

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.240.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ
МЕХАНИКИ ИМЕНИ А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
БРЫЗГАЛОВА АНДРЕЯ ИВАНОВИЧА
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета
от 06 октября 2022 года, протокол № 9

О присуждении Брызгалову Андрею Ивановичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 14 июля 2022 года, протокол № 6 диссертационным советом Д 002.240.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012)

Соискатель Брызгалов Андрей Иванович, 08 октября 1991 года рождения, в 2017 г. окончил механико-математический факультет Белорусского государственного университета по специальности «Механик. Математик-прикладник». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2022 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН). В период подготовки диссертации Брызгалов А.И. работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) в лаборатории термогазодинамики и горения в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в лаборатории термогазодинамики и горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН Якуш Сергей Евгеньевич. Работает в Федеральном государственного бюджетного учреждения науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук в должности директора.

Официальные оппоненты:

Киверин Алексей Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией вычислительной физики (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук);

Смирнов Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией волновых процессов (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. В своем положительном заключении, подписанным ведущий научный сотрудник – заведующим лабораторией федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. Ф.Иоффе Российской академии наук, кандидатом физико-математических наук Поняевым С.А. указала, что достоверность диссертационной работы Брызгалова А.И. обеспечивается корректным созданием математической модели, выбора апробированных численных схем решения уравнений, проведением валидации модели и численной реализации на известных задачах релаксации параметров плазмы за фронтом ударной волны. Также полученные в результате работы расчетные значения теплового потока для плазмотронов ИПМех РАН хорошо совпадают с экспериментально измеренными по своей выбранной тематике безусловно актуальна, т.к. расширяет класс задач для решения новых технологических проблем, имеющих место, к примеру, в бумажной промышленности, ткацкой, а также в иных областях техники,

имеющих дело с движущимися протяженными объектами. При этом автор поднимает вопрос очень важный и носящий междисциплинарный характер - это вопрос устойчивости и возможные методы стабилизации таких объектов.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 10 научных работ, изданных в периодических научных изданиях, сборниках материалов и тезисах докладов международных и всероссийских конференций, в том числе 7 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Vasilevskii S.A., Kolesnikov A.F., Bryzgalov A.I., Yakush S.E. Computation of inductively coupled air plasma flow in the torches // Journal of Physics: Conference Series. 2018 V. 1009, 012027, P. 1–15. (WoS, Scopus).
2. Vasilevskii S.A., Kolesnikov A.F., Bryzgalov A.I., Yakush S.E. Numerical testing of the similarity conditions for the induction plasmotrons // Journal of Physics: Conference Series. 2019 V. 1250, 012043, P. 1–13. (WoS, Scopus).
3. Yakush S.E., Rashkovskiy S.A., Bryzgalov A.I. Combustion in a solid fuel scramjet with channel geometry variation due to burnout // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1250, 012042, P. 1–8. (WoS, Scopus).
4. Брызгалов А.И. Численное моделирование течения термически и химически неравновесного воздуха за фронтом ударной волны // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия «Естественные науки». 2021. №3(96) С. 94–111. (Scopus).
5. Брызгалов А.И., Якуш С.Е., Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное моделирование неравновесных дозвуковых течений диссоциированного воздуха около цилиндрического тела // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021, Т. 22, №5, С. 1–14. (ВАК).
6. Брызгалов А.И., Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Якуш С.Е. Теплообмен цилиндрического тела с каталитической поверхностью при обтекании потоком дозвуковой неравновесной воздушной плазмы // Известия РАН. МЖГ. 2022, №5, С. 1–19. (WoS, Scopus).
7. Брызгалов А.И. Теплообмен цилиндрического тела с каталитической поверхностью при обтекании потоком дозвуковой неравновесной воздушной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, №2, С. 1–14. (ВАК).

