

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»

Актуальность темы выполненной работы

Диссертационная работа Кравченко О.В. посвящена актуальной научной задаче, лежащей на стыке механики жидкости и газа, вычислительной аэрогазодинамики и методов активного управления высокоскоростными течениями. Объектом исследования являются механизмы управления высокоскоростными газодинамическими потоками с использованием неоднородных плазменных структур, включая филаментарную плазму и термически стратифицированные источники энергии (ТСИЭ). Основное внимание уделено взаимодействию ударных волн с такими структурами, формированию параметров ударного слоя и изменению аэродинамических характеристик тел за счет локального энергетического воздействия на поток.

Актуальность темы определяется тем, что при высокоскоростном обтекании аэродинамических тел возникают сложные ударно-волновые и вихревые структуры, существенно влияющие на сопротивление, нагрев, устойчивость течения и акустические характеристики тел. Для современной аэродинамики и перспективной авиационно-космической техники особый интерес представляет разработка немеханических способов управления потоком, позволяющих воздействовать на головную ударную волну, параметры торможения и интегральные аэродинамические силы. В этой связи исследование ТСИЭ как управляемого средства воздействия на высокоскоростной поток следует признать своевременным и научно значимым.

Полученные в работе результаты направлены на формирование научных основ использования ТСИЭ как инструмента управления высокоскоростным потоком.

Структура и содержание диссертационной работы

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

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы степень разработанности темы исследования, а также ее цель и решаемые задачи, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость,

степень достоверности результатов и личный вклад автора. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов и публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу современного состояния исследований в области управления высокоскоростными потоками. В главе рассмотрены основные идеи и подходы к управлению ударно-волновыми структурами, включая филаментарную плазму, многокомпонентные плазменные структуры, комбинированные физические механизмы воздействия на поток, а также возможность управления высокоскоростным потоком с помощью термически стратифицированных плазменных структур. Первая глава формирует необходимую научную базу для постановки рассматриваемых в диссертации задач и показывает место диссертационной работы в контексте современных исследований.

Во второй главе изложены применяемые методы, программные комплексы и тестовые расчеты. Рассматривается применение комплексно-консервативных разностных схем второго порядка точности по времени и пространству для численного решения двумерных уравнений Эйлера и Навье–Стокса. Приводится краткое описание модифицированного программного комплекса FlowView, реализующего комплексно-консервативный подход на шахматной структурированной сетке. Специально обратим внимание на то, что в код были внесены модификации, включающие автоматическое задание ТСИЭ, введение ограничителей потоков и разработку варианта локального применения ограничителя по относительному изменению градиентов динамических и газодинамических переменных. В главе также приведены результаты тестовых расчетов, сравнения с экспериментом и анализа сеточной сходимости.

Третья глава посвящена моделированию взаимодействия плоской ударной волны со стратифицированным источником энергии. Автором получены режимы, характеризующиеся как искривлением фронта ударной волны, так и его полным размытием. Важным результатом является установление роли множественного проявления неустойчивости Рихтмайера–Мешкова как ключевого механизма разрушения фронта ударной волны. В этой главе также исследовано перераспределение внутренней и кинетической энергии при взаимодействии ударной волны с ТСИЭ, показано образование локальных горячих областей с температурами и энергиями, превышающими соответствующие значения для однородного источника. Особого внимания заслуживает разработанный метод цифровой визуализации границ ТСИЭ на основе экспериментальных шпирен-изображений, позволивший использовать в расчетах геометрию источника, соответствующую эксперименту, и получить парные грибовидные структуры.

Четвертая глава посвящена моделированию воздействия ТСИЭ на сверхзвуковое обтекание тела. В ней численно исследовано влияние стратифицированного источника энергии на головную ударную волну, параметры торможения газового потока, силовое воздействие потока на

обтекаемое тело. Показано, что по сравнению с однородным источником стратифицированный источник вызывает существенно более сложный многовихревой механизм воздействия на течение и позволяет целенаправленно изменять действующие на обтекаемое тело аэродинамические силы. Установлено, что использование ТСИЭ может приводить к снижению лобового сопротивления, уменьшению температуры торможения в вершине тела и средней температуры поверхности. Кроме того, сформулированы принципы локального управления потоком путем варьирования температуры и числа слоев в источнике: симметричные вихревые структуры могут использоваться для уменьшения сопротивления, а асимметричные – для генерации подъемной силы при нулевом угле атаки. Важным результатом является выполненная оценка звукового воздействия на поверхность Земли, показавшая, что для рассмотренных конфигураций ослабление головной ударной волны и снижение сопротивления не сопровождаются ростом воспринимаемой громкости.

Степень обоснованности и достоверности

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается тем, что исследование основано на фундаментальных уравнениях механики сплошной среды, в частности на системах уравнений Эйлера и Навье-Стокса для вязкого теплопроводного газа. Используемые численные схемы имеют второй порядок аппроксимации по времени и пространству, а программная реализация опирается на комплексно-консервативный подход, обеспечивающий корректную аппроксимацию как в расчетной области, так и вблизи криволинейных границ тел.

В диссертационном исследовании уделено должное внимание верификации численного подхода: приведены тестовые расчеты, анализ сеточной сходимости, а также для ряда задач выполнено сравнение с экспериментальными данными. Для задач взаимодействия ударной волны с ТСИЭ выполнено сопоставление численных результатов с известными экспериментами по искривлению и размытию фронта ударной волны. При этом автором показано качественное согласие наблюдаемых режимов, что существенно повышает значимость выводов, касающихся как интерпретации физических механизмов, так и количественных оценок эффективности воздействия ТСИЭ.

