

## ОТЗЫВ

**официального оппонента** на диссертационную работу Брызгалова Андрея Ивановича «Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы» в диссертационном совете Д 002.240.01 при ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.).

Диссертационная работа Брызгалова А.И. посвящена численному моделированию газодинамики плазмы. В рамках диссертационной работы автор разработал математическую модель течения химически неравновесной плазмы с учетом влияния внешнего электрического поля на компоненты плазмы и каталитических свойств обтекаемой поверхности. Математическая модель реализована программно с использованием современных вычислительных схем для дозвуковых и сверхзвуковых течений. Представлены результаты расчетов конкретных задач о неравновесной релаксации за сильными ударными волнами, о течении в разрядном канале и нагреве среды под действием электрического поля, об обтекании цилиндрических образцов плазмой воздуха и азота. Проведен всесторонний анализ получаемых решений с привлечением экспериментальных данных, показана применимость разработанной методики для решения конкретных задач об эволюции течений в плазмотроне. В работе продемонстрированы корректность полученных решений, преимущества предложенных автором методик математического моделирования, а также особенности развития моделируемых численно физических процессов. Полученные автором результаты имеют научную и практическую ценность для развития технологий расчетно-теоретического анализа и интерпретации процессов,

развивающихся на поверхностях летательных аппаратов, обтекаемых горячей плазмой при входе в атмосферу, что в свою очередь представляет практическую важность для решения задачи разработки теплозащитных покрытий.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация Брызгалова А.И. изложена на 143 страницах, состоит из введения, шести глав и заключения. Работа содержит 11 таблиц и 49 рисунков. Список литературы содержит 135 наименований.

Во введении сформулированы цель и задачи диссертации, обоснована их актуальность, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность, а также достоверность полученных результатов. Здесь же автор формулирует положения, выносимые на защиту. Представлены личный вклад автора и информация об апробации результатов диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы приводится описание объектов исследования – эксплуатируемых в настоящее время в мире плазмотронов и обзор литературы по исследуемой проблеме.

Во второй главе приводится описание математических моделей, используемых в работе, включая модель газодинамики многокомпонентного газа с учетом вязкости и теплопроводности, кинетические модели для воздушной и азотной плазмы, модель диффузии компонент плазмы во внешнем электрическом поле, а также граничные условия. Представлена расчетная схема, используемая для решения системы уравнений, входящих в математическую модель. Описана компьютерная реализация математической модели в рамках программного комплекса IPG2D.

В третьей главе представлены результаты математического моделирования термически и химически неравновесного течения в области релаксации за фронтом сильной ударной волны. Расчеты проведены в нульмерном приближении для отдельно взятой лагранжевой частицы.

Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными о колебательной и поступательной температуре при сжатии кислорода сильными ударными волнами с температурой на фронте 5300 К и 6470 К.

В четвертой главе описаны двухмерная и локально одномерная математические модели электрического поля в разрядном канале плазмотрона при протекании тока в индукторе. Представлены расчеты с использованием двух моделей и проведено их сравнение для условий, реализуемых в плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4 (ИПМех РАН). Сделан вывод о том, что одномерная модель электромагнитного поля применима только для условий относительно тонких разрядных каналов и невысокой мощности, вкладываемой в плазму. С повышением мощности и увеличением диаметра разрядного канала растет погрешность получаемого с использованием одномерной модели решения, и необходимо использовать многомерные модели.

Пятая глава посвящена результатам численного моделирования обтекания воздушной плазмой цилиндрических мишеней, покрытых семью различными металлами. Расчеты проводились в условиях 28 экспериментов, предварительно проведенных в плазмотроне ВГУ-4. На основе полученных расчетных данных проведен анализ структуры пограничного слоя и теплового потока на поверхности мишени. Во всем диапазоне используемых металлических покрытий, имеющих различную каталитическую активность, получено хорошее совпадение с экспериментами по величине тепловых потоков.

