

На правах рукописи



Кравченко Олег Викторович

**УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ОБТЕКАНИЕМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН)

Научный руководитель: **Азарова Ольга Алексеевна**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Бабаков Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, заведующий отделом;

Меньшов Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 23 апреля 2026 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.1.224.02 при ФИЦ ИУ РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 40, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 42, а также на сайте https://www.frccsc.ru/diss-council/00207303/diss/list/kravchenko_ov

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 24.1.224.02,
кандидат физико-математических наук



В.И. Никонов

Общая характеристика работы

Объект исследования и актуальность темы

Объектом исследования диссертации являются механизмы управления высокоскоростными газодинамическими потоками с использованием неоднородных плазменных структур, включая филаментарную плазму и термически стратифицированные источники энергии (ТСИЭ). Основное внимание уделено анализу взаимодействия ударных волн с плазменными структурами, формированию параметров ударного слоя и оптимизации характеристик аэродинамических тел за счет локального энергетического воздействия на поток.

Актуальность темы обусловлена ключевыми задачами современной аэродинамики, включая снижение аэродинамического сопротивления, управление головной ударной волной (ГУВ), подавление шумовых эффектов и стабилизацию течения. При высокоскоростном обтекании аэродинамических тел возникают сложные газодинамические явления, такие как образование ударно-волновых структур, отрыв пограничного слоя и возникновение вихревых структур, которые оказывают существенное воздействие на аэродинамические характеристики летательных аппаратов. Решение этих проблем требует разработки эффективных методов активного управления потоком.

Исследования, представленные в работе, направлены на изучение воздействия ТСИЭ как перспективного инструмента для управления высокоскоростными потоками. Рассмотрено влияние ТСИЭ на движущуюся первоначально плоскую ударную волну. Экспериментальные и численные исследования показали, что фронт ударной волны ослабляется или даже исчезает при взаимодействии с термически стратифицированной средой. Важное место занимает изучение воздействия ТСИЭ, расположенного перед аэродинамическим телом, на конфигурацию потока. Наличие ТСИЭ вызывает локальный стратифицированный нагрев газа, изменяя его параметры в плазменной области, что сопровождается формированием вихревых структур и неустойчивостей в области воздействия, изменением подъёмных сил и сил сопротивления аэродинамического тела, а также изменением числа Маха потока. Также широко исследуется проблема снижения шума (Sonic Boom Problem), что важно для развития высокоскоростной гражданской авиации.

Актуальность темы диссертации подтверждается современными исследованиями, в которых продемонстрирована возможность управления аэродинамическими характеристиками модели и параметрами ГУВ в высокоскоростном потоке за счёт локального энергетического воздействия на поток. Результаты исследования имеют практическое значение для установления принципов использования ТСИЭ как инструментов воздействия на силы сопротивления и подъёмные (опрокидывающие) силы, а также на

аэродинамические характеристики модели при разработке современных немеханических систем управления высокоскоростным потоком/полетом.

Цель диссертационной работы

Цель диссертационной работы состоит в исследовании влияния термически стратифицированного энерговклада в область набегающего потока перед головной ударной волной (ГУВ). Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Модификация программного комплекса «FlowView» для численного моделирования движения вязкого теплопроводного совершенного газа на основе системы уравнений Навье – Стокса за счет введения ограничителей потоков, обеспечивающих стабильность расчетов при числах Маха ударной волны $M_{yB} \geq 6$, а также автоматизация задания параметров термически стратифицированных источников энергии (ТСИЭ).
2. Моделирование экспериментальных результатов по взаимодействию плоской ударной волны с ТСИЭ, включая искривление фронта ударной волны и существенное размытие фронта, а также изучение нелинейных газодинамических эффектов, таких как множественное проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Параметрическое исследование влияния температурных характеристик слоев ТСИЭ на динамику ударной волны и распределение энергии в газовом потоке при числах Маха ударной волны $M_{yB} = 5 \div 12$. Получение оценок эффективности воздействия ТСИЭ на ударную волну.
3. Разработка метода цифровой визуализации границ ТСИЭ на основе экспериментальных шпирен-изображений, позволяющего идентифицировать грибовидные структуры и вихревые образования, связанные с воздействием ТСИЭ и проводить моделирование с учетом его реальных границ.
4. Установление принципов управления ГУВ, параметрами торможения аэродинамического тела, а также аэродинамическими силами (фронтальным сопротивлением, подъемными (опрокидывающими) силами) за счет изменения температурного профиля в ТСИЭ. Исследование влияния использования ТСИЭ на воспринимаемую громкость в децибелах на поверхности земли.

Научная новизна

Работа вносит следующий научный вклад:

1. Проведена модификация программного комплекса «FlowView»: введены программные модули для описания ограничителей потоков и автоматизации задания ТСИЭ, которые расширили область применимости алгоритма при числах Маха ударной волны $M_{yB} \geq 6$.
2. Исследованы нелинейные эффекты при взаимодействии ТСИЭ с ударной волной: получено объяснение экспериментальных результатов по искривлению и размытию ударной волны. Впервые показано, что стратифицированные источники вызывают перераспределение кинетической и внутренней энергии,

формируя локальные горячие области с энергиями, в несколько раз превышающими значения для однородного источника. Получены оценки эффективности воздействия ТСИЭ на ударную волну.

3. Разработан метод цифровой визуализации границ ТСИЭ, позволивший проводить моделирование с использованием границ ТСИЭ, соответствующих эксперименту, в также получить парные грибовидные структуры, связанные общим вихрем.

4. Для числа Маха набегающего потока $M_\infty=2$ и изменении относительных температур слоёв в диапазоне $1\div 3$ сформулированы принципы управления аэродинамическими характеристиками тела, силой фронтального сопротивления и подъёмными силами, а также головной ударной волной за счёт варьирования температурного профиля в ТСИЭ.

5. Впервые проведены оценки влияния использования ТСИЭ на воспринимаемую громкость в децибелах на поверхности земли на основе параметрического волнового метода Томаса и алгоритма расчета Стивенса Марк VII. Для чисел Маха набегающего потока $M_\infty=1.5$; 2 получено, что использование ТСИЭ в целях управления высокоскоростным потоком/полетом не сопровождается увеличением звукового воздействия на поверхность.

Научная и практическая значимость

Научная значимость данного диссертационного исследования заключается в проведении анализа механизмов взаимодействия термически стратифицированных источников энергии (ТСИЭ) с ударными волнами и аэродинамическим телом в условиях высокоскоростного обтекания. Проведенные исследования вносят вклад в развитие знаний в области высокоскоростной аэродинамики и методов управления потоком с использованием плазменных областей, включая изучение проявления неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и процессов перераспределения энергии в газодинамических структурах. Полученные результаты позволяют уточнить существующие теоретические модели, а также разработать научные основы для управления газодинамическими процессами посредством локального стратифицированного энергетического воздействия на поток.

Практическая ценность исследования заключается в усовершенствовании программного комплекса «FlowView» на основе комплексно-консервативных разностных схем для обеспечения моделирования высокоскоростных потоков. Помимо этого, подходы к управлению ГУВ и аэродинамическими характеристиками тела (фронтальным сопротивлением и подъёмными силами) за счет локального воздействия ТСИЭ могут найти применение при разработке систем активного управления высокоскоростным потоком/полетом. Исследование температурных режимов в горячих областях, образующихся за фронтом ударной волны, позволяет уточнить прогноз термомеханических

воздействий на конструкции высокоскоростных моделей, повышая их надежность. Полученные в работе результаты вносят вклад в решение задач высокоскоростного управления потоком и обеспечивают предпосылки для создания энергоэффективных и безопасных аэрокосмических систем и компонентов их активного управления.

Методы исследования и степень достоверности результатов

В диссертационном исследовании применялись численные методы и модели, основанные на фундаментальных физических законах. Сеточная сходимость решений для всех рассмотренных задач проверялась путем сравнения результатов на нескольких сетках с различной дискретизацией. Проверка достоверности моделей проводилась с помощью тестирования на задачах с известными точными решениями, а также путем сопоставления с экспериментальными данными и расчетами других авторов. Во всех случаях наблюдалась согласованность результатов, что подтверждает корректность применяемых методов и подходов и придает уверенность в достоверности полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствование программного комплекса «FlowView» для численного моделирования движения вязкого теплопроводного совершенного газа на основе системы уравнений Навье – Стокса за счет введения программных модулей на основе ограничителей потоков, обеспечивающих стабильность расчетов при числах Маха ударной волны $M_{yB} \geq 6$, а также модуля для автоматизации задания параметров ТСИЭ.
2. Результаты моделирования известных экспериментов по воздействию стратифицированного источника энергии на плоскую ударную волну. Получение для чисел Маха ударной волны $M_{yB} = 2 \div 5$ режимов взаимодействия, характеризующихся искривлением фронта ударной волны, а также режимов с полным размытием ее фронта за счет множественного проявления неустойчивости Рихтмайера — Мешкова. Получение для чисел Маха ударной волны $M_{yB} = 5 \div 12$ перераспределения энергии под воздействием ТСИЭ с образованием горячих областей, значения потенциальной и кинетической энергии в которых превышают в несколько раз соответствующие значения для однородного источника. Получение оценок эффективности использования ТСИЭ для воздействия на ударную волну.
3. Разработка метода цифровой визуализации границ ТСИЭ с использованием экспериментальных шпирен-изображений потока, позволившего провести моделирование с использованием границ ТСИЭ, соответствующих эксперименту, а также получить парные грибовидные структуры, связанные общим вихрем.

4. Разработка принципов управления головной ударной волной и аэродинамическими характеристиками тела с помощью ТСИЭ за счет изменения температуры в его слоях при числах Маха набегающего потока $M_\infty=1.5$; 2. Доказательство того, что для рассмотренных конфигураций потока использование ТСИЭ для управления потоком не сопровождается увеличением уровня шума на поверхности земли.

