

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук Копченова Валерия Игоревича на диссертацию Сторожева Дмитрия Алексеевича «Исследование неравновесных физико-химических процессов в механике сверхзвуковых струй и плазмы газового разряда», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Д.А. Сторожева посвящена решению двух блоков задач. Первый из них связан с разработкой самосогласованной модели для описания структуры газовых разрядов и неравновесных физико-химических процессов в них. Второй блок задач относится к разработке комплексной модели для описания газовой динамики и неравновесных химических процессов в струях продуктов сгорания двигателей ракет и высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА). При этом решается задача определения спектральной излучательной способности струй из сопел ракетных двигателей и ВЛА.

Актуальность работы обусловлена тем, что развитие компьютерной техники позволяет перейти к решению задач механики низкотемпературной плазмы газового разряда в двумерной, а в перспективе и в трехмерной постановках с новым уровнем детализации структуры разряда и физико-химических процессов, протекающих в нем. Кроме того, в существующих математических моделях для расчета газового разряда используется ряд полуэмпирических соотношений, которые требуют проверки. Развиваемая самосогласованная модель позволяет устранить эти ограничения. Сложность локальной диагностики плазмы газового разряда приводит к тому, что экспериментальные данные ограничиваются, в большинстве случаев, интегральными характеристиками. И хотя существуют методы бесконтактной диагностики (метод КАРС), представляется, что на стадии разработки приборов (например, нейтронных трубок), научных и промышленных установок с использованием газового разряда роль компьютерного моделирования и достоверность получаемых результатов должны возрасти. На решение этих вопросов и направлена диссертация.

Актуальность рассмотренных в диссертационной работе вопросов по созданию комплексных компьютерных моделей и методов расчета течений в струях продуктов сгорания из двигателей ВЛА с учетом физико-химических процессов в струе не вызывает сомнений с позиций

приоритетов развития новой техники. Создание авторского компьютерного кода для расчета спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания из сопел ракетных двигателей (на жидком и твердом топливах) и из двигателя ВЛА является чрезвычайно востребованным.

Из сказанного следует, что диссертационная работа Д.А. Сторожева является актуальной как с научной точки зрения, так и исходя из запросов практики.

Общая характеристика работы.

Диссертация (209 стр.) состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 157 наименований.

Во введении формулируются цель работы и задачи диссертации, основные положения, выносимые на защиту, с учетом актуальности работы, ее научной новизны и практической значимости.

В первой главе нашла отражение весьма трудоемкая работа диссертанта по анализу кинетических процессов, протекающих в низкотемпературной водородной плазме газовых разрядов (тлеющего и пеннинговского), выполненная на основе опубликованных результатов. Им создана соответствующая база данных кинетических схем (см. Таблицы 1-12 в разделе 1.3). В данной главе представлен также обзор расчетно-теоретических моделей и методов, применяемых для описания неравновесной плазмы газовых разрядов и истечения плазменных струй.

Во второй главе значительное внимание уделяется методологии численного решения уравнения Больцмана для электронов и определения функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) с учётом неупругих столкновений электронов с молекулами, приводящими к возбуждению электронно-колебательных степеней свободы молекул и ионизации. Автором создана программа численного решения уравнения Больцмана. В качестве примера проведено численное моделирование функции распределения электронов по энергиям в азотной плазме тлеющего разряда при давлениях $p=1-10$ Торр. Выполнена верификация разработанной авторской программы путем сопоставления результатов расчета с данными, полученными при использовании программы Bolsig+. На основе рассчитанной немаксвелловской ФРЭЭ определены коэффициенты подвижности, диффузии, константы скорости возбуждения колебательных и электронных уровней молекулы и ионизации в плазме молекулярного азота. Также была создана согласованная модель для

азотной плазмы, в которой одновременно с уравнением Больцмана для электронов решаются уравнения поуровневой кинетики. С использованием данной модели, рассчитаны заселенности колебательных уровней молекул азота в условиях, характерных для положительного столба тлеющего разряда (значение приведенного поля $E/N = 100$ Тд).

