

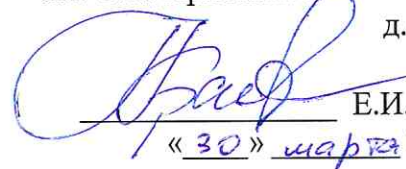


УТВЕРЖДАЮ

Ио директора

Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН

д.ф.-м.н.


Е.И. Краус
«30» марта 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию КРАВЧЕНКО Олега Викторовича «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Кравченко О.В. посвящена актуальной проблеме современной аэрокосмической науки – разработке методов управления высокоскоростными газовыми потоками. Использование активных энергетических методов управления, в частности, термически стратифицированных источников энергии (ТСИЭ), является перспективным направлением, обеспечивая высокое быстродействие и адаптивность по сравнению с пассивными методами управления.

Несмотря на значительный объём работ в области взаимодействия одиночных и многокомпонентных источников энергии со сверхзвуковыми потоками, влияние пространственно-стратифицированных тепловых структур на динамику ударных волн и аэродинамические характеристики обтекаемых тел на высокоскоростных режимах остается недостаточно изученным, что определяет **актуальность исследований**.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 133 страницы, включая 64 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 141 наименование, включая значительное число публикаций в высокорейтинговых международных изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

Во Введении изложена общая характеристика работы, определены объекты исследования и обоснована актуальность темы. Сформулированы цели диссертационной работы, раскрыты ее научная новизна и теоретическая значимость. Приведены методы исследования и оценка достоверности полученных результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также детально указан личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве и опубликованных по теме диссертации. Освещены апробация работы и сведения о публикациях автора.

Глава 1 содержит обзор отечественной и зарубежной литературы по тематике активных методов управления сверхзвуковыми потоками. Обзор охватывает использование плазменных актуаторов, электромагнитных воздействий, лазерных и

микроволновых импульсов, а также многокомпонентных плазменных структур, и демонстрирует хорошую осведомлённость автора в состоянии научной области.

Глава 2 содержит подробное описание применяемых математических моделей – систем уравнений Эйлера и Навье–Стокса для сжимаемого вязкого теплопроводного газа, – разностных схем на основе комплексно-консервативных методов второго порядка точности, постановку трёх основных задач и результаты верификации на тестовых решениях и экспериментальных данных.

Глава 3 посвящена численному моделированию известных экспериментов по взаимодействию плоской ударной волны с термически стратифицированной плазменной областью, формируемой под воздействием ионизационной неустойчивости. Приведены параметрические исследования перераспределения энергии для высокоскоростных потоков.

Глава 4 содержит результаты численного исследования воздействия ТСИЭ на сверхзвуковое обтекание заострённых аэродинамических тел, а также оценки влияния на сигнатуры давления и уровень звукового удара на земной поверхности.

В конце каждой главы сформулированы выводы. В Заключение представлены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные научные результаты, составляющие новизну диссертационной работы, связаны с четырьмя направлениями:

1. Модификация программного комплекса FlowView. Автором расширена область применимости кода FlowView путём введения ограничителей потоков, обеспечивающих численную устойчивость при высоких числах Маха ударной волны, а также разработан модуль автоматического задания параметров стратифицированного источника энергии. Данная работа носит практически значимый характер и расширяет диапазон применимости комплекса для задач высокоскоростной газодинамики.
2. Исследование нелинейных эффектов 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 соответствующие значения для однородного источника с такой же полной энергией. Проведены параметрические исследования для высоких скоростей ударной волны.
3. Метод цифровой визуализации границ ТСИЭ по экспериментальным Шлирен-изображениям. Разработан оригинальный алгоритм восстановления реальной геометрии ТСИЭ из экспериментальных изображений, что позволило проводить численное моделирование взаимодействия с учётом реальной структуры плазменного источника. Получены парные грибовидные структуры, связанные общим вихрем.
4. Принципы управления ударной волной и аэродинамическими характеристиками тела. При $M_\infty = 2$ установлены принципы управления силой фронтального

сопротивления и подъёмными силами при нулевом угле атаки за счёт варьирования температурного профиля ТСИЭ. Для осесимметричной модели «конус-цилиндр-конус» при $M_\infty = 1.5$ и 2 впервые проведены оценки влияния ТСИЭ на уровень воспринимаемой громкости (PLdB) на поверхности земли с использованием параметрического волнового метода Томаса и алгоритма Стивенса Mark VII.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии научных представлений о физических механизмах взаимодействия термически неоднородных плазменных структур с ударными волнами и аэродинамическими телами. Проведённые исследования углубляют понимание нелинейных газодинамических эффектов, в частности, возникновение вихревых структур при взаимодействии ударной волны с многослойной термической неоднородностью, в задачах управления высокоскоростными потоками.

Практическая значимость определяется развитием вычислительного инструментария (программный комплекс FlowView), пригодного для расчётов в режиме высокоскоростного обтекания, а также установленными принципами управления аэродинамическими характеристиками тел, которые могут быть применены при проектировании систем активного управления потоком высокоскоростных летательных аппаратов.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается:

- применением физически обоснованных математических моделей (системы уравнений Эйлера и Навье–Стокса) с надлежащим обоснованием граничных условий;
- верификацией численного метода на задачах с известными аналитическими решениями, а также сравнением с экспериментальными данными и результатами расчётов других авторов, выполненных независимыми кодами;
- исследованием сеточной сходимости для каждой из рассматриваемых задач;
- апробацией результатов на 12 российских и международных конференциях, включая конференции с рецензируемыми трудами;
- публикацией основных результатов в рецензируемых журналах, входящих в международные базы Scopus и Web of Science.