Отдельно следует отметить, что автор, не ограничиваясь использованием существующего вычислительного инструментария, осуществил содержательную модификацию программного комплекса FlowView. Введение ограничителей потоков и алгоритмов автоматического задания стратифицированных источников энергии расширило область применимости расчетной схемы и позволило проводить устойчивые вычисления. Этот результат не только имеет самостоятельную научную ценность, но и служит дополнительным аргументом в пользу надежности

полученных численных данных.

Следует отметить логичную структуру исследования: от обзора литературы и постановки задач автор переходит к описанию математического аппарата, далее к анализу фундаментальной задачи взаимодействия ударной волны с ТСИЭ и далее – к задачам управления обтеканием тела и оценки акустического эффекта. Такая последовательность свидетельствует о внутренней согласованности работы и обоснованности сформулированных заключений.

Научная новизна полученных результатов

К числу существенных результатов, обладающих научной новизной, следует отнести модификацию программного комплекса FlowView, включающую введение модулей ограничителей потоков и автоматизации задания параметров ТСИЭ. Это позволило расширить область численного моделирования высокоскоростных течений и обеспечить решение задач при больших числах Маха ударной волны.

Значительным научным результатом является исследование нелинейных эффектов при взаимодействии стратифицированного источника энергии с ударной волной. В работе дано физическое объяснение режимам искривления и размытия фронта ударной волны и показано, что ключевую роль здесь играет множественное проявление неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Впервые подробно исследовано перераспределение кинетической и внутренней энергии с образованием локальных горячих областей, в которых соответствующие энергетические характеристики в несколько раз превышают значения для однородного источника.

К новым и важным результатам относится также разработка метода цифровой визуализации границ ТСИЭ по экспериментальным шпирен-изображениям. Этот метод позволил приблизить расчетную постановку к экспериментальным условиям и подтвердить существование характерных грибовидных структур. Тем самым работа демонстрирует удачное сочетание численного моделирования и экспериментально ориентированной обработки данных.

Большой интерес представляют результаты, полученные в задаче управления головной ударной волной при обтекании тела высокоскоростным потоком. Автором сформулированы принципы управления головной ударной волной, параметрами торможения, сопротивлением и подъемными силами за счет изменения температурного профиля в слоях ТСИЭ. Показано, что варьирование структуры источника позволяет получать как симметричные, так и асимметричные вихревые конфигурации, что открывает возможности направленного управления интегральными аэродинамическими характеристиками.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что предложенные подходы могут служить фундаментом для дальнейших исследований

теоретических вопросов активного управления высокоскоростным потоком и полетом. Особо следует выделить результаты, показывающие возможность уменьшения сопротивления и температурных нагрузок без увеличения воспринимаемой громкости звукового удара на поверхности Земли, что является важным аргументом в пользу перспективности рассматриваемого метода управления потоком.

Результаты диссертации прошли достаточную апробацию. Они докладывались на ряде российских и международных конференций в 2019–2025 гг. и опубликованы в 9 работах, включенных в перечень ВАК и/или международные базы цитирования; при этом четыре публикации опубликованы в изданиях первого или второго квартала.

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».

Замечания по диссертационной работе

1. При рассмотрении граничных условий на твердых поверхностях автором указывается, что эти условия соответствуют отсутствию нормальных компонентов потоков. Видимо автор имел ввиду отсутствие конвективных потоков, поскольку в рамках рассматриваемых постановок даже для невязкой среды присутствует поток импульса, обусловленный реакцией твердой поверхности в виде давления.
2. В третьей главе представлен важный результат: парные грибовидные структуры, сопровождающие проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, полученной с помощью цифровой обработки экспериментальных шпирен-изображений потока. В диссертации было бы целесообразно уделить больше внимания исследованию таких структур.
3. Нет указаний о величине параметра, определяющего области ограничения потоков (стр. 59).
4. Поскольку для проведения исследований использовались вычислительные системы желательно было бы привести характеристики их вычислительных мощностей.

Отмеченные замечания носят преимущественно рекомендательный характер и не снижают высокой научной и практической ценности диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Кравченко Олега Викторовича «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии» является завершенным научно-

квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. В работе получены новые результаты в области численного моделирования и теории управления высокоскоростными течениями, представляющие фундаментальный интерес. Научная новизна работы, степень обоснованности и достоверности результатов, а также их научная значимость не вызывают сомнений.

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 Кравченко Олег Викторович заслуживает присвоения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

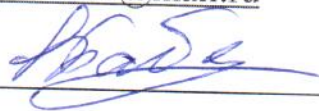
заведующий отделом «Информатизации, математического моделирования и управления» Института автоматизации проектирования Российской академии наук,

доктор физико-математических наук

по специальности 05.13.16 – «Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (по отраслям науки)»

тел.: +7 (499) 250-02-62

e-mail: avbabakov@mail.ru



/ Бабаков Александр Владимирович /

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации проектирования Российской академии наук», 123056, Москва, 2-ая Брестская ул, д.19/18, тел.: +7 (499) 250-02-62, e-mail: icad@icad.org.ru

Отзыв составлен 23.03.2026

Подпись Бабакова А. В. заверяю
заместитель директора ИАП РАН



/ Изюров Д.М. /