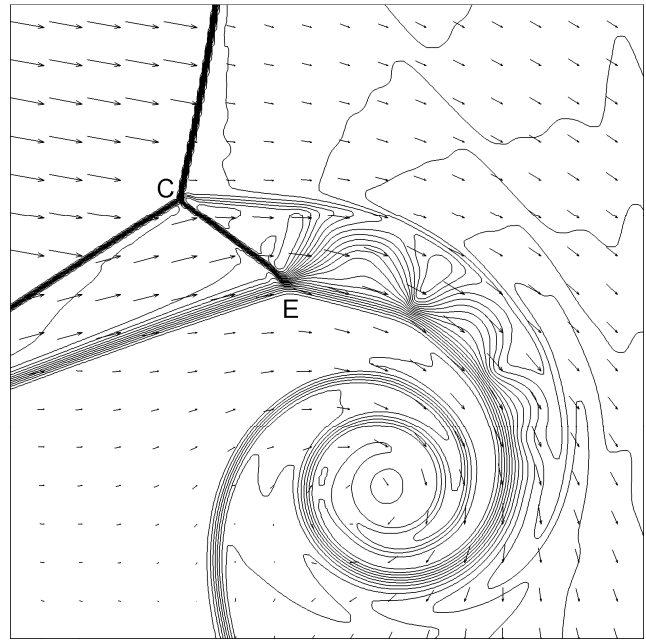


Рис. 3 Структура высоконапорной струи за скачком CE и слоистого вихря

Расчет проведен на значительно более подробной сетке, чем ранее в работах других авторов, что позволило выявить новые элементы течения: формирование струи со сложной структурой и слоистый характер образующегося вихря (рис. 3, система отсчета привязана к точке С). Внутренняя структура струи представляет собой набор нестационарных центрированных волн сжатия-разрежения, замыкающихся на изломах нижнего тангенциального разрыва и отражающихся от верхнего тангенциального разрыва. Струя является высоконапорной: при данных параметрах потеря полного давления газа, прошедшего косые скачки AC и CE, составляет 25%, а газа за прямым скачком D – 67%. Вихрь состоит из перемежающихся слоев газа различной температуры  $T = p/\rho$ : «холодного», поступающего из струи и «горячего», захваченного из области за скачком B. В целом локальное течение является нестационарным аналогом известного режима взаимодействия скачков уплотнения Edney-IV.

Длина и угол наклона косога скачка AC не зависят от  $M$ , и с точностью до 2-3% описывается известной оценочной формулой  $\sin \alpha = \sqrt{\omega}$ , где  $\alpha$  есть угол между отрезком AC и горизонтальным направлением.

В силу отсутствия в постановке задачи линейного масштаба течение является автомодельным: вся ударно-волновая структура линейно расширяется со временем. В расчетах наблюдалась точная автомодельность течения с учетом размывания разрывов на несколько ячеек сетки.

Для дополнительной верификации результатов также проводилось численное моделирование на основе метода С.К. Годунова. Основные характеристики течения – положение и углы наклона главных скачков, параметры газа за ними – отличались менее чем на 1%. В силу более высокого порядка точности, метод Р.В. Маккормака дает более четкие фронты разрывов и волн сжатия-разрежения. При расчете методом С.К. Годунова наблюдался несколько отлич-



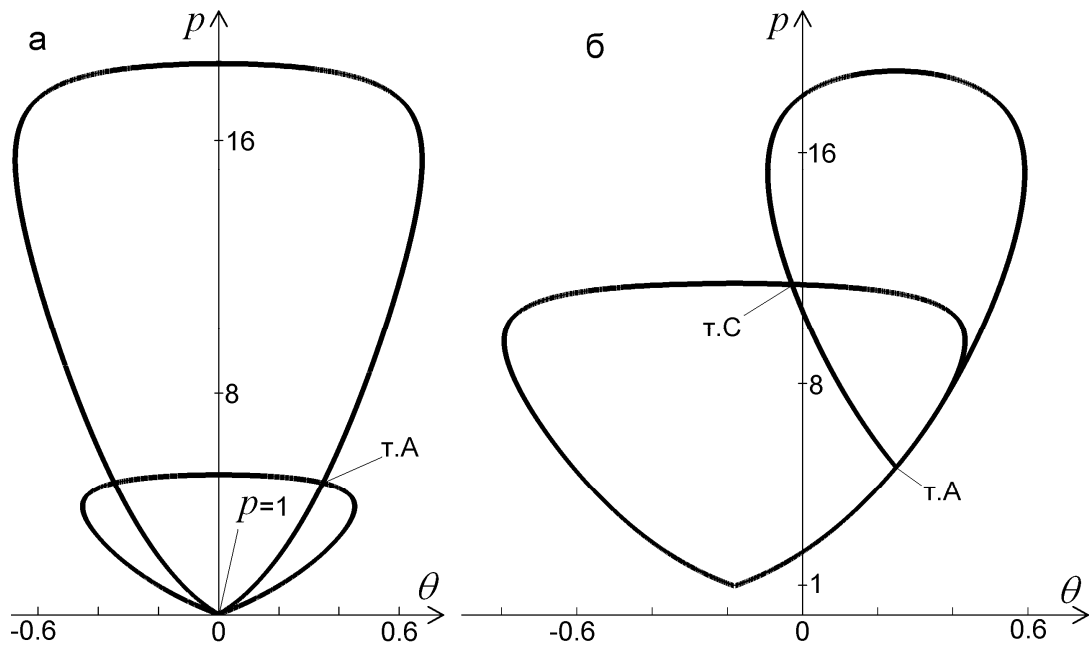


Рис. 4 Ударные поляры для точек А (а) и С (б).

ный режим взаимодействия внутреннего скачка СЕ с наклонным тангенциальным разрывом АЕ за счет существенного размытия последнего.

В §3 дано описание полуаналитического алгоритма оценки основных характеристик течения – углов наклона скачков АС, СЕ и параметров газа за ними – на основе метода ударных поляр (сердцевидных кривых). Первым шагом алгоритма является решение одномерной задачи о распаде разрыва и нахождение скорости распространения скачка В. Одномерная задача сводится к одному алгебраическому уравнению, решение которого может быть найдено простым численным алгоритмом с любой точностью. Считая, что скорость движения точки А равна скорости скачка В, можно построить две ударные поляры в координатах (угол разворота потока  $\theta$ , давление  $p$ ) для точки А (рис.4а). Координаты точки пересечения кривых, описывающие течение в окрестности точки А, также находятся из решения алгебраического уравнения. Состояние газа внутри всего треугольника АСЕ предполагается однородным и совпадающим с состоянием за косым скачком вблизи точки А. Скорость движения тройной точки С вычисляется на основе скорости и угла наклона косого скачка при пренебрежении «поднятием» исходного скачка навстречу косому. Тогда для точки С также возможно построить две поляры (рис. 4б) и по координатам точки пересечения определить состояние газа за внутренним скачком.

Сравнение с результатами численного моделирования для  $M \in (1.5, 2.5)$  и  $\omega \in (0.1, 0.5)$  показало, что данный метод позволяет оценить параметры газа внутри высоконапорной струи за скачком СЕ с точностью до 5-10%. При  $M \geq 2$  предложенный алгоритм также дает более точную оценку (невязка <6%) давления газа в треугольнике АСЕ, чем расчет на основе формулы  $\sin \alpha = \sqrt{\omega}$  (невязка 6-15%).