Личный вклад автора

Все результаты, приведенные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично при научном руководстве доктора физико-математических наук Азаровой Ольги Алексеевны. Вклад автора в результаты, изложенные в работах [1-9], заключался в следующем. Написание 50% текста обзора в [1]; подготовка данных, расчет прохождения сигнала через атмосферу по методу Томаса и расчет уровня воспринимаемой громкости на поверхности земли с использованием алгоритма Стивенса Mark VII в [2]; проведение параметрических расчетов по перераспределению различных типов энергии в зависимости от параметра разрежения и числа Маха ударной волны, разработка алгоритма автоматического задания стратифицированного источника энергии в [3]; участие в проведении расчетов по управлению потоком с помощью изменения температурного профиля в источнике энергии, визуализация и анализ результатов, разработка автоматического задания стратифицированного источника энергии в [4]; разработка метода цифровой обработки экспериментальных результатов, проведение расчетов, визуализация и анализ результатов в [5]; проведение параметрических расчетов для разных чисел Маха ударной волны и параметра разрежения, разработка алгоритма введения ограничителя потоков в [6]; проведение расчетов динамики параметров торможения, силы сопротивления и средней температуры на фронтальной поверхности тела в [7]; проведение расчетов динамики максимальных значений различных типов энергии, визуализация и анализ результатов, разработка алгоритма автоматического задания стратифицированного источника энергии в [8]; участие в проведении расчетов, визуализация и анализ результатов, связанных с множественным проявлением неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, разработка алгоритма автоматического задания стратифицированного источника энергии в [9].

Апробация работы

Результаты работы прошли апробацию на российских и международных конференциях:

1. VI Международная конференция «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования» (СКТеММ'25), 15 – 19 июля 2025 г.
2. Международная конференция «Оптические методы исследования потоков

- (ОМИП-2025)», Москва, 30 июня – 4 июля 2025 г.
3. International Conference on Computational Modeling and Applied Mathematics, Chinese-Russian conference «Differential Equations and Applications» (СМАМ 2024 & DEA), Dalian, 2 – 4 august, 2024.
 4. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 21-25 августа, 2023г.
 5. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2023), Москва, 28 – 31 марта 2023г.
 6. Всероссийский научный симпозиум по проблемам аэромеханики и газовой динамики, посвящённый 100-летию со дня рождения академика Горимира Горимировича Чёрного, Москва, 23 – 24 января, 2023г.
 7. International Conference on Physics and its Applications (Physics-2023), Los Angeles, CA, July 17 – 20, 2023.
 8. 1-ая Международная научно-техническая конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения», Москва, 29 августа – 2 сентября, 2022г.
 9. Международная конференция «Авиационное моторостроение» ICAM2020, Москва, 18 – 21 мая 2021г.
 10. 16-ая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва, 28 июня – 2 июля, 2021г.
 11. 19th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (IWMPA2020), Москва, 15 –17 сентября, 2020г.
 12. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 1 – 4 July 2019, Madrid, Spain

Публикации

Основные результаты по теме диссертации были опубликованы в 9 работах, включенных в список ВАК и/или входящих в международные базы цитирования (Scopus и/или Web of Science). Четыре работы опубликованы в журналах, входящих в первый или второй квартили международных баз цитирования Scopus и/или Web of Science. Список работ по теме диссертации приведен в конце введения.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 133 страницы, включая 64 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 141 наименование.

Содержание работы

Во **Введении** рассматривается объект исследования, обосновывается актуальность работы, формулируются цели, задачи и положения, выносимые на защиту, обсуждается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований. Помимо этого, анализируются методы исследования и степень достоверности результатов, подчеркивается факт личного получения автором представленных результатов. Представлена апробация работы, перечислены публикации автора по теме диссертации, а также дана информация об объеме и структуре диссертации.

Глава 1 посвящена обзору литературы в области управления высокоскоростными потоками. Подчеркивается значительный прогресс в гражданской авиации за последние 60 лет, обусловленный развитием широкого спектра авиационных технологий и методов компьютерного моделирования. Непрерывные достижения в аэродинамике, разработке инженерных конструкций и материалов, авионике и конструировании двигателей обеспечили техническую базу для разработки множества летательных аппаратов различных типов.

Рынок гражданской авиации всегда стремился к созданию высокоскоростного пассажирского транспортного средства для сокращения времени в пути. Первым экспериментальным высокоскоростным самолетом был Bell X-1 (1946 г.), который вобрал в себя весь объем знаний о газовой динамике на тот момент. В коммерческом воздухоплавании было создано два сверхзвуковых самолета, Ту-144 (1968 – 1997 гг.) и Конкорд (1969 – ноябрь 2003 г.), совершивших успешные полеты. С 2003 года эксплуатация сверхзвуковых пассажирских самолетов затормозилась, однако создание эффективного и доступного высокоскоростного транспорта остается актуальной задачей. При ее решении возникает множество проблем, таких как создание немеханических систем управления, снижение звуковой нагрузки, уменьшение аэродинамического сопротивления и нагрева, а также повышение устойчивости полета.

Одной из основных проблем управления высокоскоростными объектами является повышение скорости отклика системы на сигнал управления. С этой точки зрения немеханическое (плазменное) управление высокоскоростными потоками имеет преимущество перед механическим управлением: отклик системы при плазменном управлении составляет десятки – сотни микросекунд. В высокоскоростных потоках возникает значительное аэродинамическое сопротивление и, как следствие, нагрев передней части корпуса из-за образования сильной головной ударной волны перед обтекаемым телом. Снижение силы сопротивления и уменьшение нагрева высокоскоростного аппарата является одним из важнейших требований к конструкции летательного аппарата. При пониженном значении сопротивления потребность в мощности

силовой установки меньше, аппарат преодолевает большие расстояния, имеет большую грузоподъемность и потребляет относительно меньше топлива, помимо этого, снижение аэродинамического нагрева обеспечивает лучшую защиту головной части корпуса. Уменьшение сопротивления и аэродинамического нагрева одновременно является интенсивной областью исследований в настоящее время и может быть достигнуто изменением структуры потока и воздействием на ГУВ.

Глава 1 включает следующие разделы. В **разделе 1.1** даётся введение, и приводится классификация механизмов воздействия на силу сопротивления, и тепловой нагрев. В **разделе 1.2** анализируются обзорные статьи, посвященные использованию различных источников энергии для аэродинамических приложений, таких как искровые разряды, микроволновые и лазерные импульсы, а также плазменные актуаторы. В **разделе 1.3** рассматриваются основные идеи в области управления высокоскоростными потоками, включая теоретические обоснования и экспериментальные исследования. В **разделе 1.4** изучается проблема взаимодействия ударных волн и головных ударных волн с неоднородными плазменными структурами (филаментарной плазмой) и их влияния на аэродинамические характеристики модели. В **разделе 1.5** рассматривается контроль взаимодействия ударной волны с источниками энергии, представляющими собой неоднородные плазменные структуры, образованными газовыми разрядами различных типов. В **разделе 1.6** обсуждаются экспериментальные методы получения и моделирования пространственно-многокомпонентных плазменных структур, таких как локализованный двойной и многократный микроволновый разряд в воздухе, микроволновое излучение, получаемое за счет филаментации ультракоротких лазерных импульсов высокой интенсивности в атмосфере, и наносекундные поверхностные диэлектрические барьерные разряды. В **разделе 1.7** рассматриваются методы управления потоком с использованием комбинированных физических явлений, таких как плазмогазодинамическое, электрогазодинамическое и магнитогидродинамическое воздействие. В **разделе 1.8** обсуждаются численные модели управления высокоскоростными потоками с помощью термически стратифицированных плазменных структур, включая их влияние на формирование головной ударной волны и аэродинамические характеристики обтекаемого тела.

Глава 2 посвящена рассматриваемой математической модели для течений вязкого теплопроводного газа (воздуха) при наличии локального энерговклада.

В **разделе 2.1** приводится вывод безразмерных уравнений Навье-Стокса для вязкого теплопроводного совершенного газа в дивергентном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F + F_v)}{\partial x} + \frac{\partial(G + G_v)}{\partial y} = 0, \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{U} &= \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ u(E + p) \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ v(E + p) \end{pmatrix}, \\
\mathbf{F}_v &= - \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{4}{3} u_x - \frac{2}{3} v_y \right) \\ \frac{\mu}{\text{Re}} (v_x + u_y) \\ \frac{\mu}{\text{Re}} \pi_1 + \frac{1}{\text{N}} k T_x \end{pmatrix}, \mathbf{G}_v = - \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\mu}{\text{Re}} (v_x + u_y) \\ \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{4}{3} v_y - \frac{2}{3} u_x \right) \\ \frac{\mu}{\text{Re}} \pi_2 + \frac{1}{\text{N}} k T_y \end{pmatrix}, \\
\pi_1 &= u \left(\frac{4}{3} u_x - \frac{2}{3} v_y \right) + v (v_x + u_y), \\
\pi_2 &= v \left(\frac{4}{3} v_y - \frac{2}{3} u_x \right) + u (v_x + u_y), \\
E &= \rho \left(\varepsilon + 0.5 (u^2 + v^2) \right), \text{N} = \text{RePr} \frac{\gamma - 1}{\gamma},
\end{aligned}$$

где Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля, N – число Нуссельта. Использовалось уравнение состояния совершенного газа

$$\varepsilon = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}.$$

Здесь ρ, p, u, v – плотность газа, давление и x - и y - компоненты скорости, ε – удельная внутренняя энергия, $\gamma=1.4$. Для аппроксимации зависимости динамической вязкости μ от температуры использовался закон Сазерленда

$$\mu = T^{1.5} \frac{1 + s_1}{T + s_1},$$

с константой $s_1=0.41$ (120К). Полагалось, что коэффициент теплопроводности k зависит от температуры, $k=T^{0.5}$.

В разделе 2.2 изложено описание разностной схемы, используемой для численного решения уравнений Навье – Стокса. Приводится рассматриваемый шаблон для построения консервативной разностной схемы, получаемой интегрированием методом [16]. Второй порядок точности по пространству и по времени достигается учётом информации о пространственных производных. Далее в разделе рассматривается TVD (Total Variation Diminishing) вариант лимитера, предотвращающего появление нефизических осцилляций в областях с большими градиентами решения параметров и обеспечивающий монотонность

численного решения. Реализация лимитера основана на классической функции $\min\text{mod}$,

$$\min\text{mod}(a,b,c) = \begin{cases} \text{sign}(a) \cdot \min(|a|, |b|, |c|), & \text{если } \text{sign}(a) = \text{sign}(b) = \text{sign}(c), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

а предложенный лимитер применяется избирательно только в областях с существенными градиентами согласно условию

$$\left| \frac{f_n(i,j) - f_{n-1}(i,j)}{f_{n-1}(i,j)} \right| > q,$$

где f – рассматриваемое поле плотности, скорости, давления или энергии, индексы $n-1$, n относятся к предыдущему и текущему шагам по времени, а величина q контролирует относительные изменения решения. Данный лимитер применялся в расчетах задач, рассмотренных в диссертации.

