

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного учреждения
«Федеральный исследовательский
центр «Информатика и управление»
Российской академии наук»,



 М.А. Посыпкин

15 » января 20 16 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Диссертация Кравченко Олега Викторовича «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии» выполнена в отделе № 25 Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН).

Кравченко Олег Викторович, 1989 года рождения, гражданин Российской Федерации, в 2011 году окончил очный специалитет Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) по специальности «Прикладная математика» с присуждением квалификации инженер-математик, ВСГ №4446674.

С 2011 по 2014 год обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) по научной специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Кандидатские экзамены сданы в ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (справка об обучении (о периоде обучения) № 02.07-12/161 от 08.12.2025 г.). Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа, и плазмы» выдана ФИЦ ИУ РАН в 2026 г.

В период подготовки диссертации соискатель работал в должности научного сотрудника (по настоящее время) отдела № 25 ФИЦ ИУ РАН.

Научный руководитель - д.ф.-м.н. Азарова О.А. - работает в ФИЦ ИУ РАН в должности ведущего научного сотрудника отдела № 25.

По итогам обсуждения диссертационной работы принято следующее заключение.

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 термически стратифицированного источника энергии (ТСИЭ) как перспективного инструмента для управления высокоскоростными потоками. Рассмотрено влияние ТСИЭ на движущуюся первоначально плоскую ударную волну. Эта задача важна, т.к. она моделирует физические эффекты, которые возникают при использовании ТСИЭ как инструмента управления потоком/полетом. Проведенные в работе численные исследования показали, что фронт ударной волны ослабляется, видоизменяется или даже исчезает при изменении температурного профиля в ТСИЭ, что подтверждается результатами известных экспериментов. Важное место в мировой аэрокосмической науке занимает изучение воздействия источника энергии, расположенного перед аэродинамическим телом, на конфигурацию потока и аэродинамические характеристики обтекаемого тела. В работе получено, что наличие ТСИЭ вызывает локальный стратифицированный нагрев газа, что сопровождается формированием вихревых структур и неустойчивостей в области воздействия, изменением подъёмных сил и сил сопротивления аэродинамического тела в зависимости от температурного профиля в слоях источника. Таким образом показана возможность управления высокоскоростным потоком/полетом с использованием ТСИЭ. Задача подавления шума при полетах сверхзвуковых гражданских летательных аппаратов является важнейшей проблемой конструирования таких аппаратов. В диссертационной работе эта задача рассматривается с точки зрения исследования шумовых эффектов при осуществлении управления потоком/полетом с помощью ТСИЭ. Таким образом, исследования, проведенные в диссертации, являются актуальными и соответствуют современным мировым направлениям аэрокосмической науки.

Личное участие соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации. Все результаты, приведенные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично при научном руководстве Азаровой О.А.

Вклад Кравченко О.В. в результаты, изложенные в работах [1-9], заключался в следующем. Написание разделов обзора, касающихся взаимодействия и контроля ударных волн и головных ударных волн с неоднородными плазменными структурами (филаментарной плазмой), а также численного моделирования управления высокоскоростными потоками с помощью термически стратифицированных плазменных структур 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].

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением численных методов и моделей, основанных 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.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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 $M_{ув} \geq 6$.

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 $M_\infty = 1.5; 2$ для рассмотренной геометрии потока получено, что использование ТСИЭ в целях управления высокоскоростным потоком/полетом не сопровождается увеличением звукового воздействия на поверхность.

Практическая значимость диссертационного исследования Кравченко О.В. 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 подъемными 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.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 12 международных и всероссийских 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» (CMAM 2024 & DEA), Dalian, 2 – 4 august, 2024.
4. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 21 – 25 августа, 2023 г.
5. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2023), Москва, 28 – 31 марта 2023 г.
6. Всероссийский научный симпозиум по проблемам аэромеханики и газовой динамики, посвящённый 100-летию со дня рождения академика Горимира Горимировича Чёрного, Москва, 23 – 24 января, 2023 г.
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, 2022 г.
9. Международная конференция «Авиационное моторостроение» ICAM2020, Москва, 18 – 21 мая 2021 г.
10. 16-ая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва, 28 июня – 2 июля, 2021 г.
11. 19th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (IWMPA2020), Москва, 15 – 17 сентября, 2020 г.
12. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 1 – 4 July 2019, Madrid, Spain.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 9 работах в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним изданиях, входящим в международные наукометрические базы:

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, 1-ый уровень Белого списка журналов РФ.

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения.

Диссертация Кравченко Олега Викторовича «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии» является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, и 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а также паспорту научной специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы», в частности следующим пунктам:

- пункту 10 - «Аэродинамика и теплообмен летательных аппаратов»;
- пункту 14 - «Гидродинамическая устойчивость»;
- пункту 16 - «Тепломассоперенос в газах и жидкостях»;
- пункту 19 - «Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред».

Диссертация Кравченко Олега Викторовича «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на заседании семинара отдела № 25 ФИЦ ИУ РАН 14 января 2026 г., выписка из протокола №1. Присутствовало на заседании 10 человек. Результаты голосования «за» - 10, «против» - нет. «воздержалось» - нет.

Председатель семинара:

д.ф.-м.н.

рук. отдела № 25 ФИЦ ИУ РАН



Ю.А. Флëров

Секретарь:

к.т.н.

с.н.с. отдела № 25 ФИЦ ИУ РАН

Д.Р. Гончар