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке научных задач, их решении, анализе результатов и подготовке публикаций [1–7]. Им лично были созданы программы ShockWaveAir и IPG2D, использовавшиеся во всех численных расчетах, вошедших в диссертацию. При теоретической поддержке научного руководителя автором реализован модуль расчета электрического поля в разрядном канале в двумерной постановке [1, 2], расширивший возможности используемой в ИПМех РАН программы Alpha. В работе [3] соискателем апробирована схема численного расчета газодинамических потоков, реализованная затем им лично в программе IPG2D. Работы [4] и [7] по расчету релаксационной зоны и теплообмена в дозвуковых потоках плазмы азота выполнены соискателем самостоятельно. В работах [5, 6] соискатель выполнил весь объем численных расчетов, а постановка задачи и анализ результатов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами публикаций из лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с веществом ИПМех РАН.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- К.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника – заведующего лабораторией федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. Ф.Иоффе Российской академии наук, Поняева С.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Так как в качестве одного из положений выносимого на защиту заявляется разработка вычислительной модели, то следовало более подробно остановиться на отличии предлагаемой модели, от существующих на данный момент. 2. При сравнении результатов расчетов охлаждаемых моделей в воздушной и азотной плазмы отсутствует анализ погрешности экспериментальных данных, поэтому приведенные точные проценты отклонения значений тепловых потоков полученных в результате экспериментов и расчетов не совсем корректны.
- Д.ф.-м.н., заведующего лабораторией Вычислительной физики ФГБУН Объединенного института высоких температур РАН Киверина А.Д., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. При формулировании основных положений, выносимых на защиту, на мой взгляд, не вполне корректно использовать формулировку «с точностью не хуже 29%». Речь идет об ошибке, не превышающей 29%. Причем, при формулировании положения 3 автор пишет более корректно о «существенных (до 27%) ошибках». 2. Стр. 39, 6 строка сверху, не очень удачное предложение. Дословно написано «приходящей из области характеристики», но о какой области (расчетной области или области за

пределами входной границы) идет речь не ясно. На мой взгляд, было бы полезным проиллюстрировать схему построения граничных условий на открытых границах. 3. Стр. 52, не приведена литературная ссылка, откуда взяты значения характеристических температур 3354 К и 2240 К. 4. Стр. 77, автор говорит о «нефизичных вихревых образованиях...». Как формулировались критерии «нефизичности»? Учитывается ли в рассматриваемом процессе обратное влияние газодинамики плазмы на электромагнитное поле? 5. Стр. 90, автор говорит о «прямоугольной области», по всей видимости, это опечатка, и следует говорить о цилиндрической области. 6. Стр. 91, из текста не ясно, проводился ли анализ чувствительности решения к сгущению сетки. Кроме того, на стр. 103, автор говорит о том, что «острый максимум наблюдался в пределах одной сеточной ячейки», в связи с этим возникает вопрос, проверялась ли как-то чувствительность решения к выбору шага расчетной сетки. 7. Стр. 119, автор указывает значения отклонений (29%) и среднеквадратичного отклонения (16.4%). Насколько достигнутая в расчетах точность лучше других моделей, используемых другими авторами? 8. Текст диссертации в целом написан грамотным и понятным языком, но, тем не менее, в тексте иногда встречаются грамматические и синтаксические опечатки (так, на стр. 46, присутствует не вполне удачное предложение «В решении представляет интерес проведение численного решения...», на стр. 57 сказано «на рис. 3.1 и 3.1», на стр. 110, ссылка на таблицу 11 раньше, чем на таблицу 10).

- Д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой газовой и волновой динамики МГУ им. М.В. Ломоносова Смирнова Н.Н., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В записях коэффициентов переноса не указаны размерности. Приведенные формулы являются полуэмпирическими и единицы измерения скрыты в подгоночных константах, смысл которых не поясняется. 2. При проведении расчетов нестационарных течений желательно приводить оценки возможного накопления ошибок в каждом конкретном расчете. 3. Диссертация состоит из шести глав, хотя кандидатские диссертации как правило содержат от трех до четырех глав.
- К.т.н., зам. директора по научной работе и инновационной деятельности Института тепло и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси Савчина В.В. Отзыв положительный, без замечаний. Отмечено, что проведенные автором систематические исследования течения плазмы для различных режимов работы плазмотрона и типов материала поверхности

образцов важны для решения широкого круга задач высокоскоростного обтекания тел.