В разделе 2.3 приводятся постановки исследуемых задач. Первой рассматривается задача о взаимодействии ударной волны с термически стратифицированным источником энергии (ТСИЭ). Вторая задача, это задача о воздействии ТСИЭ на обтекание аэродинамического тела. Заключительная третья задача, это задача о влиянии ТСИЭ на уровень шума на поверхности земли (проблема «звукового удара» или Sonic Boom problem).

В разделе 2.4 приводится описание используемого программного комплекса FlowView [17] для численного решения системы уравнений Навье – Стокса, описывающей движение вязкого теплопроводного газа.

В разделе 2.5 рассматриваются вопросы верификации используемого программного комплекса в рамках решения задач, поставленных в диссертации, включая тестовые задачи, такие как распад произвольного разрыва, анализ пограничного слоя, приводится сравнение с экспериментальными данными и расчетами других авторов в задаче обтекания сферы и исследуется сеточная сходимость, которая также в дальнейшем проверяется отдельно для каждой задачи.

В разделе 2.6 приводятся выводы к главе 2.

В третьей главе проводится исследование воздействия термически стратифицированной плазменной области на плоскую ударную волну.

В разделе 3.1 представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных взаимодействию первоначально плоской ударной волны с локальной стратифицированной областью плазмы, формируемой под воздействием ионизационной неустойчивости. Полученные данные служат основой для последующего численного моделирования и анализа динамики изучаемого процесса.

В разделе 3.2 приводится формулировка задачи. Ударная волна с числом

Маха $M_{yB}=4.98$ набегают на стратифицированный источник, и взаимодействуют с ним. Задача решается в плоской постановке.

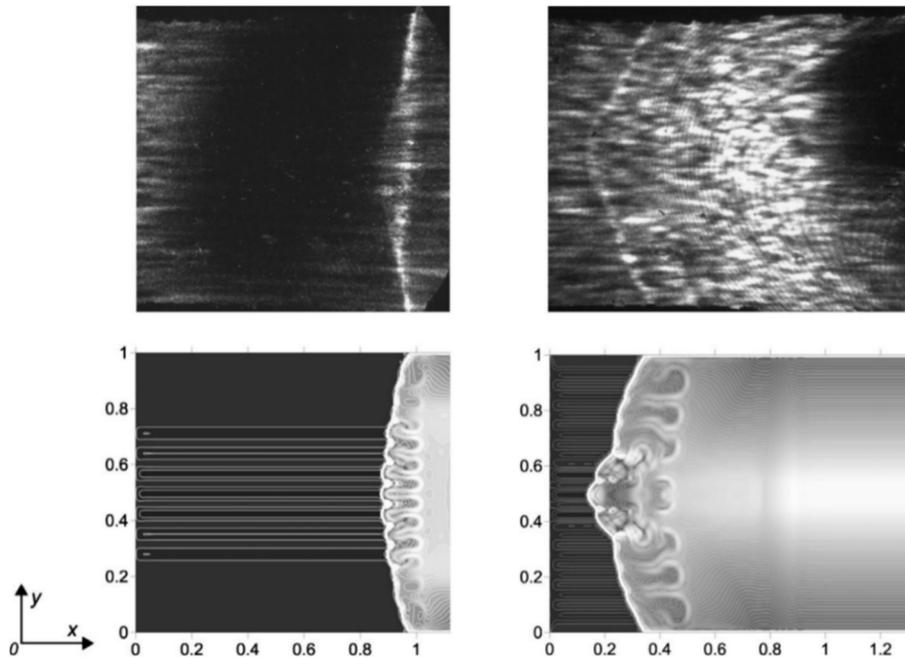


Рис. 1. Прохождение плоской ударной волны через область ионизационной неустойчивости, эксперимент (верхний ряд); соответствующие расчеты, плотность (изохоры) (нижний ряд)

В разделе 3.3 исследуется взаимодействие плоской ударной волны с термически стратифицированной плазменной областью. На рис. 1 представлен сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов численного моделирования, отражающий особенности распространения плоской ударной волны через область ионизационной неустойчивости плазмы и последующую деформацию фронта волны. Показано, что результаты моделирования для источника с $N=7$ слоями удовлетворительно согласуются с экспериментальными шпирен-изображениями. Полученные расчёты позволяют качественно представить динамику положения и формы фронта ударной волны и формирование неоднородностей, обусловленных ее взаимодействием с ионизационно стратифицированной средой.

В экспериментах на шпирен-изображениях был зафиксирован режим практически полного размытия фронтов ударной волны и контактного разрыва при их взаимодействии с областью стратифицированного источника энергии. Указанный режим воспроизводится в численном моделировании при числе Маха ударной волны $M_{yB}=2$, показателе адиабаты в плазменной области $\gamma=1.2$ и параметрах разрежения в слоях источника $\alpha_i=0.3$. Этот режим связан с развитием множественных сдвиговых неустойчивостей типа неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, приводящих к формированию ячеистой структуры области фронта ударной волны и потере выраженной формы фронта в поле плотности.

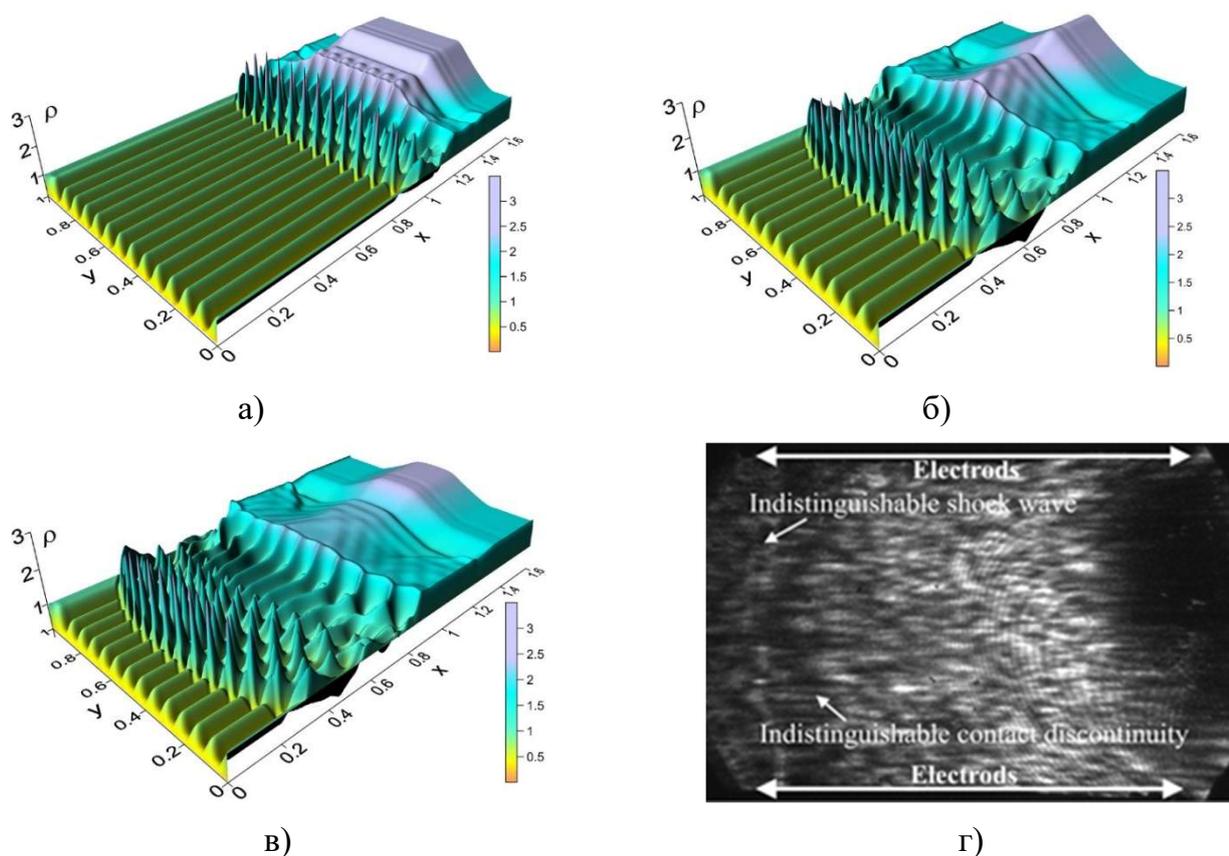


Рис. 2. Размытие фронта ударной волны в результате множественного проявления неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, поле плотности при $M_{UV}=2$, $\gamma=1.2$, $\alpha_i=0.3$; расчет: а) $t=0.216$; б) $t=0.39$; в) $t = 0.448$; г) эксперимент: $t = 0.448$.

Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными, включая наблюдения размытия ударной волны при её взаимодействии со стратифицированной областью, сформированной ионизационными стратами (рис. 2).

В разделе 3.4 исследуется перераспределение энергии при взаимодействии ударной волны с термически стратифицированной областью. Сравнительный анализ полей внутренней и объёмной кинетической энергии для стратифицированного и однородного источников энергии при одинаковой полной энергии показывает, что за фронтом ударной волны в случае стратифицированного источника формируются локальные области повышенной энергии по сравнению с однородным источником. Максимальные значения внутренней энергии в таких областях для $M_{UV}=5$ превышают соответствующие значения для однородного источника примерно в 2 раза, а объёмной кинетической энергии, более чем в 3 раза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие ТСИЭ сопровождается более выраженной пространственной неоднородностью энергетического

распределения за ударной волной (рис. 3а, 3б).