Третья глава посвящена разработке кинетической модели для описания плазмохимических процессов, протекающих в пеннинговском разряде в водороде, позволяющей рассчитать концентрацию основных компонентов водородной плазмы: молекулярного и атомарного водорода, а также молекулярных и атомарных ионов водорода и электронов. Была создана база данных поуровневых сечений для физико-химических процессов, определяющих компонентный состав водородной плазмы в условиях пеннинговского разряда. Построена подробная уровневая модель для водородной плазмы, позволяющая описывать концентрации молекулярного водорода в различных колебательных состояниях с учетом процессов VT и VV релаксации, диссоциации, диссоциативной ионизации, а также прямого и ступенчатого механизма диссоциации, идущего через возбуждение электронных состояний молекул H_2 . Проведено численное исследование влияния средней энергии, а также формы энергетического спектра электронов на компонентный состав плазмы. На основе детальной уровневой кинетической модели предложена упрощенная модель и проведена оценка ее предсказательной способности по расчету компонентного состава плазмы. Полученные в данной главе результаты использовались впоследствии для расчета двумерной электродинамической структуры пеннинговского разряда в молекулярном водороде.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования двумерной электродинамической структуры тлеющего разряда в азоте, а также тлеющего и пеннинговского разряда в водороде. В случае молекулярного азота уравнения диффузионно-дрейфовой модели для газового разряда решались с учётом результатов расчета коэффициентов переноса и констант скорости, полученных с использованием уровневой модели для азотной плазмы, описанной в Главе 2. Были сделаны выводы о количестве энергии электронов, идущей на возбуждение колебательных или электронных степеней свободы молекул азота при разных условиях разряда. При описании двумерной структуры тлеющего разряда в водороде использовалась самосогласованная модель, в которой одновременно с уравнениями для расчета электродинамической структуры разряда, решалось уравнение

Больцмана для определения ФРЭЭ и система уравнений поуровневой колебательной кинетики молекул H_2 . Детально изучена двумерная структура тлеющего и пеннинговского разряда в водороде, а также особенности протекания в разряде физико-химических процессов.

В пятой главе представлены усовершенствованные математическая модель течения и программа для расчета сверхзвукового истечения продуктов сгорания в окружающую среду. Исходная модель базируется на полной системе уравнений Навье-Стокса для нестационарного ламинарного течения многокомпонентной химически реагирующей смеси газов в осесимметричной постановке. Для расчета турбулентных течений система уравнений и замыкающих соотношений дополнена алгебраической моделью турбулентности. Кроме того, включен реакционный механизм для описания химических реакций в струях продуктов сгорания углеводородных топлив. Диссертантом предложены и реализованы различные способы ускорения численного счета методом установления по времени для получения стационарного решения. Необходимость ускорения счета обусловлена тем, что протяженность расчетной области для струйных течений составляет десятки калибров в радиусах сопла. Поэтому использование методов решения стационарных задач методом установления требует больших времен счета и сопровождается потерей точности в продольном направлении. Переход на стационарные маршевые методы корректен только для сверхзвуковых течений. Однако нерасчетность истечения (даже в случае недорасширенной струи) сопровождается образованием висячих скачков уплотнения и дисков Маха в приосевой области, что затрудняет использование маршевых методов для сверхзвуковых течений. Разработанный автором квазимаршевый метод позволяет сократить время счета. Численные эксперименты показали, что время счета до установления на одном процессоре удалось сократить более, чем в десять раз. Кроме того, автором реализована версия распараллеленного компьютерного кода. На 128 ядрах достигнуто ускорение счета в 72 раза. В качестве примеров выполнены расчеты осесимметричной недорасширенной струи продуктов сгорания РН Atlas, а также струи плазмы. Полученные результаты по распределению температуры вдоль оси симметрии струи аргоновой плазмы показали удовлетворительное согласие с экспериментальными данными (Selezneva S. E., Boulos M. I., Letourneur K. G. Y., Hest M., Van de Sanden M. C. M., Schram D. C., Plasma Sources Sci. Technol, 2003). Двумерное поле температур и изменение температуры вдоль оси в струе продуктов сгорания РН Atlas

верифицировано по результатам альтернативного расчета (Wright M., Rao R., Candler G., Hong J., Schilling T., Levin D., AIAA 1998-3622, 1998), а результаты сравнения представлены на Рис. 83 диссертации. Отмечается хорошее соответствие результатов как по продольному распределению температуры вдоль оси симметрии, так и по полю температуры.

Шестая глава посвящена созданию методики и программы для расчета спектральной излучательной способности (сигнатуры) струй продуктов сгорания в инфракрасном диапазоне ($\lambda=2-5$ мкм). Ставится задача по пространственным распределениям давления, температуры и состава компонентов продуктов сгорания в струе, истекающей из двигателя, имитационным методом Монте-Карло рассчитать сигнатуру выхлопных струй. Задача усложняется для двигателей на твердом топливе, поскольку в продуктах сгорания содержится конденсированная фаза и требуется учитывать поглощение и рассеяние излучения на частицах конденсата. С использованием разработанной программы была проведена серия тестовых расчетов направленной спектральной излучательной способности струй с целью сопоставления с известными данными. Рассмотрены струи с частицами Al_2O_3 , а также с частицами B_2O_3 . При наличии частиц выявлено сильное влияние коэффициента поглощения на сигнатуру. Согласие с расчетными данными других авторов удовлетворительное. Рассчитывались сигнатуры струй для тактической ракеты (Nelson H.F. J. Spacecr. Rockets, 1987) и для PH Atlas (Ozawa T., Garison M.B., Levin D.A. J. Thermophys. Heat Transf., 2007) с заданием гомогенной газовой смеси на срезе сопла. Расчеты свидетельствуют о том, что для сигнатуры выхлопной струи тактической ракеты получено хорошее согласование с данными других авторов. Сравнение с данными для выхлопной струи PH Atlas удовлетворительное. Проведен прогностический расчет сигнатуры для выхлопной струи высокоскоростного летательного аппарата.