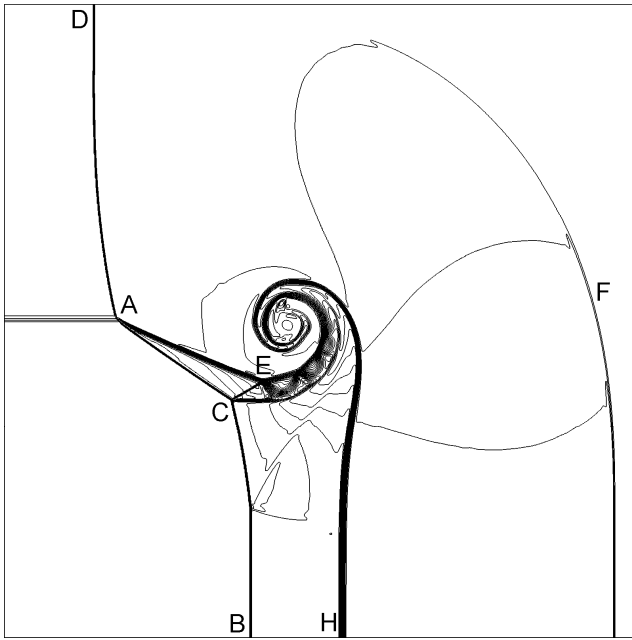


Рис. 5 Нерегулярное преломление скачка на четверти пространства при  $M = 3, \omega = 3$

В §4 описывается нерегулярное преломление скачка уплотнения в случае  $\omega > 1.1$ . На рис. 5 приведены изолинии плотности для  $M = 3, \omega = 3$ . У нижней границы расчетной области имеет место одномерный распад разрыв: влево и вправо распространяются скачки уплотнения В и F, между ними – контактный разрыв Н. В центральной области течения формируется ударно-волновая структура, качественно схожая со случаем  $\omega < 0.8$ : косой скачок АС, соединяющий исходный скачок D и отстающий от него преломленный скачок В, преломленный тангенциальный разрыв АЕ и внутренний скачок СЕ. Внутренняя структура высоконапорной струи также состоит из аналогичных волн сжатия-разрежения. Плотность за внутренним скачком СЕ ( $\rho = 18.2$ ) более чем в  $(\gamma + 1)/(\gamma - 1) = 6$  раз превышает исходную плотность внутри неоднородности ( $\rho = 3$ ). Таким образом, газ приобретает плотность, недостижимую при прохождении через прямой скачок сколь угодно высокой интенсивности. Угол наклона косого скачка АС с точностью до 5% описывается формулой  $\sin \alpha = 1/\sqrt{\omega}$ .

Четвертая глава посвящена решению задачи о преломлении ударной волны на узком слое или цилиндрическом канале газа иной плотности. В §1 дана постановка задачи, описаны регулярные режимы преломления, имеющие место при  $\omega \approx 1$ , и характеризующиеся слабым искривлением фронта исходной волны, а также изменением ширины слоя газа при проникновении за нее. Задача является неавтомодельной в силу присутствия масштаба длины – ширины слоя  $h$  (рис. 1, тип II). Однако ширина слоя определяет лишь масштаб течения времени: один и тот же результат (с точностью до масштаба координат) можно получить, проведя расчет при  $h = h_1$  до момента времени  $t = t_1$  или при  $h = h_2$  до момента времени  $t_2 = t_1 h_2 / h_1$ .

В §2 описан нерегулярный режим преломления скачка в случае легкого газа в слое (канале). Начальная стадия течения качественно совпадает с симметричной парой задач о четверти пространства (рис. 6а, изолинии плотности для плоского случая при  $M = 2, \omega = 0.3, h = 0.1$ ). Формируется «предвестник» – пара косых скачков АС, внутренних скачков СЕ и высоконапорных струй за ними; вблизи плоскости симметрии формируется грибовидная вихревая область. Со временем (или в тот же момент при меньшем значении  $h$ ) встречное течение

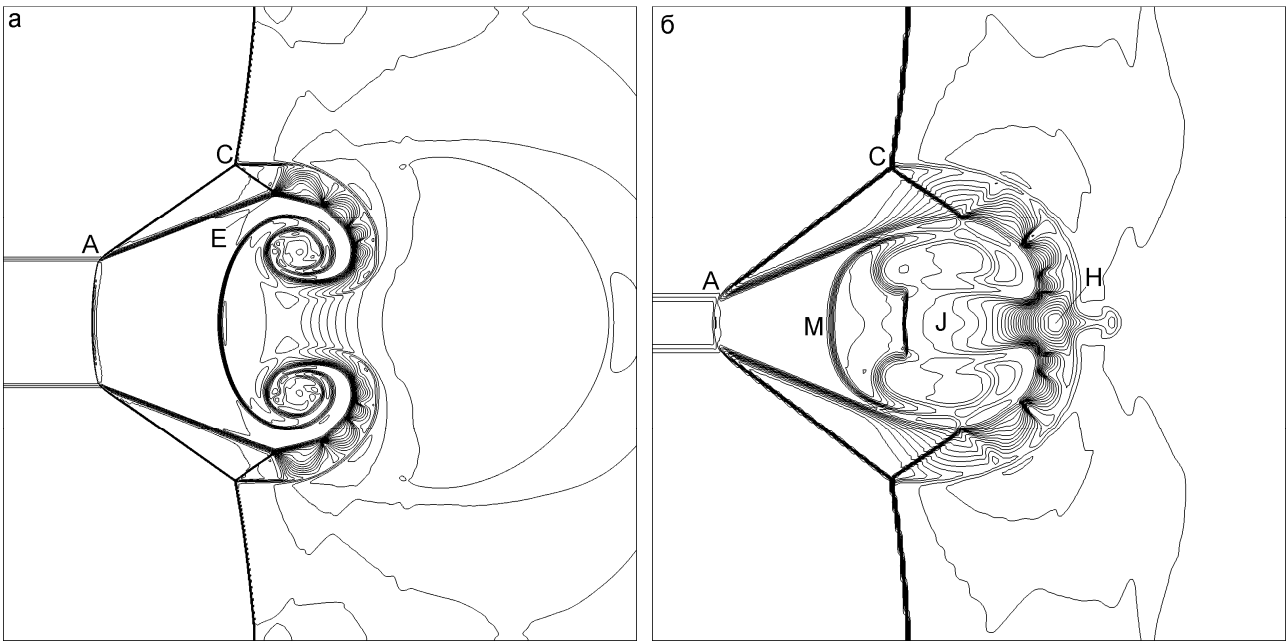


Рис. 6 Нерегулярное преломление скачка на «легком слое» при  $M = 2$ ,  $\omega = 0.3$ , один и тот же момент времени для различных  $h$ : а)  $h = 0.1$ , б)  $h = 0.03$