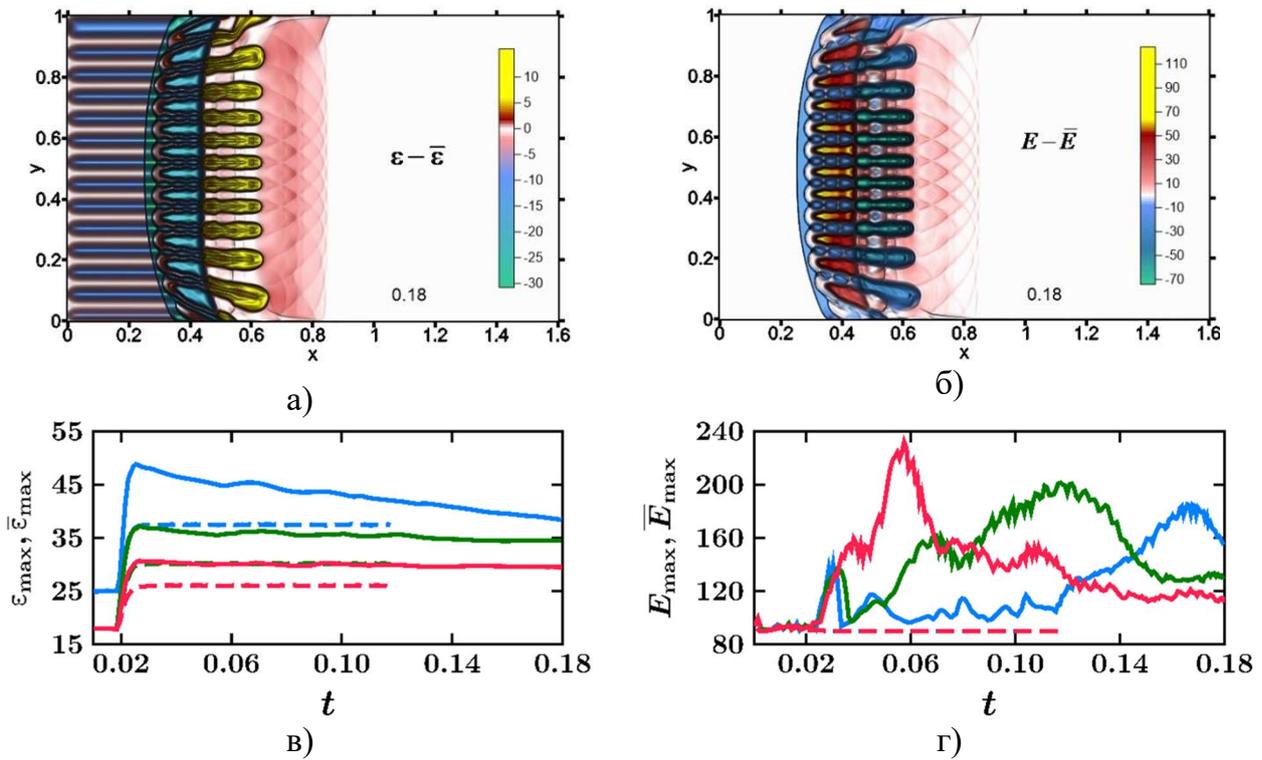


Рис. 3. Разности между полями, создаваемыми стратифицированным и однородным источниками энергии, $M_{UV}=5$ все $\alpha_i=0.2$: а) ε_{\max} , б) E_{\max} ; динамика в) ε_{\max} и г) E_{\max} во время взаимодействия для $M_{UV}=5$: $\alpha_s = 0.2$ (синяя кривая), $\alpha_s = 0.3$ (зеленая кривая), $\alpha_s = 0.4$ (красная кривая), штриховые линии показывают динамику соответствующих параметров для однородного источника

На рис. 3в, 3г представлена динамика абсолютных максимальных значений внутренней $\varepsilon_{\max}(t)$ и кинетической энергии $E_{\max}(t)$ для стратифицированного источника энергии и соответствующие зависимости для нестратифицированного источника при различных α_i . Показано, что при уменьшении α_i рост ε_{\max} усиливается, и при $\alpha_i = 0.2$ максимальное значение внутренней энергии для стратифицированного источника превышает соответствующее значение для нестратифицированного в 1.32 раза, тогда как динамика $E_{\max}(t)$ носит более сложный осциллирующий характер, связанный с многократным развитием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, и при $\alpha_i = 0.4$ сопровождается превышением максимального значения кинетической энергии в ~ 2.5 раза.

Моделирование экспериментально наблюдаемого искривления фронта ударной волны достигается за счёт формирования более нагретых центральных слоёв в стратифицированном источнике энергии; при этом сравнение полей при $t = 0.18$ показывает локальное превышение внутренней энергии ε за фронтом ударной волны в ~ 3 раза и кинетической энергии E в ~ 1.5 раза по сравнению с

нестратифицированным источником, что связано с более быстрой адвекцией теплового возмущения при воздействии ТСИЭ.

Полученные результаты указывают на то, что при больших числах Маха ударной волны и малых параметрах разрежения в слоях источника проявляются эффекты, связанные с перераспределением энергии между слоями. Для стратифицированного источника с более широкими слоями наблюдается развитие неустойчивостей Рихтмайера-Мешкова, сопровождающееся формированием грибовидных структур (рис. 4а).

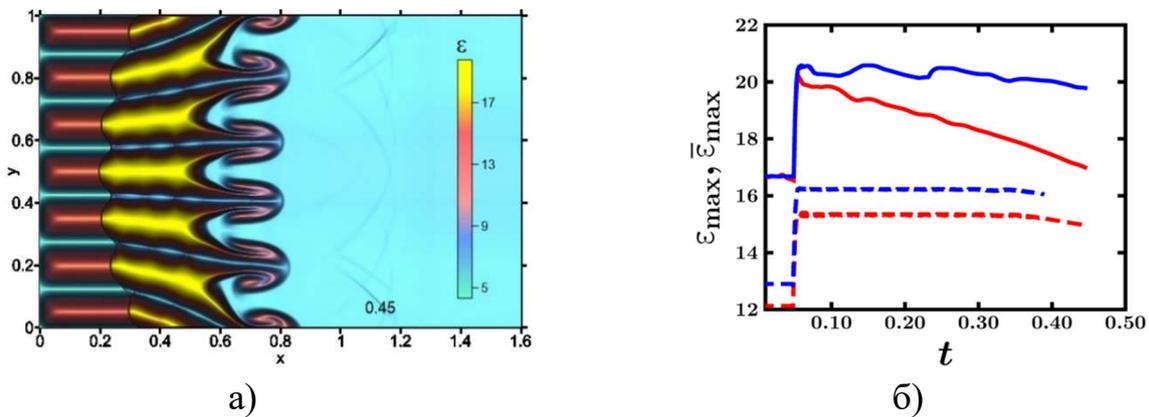


Рис. 4. а) Проявление неустойчивостей Рихтмайера–Мешкова в случае более широких слоев $M_{ув}=2$, все $\alpha_i=0.3$; б) Динамика максимального значения внутренней энергии для стратифицированного источника (красная кривая – узкие слои, синяя кривая - широкие слои), штриховые линии показывают динамику соответствующих параметров для однородного источника

Анализ динамики максимальных значений внутренней энергии $\varepsilon_{\max}(t)$ (рис. 4б) показывает, что для широких слоёв ε_{\max} после прохождения ударной волны понижается на 5–7%, тогда как для узких слоёв снижение ε_{\max} составляет до 15–20%. Для нестратифицированного источника значения $\bar{\varepsilon}_{\max}$ остаются существенно ниже и слабо изменяются во времени. Менее интенсивное уменьшение ε_{\max} для широких слоёв связано с ослабленным влиянием теплопроводности вследствие меньшего количества высоких пространственных градиентов термодинамических величин.

Рассмотрены зависимости максимальных значений относительных приращений внутренней энергии $\max(\Delta\varepsilon/\bar{\varepsilon})$ и кинетической энергии $\max(\Delta E/\bar{E})$ в случае действия стратифицированного источника от числа Маха и параметра разрежения в слоях $\alpha_i=\alpha$ при числе Рейнольдса $Re=5000$. Соответствующие зависимости для момента времени $t=0.216$ приведены на рис. 5. Показано, зависимости $\max(\Delta\varepsilon/\bar{\varepsilon})$ и $\max(\Delta E/\bar{E})$ убывают с ростом α . При этом зависимости от числа Маха ударной волны имеют, в основном, возрастающий характер.

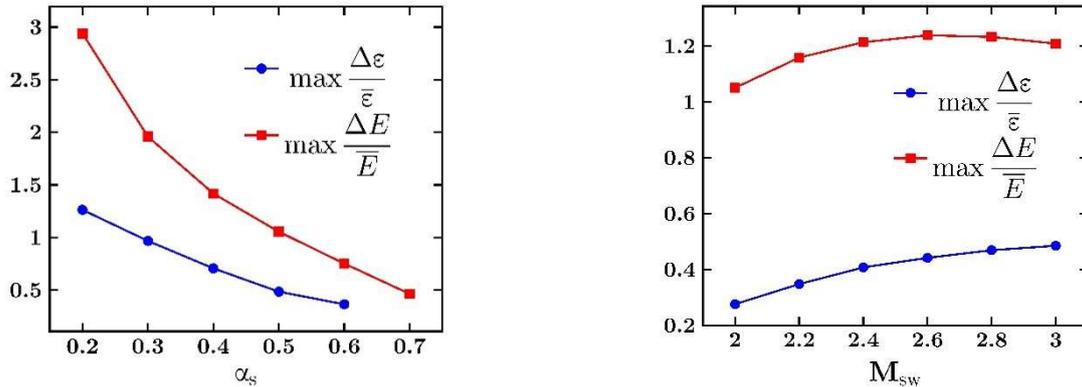
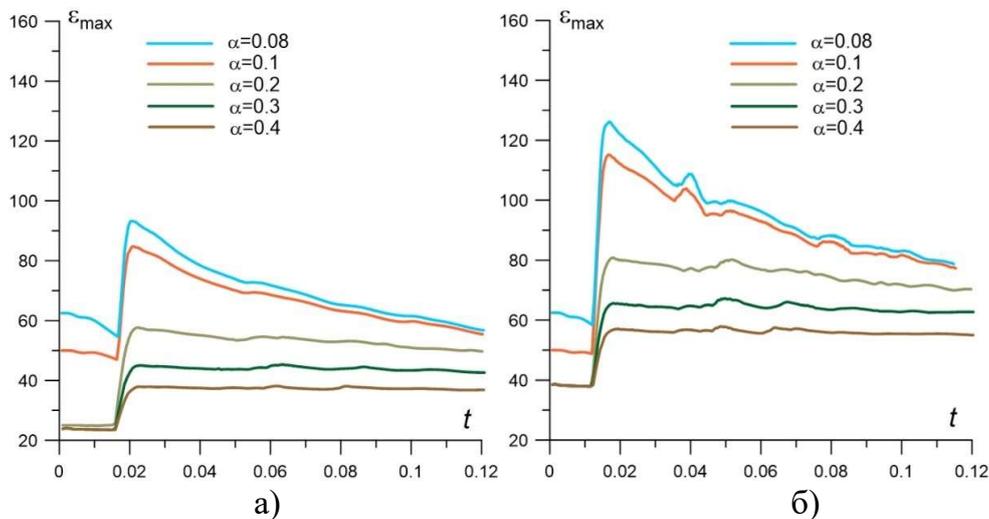