В заключении на основании полученных в диссертации новых результатов формулируются выводы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Исследования, выполненные в диссертации, основаны на базовых математических моделях тлеющего и пеннинговского разрядов, и газовой динамики высокотемпературных нерасчетных струйных течений, которые прошли серьезную научную апробацию. Новые элементы, связанные с темой диссертации, вводятся на основании тщательного анализа публикаций,

проведения экспертных оценок диссертанта. Исследования выполняются на современном уровне с детальным описанием постановок задач, привлекаемых данных и моделей из области механики плазмы в газах, физики разряда, радиационной газовой динамики, физико-химической кинетики. Принимаемые допущения обосновываются. Расчеты проводятся с использованием современных численных методов, с предварительным тестированием разрабатываемых программ. На этапе тестирования программ проводится сравнение с известными расчетными и экспериментальными данными, опубликованными в открытых источниках.

Достоверность результатов работы обеспечивается обоснованностью постановок задач, проверкой основных получаемых результатов на всех стадиях создания математических и физико-химических моделей процессов и реакционных механизмов, привлечением известных результатов других авторов, всесторонним тестированием разрабатываемых программ, включая перекрестную верификацию, а также непосредственным сопоставлением полученных результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна. Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Разработана методология численного описания механики плазмы тлеющего разряда, которая базируется на согласованном решении уравнений диффузионно-дрейфовой модели для плазмы, кинетического уравнения Больцмана для электронов, уравнений химической кинетики и уравнений поуровневой колебательной кинетики молекул и позволяет определять структуру разряда и кинетические параметры плазмы (коэффициент ионизации, подвижности, диффузии, константы скоростей). На основе данной методологии построены модели для азотной и водородной плазмы.

2. Создана база данных поуровневых сечений физико-химических процессов, протекающих в плазме молекулярного водорода, на основе которой разработана подробная уровневая кинетическая модель для расчета компонентного состава плазмы пеннинговского разряда в молекулярном водороде. Исследована роль различных плазмохимических процессов в механике пеннинговского разряда в водороде и на основе проведённого анализа построена упрощённая кинетическая модель для расчета концентраций молекулярных и атомарных ионов водорода, позволяющая описывать компонентный состав водородной плазмы с точностью, близкой к точности подробной уровневой модели.

3. Разработана программа для численного решения уравнения Больцмана для определения функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Программа верифицирована по результатам расчетов с использованием программы Bolsig+.

4. С использованием разработанных кинетических моделей проведены численные исследования двумерной структуры тлеющего разряда в азоте, а также тлеющего и пеннинговского разрядов в водороде с учетом влияния на кинетические свойства плазмы немаксвелловской ФРЭЭ.

5. Разработана базовая версия комплекса программ для расчета струй продуктов сгорания из двигателей летательных аппаратов, включая высокоскоростные летательные аппараты, и направленной спектральной излучательной способности струй с использованием моделей радиационной газовой динамики и метода Монте-Карло.

Практическая значимость. Одним из важных результатов диссертационной работы Д.А. Сторожева, представляющим большую практическую ценность, является комплекс программ, предназначенный для численного моделирования неравновесных физико-химических процессов в плазме газовых разрядов и струях продуктов сгорания. В данный комплекс входят программы расчета функции распределения электронов по энергиям и коэффициентов переноса в плазме тлеющего разряда, программа для согласованного численного моделирования двумерной электродинамической структуры тлеющего разряда. С использованием разработанных компьютерных кодов исследована двумерная электродинамическая структура тлеющего и пеннинговского разрядов в молекулярном водороде, что представляет практический интерес для разработчиков газонаполненных нейтронных трубок. Программа расчета параметров недорасширенной сверхзвуковой струи продуктов сгорания, истекающей в спутный поток и программа для математического моделирования направленной спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания имеют большую значимость для разработчиков высокоскоростных летательных аппаратов и двигателей к ним.

Личное участие соискателя в получении результатов, представленных в диссертации. Личное участие автора достаточно полно и правильно отражено в автореферате. Он принимал участие в постановке задач. Им реализованы соответствующие модели, разработаны компьютерные коды, проведены расчеты и выполнен анализ результатов.

