

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора физико-математических наук Смирнова Николая Николаевича

На диссертацию Брызгалова Андрея Ивановича

«Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности

01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Брызгалова Андрея Ивановича посвящена численному моделированию течения плазмы в плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4 ИПМех РАН с приложением к определению каталитических свойств материалов теплозащитных покрытий.

Разработка и модификация расчётных программ в приложение к экспериментальным исследованиям позволяет дополнить и уточнить получаемую в ходе эксперимента информацию. При проведении тепловых испытаний помимо заключения о термостойкости материала необходимо узнать его каталитические свойства, которые определяются с помощью численного моделирования. Поскольку существующий в ИПМех РАН набор программ Alpha, Beta и Gamma был написан более 20 лет назад и позволяет определить каталитические свойства только для дозвукового режима и в критической точке **актуальным** является разработка авторского программного пакета, расширяющего возможности численного моделирования и использующего в расчетах современные модели.

Во **введении** показаны актуальность, практическая значимость, формулируются цель и задачи исследования.

В **первой главе** рассматриваются задачи аэротермодинамики, возникающие при входе спускаемых аппаратов в атмосферу Земли и приводится обзор экспериментальных исследований теплозащитных покрытий. Подробно рассматриваются исследования в индукционных ВЧ-плазмотронах и излагаются экспериментальные возможности различных установок в России и в мире. Подробно описываются наиболее крупные мировые плазмтроны, находящиеся в Бельгии (von Karman Institute, Брюссель), Германии (Institut für Raumfahrtssystem, Штуттгарт) и Японии (JAXA, Токио). Кратко описаны используемые каждой группой ученых математические модели. Приведён исчерпывающий обзор отечественных индукционных плазмтронов совместно с используемыми математическими моделями. В сравнительном анализе описаны плазмтроны ВГУ-3 и ВГУ-4

ИПМех РАН, показано их соответствие современному уровню развития экспериментальных возможностей при проведении тепловых испытаний.

Во **второй главе** приводится математическая модель и численная схема, реализованная в программе IPG2D при расчете течения в барокамере плазмотрона. Плазма рассматривается как вязкий теплопроводный однократно ионизованный газ, описываемый уравнениями Навье-Стокса. Состав моделируется с учетом химической неравновесности. Поток во всей расчётной области предполагается ламинарным. Коэффициенты переноса рассчитываются из формул, использующих диагональные разложения выражений теории Чепмена-Энскога с введенными поправочными эмпирическими коэффициентами для вязкости и теплопроводности. Данные соотношения являются намного более экономичными по сравнению с расчетами по точным формулам, но в то же время хорошо моделируют коэффициенты переноса при наличии сильной ионизации. Термодинамические параметры берутся из табличных данных, соответствующих свойствам реального газа. В барокамере пренебрегается электромагнитным полем индуктора и диффузионные потоки рассчитываются из соотношений Стефана-Максвелла с учетом амбиполярного электрического поля. Представлены типы граничных условий и описана их реализация. Отдельно разобрано граничное условие на каталитической поверхности. Приведена методика определения эффективного коэффициента рекомбинации как решения соотношений Стефана-Максвелла с известными диффузионными скоростями и неизвестным химическим составом. Расчетная схема построена методом конечного объема на неравномерной декартовой сетке со сгущениями к вертикальной и горизонтальной поверхностям модели, границе разрыва каталитичности и к краю входного сопла. Газодинамические потоки аппроксимируются посредством схемы SLAU, применимой для произвольных чисел Маха. Диссипативные и диффузионные потоки аппроксимируются по центральной разностной схеме второго порядка точности. Для ускорения вычислений решение находилось по неявной схеме LU-SGS с характерными числами Куранта 2000. По неявной схеме аппроксимировались и скорости химических реакций с выделением главной части якобиана. Вычислительная модель реализована в виде авторского программного пакета IPG2D.

В **третьей главе** представлены результаты расчёта физико-химически неравновесного течения в релаксационной зоне за ударной волной. За фронтом ударной волны в чистом кислороде рассчитаны профили колебательной и поступательной температуры и получено хорошее совпадение с экспериментальными значениями колебательной температуры. Выполнено физико-химически неравновесное моделирование течения за сильной ударной волной в воздухе и проведена верификация с аналогичными расчетами. Результатом проделанной работы стала валидация и верификация

вычислительного модуля расчета источниковых членов химической кинетики и температурной неравновесности.