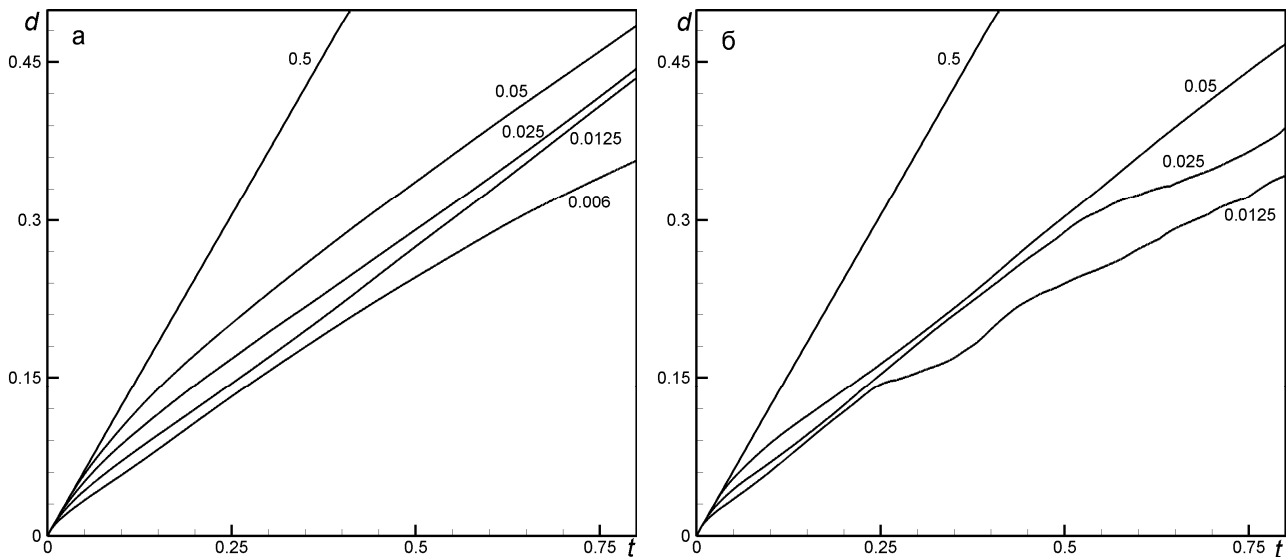


Рис. 7 Зависимость длины  $d$  плоского (а) и цилиндрического (б) предвестника от времени для различных  $h$ .

растущих высоконапорных струй приводит к формированию области повышенного давления и плотности  $H$  (рис. 6б). «Шляпка»  $M$  грибовидной области отрывается и движется навстречу потоку газа за лидирующим скачком. Вслед за ней из области  $H$  направлена струя газа  $J$ . В системе отсчета, связанной с исходным скачком, струя  $J$ , как и высоконапорная струя за скачком  $CE$ , является сверхзвуковой и отделена от «шляпки»  $M$  грибовидной вихревой области скачком уплотнения.

Осесимметричное течение с узким каналом газа пониженной плотности имеет качественно тот же характер, однако эффект кумуляции встречных высоконапорных струй (в данном случае – одной кольцевой струи) проявляется раньше. Область кумуляции устроена несколько иначе: максимальное давление

достигается на оси симметрии, а максимальная плотность – в тороидальной области на некотором расстоянии от оси.

Применение многоуровневых расчетных сеток в настоящей работе позволило провести исследование роста предвестника при малых  $h$  и на больших временных отрезках. На рис. 7 приведена зависимость длины  $d$  (расстояния между лидирующим и исходным скачком) предвестника от времени для различных  $h$ . Прямой линии  $h = 0.5$  соответствует одномерная задача о распаде газодинамического разрыва – бесконечно широкий слой. На некотором отрезке времени скорость распространения лидирующего скачка не зависит от  $h$ , а также совпадает в плоской и осесимметричной задачах; толщина слоя оказывает влияние лишь на время установления скорости.

Однако с течением времени линейный закон движения скачка нарушается (кривые  $h = 0.006$  на рис. 7а,  $h = 0.025, 0.0125$  на рис. 7б), причем в осесимметричном случае данный эффект проявляется раньше. Замедление роста предвестника обусловлено перестройкой течения за его фронтом за счет запираания потока газа за лидирующим скачком при движении и разрушении «шляпки» М и развития сложного локального вихревого течения. При расчете методом С.К. Годунова не наблюдалось неустойчивости тангенциальных разрывов внутри предвестника, однако его рост со временем замедлялся в той же степени.

В §3 дано описание нерегулярного преломления скачка в случае «тяжелого» газа в слое. Обнаружено два качественно различных режима течения в зависимости от параметра  $\omega$ . На рис. 8а приведены изолинии плотности первого режима, реализующегося при  $M = 2, \omega = 2$ . Формируется пара треугольных конфигураций скачков АСЕ и проникающая за скачок струя газа с грибовидной вершиной М. Струя имеет слоистую структуру: скорость газа за косыми скачками СЕ выше, чем в середине струи, за прямым скачком. Газ непосредственно

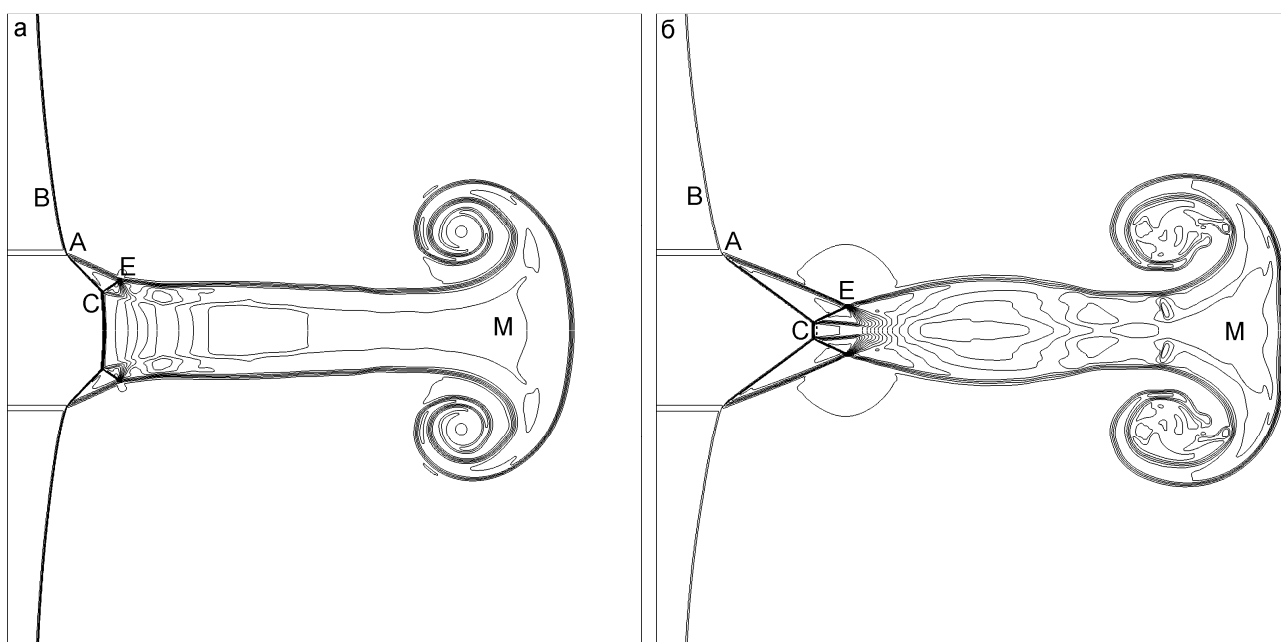


Рис. 8 Нерегулярные режимы преломления ударной волны на «тяжелом слое» при  $M = 2$ : а)  $\omega = 2$  б)  $\omega = 3$ .

за прямым скачком имеет дозвуковую скорость, но ускоряется до сверхзвуковой скорости в волне разрежения. С течением времени структура течения сохраняется: струя проникает все дальше за скачок, сохраняя ширину.

При  $\omega = 3$  формируется иной тип течения с бочкообразной формой струи за скачком (рис. 8б). По мере проникновения струи газа за скачок количество «бочек» в структуре струи растет, формируется локально стационарное течение, являющееся аналогом истечения перерасширенной струи в покоящийся газ. Осесимметричное течение имеет качественно аналогичную структуру.