Замечания по диссертации

1. При формулировке основных задач исследования на стр. 5 и 6 Введения в п.4 (стр. 6) наряду с двумерными предполагается рассмотрение трехмерных задач. В Заключение в п.4 (стр.198) указывается, что разработан компьютерный код на «основе двумерных и трехмерных моделей». Вместе с тем, все примеры расчетов в Главе 5 (Рис. 66 на стр.155 и Рис. 68, 69 на стр.158, 159) относятся к 2D постановкам задачи. Что касается 3D задач, то для них в п.5.3 выписана только система уравнений.

2. В Главе 5 (стр. 150) для расчета струи предлагается использовать алгебраическую модель турбулентности Пеннера-Хасселмана-Эдвардса (23rd Aerospace Sciences Meeting, 1985). Выбор модели не обосновывается. Это модель типа модели «пути смешения». Возникает вопрос, насколько хорошо эта модель описывает сверхзвуковые слои смешения и сверхзвуковые струи в спутном сверхзвуковом потоке.

3. Для моделирования химических процессов в струе продуктов сгорания предлагается использовать кинетический механизм, представленный на стр.158. Приведен только список реакций без ссылок на источник и без каких-либо пояснений. При этом тип топлива не конкретизируется.

4. На Рис. 13 на стр. 76 представлена «колебательная функция распределения молекул азота в плазме тлеющего разряда ... для первых 8 колебательных уровней основного состояния». Результат диссертанта, полученный из решения уравнения Больцмана, практически совпадает с данными, обозначенными на рисунке цифрой 4. В обозначениях в подрисуночной надписи указано, что «4 –результаты расчета [26]». В действительности в работе [26] была применена КАРС спектроскопия и, фактически, напрямую из эксперимента получалась колебательная функция распределения. Таким образом, можно говорить о хорошем совпадении результатов автора диссертации с результатами эксперимента, выполненного с применением КАРС спектроскопии, а не с результатами расчета, как на это указано на стр.73.

5. При хорошо написанной, в целом, диссертации есть огрехи в оформлении.

Так, на стр. 57 для Рис. 4 отсутствует расшифровка условных обозначений в подписи к рисунку. Пояснения нет и в соответствующем фрагменте текста.

На Рис. 37 (стр.114) оценивается влияние способа вычисления 1-го коэффициента Таунсенда (с использованием эмпирической формулы и на

основе решения уравнения Больцмана) на распределение плотности тока по радиусу на аноде и катоде. Обозначение кривых (штриховая и сплошная линии в подрисуночной надписи) не соответствует фрагменту текста на стр.113 о том, что при использовании уравнения Больцмана «уменьшается плотность тока на аноде и увеличивается на катоде». По-видимому, в подписи к рисунку неправильно указано соответствие кривых аноду и катоду.

Автор не привел рисунок со схемой разряда Пеннинга. Это затрудняет понимание постановки граничных условий, представленной на стр. 135.

На стр.143 помещена ссылка на несуществующий Рис.104, а на стр. 144 – на Рис. 109-110.

Сделанные замечания не меняют общую положительную оценку работы.

Заключение

В целом диссертация Сторожева Дмитрия Алексеевича на тему «Исследование неравновесных физико-химических процессов в механике сверхзвуковых струй и плазмы газового разряда» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Решения задач, поставленных в диссертации, вносят существенный вклад в механику плазмы, газовую динамику сверхзвуковых высокотемпературных струй, в радиационную газовую динамику. Полученные в диссертации результаты представляют практический интерес для разработчиков электрофизической и ядерно-физической аппаратуры. Созданные компьютерные программы востребованы также в организациях, занимающихся проектированием новых образцов высокоскоростных летательных аппаратов и двигателей для них.

Цели, поставленные в диссертации, достигнуты, задачи успешно решены.

Отмеченные недостатки не снижают общего высокого уровня диссертации, выполненной на актуальную тему и имеющей научную и практическую ценность.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и отражает основные научные результаты, полученные при её выполнении.

Основные научные результаты диссертационного исследования Сторожева Дмитрия Алексеевича опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах, трудах российских и международных конференций и в изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Таким образом, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук диссертация Сторожева Дмитрия Алексеевича является завершенной научно-квалификационной работой. Диссертационная работа соответствует критериям п.9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации «Исследование неравновесных физико-химических процессов в механике сверхзвуковых струй и плазмы газового разряда» Сторожев Дмитрий Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

И.о. начальника отделения

«Неравновесные физико-химические процессы

в газовых потоках и в элементах реактивных двигателей» ЦИАМ,

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник



Копченов Валерий Игоревич

« 30 » октября 2018 г.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Адрес: 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

Телефон: +7 (495) 361-09-30

E-mail: kop@ciam.ru

<http://www.ciam.ru/>

Подпись В.И. Копченова удостоверяю:

Ученый секретарь ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»,

доктор экономических наук, доцент



Джамай Екатерина Викторовна