В четвертой главе дано описание двумерной и локально-одномерной моделей электрического поля, индуцируемого катушкой в разрядном канале плазмотрона и разогревающего протекающий газ до нескольких тысяч градусов посредством Джоулева тепла. Реализована конечно-разностная модель двумерного электрического поля, индуцированного вихревыми токами в плазме; поле в вакууме, порожденное током в индукторе задавалось аналитически. Полученная в результате дискретизации система линейных алгебраических уравнений с разреженной матрицей решалась итерационно методом GMRES. Разработанный автором расчетный модуль был интегрирован в программу Alpha, моделирующую течение в разрядном канале. В результате моделирования амплитуды электрического поля было сделано заключение и приемлемости использования локально-одномерной модели для расчета разрядного канала ВГУ-4 и необходимости использования двумерной модели при расчетах ВГУ-3. В пятой главе описывается серия из 28 экспериментов в плазмотроне ВГУ-4 при обтекании воздушной плазмой образцов из различных материалов, выполнено численное моделирование тепловых потоков к испытываемому образцу и проведен анализ полученных результатов. В расчетах автор заимствовал из экспериментальной статьи эффективный коэффициент рекомбинации каждого из материалов и исходя из них вычислял распределение тепловых потоков вдоль всей лобовой поверхности державки. Также приводятся поля течения в барокамере плазмотрона, в непосредственной близости у каталитической поверхности и структура ламинарного пограничного слоя вдоль линии торможения. Выполнено сравнение распределения температуры и скорости вдоль линии торможения от входа до поверхности образца с расчетами химически равновесной моделью, существующей в ИПМех РАН программы Beta и получено хорошее совпадение вплоть до внешней границы ламинарного пограничного слоя. Автор подробно анализирует распределение тепловых потоков вдоль обтекаемой поверхности и делается вывод, что рост потока на каталитических поверхностях обусловлен преимущественно рекомбинационной составляющей. Подтверждается оправданность допущения о равномерности теплового потока вдоль всей поверхности каталитической вставки. Также расчетным путем подтверждается явление сверхравновесного нагрева, наблюдаемое в эксперименте и спровоцированное переходом от низкокatalитического материала к высококatalитическому. В конце главы приводится сравнительная диаграмма рассчитанных программой IPG2D тепловых потоков и экспериментальных значений. Получено хорошее совпадение, находящееся в пределах погрешности измерений.

В **шестой главе** проводится серия валидационных расчетов на 12 испытаниях в плазмотроне ВГУ-4 при обтекании трех различных материалов потоком плазмы азота. Описаны геометрия, параметры на входе и условия обтекания, полностью соответствующие экспериментальным. Выполнена верификация температуры и скорости вдоль оси с равновесными расчетами программой Beta. Проведен расчет тепловых потоков с заимствованием из экспериментальной публикации коэффициента рекомбинации для каждого из материалов и выполнено сравнение с экспериментальными тепловыми потоками. Качественно распределения тепловых потоков аналогичны случаю обтекания воздушной плазмы, однако количественно наблюдается систематическое отклонение суммарного теплового потока от экспериментальных значений. Далее автор приводит возможные источники возникновения погрешности. В целом согласование с экспериментом получилось удовлетворительное.

В **заключении** кратко формулируются основные выводы диссертации

Достоверность полученных результатов

Результаты настоящей диссертационной работы являются достоверными, что обусловлено верификацией отдельных вычислительных модулей расчетной программы с результатами других авторов. Проведена верификация программы IPG2D с результатами моделирования существующей в ИПМех РАН расчетной программы Beta. Выполнена валидация определения тепловых потоков на двух сериях экспериментов в плазмотроне ВГУ-4, составляющих в сумме 40 испытаний.

Актуальность

Эксперименты в плазмотронах имеют практическое приложение к разработке тепловой защиты спускаемых космических аппаратов. В связи с ростом вычислительных возможностей современных ЭВМ появляется возможность усложнения математических и расчетных моделей с целью получения более точного, надежного и широкого набора информации из результатов эксперимента. Также появляются новые экспериментальные возможности плазмотронов ИПМех РАН и необходимо развивать численное моделирование для полноты картины получаемой информации.

Научная новизна

В диссертационной работе представлен ряд новых результатов, имеющих большое практическое значение.

1. Разработан расчетный код, позволяющий проводить численное моделирование реальных экспериментов в индукционном плазмотроне и дающий большой набор информации по результатам

проведенного испытания в сравнении с существующим в ИПМех РАН кодом

2. Расширены условия численного моделирования на более низкие давления в барокамере плазмотрона
3. Расчетным путем подтверждена правомерность предположения, используемого экспериментаторами, о равномерности теплового потока вдоль поверхности каталитической вставки.
4. Расчетным путем продемонстрирован эффект нагрева выше равновесной температуры, наблюдаемый в эксперименте.

Практическая значимость

Созданное в рамках диссертационной работы программное обеспечение расширяет возможности существующего в ИПМех РАН кода на моделирование течения в разрядном канале ВГУ-3 и позволяет проводить численное моделирование экспериментов в плазмотроне и определять каталитические свойства исследуемой поверхности. Следует отметить появившуюся возможность моделирования распределения теплового потока вдоль всей тепловоспринимающей поверхности. Важность заключается в том, что в эксперименте замеряется суммарный тепловой поток и для его сравнения с расчётным необходимо проводить интегрирование вдоль всей площади образца.

Замечания по диссертационной работе

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.

Указанные недостатки не оказывают влияния на в целом положительную оценку диссертации. Полученные результаты имеют как научную, так и практическую значимость.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа Брызгалова Андрея Ивановича представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842

(с изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 №335). Уровень изложения материала и содержание диссертации подтверждает квалификацию соискателя.

Автореферат соответствует содержанию диссертации

Объем диссертации составляет 143 страницы. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. В работе имеется 49 рисунков, 11 таблиц, список литературы содержит 135 источников. Результаты диссертации докладывались на профильных и международных конференциях и изложены в 11 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Выполненное исследование соответствует научной специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а ее автор, Брызгалов Андрей Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.


Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,

Проректор, зам. зав. кафедрой

Газовой и волновой динамики

Зав. лабораторией волновых процессов


19.09.2022
Н. Н. Смирнов

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, ауд. 1217

Тел: +7(495)9393754, e-mail: gvd.msu@mail.ru

Сведения о Смирнове Николае Николаевиче подтверждаю

Подпись Смирнова Николая Николаевича удостоверяю

Декан механико-математического факультета

«Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова»

член-корр. РАН





А.И. Шафаревич