В **пятой главе** исследуется преломление ударной волны на «газовом клине» повышенной или пониженной плотности. В §1 дана постановка задачи и приведены определяющие параметры задачи:  $M$ ,  $\omega$ ,  $\gamma$ , а также угол наклона  $\alpha$  и угол раствора  $\beta$  клина (рис. 1, тип III). Описаны регулярные режимы преломления для симметричного случая ( $\alpha = 0$ ), характеризующиеся наличием единственной точки сопряжения всех разрывов и прямолинейностью фронтов последних.

В §2 приведены нерегулярные режимы преломления для случая  $\alpha = 0$ ,  $\omega < 1$ . Общим свойством данных режимов является формирование дополнительного скачка уплотнения К и грибовидной вихревой области V (рис. 9, верхняя половина течения, изолинии плотности). В нерегулярном случае лидирующий скачок В сопрягается с исходным скачком D посредством треугольной структуры типа предвестника (на рис.9а не обозначена, см. аналогичную структуру АСЕ на рис. 9б). За скачком К формируется локальная область существенно повышенного давления и плотности ( $p = 12.2$ ,  $\rho = 5.1$ , тогда как за исходным скачком  $p = 4.5$ ,  $\rho = 2.67$ ). Двойное маховское преломление, реализующееся при меньших углах раствора клина, характеризуется образованием двух тройных точек С, G и соединяющей их ножки Маха (рис. 9б). При расчете методом С.К. Годунова нерегулярный режим не обнаруживается в силу размывания исходного контактного разрыва Т, однако картина двойного маховского преломления при расчете различными методами совпадает.

При дальнейшем уменьшении угла  $\beta$  двойной маховский режим сохраняет-

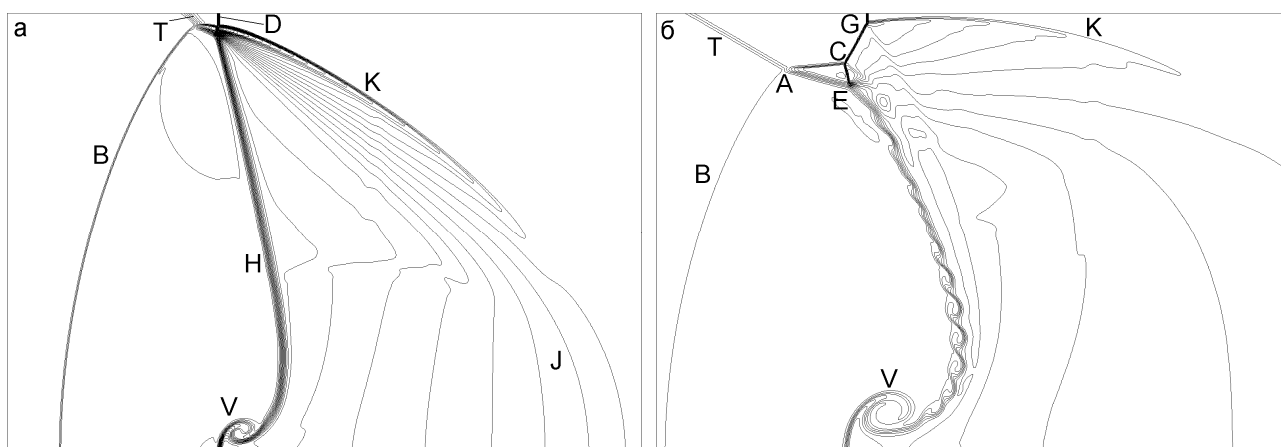


Рис. 9 Преломление скачка на «легком газовом клине» при  $M = 2$ ,  $\omega = 0.3$ ,  $\alpha = 0$ : а) нерегулярный ( $\beta/2 = 45^\circ$ ) и б) двойной маховский ( $\beta/2 = 30^\circ$ ) режимы.

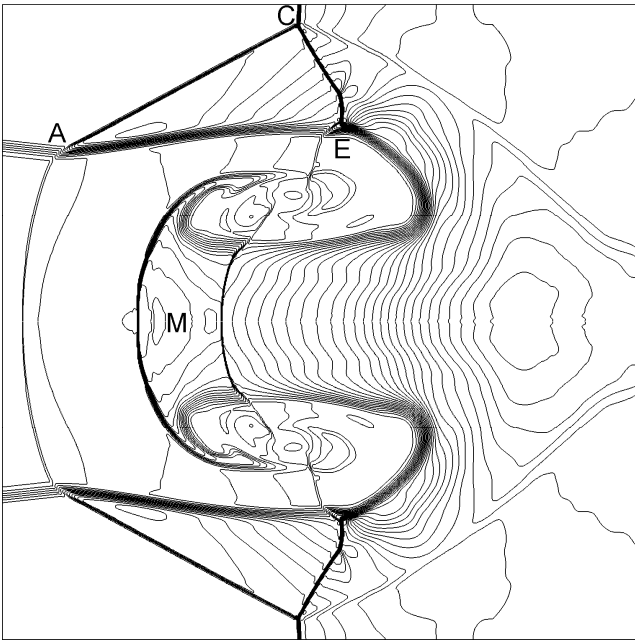


Рис. 10 Узкий клин:  $\beta/2 = 5^\circ$

ся, однако интенсивность скачка К уменьшается до очень малой величины (см. К на рис. 2). В случае очень малого угла раствора клина структура течения (рис. 10) качественно совпадает со структурой предвестника (рис. 6). Имеет место эффект кумуляции встречных высоконапорных струй и отрыв «шляпки» М грибовидной вихревой области, однако запираения потока за лидирующим скачком не происходит в силу автомодельности задачи.

В §3 приведены нерегулярные режимы преломления для случая  $\alpha = 0, \omega > 1$ . В нерегулярном течении

(рис. 11а) исходный D, преломленный В и искривленный отраженный К скачки сопрягаются с тангенциальным разрывом АЕ в точке А; в окрестности вершины клина формируется грибовидная вихревая зона V. Преломленный скачок испытывает маховское отражение от плоскости симметрии: формируется тройная точка С и ножка Маха Н. За ножкой Маха формируется характерное «сопло», причем в отличие от стационарных конфигураций Маха, его ширина уменьшается до нуля по мере удаления от ножки. Данный эффект обусловлен автомодельностью течения: газ из «сопла» не вытекает, а накапливается за счет удлинения и движения ножки Маха навстречу потоку газа. При уменьшении угла раствора клина данный режим преломления сохраняется. При  $\beta \leq 5^\circ$  проявляется аналогия с задачей об узком слое (рис.8б): вблизи плоскости симметрии формируется автомодельно расширяющаяся последовательность «бочкообразных» структур.