Шестая глава посвящена результатам численного моделирования обтекания плазмой азота цилиндрической мишени. Расчеты проводились в условиях 12 экспериментов, предварительно проведенных в плазмотроне ВГУ-4. Продемонстрирована более высокая погрешность при определении теплового потока, чем в случае обтекания воздушной плазмой. Предложены возможные источники ошибки, определяемые особенностями постановки

задачи, включая особенности регистрации параметров в эксперименте и выбор кинетической схемы для газофазных реакций. Проведен анализ чувствительности возникающих тепловых потоков к поверхности к выбору кинетической схемы. Показано, что степень химической неравновесности растет с уменьшением каталитичности материала.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

**Актуальность работы.** Разработка и тестирование теплозащитных покрытий летательных и космических аппаратов является одной из первостепенных задач в области развития космонавтики. При этом основным методом тестирования теплозащитных покрытий является нагрев образца в струе плазмы в течение заданного времени, что реализуется в электродуговых и индукционных плазмотронах. При этом для анализа и корректной интерпретации физических процессов в плазмотроне необходимо всестороннее их исследование как экспериментальное, так и расчетно-теоретическое. В свою очередь успешное расчетно-теоретическое сопровождение

**Научная новизна** диссертационной работы определяется разработкой новых моделей для описания газодинамики плазмы в канале индукционного плазмотрона, их оригинальной компьютерной реализацией и результатами валидации, указывающими на перспективность использования разработанных новых моделей для расчетно-теоретического сопровождения процесса создания и тестирования теплозащитных покрытий для космических аппаратов. Продемонстрированные в расчетах особенности распределения тепловых потоков в условиях работы плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 существенно расширяет представления о создаваемых в барокамере плазмотрона условиях при испытании теплозащитных материалов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты, полученные Брызгаловым А.И. и представленные в тексте диссертационной работы, указывают пути развития математических моделей и

вычислительных комплексов для расчетно-теоретического сопровождения разработки и тестирования теплозащитных покрытий летательным аппаратам. Подробное описание моделей, описывающих широкий класс физических явлений, и их всесторонний анализ методами численного моделирования и сравнения результатов расчета с экспериментом является неотъемлемым шагом при разработке вычислительных комплексов и их последующего использования для расчетно-теоретического сопровождения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Полученные автором результаты могут быть использованы для решения широкого круга задач, исследуемых в таких научных центрах как АО ГНЦ «Центр Келдыша», Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ОИВТ РАН и др.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях.

**Публикации.** Результаты работы изложены в 11 научных работах, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, зарегистрирована 1 программа для ЭВМ. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертации.

**Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертации.

**Личный вклад автора** правильно и полно отражён в диссертации и автореферате.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие **вопросы и 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).

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертации. Диссертация содержит новые результаты, имеющие практическую и научную значимость для решения актуальной задачи разработки теплозащитных покрытий. А предложенная вычислительная методика и ее реализация может в последствие использоваться при расчетно-теоретическом сопровождении экспериментальных исследований покрытий в плазмотроне.

Диссертационная работа Брызгалова А.И. была заслушана и одобрена на научном семинаре Лаборатории Вычислительной физики Объединенного института высоких температур Российской академии наук 14 сентября 2022 г.

Тема исследования соответствует пунктам 8, 9, 16 паспорта специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертация Брызгалова А.И «Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно, и соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Брызгалов Андрей Иванович заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент  
заведующий лабораторией №15.2 Вычислительной физики Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института  
высоких температур РАН,  
доктор физико-математических наук  
(специальность - 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника»)



Киверин Алексей Дмитриевич

ФГБУН ОИВТ РАН, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

Телефон: (495)484-44-33

E-mail: alexeykiverin@gmail.com

Подпись Киверина А.Д. и сведения заверяю

Зам. директора ОИВТ РАН

Иванова Нина Николаевна

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-96-63

ivanova-n@ihed.ras.ru



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный  
институт высоких температур (ОИВТ РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская,  
д.13, стр.2, (495) 485-82-44, webadmin@ihed.ras.ru