

На правах рукописи

Сторожев Дмитрий Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИКЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ И ПЛАЗМЫ
ГАЗОВОГО РАЗРЯДА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской Академии Наук (ИПМех РАН)

Научный руководитель: **Суржиков Сергей Тимофеевич**
академик РАН, д.ф.-м.н., профессор

Официальные оппоненты: **Шибков Валерий Михайлович**
д.ф.-м.н., профессор, Физический факультет МГУ
им. М. В. Ломоносова

Копченев Валерий Игоревич
к.ф.-м.н., Государственный научный центр ФГУП
«Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова»

Ведущая организация: **АО «Государственный научный центр
Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени
А.И. Лейпунского»**

Защита состоится 15 ноября 2018 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН по адресу: 119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН (<http://www.ipmnet.ru/files/diss/2018/5/Storozhev-diss.pdf>).

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.240.01
при ИПМех РАН

кандидат физико-математических наук

Сысоева Е.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Повышенный интерес к исследованию неравновесных физико-химических процессов с участием молекулярного и атомарного водорода, протекающих в газах и плазме, связан в последнее время с разработкой высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) и систем их обнаружения, созданием различных физических приборов и устройств, таких как газонаполненные нейтронные трубки и электрореактивные двигатели, а также исследованиями полярных струйных течений (джетов) в астрофизике. В основе описания перечисленных физических явлений и процессов лежат методы фундаментальной физико-химической механики. В силу того, что экспериментальные исследования таких процессов сопряжены с техническими и финансовыми трудностями, становится актуальной разработка компьютерных моделей, позволяющих выполнить численное моделирование изучаемых процессов и явлений.

Численное моделирование неравновесных физико-химических процессов в механике газового разряда или струях продуктов сгорания ракетных двигателей, требует не только решения уравнений механики газов и плазмы, но и адекватного описания системы на микроуровне: процессов взаимодействия электронов и молекул, атомов, ионов. При численном моделировании таких сложных физических явлений, как газовый разряд (в особенности, тлеющие и пеннинговские разряды), сверхзвуковое истечение струи плазмы из сопел электрореактивных двигателей, а также спектральной излучательной способности струи продуктов сгорания возникает необходимость определения неравновесной заселенности атомов и молекул, а также коэффициентов переноса сильно неравновесной электронной компоненты плазмы. В связи с этим возникает необходимость построения согласованных компьютерных моделей механики газа и плазмы, включающих все многообразие физико-химических процессов, протекающих в неравновесных системах. Такие модели

включают в себя одновременно как систему уравнений движения для газов (система уравнений Навье-Стокса) или плазмы (диффузионно-дрейфовая модель газового разряда), так и уравнения для описания физической кинетики (кинетическое уравнение Больцмана), систему уравнений поуровневой кинетики возбужденных частиц, методы прямого статистического моделирования Монте-Карло.

Глава 6 посвящена численному моделированию струй продуктов сгорания и их направленной спектральной излучательной способности (сигнатуры). При решении данной задачи использовались методы и подходы, разработанные в предыдущих главах.

Цель работы заключается в разработке компьютерной модели неравновесных физико-химических процессов в механике газовых разрядов и струй продуктов сгорания гиперзвуковых двигателей, а также создании вычислительных методов и компьютерных кодов для численного моделирования исследуемых процессов и явлений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана согласованная модель механики тлеющего разряда, основанная на решении двухмерной диффузионно-дрейфовой системы уравнений для расчета электродинамической структуры разряда, решении кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов для нахождения коэффициентов переноса в плазме и констант скорости, а также решении системы уравнений поуровневой кинетики для расчета компонентного состава плазмы тлеющего разряда.
2. Создана структурированная база данных констант скоростей и сечений рассеяния электронов на молекулах и атомах водорода для процессов, протекающих в плазме газовых разрядов. Разработаны подробная уровневая и упрощенная кинетические модели для расчета

концентрации молекулярных и атомарных ионов водорода в плазме пеннинговского разряда. Выполнены расчеты компонентного состава пеннинговского разряда с использованием разработанных кинетических моделей.