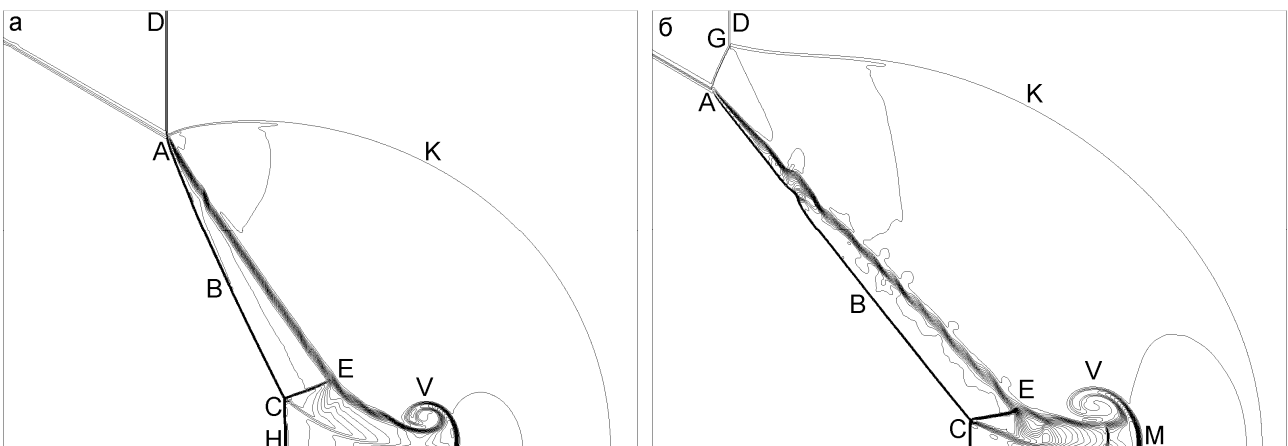


Рис. 11 Режимы преломления скачка на «тяжелом газовом клине» при  $M = 3, \alpha = 0, \beta/2 = 30^\circ$ : а) нерегулярный ( $\omega = 3$ ), б) маховский ( $\omega = 8$ )

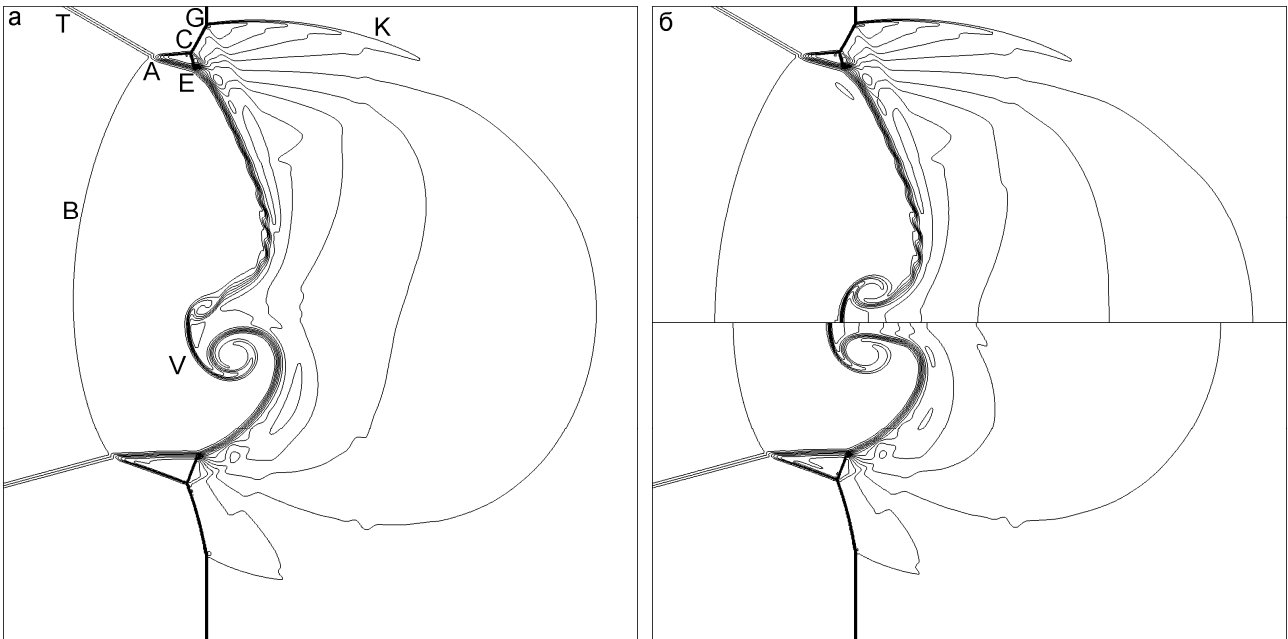


Рис. 12 Несимметричный «легкий клин»: а) единый клин,  $\alpha = 7.5^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ , б) две половины симметричных клиньев  $\beta/2 = 30^\circ$  и  $\beta/2 = 15^\circ$

При  $M = 3$ ,  $\beta/2 = 30^\circ$  и существенно большем отношении плотностей ( $\omega = 8$ ) реализуется маховское преломление скачка (рис. 11б), характеризующееся формированием ножки Маха AG и отрывом «шляпки» M вихревой области.

В §4 рассмотрен случай  $\alpha \neq 0$  – клин под углом наклона. При небольших углах наклона ( $\alpha \leq \beta/2$ ) течение представляет собой некоторое сочетание режимов преломления, наблюдающихся при симметричном расположении клина. На рис. 12а приведен пример для случая  $\alpha = 7.5^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ : в верхней и нижней

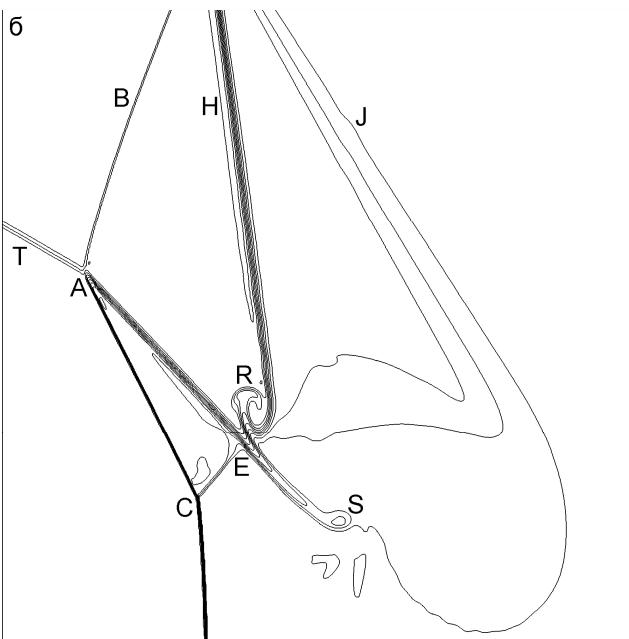


Рис. 13 Узкий клин под большим углом наклона:  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 30^\circ$

областях течения имеет место двойное маховское преломление ударной волны. Для сравнения на рис. 12б приведены две половины симметричных течений при  $\beta/2 = 30^\circ$  и  $\beta/2 = 15^\circ$ . Локальные структуры преломления полностью совпадают, и несимметричность течения существенно проявляется лишь в перекосе грибовидной вихревой области V. При  $\alpha > \beta/2$  формируется особый тип течения, характеризующийся формированием двух проскальзывающих струй газа R и S (рис. 13). В верхней области течения имеет место регулярное преломление: лидирующий скачок B, волна разрежения J и

контактный разрыв Н сопрягаются в одной точке. В нижней области – некоторый аналог структуры предвестника, включающий косой скачок АС, висячий скачок СЕ и тангенциальный разрыв АЕ. Эффект проскальзывания струй выражен тем сильнее, чем больше угол  $\alpha$  и меньше угол  $\beta$ .

**Шестая глава** содержит исследование взаимодействия ударной волны с цилиндрической или эллипсоидальной областью газа иной плотности. В §1 дана постановка задачи, перечислены определяющие параметры задачи:  $M$ ,  $\omega$ ,  $\gamma$  и длины  $a, b$  полуосей сечения неоднородности (рис. 1, тип IV). Описаны регулярные режимы преломления, характеризующиеся сохранением эллиптической формы сечения неоднородности после прохождения ударной волны.

