

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертационной работе 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 «Управление высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел с помощью стратифицированных источников энергии» является цельным самостоятельным научным исследованием, в котором содержится решение научных задач, имеющих значение для развития аэрокосмической науки. Данная работа выполнена в отделе 25 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН).

Диссертация посвящена исследованию механизмов управления высокоскоростными газодинамическими потоками с использованием неоднородных плазменных структур, а именно, термически стратифицированных источников энергии. Немеханическое энергетическое (плазменное) управление потоком и аэродинамическими характеристиками модели имеет существенные преимущества перед механическим управлением, особенно в контексте задач сверхзвуковой авиации, т. к. оно обеспечивает более быстрый отклик системы и исключает наличие движущихся частей, подверженных износу. Плазменное управление высокоскоростными потоками широко изучается в мировой аэрокосмической науке. Исследования демонстрируют перспективность использования различных плазменных методов управления потоком для контроля взаимодействия пограничного слоя с ударными волнами, контроля отрыва потока, а также управления головной ударной волной с помощью формирования плазменных структур на поверхности модели или перед фронтом волны. В настоящее время активно разрабатываются устройства для организации плазмуправляемых течений и изучаются механизмы их действия. Также широко исследуется проблема понижения шума (Sonic Boom Problem) при проектировании сверхзвуковых летательных аппаратов, что важно для развития сверхзвуковой гражданской авиации.

В диссертации О.В. Кравченко проведены численные исследования и анализ литературы, опубликованной в мире, по моделированию управления высокоскоростными потоками с использованием пространственно многокомпонентных плазменных структур. Исследовано воздействие термически стратифицированных источников энергии на одиночную ударную волну,

движущуюся со сверхзвуковой скоростью, рассмотрены гиперзвуковые взаимодействия, а также ударно-волновые структуры, возникающие при высокоскоростном обтекании аэродинамических тел потоком, содержащим стратифицированный источник энергии. Другим направлением исследований являлась проблема анализа полей параметров в ближнем поле и на поверхности земли для оценки шумового воздействия на поверхность (Sonic Boom Problem) при осуществлении управления высокоскоростным потоком плазмогазодинамическим методом с использованием термически стратифицированного источника энергии.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, формулируются цели, задачи и положения, выносимые на защиту, обсуждается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, проводится анализ методов исследования и степени достоверности результатов. Представлена апробация работы, перечислены публикации автора по теме диссертации, а также дана информация об объеме и структуре диссертации.

В **Главе 1** проведен аналитический обзор экспериментальных и теоретических результатов по получению и исследованию пространственно-многокомпонентных плазменных структур и комбинированного вложения энергии в высокоскоростной поток в целях осуществления немеханического энергетического (плазменного) управления потоком/полетом. В обзоре представлены работы по экспериментальному получению и численному моделированию многокомпонентных плазменных структур и использованию комплексов актуаторов на основе плазмы филаментарного типа для целей управления взаимодействием ударной волны/головной ударной волны с источником энергии, а также для управления взаимодействием ударной волны с пограничным слоем. Отдельные разделы посвящены управлению высокоскоростными потоками с использованием комбинированных физических явлений и численному прогнозированию возможностей управления потоками с использованием продольно-слоистых плазменных структур. Показаны широкие возможности организации и применения пространственно многокомпонентной структурированной плазмы для целей управления высокоскоростными потоками.

Глава 2 посвящена рассматриваемой математической модели для течений вязкого теплопроводного газа (воздуха) при наличии локального энерговклада. Приводится вывод безразмерных уравнений Навье-Стокса для совершенного газа в дивергентном виде, изложено описание разностной схемы, используемой для численного решения уравнений Навье – Стокса. Предложен TVD (Total Variation Diminishing) вариант лимитера, предотвращающего появление нефизических осцилляций в областях с большими градиентами параметров и обеспечивающего монотонность численного решения. Приводятся математические постановки исследуемых задач и описание используемого программного комплекса FlowView для численного решения системы уравнений Навье – Стокса. Проводится

верификация используемого программного комплекса в рамках решения задач, поставленных в диссертации, включая тестовые задачи, сравнение с экспериментальными данными и расчетами других авторов и исследование сеточной сходимости, которая также в дальнейшем проверяется отдельно для каждой задачи. В конце главы приводятся выводы.

В **Главе 3** проводится исследование воздействия термически стратифицированной плазменной области на плоскую ударную волну. Представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных взаимодействию первоначально плоской ударной волны с локальной стратифицированной областью плазмы, формируемой под воздействием ионизационной неустойчивости газового разряда. Приводится физическая формулировка задачи, исследуется взаимодействие плоской ударной волны с термически стратифицированной областью. Воспроизводится режим практически полного размытия фронтов ударной волны и контактного разрыва при взаимодействии с областью стратифицированного источника энергии, зафиксированный в экспериментах. Показано, что этот режим связан с развитием множественных сдвиговых неустойчивостей Рихтмайера–Мешкова, приводящих к формированию ячеистой структуры области фронта ударной волны и потере выраженной формы ее фронта.