- Д.ф.-м.н., профессора кафедры теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана Рыжкова С.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В разделе научная новизна следовало бы указать, что впервые получены распределения тепловых потоков вдоль поверхности образца только при дозвуковом обтекании. При сверхзвуковом обтекании такие распределения уже получены ранее (Сахаров В.И. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2007). 2. В разделе методология и методы исследования говорится про учёт химической и температурной неравновесности. В описании второй главы говорится, что применительно к течению в барокамере плазмотрона используется модель только химически неравновесной плазмы. 3. В пятой и шестой главах проводится сравнение тепловых потоков с использованием известных эффективных коэффициентов рекомбинации, опубликованных в экспериментальной научной статье. Для полноты картины следовало бы ещё рассчитать коэффициенты рекомбинации и сравнить их со значениями, приведёнными в публикации.
- Д.т.н., доцента, профессора кафедры 204 Московского авиационного института Молчанова А.М. и к.ф.-м.н., доцента кафедры 306 Московского авиационного института Харченко Н.А., которые наряду с положительным отзывом сделали следующие замечания: 1) В автореферате не представлены основные уравнения, описывающие течение химически и термически неравновесной плазмы; 2) В автореферате при описании результатов численного моделирования различных задач не приводится информация об используемых вычислительных ресурсах и вычислительной сложности задач.
- Д.ф.-м.н., профессора, чл.-корр. РАН, главного научного сотрудника ФАУ «ЦАГИ» Егорова И.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: При чтении автореферата возникли следующие замечания: 1. Отсутствует комментарий касательно причины существенного расхождения одномерной и двумерной моделей при расчёте энтальпии на выходе из разрядного канала ВГУ-3. 2. Из представленного на рис. 9 сравнения можно заключить, что отклонения экспериментальных данных от расчётных носят систематический характер и связаны с недостаточным количеством сведений об

экспериментальных условиях. Источник расхождения следует найти, так как полученное среднеквадратичное отклонение между расчётом и экспериментом существенно (16.4%).

- Д.ф.-м.н., профессора, зав. кафедрой математической физики ФГАОУ ВО Национальный исследовательский томский государственный университет Крайнова А.Ю., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Считаю некорректным использование термина «движение упругих материалов» т.к. рассматриваются задачи движения тел определенной геометрии выполненных из упругих материалов. В названиях своих статей автор указывает конкретные виды тел, а не материалов. 2. В третьей главе приводится численное решение задачи определения оптимального распределения слоев по толщине полотна на основе генетического алгоритма. Не приведены данные о сходимости процесса построения решения, которые позволили бы судить об эффективности предложенного метода. 3. При этом автор принял не стандартную форму написания автореферата, когда в обзорной части ссылается на 38 публикаций других авторов! Это заняло 4,5 стр. текста автореферата.
- Д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отделение 2 Моделирование сложных физических и технических систем", Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" Титарев В.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1) Не выписаны расчетные уравнения и метод их решения. Более того, нет никакой информации о разрешении использовавшихся расчетных сеток, оценок точности полученных решений и требуемых затрат машинного времени. Строго говоря, сравнение с экспериментом не является оценкой точности расчета. 2) Автореферат не содержит информации о числе используемых в расчете ядер и требуемых расходах машинного времени в ядро-часах. 3) Расчетный код является осесимметричным и работает только на блочно-структурированных сетках. Планирует ли автор переходить к использованию полностью трехмерных кодов на произвольных неструктурированных сетках? Пример такого кода описан в работе М.Н. Петров, А.А. Тамбова, В.А.Титарев, С.В. Утюжников. А.В. Чикиткин. Программный комплекс FlowModellillm для расчета

высокоскоростных течений сжимаемого газа. Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018, Т. 58. N. 11, С. 1932-1954.