Рис. 5. Зависимости относительных приращений внутренней и кинетической энергии а) от α при $M_{UV} = 3$, б) от M_{UV} при $\alpha = 0.5$

Динамика максимального значения внутренней энергии ε_{\max} , определяемого как наибольшее локальное значение по пространству в области формирующейся ударно-волновой структуры с неустойчивостями, приведена на рис. 6 для различных параметров разрежения α и чисел Маха ударной волны. Указанная величина характеризует максимальное локальное увеличение внутренней энергии, обусловленное воздействием ТСИЭ, и далее рассматривается в относительном виде $\varepsilon_{\max} / \varepsilon_{\max,0}$. Показано, что зависимости $\varepsilon_{\max}(t)$ имеют выраженные максимумы на начальной стадии взаимодействия; при этом для $\alpha = 0.08$ максимальные относительные значения $\varepsilon_{\max} / \varepsilon_{\max,0}$ составляют 2.7 (рис. 6а) и 2.1 (рис. 6б), тогда как для $\alpha = 0.4$ рост существенно слабее и не превышает 1.4 (рис. 6а, 6б). Увеличение амплитуды ε_{\max} при уменьшении α и росте M_{UV} указывает на усиление локальных флуктуаций внутренней энергии, и температуры газа в потоке, а максимальный локальный эффект наблюдается при $\alpha = 0.08$ и $M_{UV} = 12$.



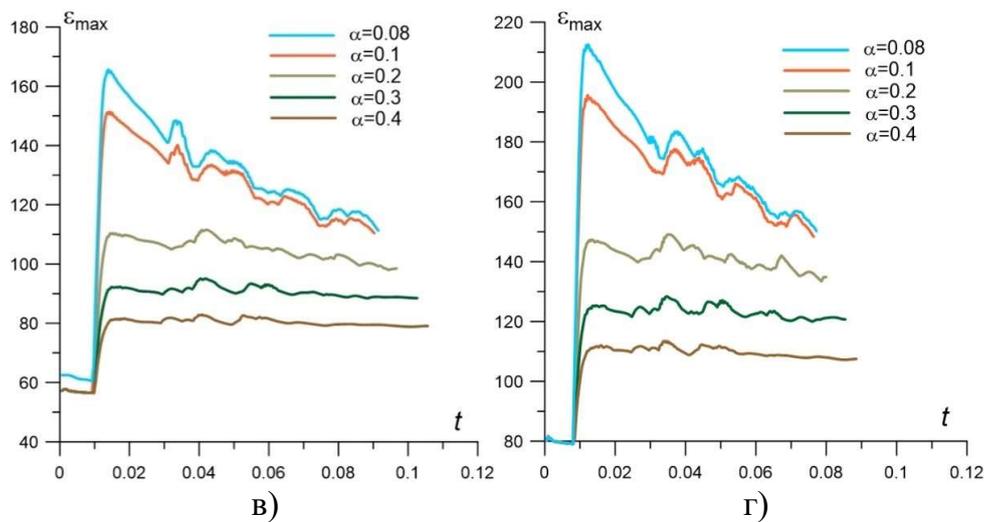


Рис. 6. Динамика ε_{\max} для различных α и а) $M_{УВ} = 6$, б) $M_{УВ} = 8$, в) $M_{УВ}=10$, г) $M_{УВ}=12$

Эффективность воздействия термически стратифицированного источника энергии на внутреннюю и кинетическую энергии характеризуется безразмерными коэффициентами η_ε и η_E , определяемыми как

$$\eta_\varepsilon = \frac{\max_t \varepsilon_{\max} - \varepsilon_h}{\varepsilon_h}, \quad \eta_E = \frac{\max_t E_{\max} - E_h}{E_h},$$

где ε_h и E_h – значения соответствующих величин в области между ударной волной и контактным разрывом. Зависимости η_ε и η_E от параметра разрежения α для рассматриваемых чисел Маха ударной волны $M_{УВ}$ приведены на рис. 7. Показано, что относительное увеличение локальных максимумов внутренней энергии возрастает при уменьшении α и $M_{УВ}$ и достигает значений порядка $\eta_\varepsilon \approx 0.29$ при $M_{УВ}=6$ и $\alpha = 0.1$.

Для кинетической энергии соответствующий эффект выражен существенно сильнее: при тех же параметрах величина η_E возрастает примерно в 8.3 раза, при этом её значение в большей степени определяется температурой слоёв источника энергии, чем числом Маха ударной волны. Различия в поведении η_ε для $M_{УВ}=6$ и $M_{УВ}=8 \div 10$ связаны с различным пространственным положением максимума ε_{\max} в формирующихся ударно-волновых конфигурациях.

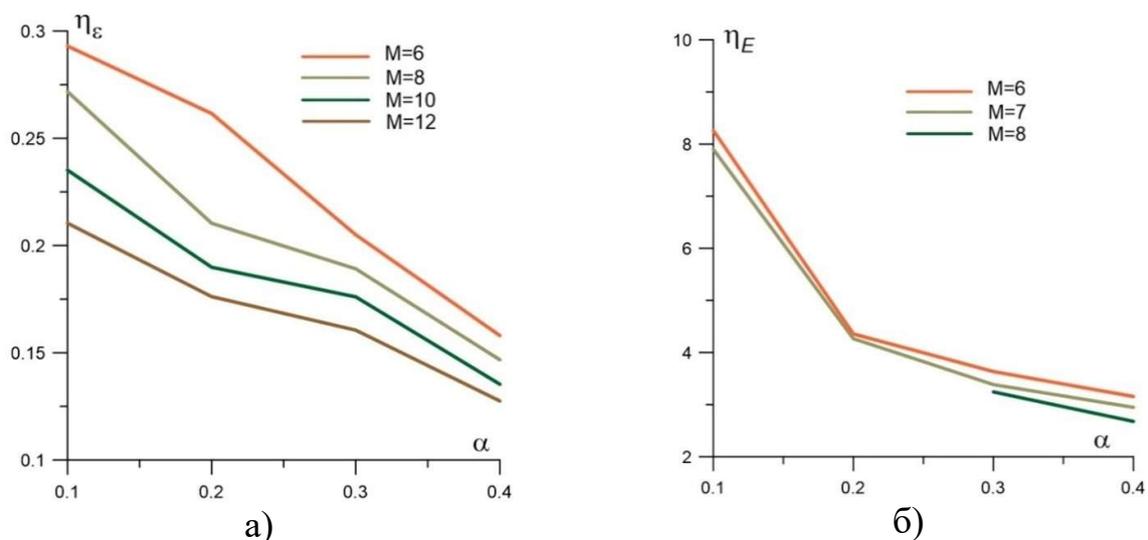
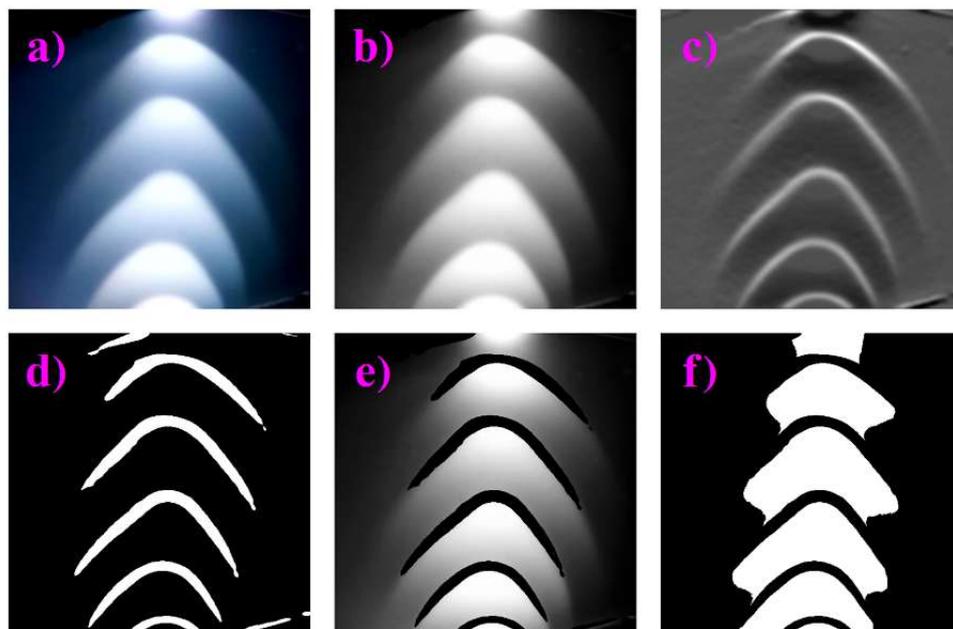


