

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии
наук,
д.ф.-м.н., Брунков П.Н.



_____ 2022 г.

ведущей организации на диссертацию Брызгалова Андрея Ивановича на тему «Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Брызгалова А.И. посвящена реализации модели численного моделирования течения плазмы в барокамере плазмотрона ВГУ-4 и валидации расчетного кода на экспериментальных данных. Также в рамках работы был разработан вычислительный модуль расчета двумерного электромагнитного поля в разрядном канале плазмотронов ВГУ-4 и ВГУ-3.

Актуальность темы

Актуальность темы подтверждается интенсификацией разработки аэрокосмической техники, где используются различные теплозащитные покрытия, испытания которых проводятся на наземных плазмотронах. В настоящее время тема численного моделирования течения химически неравновесной плазмы в плазмотронах и ее взаимодействие с исследуемыми

теплозащитными покрытиями становится все более актуальной, и работа автора в этой области, учитывая проведение валидации на экспериментальных данных является важной и своевременной.

Цели и задачи диссертационной работы

К основным целям работы А.И. Брызгалова стоит отнести проведение численного моделирования химически неравновесных плазменных течений в трактах плазмотронов ИПМех РАН, численное моделирование взаимодействия плазмы с поверхностью исследуемых в плазмотронах образцов, проведение валидации полученных решений по экспериментальным данным.

Общая характеристика работы

Настоящая диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем работы – 143 страницы со 135 литературными источниками.

Во **введении** проводится обоснование выбора темы исследования, формулируется цель и задачи работы.

В **первой** главе «Современное состояние исследований с применением высокочастотных плазмотронов» проводится обзор существующей литературы по направлениям задач аэротермодинамики, возникающих при входе различных тел в атмосферу Земли, рассмотрены экспериментальные способы моделирования таких процессов, приведен обзор существующих в мире установок на базе плазмотронов, их параметров и свойств, полученных на них результатов. Рассмотрены подходы к численному моделированию течений в трактах таких установок.

Во **второй** главе «Вычислительная модель течения неравновесной плазмы» описывается созданная автором математическая модель для течения вязкой химически неравновесной плазмы. Приводятся методы расчета коэффициентов вязкости и теплопроводности, а также кинетические схемы

химических реакций, которые будут использоваться в рамках работы. Приводятся подробности программной реализации выбранной математической модели на языке FORTRAN-95 с учетом выбранных численных схем.

В **третьей** главе «Течение химически и термически неравновесной воздушной плазмы за сильной ударной волной» представлены результаты проведения тестовых расчетов по известной задаче о течении термически и химически неравновесного газа в релаксационной зоне за фронтом сильной ударной волны. Приведены результаты валидации по экспериментальным данным.

В **четвертой** главе «Моделирование разрядного канала плазмотрона на основе двумерной модели электрического поля» представлены описания одномерной и двухмерной моделей, описывающих электрическое поле в канале плазмотрона. Проведено моделирование течений в каналах плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4. На основе моделирования сделан вывод о применимости локально одномерной модели только для условий относительно тонких разрядных каналов и невысокой мощности, вкладываемой в плазму.

В **пятой** главе «Обтекание образцов дозвуковым потоком воздушной плазмы» приведены результаты расчетов тепловых потоков на поверхности водоохлаждаемой модели для серии из 28 экспериментов по обтеканию различных материалов воздушной плазмой при различных давлениях и мощностях плазмотрона ВГУ-4. Рассмотрены пространственные изменения параметров течения в свободном течении и в пограничном слое у модели, показано, что наиболее существенными областями течения с точки зрения неравновесности течения являются пограничный слой у холодной стенки и слой смещения на границе струи. Проведена валидация рассчитанных тепловых потоков с экспериментальными данными, полученными на плазмотроне ВГУ-4. Получено хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными.

В **шестой** главе «Теплообмен на каталитической поверхности в

дозвуковой струе плазмы азота» представлены результаты обработки расчетов тепловых потоков для серии из 12 экспериментов в плазме азота, проведенных на плазмотроне ВГУ-4. Сравнение показывает худшее согласие, чем в предыдущей главе, при водятся возможные причины такого расхождения (способ определения эффективного коэффициента рекомбинации с введением эталонного материала и опорой на него как на каталитический ($\gamma_w = 1$), неопределенность в к.п.д. плазмотрона в случае азота, которая известна с меньшей точностью, чем для воздуха). Но полученные в результате расчета данные верно показывают динамику изменения.

В **заключении** перечисляются основные результаты диссертационного исследования.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы 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.

Оценка научной новизны и практической значимости

К научной новизне диссертационного исследования относится создание программной реализации модели течения химически неравновесной плазмы для расчета течений в каналах плазмотронов (наличие электрического поля) и взаимодействия такой плазмы с моделями, исследуемыми на плазматронах, что дает не только получаемые в экспериментах интегральные характеристики, но и позволяют рассмотреть распределения параметров по модели.

Практическая значимость работы несомненна, так как современные

экспериментальные исследования предполагают одновременное использование поддерживающего численного моделирования с целью оценки параметров и однородности течений, локальных распределений тепловых потоков по поверхности модели. Так что созданная в рамках диссертационного исследования программная реализация течений для плазмотронов ИПМех РАН несомненно найдет свое место в арсенале используемых при проведении работ.

Замечания по диссертации

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.

Несмотря на указанные замечания, которые, частично, связаны с ограниченным объемом диссертации, отметим, что в диссертации выполнен большой объем исследований по актуальному направлению на высоком научном уровне, основанном на использовании современной математической модели дозвукового течения низкотемпературной плазмы, реализации программы компьютерного моделирования на языке FORTRAN-95 и валидации расчетов на двух сериях экспериментов. Тема и содержание диссертации полностью соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Результаты диссертационного исследования докладывались на многих российских и международных конференциях, а также опубликованы в нескольких изданиях, индексируемых базами данных WoS и Scopus. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационной работы.

Заключение

Диссертация «Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне», представленная Брызгаловым А.И. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 г № 335, а ее автор, Брызгалов Андрей Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составил ведущий научный сотрудник-заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук Сергей Александрович Поняев, обсужден и одобрен на расширенном заседании научного семинара лаборатории физической газодинамики ФТИ им. А.Ф. Иоффе 21 июля 2022 г., 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, post@mail.ioffe.ru, тел +7(812) 297-2245, сайт: <https://ioffe.ru/>

Ведущий научный сотрудник-заведующий лабораторией федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»,

Дата 07. 09 2022 г.



С.А. Поняев

(подпись)



Подпись Поняева С.А. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Мель, Н.С. Буцко