- Д.ф.-м.н., зав. лабораторией физико-химической газодинамики Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова Сахарова В.И., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В постановке всех задач рассматриваются только осесимметричные течения без учета закрутки вдуваемого в разрядный канал газа, которая присутствует в экспериментах на плазмотронах. Это может сказаться на выводах о степени каталитичности покрытий моделей. 2. В диссертации рассмотрены расчеты обтекания цилиндрических моделей с острыми кромками на декартовых сетках, что ограничивает класс геометрий моделей в экспериментах, например, со скругленными кромками (евромодель, сферический носок, и т.д.). 3. Использование разбиения области течения на три в расчетах течений в плазмотронах, без взаимного влияния их друг на друга, может дать неверный результат, особенно, когда модель в рабочей камере расположена близко к выходному сечению разрядного канала.
- Д.ф.-м.н., профессора, зав. лабораторией физики плазменно-дуговых и лазерных процессов Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Ковалева О.Б., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Результаты работы позволяют моделировать обтекание спускаемого аппарата при входе в атмосферу т.е. на начальном участке пути где плотность воздуха низкая, скорость потока невысокая, что вполне удовлетворяет параметрам расхода воздуха в барокамере индукционного плазмотрона. В плотных слоях атмосферы обтекание аппарата происходит в других условиях, которые в ВЧ-плазмотроне трудно воспроизвести. 2. В обзорной части работы нет информации о широком применении электродуговых плазмотронов. Наряду с ВЧ-плазмотронами по нагреву газов требуется дать сравнительные характеристики электродуговых плазмотронов переменного и постоянного тока. Особое место здесь могут занимать электродуговые плазмотроны постоянного тока с межэлектродной вставкой.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у официальных оппонентов и представителя ведущей организации публикаций по теме работы соискателя:

1. Попов П.А., Сахаров В.А., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Монахов Н.А. Измерение тепловых потоков датчиками на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте на ударных трубах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22. № 3. С. 31-41.
2. Чернышев А.С., Шмидт А.А. Моделирование распределения дисперсной фазы при течении в цилиндрической области методами вычислительной гидродинамики // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 1. С. 32-35.
3. Popov P.A., Monakhov N.A., Poniaev S.A., Kotov M.A. Experimental investigation of the thermal loads upon electrodynamic modification of supersonic flow around axisymmetrical body // IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng. 927 012084
4. Безверхний Н.О., Бобашев С.В., Колычев А.В., Монахов Н.А., Поняев С.А., Сахаров В.А. Исследование эффекта электронного охлаждения. Обзор современного состояния работ // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 3. С. 323–328.
5. Ряховский А.И., Шмидт А.А., Антонов В.И. Численное моделирование взаимодействия магнитного поля с потоком ионизированного газа в континуальном и свободномолекулярном режиме // Восемнадцатое Международное Собрание по Магнитоплазменной Аэродинамике. 2019. С. 169-173.
6. Кузнецов В.И., Поняев С.А., Дьяков Б.Б. Технические инновации и газодинамические исследования // Природа. 2018. № 9 (1237). С. 32–40.
7. Popov P., Poniaev S., Nakhimovich M., Shvarts M. Photovoltaic module with sunlight concentrators: numerical simulation of steady state thermal regime // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1135 (2018) 012100.
8. Ларионов Н.В., Овчинников С.Ю., Смирновский А.А., Шмидт А.А. Применение теории возмущений к исследованию возникновения квантовых вихрей, образующихся при воздействии сверхкороткого импульса электромагнитного поля на атом // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 11. С. 1621–1627.
9. А. Д. Киверин, И. С. Яковенко. О роли локальных эффектов в развитии горения // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58. – № 3. – С. 32-39.