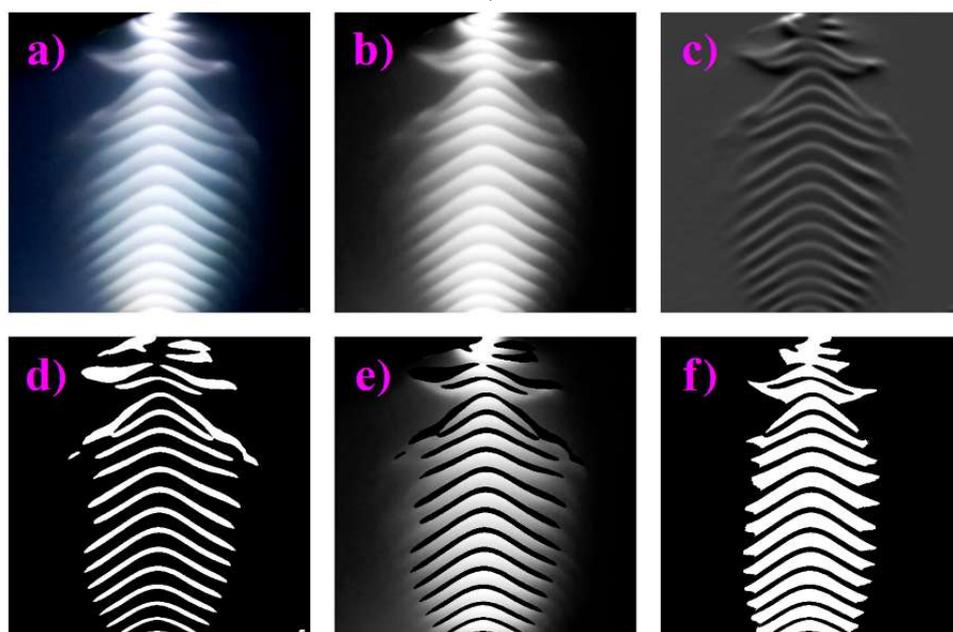
Рис. 7. Зависимость эффективности воздействия стратифицированного источника от α при различных $M_{ув}$: а) для ε , б) для E

В разделе 3.5 рассматривается моделирование распространения ударной волны через область ионизационной неустойчивости на основе цифровой обработки данных. Процесс обработки включает формирование входного изображения в формате RGB (красно-зелено-синий), фильтрация по Гауссу, формирование изображения в оттенках серого; получение изображения с теневой графикой (шпирено-подобное) и изображения с бинарными слоями для получения составного изображения, которое используется для вывода слоев маски (бинарного изображения маски) (рис. 8). Анализ результатов численных расчетов на основе уравнений Навье-Стокса, полученных с использованием бинарных масок, показывает, что в области взаимодействия ударной волны с асимметрично расположенным стратифицированным источником энергии за деформированным фронтом ударной волны зарождаются вихревые структуры (грибовидные структуры), характерные для развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. В частности, на рис. 9 наблюдается образование парных грибовидных структур, возникающих вследствие близкого расположения левой и правой границ слоёв источника энергии и их совместного взаимодействия с фронтом ударной волны. Формирование таких сопряжённых вихревых структур указывает на сложный характер нелинейного взаимодействия ударной волны с асимметричной стратифицированной средой и, по имеющимся данным, ранее в литературе не описывалось.

В разделе 3.6 приводятся выводы к главе 3.



a)



б)

Рис. 8. Процесс обработки экспериментальных шликрен-картин ионизационной неустойчивости: а) крупномасштабные страты; б) мелкомасштабные страты

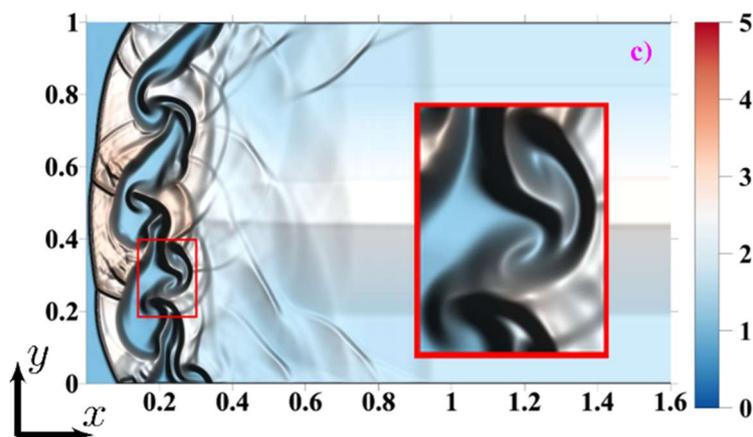


Рис. 9. Парная грибовидная структура, полученная при взаимодействии ТСИЭ с ударной волной, $t=0.4$

В **четвертой главе** проводится численное исследование воздействия ТСИЭ на высокоскоростное обтекание тела.

В **разделе 4.1** приводится постановка задачи и методология её решения.

В **разделе 4.2** исследуется влияние ТСИЭ на головную ударную волну (ГУВ) и аэродинамические характеристики тела. Динамика взаимодействия ТСИЭ с ударным слоем, формируемым телом типа «двойной клин – пластина» в сверхзвуковом потоке при $M_\infty=2$, представлена на рис. 10. Во всех слоях источника параметр разрежения принимался одинаковым и равным $\alpha_i = 0.3$. В области источника энергии наблюдается бифуркация ударной волны с формированием трёхударной конфигурации и фронта предвестника, характерного для задач с локализованным внешним протяженным энерговыделением. На начальной стадии взаимодействия в полях плотности газа фиксируется проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, после чего формируются вихревые (грибовидные) структуры, взаимодействующие с лобовой поверхностью тела. Получено, что воздействие многовихревой структуры на обтекаемое тело сопровождается значительным преобразованием потока внутри ударного слоя, а также изменением характеристик аэродинамического тела.

Сравнение с воздействием однородного источника показывает, что при небольшом различии в динамике давления и силе сопротивления клиновидной поверхности разница температур на вершине клина значительна, и температура в случае стратифицированного источника энергии на 78% ниже, чем в случае однородного (относительно температуры торможения при отсутствии источника). При этом максимум средней температуры на поверхности двойного клина на всем временном интервале для стратифицированного источника меньше этого значения для однородного источника в 1.5 раза. Таким образом, результаты расчётов показали, что применение ТСИЭ (по сравнению с однородным

источником), несмотря на небольшие потери в снижении силы сопротивления, дает несомненную выгоду с точки зрения понижения средней температуры газа на поверхности обтекаемого тела.

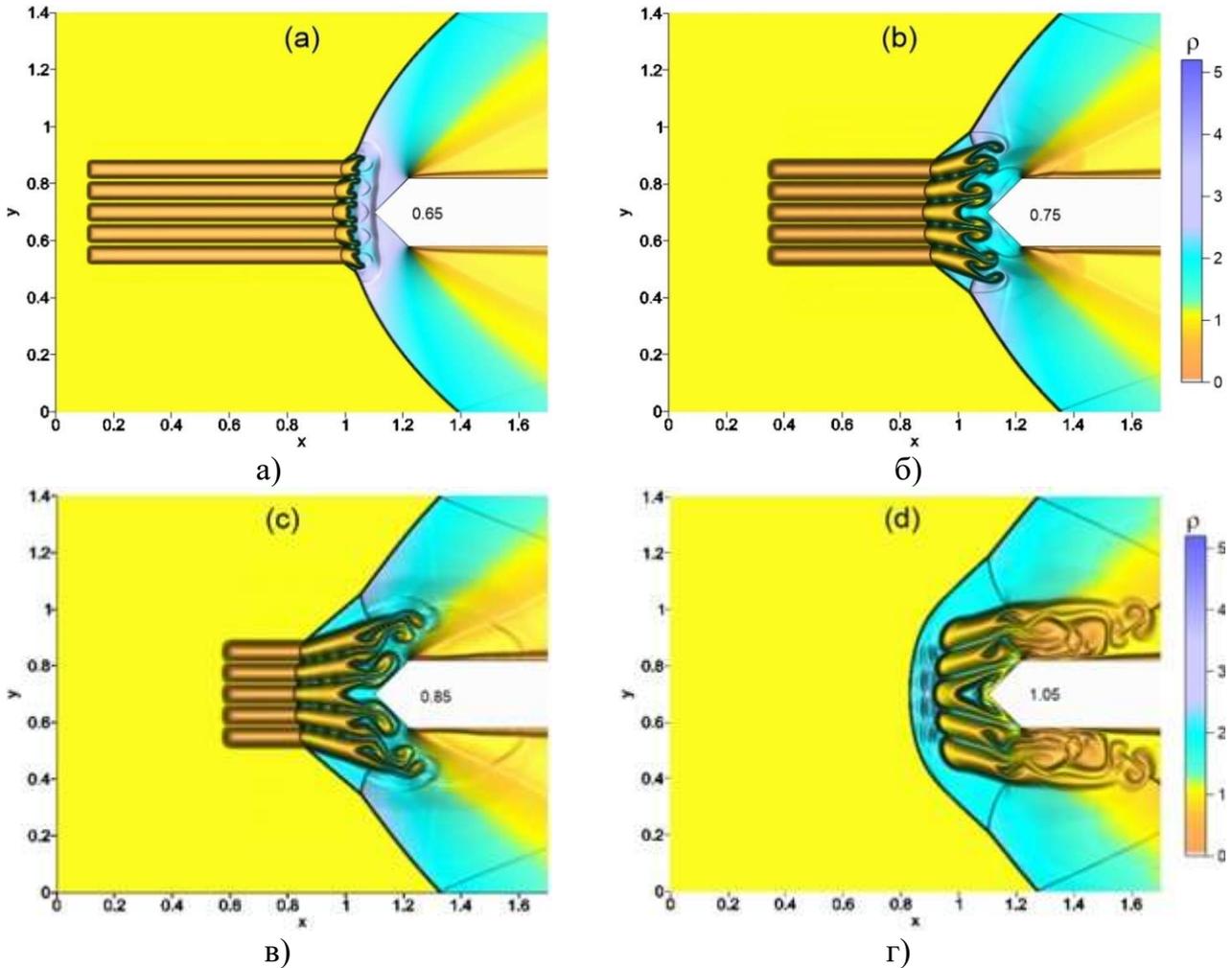


Рис. 10. Динамика поля плотности при взаимодействии стратифицированного источника энергии с ударным слоем, создаваемым заостренным телом: а) $t=0.65$, б) $t=0.75$, в) $t=0.85$, г) $t=1.05$

В разделе 4.3 формулируются принципы управления высокоскоростным потоком с применением стратифицированного источника энергии. Динамика силы сопротивления для различных симметричных наборов $\{\alpha_i\}$ представлена на рис. 11. Показано, что уменьшение силы сопротивления оказывается более выраженным при меньших значениях α_i , соответствующих более разреженным (более нагретым) слоям источника энергии (рис. 11а). Увеличение числа нагретых слоёв в термически стратифицированном источнике сопровождается уменьшением периода колебаний силы сопротивления и увеличением интервала времени, в течение которого наблюдается её снижение (рис. 11б). При этом

эффект снижения сопротивления тем более выражен и длителен, чем больше число слоёв с пониженными значениями α_i присутствуют в источнике. Таким образом, изменение температурного профиля и числа нагреваемых слоёв в стратифицированном источнике энергии позволяет управлять силой сопротивления обтекаемой поверхности. Отметим, что для симметричных наборов $\{\alpha_i\}$ подъёмные силы не возникают, в отличие от случая асимметричной стратификации, который рассматривается ниже.

