

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

Диссертация О.В. Кравченко посвящена изучению механизмов управления высокоскоростными газодинамическими потоками с помощью создания неоднородных по плотности структур посредством термически стратифицированных источников энергии (ТСИЭ). В диссертации решены три связанные с этой тематикой задачи. В первой исследовано воздействие ТСИЭ на плоскую ударную волну. Описаны режимы размытия и искривления фронта волны под влиянием ТСИЭ, наблюдаемые в экспериментах. Во второй задаче изучено воздействие ТСИЭ, расположенного в набегающем потоке, на структуру течения в задаче сверхзвукового обтекания аэродинамического тела. Показано, что воздействие ТСИЭ на головную ударную волну сопровождается возникновением неустойчивости и формированием вихревых структур, изменяющих аэродинамические характеристики обтекаемого тела. Третья задача связана с исследованием звукового удара сверхзвукового летательного аппарата на поверхности Земли (Sonic Boom Problem) при использовании ТСИЭ.

Актуальность темы диссертации обусловлена перспективными методами активного энергетического управления течением, разработанными на современном этапе, в которых продемонстрирована возможность эффективного управления сверхзвуковым течением посредством локального энергетического воздействия. Эти методы включают как управление головной ударной волной, так и управление аэродинамическими характеристиками модели, такими как параметры торможения, сила лобового сопротивления и подъемные силы. Важное место в прикладной аэродинамике занимает также вопрос понижения интенсивности аэродинамического шума и

стабилизации течения. При высокоскоростном обтекании аэродинамических тел потоками, содержащими распределенные источники энергии, возникают сложные газодинамические явления, такие как образование ударно-волновых структур, отрыв пограничного слоя и возникновение вихревых структур, которые могут существенно влиять на аэродинамические характеристики летательных аппаратов. Эти вопросы требуют дополнительного изучения. Решение этих проблем непосредственно связано с разработкой эффективных методов активного управления потоком.

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

Во **Введении** приводится общая характеристика работы, описываются объекты исследования, отмечается актуальность темы. Приводятся цели диссертационной работы и описывается ее научная новизна и значимость. Описываются методы исследования и степень достоверности полученных результатов. Приводятся основные положения, выносимые на защиту, а также подробно указан личный вклад автора в совместных работах, опубликованных по теме диссертации. Приводится апробация работы, а также описание публикаций автора.

**Глава 1** посвящена обзору литературы в области управления высокоскоростными потоками. Приведена классификация механизмов воздействия на силу лобового сопротивления, и тепловой нагрев, проведен анализ статей, посвященных использованию различных источников энергии для аэродинамических приложений. Рассмотрены основные идеи в области управления высокоскоростными потоками, а также проблемы взаимодействия ударных волн и головных ударных волн с неоднородными плазменными структурами (филаментарной плазмой) и их влияния на аэродинамические характеристики модели, включая теоретические обоснования и экспериментальные исследования.

**Глава 2** посвящена математической модели течения вязкого теплопроводного газа при наличии локального стратифицированного энерговклада. Приводится вывод безразмерных уравнений Навье – Стокса вязкого теплопроводного совершенного газа. Изложено описание разностной схемы, используемой для численного решения этих уравнений, приводится

вариант лимитера (ограничителя потоков) для предотвращения нефизических осцилляций в областях с большими градиентами численного решения. Приводятся постановки исследуемых задач, а также описание используемого программного комплекса FlowView решения сжимаемых уравнений Навье-Стокса. Рассматриваются вопросы верификации этого программного комплекса в классе задач, рассматриваемых в диссертации. Приводится также сравнение с экспериментальными данными и расчетами других авторов

В **Главе 3** проводится исследование воздействия термически стратифицированной плазменной области на плоскую ударную волну. Обсуждаются результаты имеющихся экспериментальных исследований взаимодействия первоначально плоской ударной волны с локальной стратифицированной областью плазмы, формируемой под воздействием ионизационной неустойчивости. Эти результаты служат основой для постановки соответствующих задач численного моделирования и анализа динамики изучаемого процесса. В результате проведенных автором вычислительных экспериментов получены режимы размытия и искривления ударной волны при её взаимодействии со стратифицированной областью, сформированной ионизационными стратами. Полученные в вычислительном эксперименте режимы хорошо согласуются с наблюдениями физического эксперимента. Исследуется также перераспределение энергии при взаимодействии ударной волны с термически стратифицированной областью. Проведен сравнительный анализ полей удельной внутренней и объемной кинетической энергии для стратифицированного и однородного источников энергии при одинаковой их полной энергии. Обнаружен и качественно описан процесс развития множественной неустойчивости Рихтмайера – Мешкова. Проведены параметрические исследования по числу Маха ударной волны и параметру разрежения в слоях ТСИЭ. Проведены также оценки эффективности воздействия ТСИЭ на параметры ударной волны.