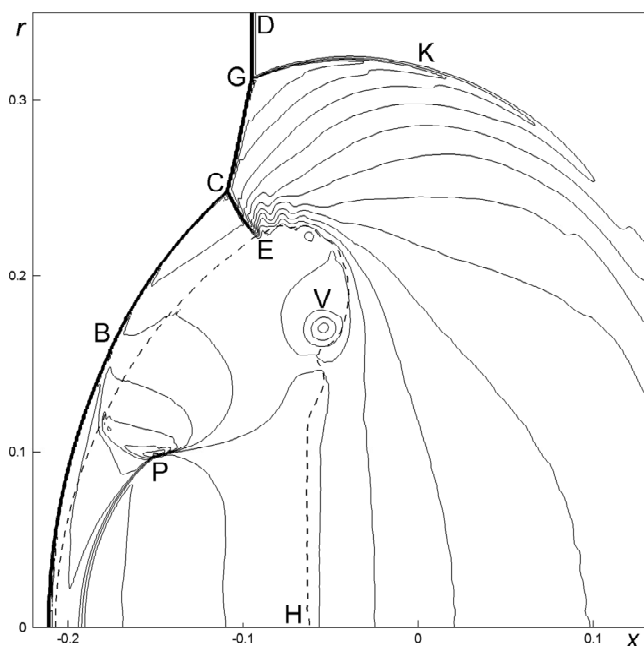


Рис. 14 Нерегулярное преломление скачка на сферическом «легком газовом пузыре»

В §2 описывается нерегулярное течение для случая  $\omega < 1$ . На рис. 14 приведены изолинии давления для осесимметричного случая при  $M = 2$ ,  $\omega = 0.3$ ,  $a = b = 0.2$ . Пунктиром обозначен контактный разрыв – деформированная граница эллипсоида. При прохождении ударной волны через «пузырь» легкого газа на его границе последовательно реализуются регулярное, нерегулярное (рис. 9а) и двойное маховское (рис. 9б) сопряжение разрывов, формируется отраженный скачок К и висячий скачок СЕ, в силу бароклинности образуется кольцевой вихрь V. При выходе преломленного скачка В в покоящийся газ формируется кумулятивный скачок Р, опрокидывающийся и движущийся к оси симметрии.

При постоянных  $M$ ,  $\omega$ , в зависимости от удлинения  $e = a/b$  эллипсоида течение имеет качественно различный характер: кумуляция скачка Р на оси происходит внутри или снаружи деформированного эллипсоида. На рис. 15 приведена зависимость давления и плотности, достигаемых при кумуляции при  $\omega = 0.3$ , от  $e$ . Каждой точке на графике соответствует расчет для конкретной пары параметров  $M, e$ , при котором определялись максимальные параметры газа на оси симметрии за все время расчета. Наиболее интенсивное повышение параметров имеет место, когда кумуляция происходит в окрестности контактного разрыва Н. Величина удлинения, при котором выполняется это условие, зависит от числа Маха:  $e \approx 0.75, 1.0, 1.33$  при  $M = 1.5, 2.0, 3.0$  соответственно.



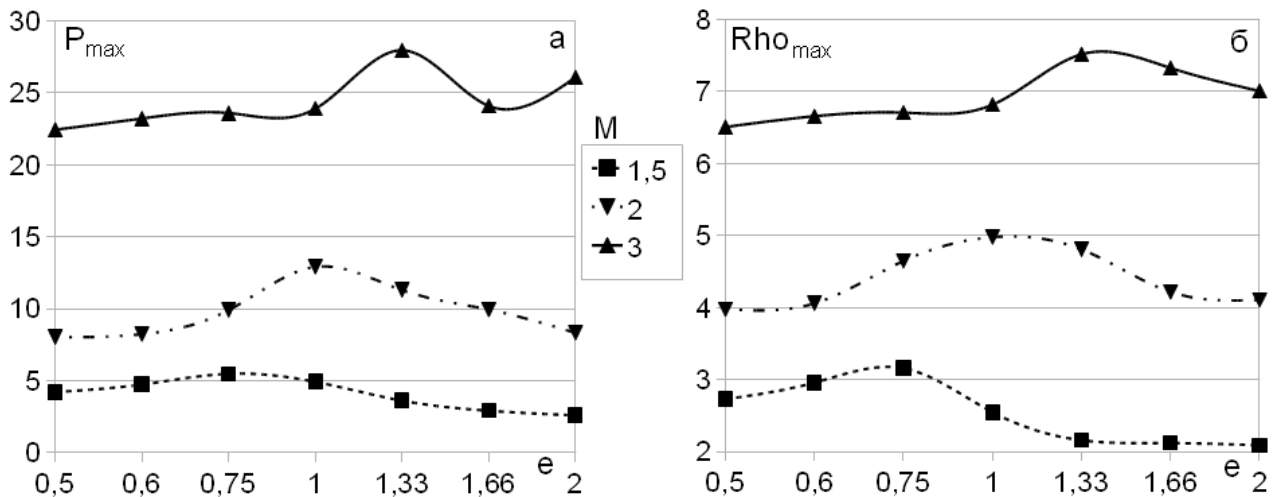


Рис. 15 Зависимость давления (а) и плотности (б) газа, достигаемых при кумуляции, от удлинения эллипсоида при  $M = 1.5, 2.0, 3.0$ ;  $\omega = 0.3$

В плоской постановке задачи течение качественно совпадает с осесимметричным случаем, однако эффект кумуляции выражен существенно слабее.

В §3 описывается нерегулярный случай  $\omega > 1$ . На рис. 16 приведены изолинии давления для осесимметричного случая при  $M = 2$ ,  $\omega = 3$ ,  $a = b = 0.2$ . От границы неоднородности отражается скачок уплотнения К, преломленный скачок В отстает от исходного скачка D, огибающего эллипсоид снаружи; на внешней границе эллипсоида формируется цепочка вихрей V. С течением времени скачок В опрокидывается, и его фронт разбивается на две части тройной точкой С. Аналогичное опрокидывание скачка ВС позднее приводит к формированию второй тройной точки и дополнительного скачка М.

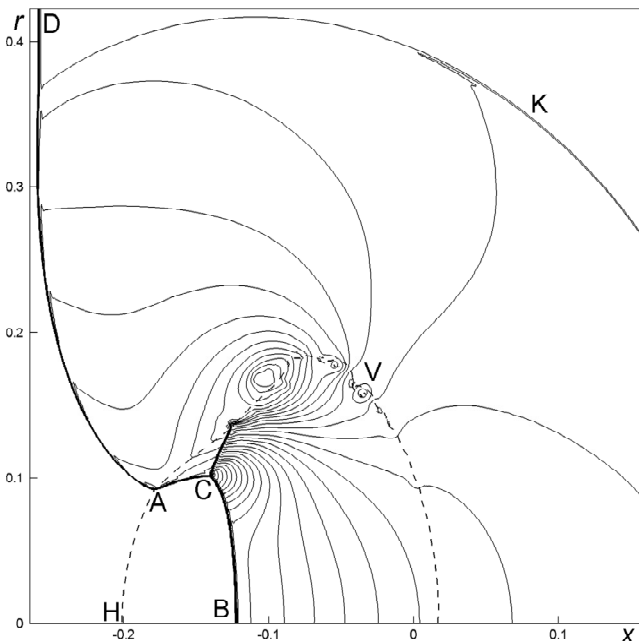


Рис. 16 Нерегулярное преломление скачка на сферическом «тяжелом газовом пузыре»