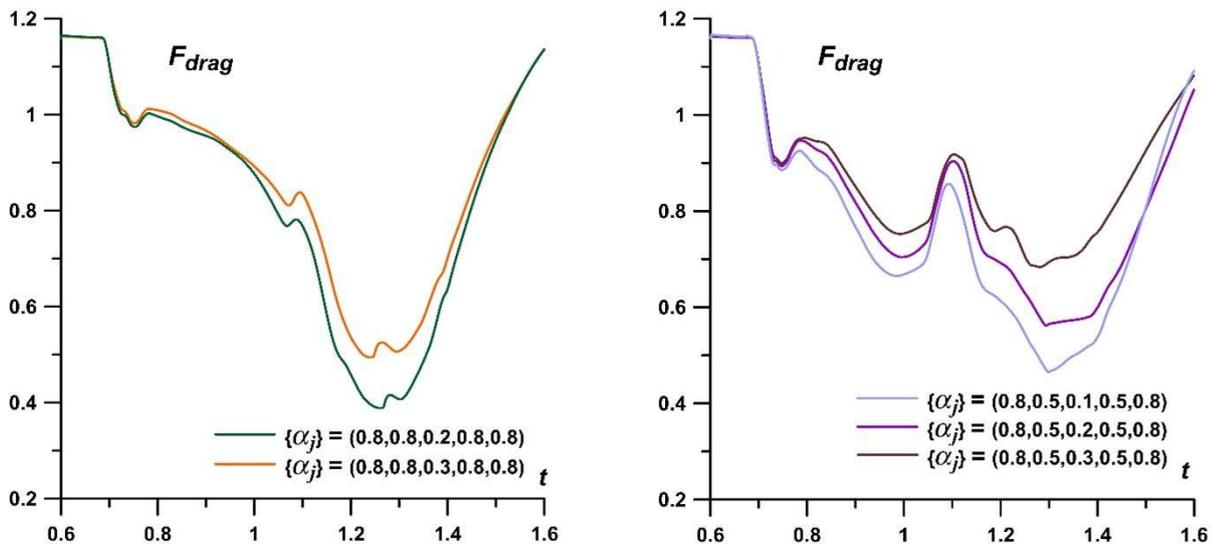


Рис. 11. Динамика силы сопротивления для различных симметричных наборов $\{\alpha_i\}$

Динамика нестационарных сил сопротивления для различных асимметричных наборов $\{\alpha_i\}$ в стратифицированном источнике энергии представлена на рис. 12. Рассматривается сила сопротивления, формируемая клиновидной поверхностью тела F_{drag} , а также составляющие силы сопротивления, действующие на нижнюю и верхнюю поверхности клина, $F_{drag\ bottom}$ и $F_{drag\ top}$, определяемые соотношениями

$$F_{drag\ bottom} = \int_{y_b}^{y_b+R} p_b dy, \quad F_{drag\ top} = \int_{y_b+R}^{y_b+D} p_b dy, \quad F_{drag\ total} = F_{drag\ bottom} + F_{drag\ top},$$

где p_b - давление в области вершины клина. Аналогично случаю симметричных наборов $\{\alpha_i\}$, понижение силы сопротивления F_{drag} усиливается при уменьшении значений α_i ; при этом характерные скорости изменения сопротивления остаются близкими. Использование асимметричных наборов $\{\alpha_i\}$ позволяет варьировать скорость изменения силы сопротивления, которая возрастает с увеличением разности параметров α_i (температур) в слоях источника. Показано также, что для

асимметричных и «отражённых» асимметричных наборов $\{\alpha_i\}$ силы сопротивления, действующие на верхнюю и нижнюю поверхности клина, имеют противоположные знаки, тогда как суммарная сила сопротивления остаётся одинаковой, что связано с совпадением оси симметрии стратифицированного источника энергии с осью симметрии тела.

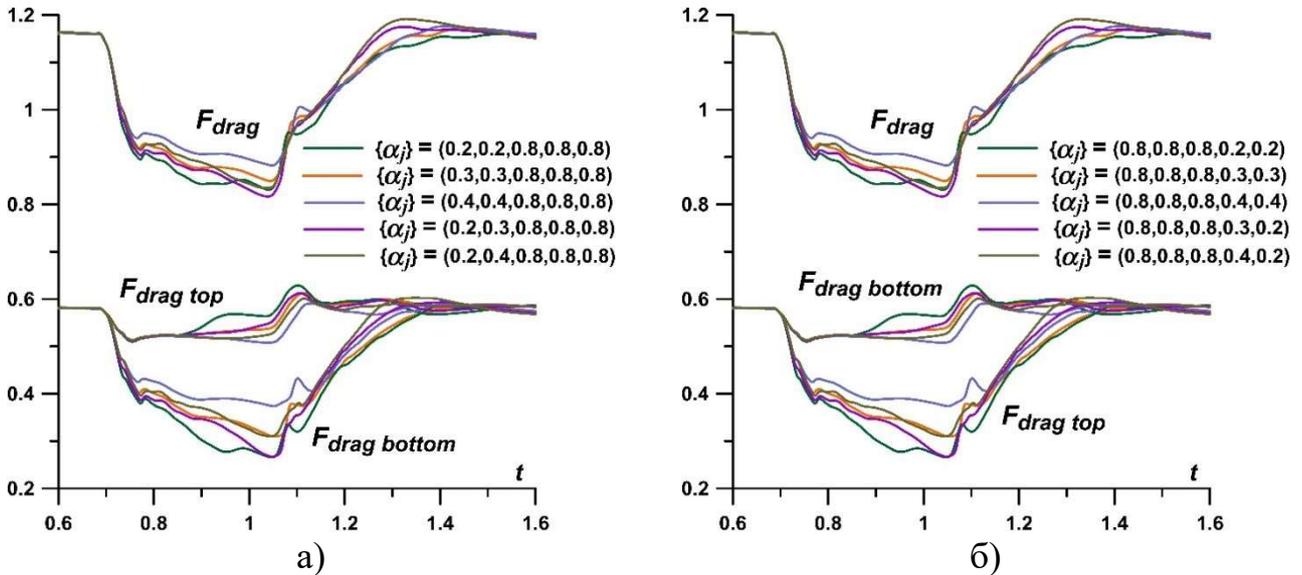


Рис. 12. Динамика силы сопротивления для различных асимметричных (а) и «отражённых» асимметричных (б) наборов $\{\alpha_i\}$

Динамика полной подъёмной силы $F_{\text{lift total}}$ для асимметричных и «отражённых» асимметричных наборов $\{\alpha_i\}$ представлена на рис. 13. Подъёмная сила определяется как

$$F_{\text{lift bottom}} = \int_{x_b}^{x_b+L} p_{\text{bottom}} dx, \quad F_{\text{lift top}} = \int_{x_b}^{x_b+L} p_{\text{top}} dx, \quad F_{\text{lift total}} = F_{\text{lift bottom}} - F_{\text{lift top}},$$

где p_{bottom} и p_{top} , это давления на нижней и верхней поверхностях тела. Показано, что по модулю значения $F_{\text{lift total}}$ возрастают при уменьшении значений α_i , соответствующих более нагретым слоям источника энергии, что позволяет управлять величиной и динамикой подъёмной силы. Для асимметричных наборов $\{\alpha_i\}$ временные зависимости подъёмной силы являются обратными, вследствие чего замена набора на его «отражённый» вариант сопровождается формированием подъёмной силы противоположного знака. Таким образом, ТСИЭ позволяет формировать и контролировать подъёмные силы при его асимметричном расположении относительно оси тела (при нулевом угле атаки).

В разделе 4.4 оценивается влияние стратифицированного источника энергии при высокоскоростном обтекании заостренного цилиндрического тела

на сигнатуры давления и уровень воспринимаемой громкости (PLdB) на поверхности земли.

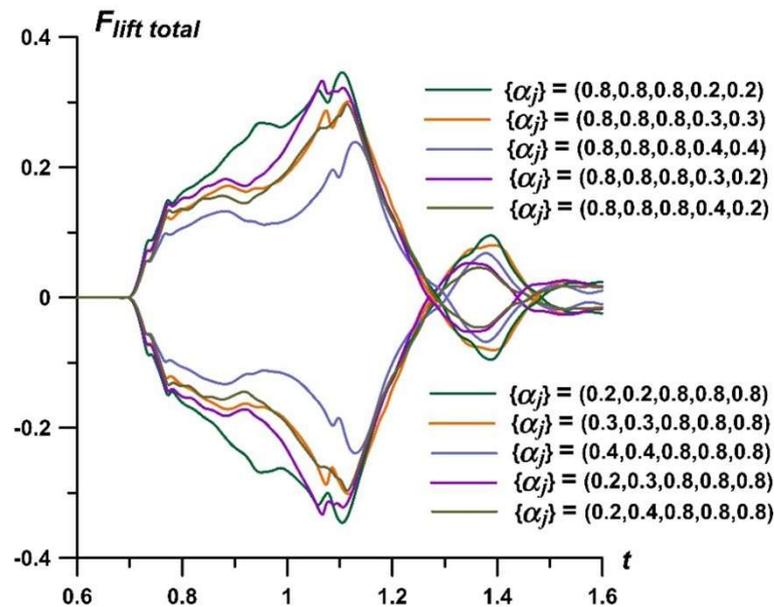


Рис. 13. Динамика подъемной силы для различных асимметричных и «отражённых» асимметричных наборов $\{\alpha_i\}$

На рис. 14 приведена динамика полей плотности ρ при $M_\infty = 2$ для случая без источника энергии (синий) и при воздействии ТСИЭ ($\alpha_i = 0.25, N = 7.5$, красный) в моменты времени $t = 9$, $t = 20$ и $t = 40$, а также показан увеличенный фрагмент взаимодействия источника с головной ударной волной. Сопоставление изохор показывает, что при наличии ТСИЭ положение и форма линий равной плотности в области ударно-волнового взаимодействия отличаются от случая без источника энергии и эти различия сохраняются на протяжении рассматриваемого временного интервала. На увеличенном фрагменте отчётливо видно локальное изменение формы и положения изохор в зоне взаимодействия источника с головной ударной волной. Было показано, что чем выше температура в слоях ТСИЭ и чем больше количество слоев в нем, тем в большей степени снижается величина лобового сопротивления аэродинамического тела.