**Глава 4** посвящена воздействию ТСИЭ на высокоскоростное обтекание тела. Исследуется влияние ТСИЭ на головную ударную волну и аэродинамические характеристики заостренной модели. Формулируются основные принципы управления сверхзвуковым потоком, силой сопротивления и подъемной силы за счет изменения температурного профиля

в ТСИЭ. Исследуется также влияние ТСИЭ на сигнатуры давления и уровень звукового удара при сверхзвуковом движении заостренного цилиндрического тела. Проведены параметрические расчеты по числу Маха и характеристикам ТСИЭ.

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

**Научная новизна** диссертации О.В. Кравченко заключается в следующем.

1. Исследованы нелинейные эффекты при взаимодействии ТСИЭ с ударной волной и 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.
2. Разработан метод цифровой визуализации границ ТСИЭ, позволивший проводить моделирование с использованием границ ТСИЭ, соответствующих эксперименту.
3. Сформулированы основные принципы управления положением и формой головной ударной волны и аэродинамическими характеристиками обтекаемого тела за счет варьирования температурного профиля в ТСИЭ.
4. Впервые проведены оценки влияния ТСИЭ на интенсивность и сигнатуру звукового удара сверхзвукового летательного аппарата. Показано, что использование ТСИЭ в целях управления высокоскоростным потоком/полетом не сопровождается увеличением акустического воздействия.

Для решения задач, рассмотренных в диссертации автором 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  $M_{уВ} \geq 6$ .

**Научная значимость** данного диссертационного исследования заключается в проведении анализа механизмов взаимодействия ТСИЭ с ударными волнами и аэродинамическим телом в условиях высокоскоростного обтекания. Проведенные исследования вносят вклад в развитие знаний в области сверхзвуковой аэродинамики и методов управления потоком с

использованием плазменных областей в части формирования множественных структур неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и процессов перераспределения энергии в газодинамических структурах. Полученные результаты позволяют уточнить существующие теоретические модели, а также разработать принципы управления газодинамическими процессами посредством локального стратифицированного энергетического воздействия на поток.

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. Результаты работы прошли апробацию на 12 российских и международных конференциях, в том числе, на XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 21–25 августа, 2023г.) и 8<sup>th</sup> European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS) (Madrid, Spain, 1 – 4 July 2019). Данные факты свидетельствуют о высоком уровне результатов, представленных в диссертации.

Диссертация отличается четкой структурой и хорошо написана, цели диссертации полностью достигнуты. Все выносимые на защиту положения являются в достаточной степени обоснованными и достоверными. Основные результаты работы являются непротиворечивыми и качественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Соискатель корректно ссылается на источники заимствованных материалов.

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание и главные результаты. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

К возможным **недостаткам** работы можно отнести следующие.

1. Вводная и обзорная часть диссертации несколько затянуты (почти треть объема) и включают обсуждение результатов исследований, имеющих слабую связь с темой диссертационной работы (например, вопросы экспериментальной плазмохимии, взаимодействие ударной волны с пограничным слоем), имеются повторы.

2. Имеются неточности в изложении при описании моделей Эйлера и Навье-Стокса. Так, на стр. 47 в п. 2.2.1 речь идет о модели Эйлера, но приводятся коэффициенты вязкости и теплопроводности. На стр. 48 и в разделе 2.2.3 для уравнений Эйлера ставятся условия прилипания и нулевого теплового потока.

3. Численный метод второго порядка на основе дифференциальных следствий для производных описан для модели Эйлера; целесообразно было бы привести еще обобщение метода на систему уравнений вязкого теплопроводного газа.

4. В тесте 2 на стр. 62 проведена верификация численного метода для обтекания сферы без энерговложения. Проводится сравнение с результатами эксперимента и расчетами других авторов. Однако, в постановке задачи присутствует энерговложение в набегающем потоке. Следовало бы провести такую верификацию и для задачи, включающей энерговложение в набегающий поток.

5. В разделе 3.3.1 в задаче о взаимодействии плоской ударной волны со слоистой структурой энерговложения верификация численного метода (стр. 70) проводится для модели Навье-Стокса (различные сетки, различные числа Рейнольдса), а основные расчеты и сравнение с экспериментальными данными проводятся для модели Эйлера. Было бы логично поместить описание верификации в раздел 3.4.1, где рассматривается вязкая среда.

Указанные замечания не ставят под сомнение квалификацию автора и не изменяют общего положительного впечатления о представленной диссертации.

Считаю, что диссертационная работа О.В. Кравченко «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии» удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в том числе соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842,

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник

Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,

отдел «Прикладные задачи механики сплошных сред»,

доктор физико-математических наук

по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

тел.: +7-499-220-79-00

e-mail: imen57@mail.ru

/ Меньшов Игорь Станиславович

Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

119526, Москва, Москва, Миусская пл., д.4,

тел.: +7 499 978-13-14, e-mail: office@keldysh.ru

Отзыв составлен 23.03.2026

Подпись Меньшова И.С. заверяю.

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

кандидат физико-математических наук



/ А. А. Давыдов