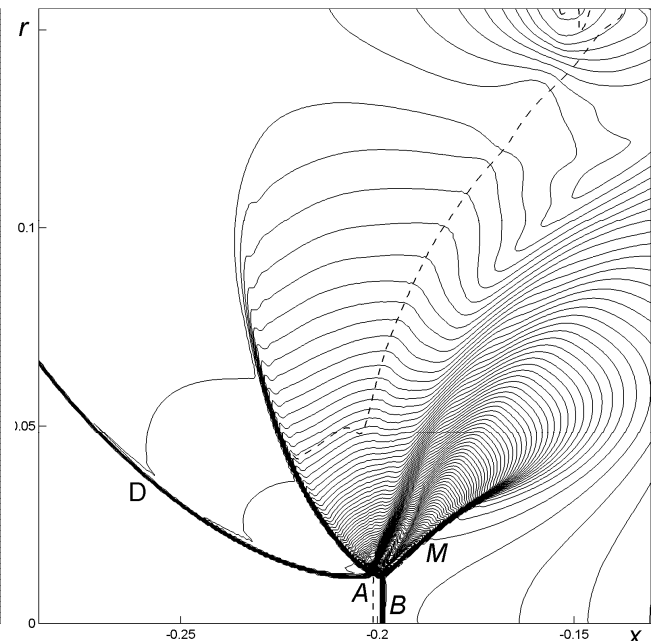


Рис. 17 Переходный режим кумуляции скачков: сферический эллипсоид ( $e = 1$ )

При постоянных  $M, \omega$ , в зависимости от удлинения  $e = a/b$  эллипсоида реализуются различные режимы течения: точка А достигает оси симметрии до или после прохождения скачка В через контактный разрыв Н. При  $e \approx 1$  имеет место переходная кумуляция (рис. 17): сложная конфигурация скачков уплотнения, включающая две сходящиеся тройные точки, достигает оси симметрии в окрестности тангенциального разрыва Н. В случае  $e = 2$  имеет место внутренняя кумуляция: скачки В и АС встречаются внутри деформированного эллипсоида (фиг. 18а, стрелками показано направление движения скачков). При  $e = 0.5$  тройная точка С достигает оси симметрии вне эллипсоида (18б).

На рис. 19 приведена зависимость давления и плотности, достигаемых при кумуляции, от  $e$ . В расчетах наблюдалось существенная зависимость давления

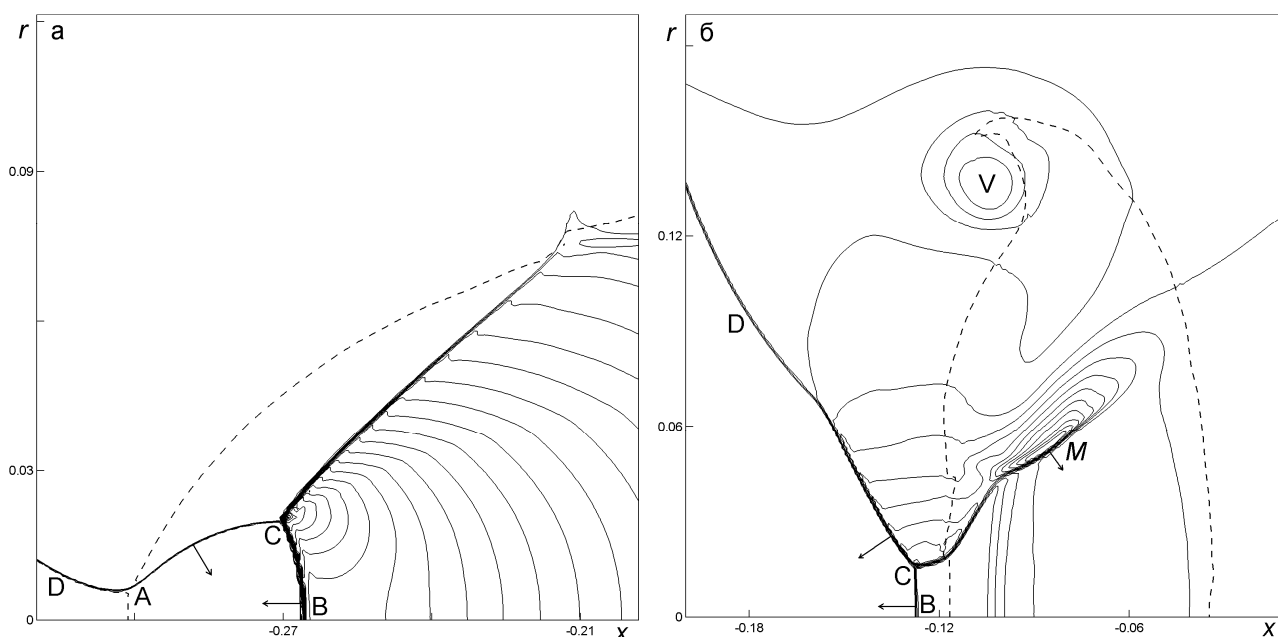


Рис. 18 Режимы кумуляции скачков при  $M = 2$ : а) внутренний (вытянутый эллипсоид,  $e = 2$ ) и б) внешний (сплюснутый эллипсоид,  $e = 0.5$ )

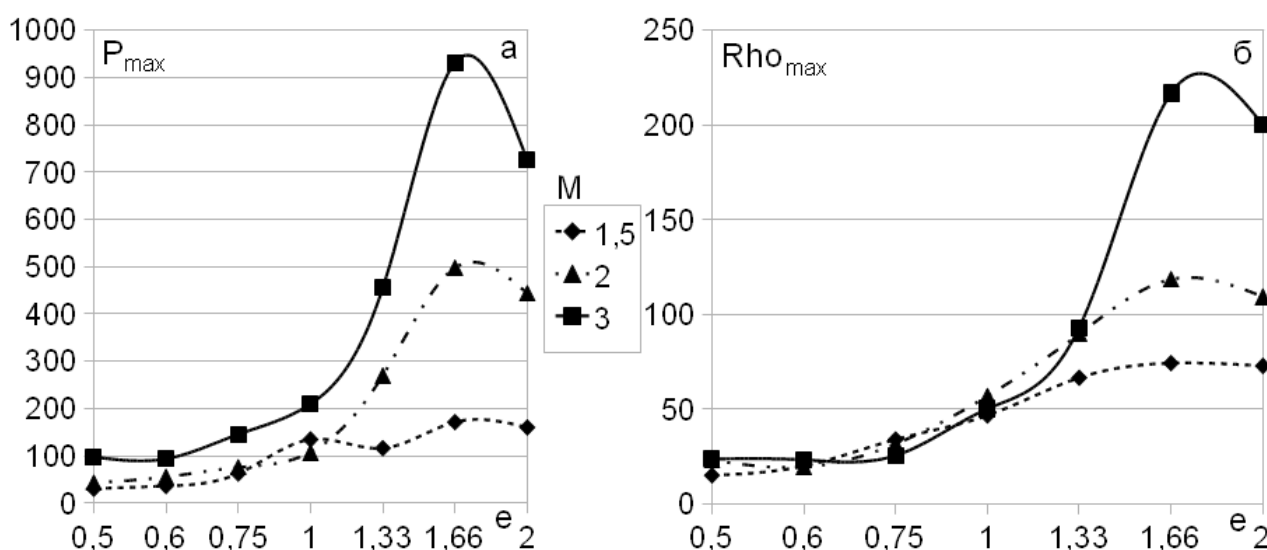


Рис. 19 Зависимость давления (а) и плотности (б), достигаемых при кумуляции от удлинения эллипсоида при  $M = 1.5, 2.0, 3.0$ ;  $\omega = 3$

кумуляции от шага расчетной сетки: при измельчении ячеек получаемое значение давления многократно возрастало. Значение плотности кумуляции возрастало ограниченно. Данный эффект обусловлен сходством локального течения при кумуляции с задачей Гудерлея о сходящейся ударной волне: в момент достижения оси симметрии давление на фронте волны бесконечно, а величина плотности конечна. Можно ожидать, что в расчетах, при дальнейшем измельчении сетки, давление кумуляции будет расти неограниченно. Однако проведение расчетов для различных  $M, e$  на одной и той же сетке позволяет определить качественную зависимость интенсивности кумуляции от удлинения эллипсоида. Для всех рассмотренных чисел Маха  $M$  наиболее интенсивным является внутренний режим кумуляции, имеющий место при  $e \approx 1.66$ . В случае  $M = 1.5, e = 1$  наблюдается второй максимум давления, достигаемый при кумуляции переходного типа.