Ударно-волновые профили давления в ближней зоне при $r=21R$ (R – максимальный радиус тела) были обработаны с использованием пакета программ из [18], который реализует метод параметров формы сигнала Томаса (Thomas) для моделирования прохождения сигнала через атмосферу. Были получены соответствующие значения воздействия PLdB (воспринимаемая громкость в децибелах) на грунт, оцененные с использованием пакета с открытым исходным кодом PyLdB [19]. Код PyLdB реализует вычисление воспринимаемого уровня громкости, определенного с использованием алгоритма Mark VII, где

воспринимаемое значение соотносится с таблицей соответствующего диапазона, составленной Стивенсом (Stevens), и значение воспринимаемой амплитуды преобразуется в PldB, согласно дополнительной таблице [20]. Для рассмотренной геометрии обтекаемого тела было установлено, что использование ТСИЭ для управления потоком не увеличивает воздействие PLdB на поверхность земли.

В разделе 4.5 приводятся выводы к главе 4.

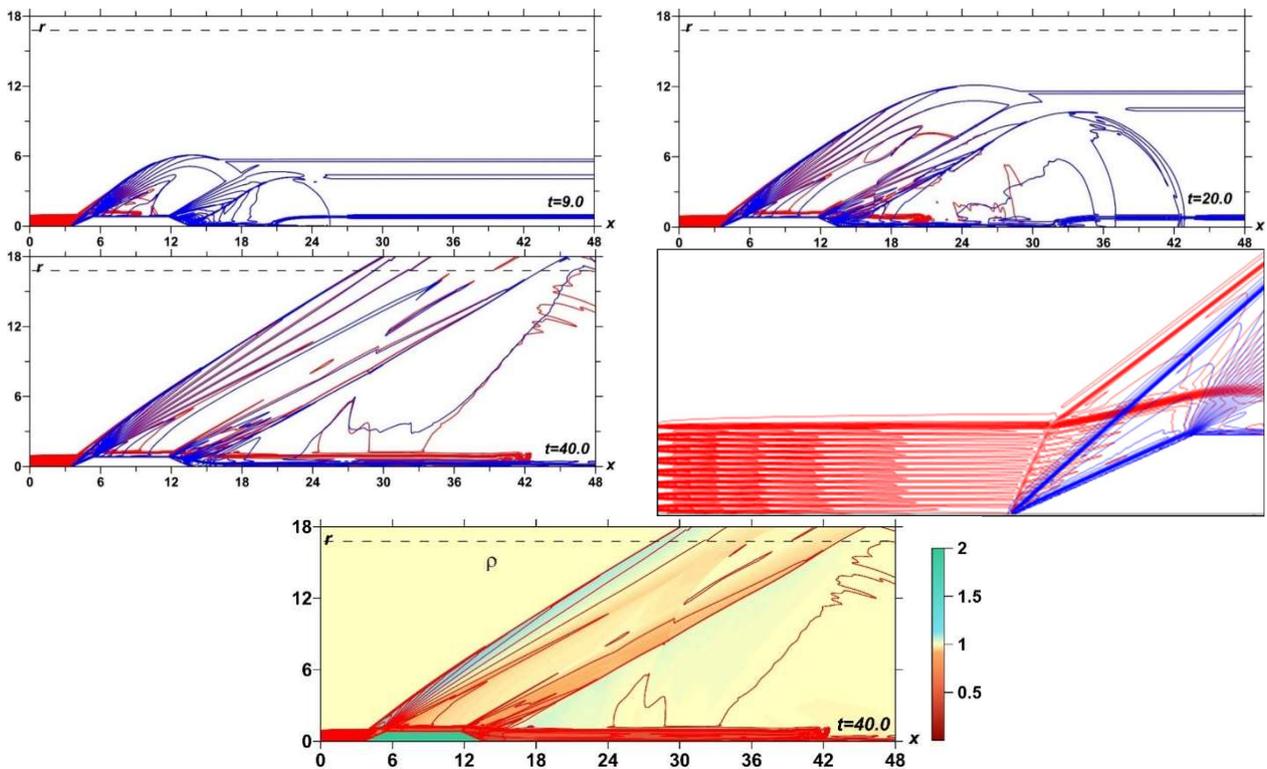


Рис. 14. Влияние ТСИЭ на обтекание тела: динамика полей плотности, $M_\infty=2$, без источника энергии, синий; с ТСИЭ, $\alpha_i=0.25$, $N=7.5$, красный

В **Заключении** представлены основные результаты, достигнутые в процессе выполнения диссертационной работы:

1. Проведено усовершенствование программного комплекса «FlowView» для численного моделирования движения вязкого теплопроводного газа на основе системы уравнений Навье – Стокса за счет введения программных модулей на основе ограничителей потоков, обеспечивающих стабильность расчетов при числах Маха ударной волны $M_{yB} \geq 6$, а также модуля для автоматизации задания параметров термически стратифицированного источника энергии.

5. Получены результаты моделирования известных экспериментов по воздействию стратифицированного источника энергии на плоскую ударную волну. Для чисел Маха ударной волны $M_{yB}=2; 4.98$ получены режимы взаимодействия, характеризующиеся искривлением фронта ударной волны, а также режимы с полным размытием ее фронта за счет множественного

проявления неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Для чисел Маха ударной волны $M_{уВ}=5\div 12$ показано, что под воздействием стратифицированного источника энергии происходит перераспределение энергии с образованием горячих областей, температура в которых до 3 раз превышает температуру в однородном источнике. Получены оценки эффективности воздействия ТСИЭ на ударную волну.

2. Предложен метод цифровой визуализации границ стратифицированного источника энергии с использованием экспериментальных шпирен-изображений потока, позволивший провести моделирование с использованием границ ТСИЭ, соответствующих эксперименту, а также получить парные грибовидные структуры, связанные общим вихрем.

3. При числах Маха набегающего потока $M_{\infty}=1.5; 2$ разработаны принципы управления головной ударной волной и аэродинамическими характеристиками тела с помощью стратифицированного источника энергии за счет изменения температуры в его слоях. Получено, что для рассмотренных конфигураций потока использование термически стратифицированного источника энергии не сопровождается увеличением звукового эффекта на поверхности земли.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

1. Azarova O.A., Kravchenko O.V. The Use of Spatially Multi-Component Plasma Structures and Combined Energy Deposition for High-Speed Flow Control: A Selective Review // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – No. 7. – P. 1632. – DOI: 10.3390/en17071632 (Q1)
2. Kravchenko O.V., Azarova O.A., Knight D.D. Impact of a thermally stratified energy source located in front of a pointed cylinder aerodynamic model on the pressure signatures and PLdB effect on the ground // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – No. 13. – P. 7927. – DOI: 10.3390/app13137927.
3. Azarova O.A., Krasnobaev K.V., Lapushkina T.A., Kravchenko O.V. Energy transformations accompanying a shock wave distortion and disappearance during the interaction with thermally stratified plasma // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2023. – Vol. 2548. – No. 1. – P. 012004. – DOI: 10.1088/1742-6596/2548/1/012004.
4. Azarova O.A., Kravchenko O.V. Principles of unsteady high-speed flow control using a time-limited thermally stratified energy source // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7. – No. 10. – P. 326. – DOI: 10.3390/fluids7100326 (Q2)

5. Kravchenko O.V., Azarova O.A., Lapushkina T.A. Image-based processing simulation of shock wave propagation through the area of ionization instability // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2127. – No. 1. – P. 012013. – DOI: 10.1088/1742-6596/2127/1/012013.
6. Azarova O.A., Lapushkina T.A., Krasnobaev K.V., Kravchenko O.V. Redistribution of energy during interaction of a shock wave with a temperature layered plasma region at hypersonic speeds // *Aerospace*. – 2021. – Vol. 8. – No. 11. – P. 326. – DOI: 10.3390/aerospace8110326 (Q2)
7. Azarova O.A., Kravchenko O.V. Impact of a thermally stratified energy source on the bow shock wave and aerodynamic characteristics of a body // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1891. – No. 1. – P. 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012025.
8. Azarova O.A., Krasnobaev K.V., Kravchenko O.V., Lapushkina T.A., Erofeev A.V. Redistribution of energy in a viscous heat – conductive medium during the interaction of a shock wave with a temperature layered plasma region // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1698. – No. 1. – P. 012004. – DOI: 10.1088/1742-6596/1698/1/012004
9. Lapushkina T.A., Erofeev A.V., Azarova O.A., Kravchenko O.V. Interaction of a plane shock wave with an area of ionization instability of discharge plasma in air // *Aerospace Science and Technology*. – 2019. – Vol. 85. – P. 347 – 358. – DOI: 10.1016/j.ast.2019.05.012.020 (Q1)

Список литературы

10. Азарова О.А. Комплексно консервативные разностные схемы в задачах высокоскоростного обтекания простых аэродинамических форм // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2015. – Т. 55. – № 12. – С. 2067 – 2092.
11. Азарова О.А. Программный комплекс FlowView, Роспатент, регистрационный номер: №2022667647 от 22.09.2022.
12. Thomas C.L. Extrapolation of Sonic Boom Pressure Signatures by the Waveform Parameter Method. NASA Technical Note D-6832. 1972, pp. 1–31. Available online: https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_19720018354/mode/2up (accessed on 3 July 2023).
13. Pyldb. “PyLdB”. 2019. Available online: <https://github.com/usuaero/PyLdB> (accessed on 20 April 2023).
14. Stevens S.S. Perceived level of noise by Mark VII and decibels (E). *J. Acoust. Soc. Am.* 1972, 51, 575 – 601.