Основные результаты работы опубликованы в 9 научных статьях, включённых в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, четыре из которых опубликованы в журналах первого и второго квартилей международных баз цитирования Scopus и/или Web of Science.

При наличии существенных положительных качеств диссертация не лишена ряда **недостатков и дискуссионных мест**, на которые ведущая организация считает необходимым обратить внимание.

1. Литературный обзор, представленный в Главе 1, носит преимущественно описательный характер и представляет собой последовательное изложение работ по тематике, но не содержит чёткого аналитического заключения, которое бы обосновывало место диссертации в мировой практике. В тексте не выделены

нерешённые проблемы, из которых логически следовали бы сформулированные автором цель и задачи исследования. Отсутствие такого анализа снижает убедительность обоснования актуальности и научной новизны работы. Целесообразно было бы в завершение обзора привести краткое резюме, систематизирующее известные результаты и явно указывающее на пробелы, которые восполняет диссертация.

2. Формулировка цели диссертации. Цель работы ограничена исследованием влияния ТСИЭ на поток «перед головной ударной волной». Между тем значительный объём Главы 3 посвящён взаимодействию плоской ударной волны с ТСИЭ в ударной трубе – задаче, в которой аэродинамическое тело и головная ударная волна в собственном смысле отсутствуют. Желательно было бы более точно и широко сформулировать цель, включив в неё исследование динамики ударных волн в присутствии ТСИЭ как самостоятельного направления работы.
3. Утверждение в пункте научной новизны о том, что «впервые показано» перераспределение кинетической и внутренней энергии при взаимодействии с ТСИЭ, нуждается в уточнении: в ряде более ранних публикаций научного руководителя (в том числе [37] из списка литературы, датированной 2015 г.) аналогичные эффекты уже рассматривались. Элемент новизны диссертации по данному пункту целесообразно было бы сформулировать точнее.
4. Метод цифровой визуализации границ ТСИЭ на основе экспериментальных шпирен-изображений выносится как отдельный элемент научной новизны. Тем не менее не приведено никаких количественных оценок погрешности восстановления геометрии источника: не указано, с какой точностью восстанавливаются границы стратифицированной области, какова чувствительность результатов расчётов к ошибкам в восстановленной геометрии.
5. В расчётах Главы 4 принято $Re = 9500$. Данное значение существенно ниже числа Рейнольдса реального обтекания высокоскоростного летательного аппарата. В работе отсутствует обоснование такого выбора и оценка чувствительности полученных результатов к изменению числа Рейнольдса. Данный вопрос желательно прояснить в ходе защиты.
6. В Главе 4 в п. 4.4 диссертации рассматривается задача звукового удара на поверхности земли при осуществлении управления потоком с помощью ТСИЭ. В постановке, принятой в диссертации, источник энергии предполагается полубесконечным. обтекание задней границы источника не происходит, и дополнительная ударная волна не образуется. Интересно было бы рассмотреть задачу, когда происходит обтекание источника. Ведь в этом случае формирующаяся вторая ударная волна может вызвать дополнительное шумовое воздействие на поверхность.
7. Сформулированные в работе «принципы управления» носят преимущественно описательный характер. Не предложено критериев (например, параметров подобия), позволяющих экстраполировать полученные закономерности на другие числа Маха, геометрии тел или параметры источника без проведения новых дорогостоящих расчетов. Рекомендуется рассмотреть вопрос о введении безразмерных параметров (например, число Струхала, Ридчардсона и др.),

которые помогут продемонстрировать, что с их помощью можно предсказать эффект для других конфигураций без повторного моделирования.

8. Вызывает вопрос энергетическая эффективность предложенного метода управления течением. Сравнение стратифицированного и однородного источников по приращениям внутренней и кинетической энергии проведено без учета затрат на создание самой стратификации. Вывод о «большей эффективности» сделан только по газодинамическому эффекту, без анализа энергетического баланса всей системы: отношение полученного эффекта к вложенной энергии.
9. В работе ионизационно-неустойчивая плазма моделируется исключительно термической стратификацией (заданием слоев с пониженной плотностью). Плазменные эффекты (неравновесность, степень ионизации) не учитываются, что ставит вопрос об адекватности и границах применимости модели для прямого сравнения с экспериментами по газовому разряду.
10. В п. 4.4 диссертации на графиках, полученных соискателем, давление на поверхности земли выражается в фунтах на квадратный фут. Данные величины размерности не рекомендованы к использованию в оформлении диссертационных работ.
11. В диссертации термин «неустойчивость Рихтмайера-Мешкова» используется для описания формирования гидродинамической сдвиговой неустойчивости, сопровождающейся формированием системы пиков и грибовидных вихревых структур, возникающих в численном решении при взаимодействии ударной волны с многослойным стратифицированным источником энергии. При этом автор не исследует динамику изменения высоты этих пиков. Однако классической неустойчивость Рихтмайера-Мешкова развивается на контактном разрыве плотности в поле ускорения. Эта неустойчивость экспоненциально развивается при достижении критического волнового числа вдоль линии разрыва, которое определяется перепадом плотности на разрыве и ускорением. Маловероятно, что это критическое волновое число совпадает с шагом стратификации во всех случаях данной работы. Похожесть получаемых структур еще не говорит о действии механизма неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Целесообразно либо сузить применение термина к случаям, строго соответствующим классической постановке, либо использовать более широкое понятие, например, «проявление бароклинной неустойчивости, подобной неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, сопровождаемой возникновением грибовидных структур». Отметим, что бароклинный характер данной неустойчивости (на примере одного теплового слоя) был показан в работе [37].
12. Ряд библиографических описаний не соответствует ГОСТ.
13. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности, не влияющие на восприятие материала.

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и носят рекомендательный характер, указывая на возможные направления доработки в рамках дальнейших исследований.