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование взаимодействия ударной волны с четвертью пространства, занятой газом повышенной или пониженной плотности. Выявлены качественно различные – регулярные и нерегулярные – режимы течения в зависимости от плотности газа внутри неоднородности. Найдены новые элементы ударно-волновой структуры, включающие высоконапорную струю, сформированную чередующимися центрированными волнами сжатия-разрежения, и крупномасштабный слоистый вихрь. Течение в окрестности основания струи является нестационарным аналогом известного режима взаимодействия скачков уплотнения Edney-IV. Проведена внутренняя верификация расчетов с помощью проверки автономности получаемых решений. Предложен «почти аналитический» метод оценки основных параметров течения.
2. Изучено преломление ударной волны на узком слое газа иной плотности. Обнаружено, что «предвестник», формирующийся при пониженной плотности газа в слое, имеет постоянную скорость роста на большом отрезке времени, однако позднее рост замедляется в результате запираания потока во внутреннем течении. В случае слоя газа повышенной плотности найдены качественно различные режимы течения, характеризующиеся формированием сверхзвуковой струи газа постоянной ширины или струи с периодической «бочкообразной» структурой.
3. Проведено исследование взаимодействия ударной волны с «газовым клином» различной плотности и угла раствора. Найдены ряд регулярных, нерегулярных и маховских режимов преломления волны. В случае легкого газового клина очень малого угла раствора отмечена аналогия со структурой предвестника и обнаружено отсутствие эффекта запираания потока. Найдены новые качест-

венные эффекты, имеющие место при преломлении ударной волны на несимметричном газовом клине.

4. Изучено взаимодействие ударной волны с эллипсоидальными и цилиндрическими областями газа иной плотности. Обнаружены новые режимы течения в зависимости от определяющих параметров задачи. Выделены качественно различные режимы кумуляции скачков уплотнения на оси симметрии – внутренние, внешние и пограничные. Определена зависимость максимальных параметров газа, достигаемых при кумуляции скачков уплотнения, от удлинения эллипсоида. Выявлено, что в случае газа пониженной плотности наиболее интенсивным является пограничный режим кумуляции, а в случае повышенной плотности – внутренний режим.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин* Двумерные автомодельные течения порожденные взаимодействием скачка уплотнения с областями газа пониженной плотности // Изв. РАН. МЖГ. 2010. №2. С. 126–134.
2. *П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин* Эффект кумуляции при взаимодействии скачка уплотнения с локальной областью газа повышенной или пониженной плотности // Изв. РАН. МЖГ. 2011. №6. С. 146–154.
3. *Сутырин О.Г.* Газодинамика взаимодействия ударных волн с областями газа пониженной и повышенной плотности // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. №4. Ч.3 – Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. С. 1153–1154.
4. *Сутырин О.Г.* Развитие предвестника при взаимодействии скачков уплотнения с температурными неоднородностями // Труды конференции-конкурса молодых ученых. 8-10 октября 2008 г. / под ред. ак. РАН Г.Г. Черного, проф. В.А. Самсонова. – М.: Изд-во МГУ. 2009. С. 32–39.
5. *Сутырин О.Г.* Двумерные нестационарные течения порожденные взаимодействием скачка уплотнения с областями газа пониженной плотности // Труды конференции-конкурса молодых ученых, 14–16 октября 2009г, под ред. Г.Г. Черного, В.А. Самсонова. – М.: Изд-во МГУ. 2010. С. 292–299
6. *P.Yu. Georgievsky, V.A. Levin, R.R. Gadelev, O.G. Sutyurin* Control of Front Separation Regions for Supersonic Flows over Blunt and Streamlined Bodies by Upstream Energy Deposition // Proc. of the 7th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics / Ed. V.A. Bityrin. M.: JIVTAN, 2007. P. 79–86.
7. *Georgievsky P., Levin V., Sutyurin O.G.* Front Separation Regions Initiated by Upstream Energy Deposition, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA Paper 2008–1355, 10 p.

8. П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин Проблемы устойчивости при формировании «передних» отрывных зон посредством локализованного энерговыклада в набегающий на тело поток // Труды третьей школы-семинара по Магнитоплазменной аэродинамике / Под ред. В.А. Битюрина. Москва, ОИВТ РАН, 2008. С. 115–122.
9. *Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G.* Instability of Front Separation Regions Initiated by Upstream Energy Deposition // International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Proceedings CDROM, Novosibirsk, 2008, 7 p.
10. *Georgievsky P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G.* Formation of Separation Zones During the Interaction of a Shock Wave with Thin Temperature Wake // Proc. 10th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. / Ed. V.A. Bityurin, Moscow, ИИТ RAS, 2011, P. 88–91.
11. *Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G.* Instability of Front Separation Regions Initiated by Upstream Energy Deposition // International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. II / Ed. V.M. Fomin. Novosibirsk: Parallel, 2008, p. 161–162.
12. В.А. Левин, П.Ю. Георгиевский, О.Г. Сутырин Газодинамические структуры, формирующиеся при взаимодействии скачка уплотнения с температурными неоднородностями // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. 16–25 апреля 2009, Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета, 2009. С. 47–48.
13. *P.Yu. Georgievskiy, V.A. Levin, O.G. Sutyurin* Gasdynamic structures of forerunner type for interaction of a shock with temperature inhomogeneities // 27th International Symposium on Shock Waves. Book of Proceedings. 19-24 July 2009. St.-Petersburg, Russia. P. 320.
14. П.Ю. Георгиевский, О.Г. Сутырин Газодинамика распространения ударных волн в газе с неоднородным распределением плотности // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. 16–25 апреля 2010, Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова – М.: Изд-во Московского университета, 2010. С. 59.
15. П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин Газодинамика распространения ударных волн в средах с неоднородным распределением плотности // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. Тезисы докладов. Новосибирск, Институт гидродинамики СО РАН, 2010. С. 202.
16. *P. Georgievskiy, V. Levin, O. Sutyurin* Interaction of a Plane Shock with Density Inhomogeneities // 19th International Shock Interaction Symposium. Book of Proceedings. 2010. CDROM.

17. *П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин* Газодинамика распространения ударных волн по неоднородным средам // Современные проблемы аэрогидродинамики: Тезисы докладов XVI школы-семинара под руководством академика РАН Г.Г.Черного. 6 – 16 сентября 2010 г. Сочи, «Буревестник» МГУ – М.: Изд-во Московского университета, 2010. С. 29
18. *О.Г. Сутырин* Распространение ударных волн в газе с неоднородным распределением температуры // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении». М.: ЦИАМ, 2010. CDROM.