3. Проведены численные исследования электродинамической структуры тлеющего и пеннинговского разрядов с использованием решения системы уравнений механики сплошной среды. Выполненное исследование двумерной структуры нормального тлеющего разряда позволило установить ряд особенностей, связанных с физико-химической кинетикой. Было показано, что при давлении порядка нескольких Тор использование решения кинетического уравнения Больцмана при расчете 1-го коэффициента Таунсенда приводит к росту плотности ионов и электронов на катоде и в положительном столбе тлеющего разряда, что имеет большое практическое значение.
4. Разработана квазимаршевая методика решения системы уравнений движения вязкого теплопроводного химически реагирующего газа в задачах истекания струи продуктов сгорания из сопла ВЛА и разработана параллельная версия компьютерного кода, решающего данную задачу. Это позволило значительно сократить время расчетов.
5. Создана серия авторских компьютерных кодов, предназначенных для численного моделирования неравновесных физико-химических процессов в механике газовых разрядов и струй продуктов сгорания (программы расчета: функции распределения электронов по энергиям и коэффициентов переноса в плазме газового тлеющего и пеннинговского разрядов, компонентного состава плазмы, двумерной электродинамической структуры разряда, параметров в струе продуктов сгорания двигательной установки летательного

аппарата на основе двухмерных и трехмерных моделей, спектральной излучательной способности струи продуктов сгорания ВЛА).

6. Проведены многопараметрические расчеты спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания, истекающих из сопел твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей, а также перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов.

Практическая значимость. Построенные в работе модели и разработанные методы расчета могут быть использованы для численного моделирования неравновесных физико-химических процессов в механике газовых разрядов и струй продуктов сгорания, истекающих из сопел жидкостных и твердотопливных двигателей. Созданный при выполнении работы компьютерный код, предназначенный для расчета спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания, позволяет решать целый ряд прикладных задач. Результаты исследования могут также использоваться при верификации процедур численного расчета в соответствующих задачах.

Научные исследования, проведенные в диссертационной работе, осуществлялись в рамках проектов РФФИ-13-01-00537, РФФИ-16-01-00379, РНФ-16-11-10275, а также программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы механики взаимодействий в технических и природных системах, материалах и средах», программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН «Физико-химическая механика неравновесных систем», в рамках проекта Фонда перспективных исследований РФ.

Методы исследования. Метод решения задач об истечении струй продуктов сгорания из сопел ВЛА основывался на решении системы уравнений движения вязкого теплопроводного турбулентного химически-реагирующего

газа и на конечно-разностном методе. Для решения задачи о распаде произвольного разрыва использовался метод AUSM.

Задача о расчете сигнатуры струи продуктов сгорания решалась методом прямого численного моделирования Монте-Карло.

При решении системы уравнений диффузионно-дрейфой модели для описания плазмы тлеющего и пеннинговского разрядов использовался метод установления.

При решении уравнения Больцмана для электронов производные по энергии аппроксимировались с использованием конечно-разностной экспоненциальной схемы. Система уравнений поуровневой кинетики решалась с использованием обобщенного метода Ньютона для решения жестких систем ОДУ.

Основными защищаемыми положениями и результатами являются:

1. Самосогласованная модель физической механики нормального тлеющего разряда и результаты численного моделирования двумерной электродинамической структуры тлеющего разряда.
2. Поуровневая и упрощенная кинетические модели для описания компонентного состава плазмы пеннинговского разряда в молекулярном водороде. Результаты численного моделирования компонентного состава.
3. Методика расчета газодинамики истечения струи продуктов сгорания из сопла перспективного ВЛА, а также направленной спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания. Результаты численного моделирования сигнатуры струй продуктов сгорания.

Личный вклад автора. Сторожев Д.А. разработал компьютерные программы расчета: функции распределения электронов по энергиям и коэффициентов переноса в плазме тлеющего и пеннинговского разрядов, самосогласованной двухмерной электродинамической структуры тлеющего и

пеннинговского разрядов, спектральной излучательной способности струи продуктов сгорания ВЛА, параметров в струе продуктов сгорания ВЛА на основе двухмерных и трехмерных моделей с использованием квазимаршевого метода, а также распараллеленный вариант программ. Автор принимал участие во всех стадиях разработки компьютерных моделей, лично выполнил численные расчеты и провел анализ полученных результатов.

Достоверность результатов диссертации подтверждается физической обоснованностью постановок задач и строгим аналитическим характером их рассмотрения с применением современных теоретических концепций и математических средств физической и химической механики, сравнением собственных численных результатов с расчетами других авторов, а также соответствием расчетных и экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных профильных научных конференциях и семинарах:

1. 52nd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 13 - 17 January 2014, National Harbor, Maryland.
2. 46th AIAA Thermophysics Conference, AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 22 – 26 June 2015, Dallas, Texas
3. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, Gaylord Texan, Grapevine, Texas.
4. 9th international Conference on Plasma Assisted Technologies, LLC, Saint-Petersburg, 2014.
5. Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2014, 2015, 2016
6. Школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ), Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017.