10. А. Д. Киверин, А. Е. Смыгалина. Механизмы развития интенсивных динамических процессов при сжигании водорода в камерах сгорания ДВС // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – № 1. – С. 103-107.
11. V. P. Efremov, A. D. Kiverin. Compression-induced fracture in silicon dioxide as a mechanism of ultra fast plasma propagation under the action of intense laser pulse // Acta Astronautica. – 2021. – Vol. 181. – P. 655-659.
12. V. P. Efremov, A. D. Kiverin. Hydrodynamic processes determining the silica fracture under the action of high-intense laser // Acta Astronautica, 2020, V. 176, P. 662-665.
13. И. С. Яковенко, И. С. Медведков, А. Д. Киверин. Структура и динамика фронта горения обедненной водородно-воздушной смеси в проточном реакторе // Химическая физика. – 2022. – Т. 41. – № 3. – С. 85-90.
14. V. Efremov, A. Kiverin, I.Yakovenko, E.Baldina, A.Baldin, V.Bleko. Modeling of heat and hydrodynamic processes in the big uranium target “BURAN” under the action of high-energy ions.// Journal of Physics: Conference Series, 1686 (2020) 012072
15. В.П.Ефремов, А.Д.Киверин, И. С. Яковенко [и др.] Моделирование тепловых и гидродинамических процессов в большой урановой мишени «БУРАН» под действием высокоэнергетичных протонов // VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2020». Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2020. – С. 275-276.
16. А.Д.Киверин, И.С.Яковенко, В.Е.Фортов. Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 489. – № 5. – С. 461-464.
17. A.D.Kiverin, I.S.Yakovenko Evolution of wave patterns and temperature field in shock-tube flow // Physical Review Fluids, 2018, V. 3, Issue 5, P. 053201.
18. M.F.Ivanov, A.D.Kiverin, A.E.Smygalina [et al.] Mechanism of self-ignition of pressurized hydrogen flowing into the channel through rupturing diaphragm // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – No 16. – P. 11902-11910.
19. N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, L. I. Stamov. Different scenarios of shock wave focusing inside a wedge-shaped cavity in hydrogen-air mixtures // Aerospace Science and Technology. – 2022. – Vol. 121. – P. 107382.
20. Neural network approach to solve gas dynamics problems with chemical transformations / V. B. Betelin, B. V. Kryzhanovsky, N. N. Smirnov [et al.] // Acta Astronautica. – 2021. – Vol. 180. – P. 58-65.

21. Н. Н. Смирнов, В. В. Тюренкова, В. Ф. Никитин. Цифровые модели для решения многомасштабных задач горения // Успехи кибернетики. – 2021. – Т. 2. – № 4. – С. 30-41.
22. N. N. Smirnov, A. B. Kiselev, P. P. Zakharov. Numerical simulation of the hypervelocity impact of the ball and the spherical containment in three-material statement // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 171. – P. 215-224.
23. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Stamov L.I., Mikhachenko E.V., Tyurenkova V.V. Three-dimensional modeling of rotating detonation in a ramjet engine // Acta Astronautica. 2019. V. 156. P. 168-176.
24. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Stamov L.I., Tyurenkova V.V., Penyazkov O.G., Sevrouk K.L. Nonequilibrium processes in meta-stable media // The European Physical Journal E - Soft Matter. 2018. V. 41. № 5. P. 66.
25. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Zakharov P.P. Numerical simulation of the high-speed collision of the ball and the spherical fluid-filled shell // Acta Astronautica. 2018. V. 150. P. 62-72.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана вычислительная модель и расчетная программа IPG2D для химически и термически неравновесной плазмы, позволяющая осуществлять математическое моделирование течений диссоциированного и однократно ионизованного газа в индукционном плазмотроне и определять тепловые потоки на поверхности с различной каталитической активностью. Проведено моделирование релаксационной зоны за фронтом сильной ударной волны в кислороде и воздухе с учетом химической и температурной неравновесности, **подтверждена** правильность работы модуля неравновесной химической кинетики. Выполнены сравнительные расчеты течений в разрядном канале плазмотрона на основе одномерной и двумерной моделей электрического поля. **Проведены** систематические расчеты 28 экспериментов на плазмотроне ВГУ-4 по теплообмену дозвуковых высокоэнтальпийных потоков воздуха с металлическими покрытиями, а также расчеты 12 экспериментов по теплообмену дозвуковых потоков высокоэнтальпийного диссоциированного азота с металлами и графитом. Получены характеристики сверхравновесного нагрева материала вблизи разрыва каталитической активности поверхности.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Разработан метод расчета течения неравновесной плазмы в барокамере