Приводятся результаты моделирования экспериментально наблюдаемого режима течения с искривлением фронта ударной волны при воздействии термически стратифицированного источника энергии. Исследовано перераспределение энергии при взаимодействии ударной волны с термически стратифицированной областью и показано, что за фронтом ударной волны формируются локальные области повышенной энергии по сравнению со случаем воздействия однородного источника. Получены результаты для больших чисел Маха ударной волны при гиперзвуковом взаимодействии, которые указывают на тот факт, что в слоях источника проявляются эффекты, связанные с перераспределением энергии между слоями. Проведена оценка эффективности воздействия термически стратифицированного источника энергии на различные типы энергии, характеризующие рассмотренное взаимодействие.

Предложен метод моделирования распространения ударной волны через область ионизационной неустойчивости на основе цифровой обработки экспериментальных данных. 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. При этом получены парные грибовидных структуры, характеризующие сложный характер нелинейного взаимодействия ударной волны с асимметрично

расположенной стратифицированной средой и которые ранее в литературе не описывались. В конце главы приводятся выводы.

В **Главе 4** проводится численное исследование воздействия термически стратифицированного источника энергии на высокоскоростное обтекание аэродинамического тела. Приводится постановка физической задачи и методология ее решения, исследуется влияние термически стратифицированного источника энергии на головную ударную волну и аэродинамические характеристики тела. Показано, что на начальной стадии взаимодействия в полях плотности газа фиксируется проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, после чего формируются вихревые (грибовидные) структуры, взаимодействующие с фронтальной поверхностью тела. Получено, что воздействие многотурбулентной структуры на обтекаемое тело сопровождается значительным преобразованием потока внутри ударного слоя, а также изменением характеристик аэродинамического тела. Показано, что применение термически стратифицированного источника энергии (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.

Сформулированы принципы управления высокоскоростным потоком с применением стратифицированного источника энергии. Показана возможность управления силами сопротивления и подъемными силами (при нулевом угле атаки) с помощью изменения температурного профиля в слоях источника и числа слоев в нем. С использованием метода Томаса (Thomas) для моделирования прохождения сигнала через атмосферу, а также пакета с открытым исходным кодом PyLdB, использующего алгоритма Mark VII для вычисления воспринимаемого уровня громкости, проведена оценка влияния использования стратифицированного источника энергии при высокоскоростном обтекании заостренного цилиндрического тела на сигнатуры давления и уровень воспринимаемой громкости на поверхности земли. Для рассмотренной геометрии обтекаемого тела установлено, что использование термически стратифицированного источника энергии для управления потоком не увеличивает уровень воспринимаемой громкости на поверхности земли. В конце главы приводятся выводы.

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

- 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, а также модуля для автоматизации задания параметров термически стратифицированного источника энергии;

- получены результаты моделирования известных экспериментов по

воздействию стратифицированного источника энергии на плоскую ударную волну. Получены режимы взаимодействия, характеризующиеся искривлением фронта ударной волны, а также режимы с полным размытием ее фронта за счет множественного проявления неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Показано, что под воздействием стратифицированного источника энергии происходит перераспределение энергии с образованием горячих областей, температура в которых в несколько раз превышает температуру при воздействии однородного источника;

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

- 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.

Результаты, включенные в диссертацию, получены автором самостоятельно под руководством научного руководителя диссертации. Текст работы написан лично соискателем.

Диссертация О.В. Кравченко соответствует паспорту специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы», поскольку в ней предложена математическая модель взаимодействия стратифицированной плазменной области с ударно-волновыми структурами; поскольку с помощью указанной модели проведены исследования экспериментальных результатов по воздействию стратифицированной области газа на ударную волну в условиях высокоскоростного взаимодействия; поскольку проведены оценки воздействия термически стратифицированного источника энергии на сверхзвуковое обтекание аэродинамического тела и влияния такого типа источников на воспринимаемую громкость в децибелах при осуществлении управления высокоскоростным потоком.

Научная новизна и значимость данного диссертационного исследования заключается в разработке научных основ управления высокоскоростными газодинамическими процессами посредством локального стратифицированного энергетического воздействия. Проведенные исследования вносят вклад в развитие знаний в области высокоскоростной аэродинамики и методов управления потоком с использованием стратифицированных плазменных областей, включая изучение процессов перераспределения энергии в газодинамических структурах при

высокоскоростном обтекании, а также оценку уровня шума при управлении потоком/полетом с помощью стратифицированного энергетического воздействия.

Результаты диссертации опубликованы с необходимой полнотой в 9-ти статьях в изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в международные базы цитирования (SCOPUS и/или Web of Science), в том числе, в 4-х статьях, опубликованных в журналах, входящих в первый или второй квартили этих международных баз цитирования и в одной работе в журнале первого уровня Белого списка журналов РФ. Результаты диссертации представлялись на 12-ти международных и всероссийских конференциях. Работа была обсуждена на семинарах в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук и в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Считаю, что диссертация Кравченко Олега Викторовича представляет собой цельное и завершённое исследование, демонстрирующее высокую квалификацию автора в области механики жидкости, газа и плазмы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертационная работа 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».

Научный руководитель, вед. науч. сотр. отдела 25
ФИЦ ИУ РАН, д.ф.-м.н.

16.02.2026г. 

О.А. Азарова

Подпись Азаровой О.А. заверяю,
Зам. директора ФИЦ ИУ РАН




Р.В. Разумчик