индукционного плазмотрона на основе численных схем, позволяющих изучать течения плазмы широком диапазоне чисел Маха. **Исследовано** обтекание плазмой цилиндрических тел с каталитической вставкой, изучена структура пограничного слоя вблизи каталитической поверхности, расчетным путем получены количественные оценки неравномерности теплового потока по поверхности каталитической вставки. **Продемонстрировано** резкое локальное увеличение теплового потока при переходе с низкокаталитической поверхности на высококаталитическую (эффект сверхравновесного нагрева), наблюдающееся экспериментально. **Показано**, что увеличение теплового потока обусловлено поведением его рекомбинационной составляющей и происходит за счет диффузионного и конвективного переноса атомов в пограничном слое вдоль поверхности тела.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что:

Результаты работы существенно расширяют **возможности проведения** численных расчетов течений в уникальных научных установках (УНУ) – плазмотронах ВГУ-4 и ВГУ-3 ИПМех РАН, в части моделирования режимов работы с большой мощностью, исследовать распределения тепловых потоков по поверхности обтекаемой модели, в том числе с переменной каталитичностью. Проведенные исследования **подтвердили** количественно правомерность используемой в ИПМех РАН расчетной методики определения эффективных коэффициентов каталитической рекомбинации материалов по данным экспериментов на плазмотроне ВГУ-4, в части расчета электрического поля в разрядном канале по одномерной модели и предположения о равномерности теплового потока по площади калориметра. В то же время, показано, что при переходе к геометрии и уровням мощности, характерным для мегаваттного плазмотрона ВГУ-3, требуется корректировка методики. Разработанная вычислительная модель и программа IPG2D в дальнейшем позволит осуществлять сопровождение экспериментов на мегаваттном плазмотроне ВГУ-3, исследовать течения плазмы в широком диапазоне чисел Маха с учетом эффектов неравновесности.

Достоверность результатов исследования обеспечена строгой постановкой решаемых задач на основе уравнений Навье-Стокса, сравнением разработанных численных подходов и полученных с их помощью результатов с известными аналитическими и численными решениями, проведением валидационных расчетов и сравнением результатов с данными экспериментальных измерений.

Личный вклад соискателя состоит в том, что:

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке научных задач, их решении, анализе результатов и подготовке публикаций [1–7]. Им лично были созданы программы ShockWaveAir и IPG2D, использовавшиеся во всех численных расчетах, вошедших в диссертацию. При теоретической поддержке научного руководителя автором реализован модуль расчета электрического поля в разрядном канале в двумерной постановке [1, 2], расширивший возможности используемой в ИПМех РАН программы Alpha. В работе [3] соискателем апробирована схема численного расчета газодинамических потоков, реализованная затем им лично в программе IPG2D. Работы [4] и [7] по расчету релаксационной зоны и теплообмена в дозвуковых потоках плазмы азота выполнены соискателем самостоятельно. В работах [5, 6] соискатель выполнил весь объем численных расчетов, а постановка задачи и анализ результатов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами публикаций из лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с веществом ИПМех РАН.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: дать сравнительный анализ используемых математических и физических моделей плазмы с моделями других групп исследователей; дать пояснение сходимости полученных решений по отношению к шагу сетки; объяснить физические причины сильного различия в результатах расчетов по одномерной и двумерной модели электрического поля для плазмотрона ВГУ-3; пояснить возможные причины систематического отклонения результатов расчетов тепловых потоков в плазме азота от экспериментальных данных.

Соискатель ответил по существу на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, дал пояснения по используемым физико-химическим моделям, кинетическим схемам и численным методам решения задач, оценке зависимости результатов от шага сетки, методике сравнения численных решений с экспериментальными данными, возможным причинам более низкой точности полученных результатов для плазмы азота, использованию эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации из экспериментальных работ.

На заседании 06.10.2022 **Диссертационный совет принял решение** за существенный вклад в развитие численных подходов к решению задач течения плазмы в высокочастотных плазмотронах и получение новых достоверных результатов, имеющих существенное значение для развития механики жидкости, газа и плазмы, **присудить Брызгалову Андрею**

Ивановичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 доктора наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета
Д 002.240.01 при ИПМех РАН,
академик РАН



Климов Д.М.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.240.01 при ИПМех РАН,
к.ф.-м.н.



Сысоева Е.Я.

07 октября 2022 г.