7. Ежегодная научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, Московский Физико-Технический Институт, 2011 – 2017 гг.
8. Научно-техническая конференция молодых ученых «ВНИИА», Москва, 2015, 2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей, 16 тезисов международных и всероссийских конференций, 6 из которых индексируются в базах данных «Сеть науки» (Web of Science) и «Скопус» (Scopus), и входят в список рекомендуемых изданий Высшей аттестационной комиссии РФ. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 209 страниц, включая 86 рисунков и 30 таблиц. Список литературы содержит 157 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность рассматриваемых в работе проблем, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены представленные в диссертации новые результаты, их практическая ценность и положения, выносимые на защиту, кратко изложена структура диссертации.

В первой главе изложен обзор экспериментальных и расчетно-теоретических работ, посвященных численному моделированию неравновесных физико-химических процессов с участием водорода, протекающих в плазме тлеющего и пеннинговского разрядов, плазменных струях, а также дано описание кинетических моделей, используемых в данных работах. В обзоре анализируются кинетические схемы, используемые для численного моделирования компонентного состава водородной плазмы различными авторами. На основе данного обзора разработана база данных констант скоростей и сечений рассеяния электронов на атомах и молекулах водорода. Данная база данных в дальнейшем использовалась для численного моделирования компонентного состава пеннинговского и тлеющего разрядов, а также выявления основных механизмов образования атомарных и молекулярных ионов в этих разрядах.

Отдельное внимание в обзоре уделено влиянию неравновесной функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) на характеристики плазмы. Описываются различные методы решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в плазме газового разряда, учет влияния неупругих интегралов столкновения в правой части уравнения Больцмана на ФРЭЭ. Приведенные в данной части обзора методы и подходы к численному моделированию ФРЭЭ использовались в последующих главах при разработке согласованной модели механики тлеющего разряда, основанной на решении двухмерной диффузионно-дрейфовой системы уравнений для расчета электродинамической структуры разряда, решении кинетического уравнения Больцмана для функции

распределения электронов, а также решении системы уравнений поуровневой кинетики.

Во второй главе приводится описание двух методов решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям [1-2]. Приводятся результаты численного моделирования функции распределения электронов по энергиям (Рис. 1) и заселенности возбужденных колебательных уровней основного электронного состояния молекул азота (Рис. 2), а также коэффициентов переноса в плазме молекулярного азота. Выполнены расчеты констант скоростей возбуждения различных колебательных и электронных степеней свободы молекулы, 1-го коэффициента Таунсенда, рассчитаны заселенности колебательных уровней основного электронного состояния молекулы азота. Выполнено сравнение результатов, полученных по разработанной модели с расчетными данными других авторов.

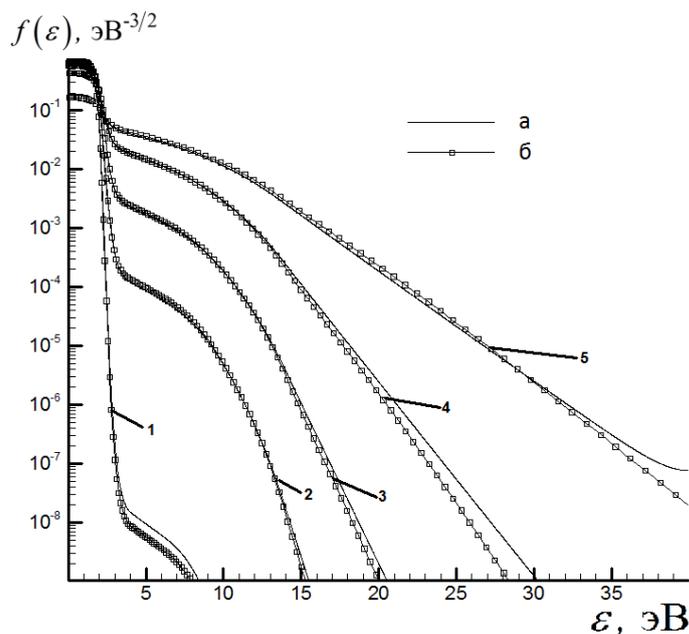


Рис. 1 Сравнение функции распределения электронов по энергиям, рассчитанной в данной работе, (а) с данными [3] (б) при различных значениях приведенного поля $\frac{E}{N}$: $\frac{E}{N} = 20$ Тд (1), $\frac{E}{N} = 40$ Тд (2), $\frac{E}{N} = 60$ Тд (2), $\frac{E}{N} = 100$ Тд (3), $\frac{E}{N} = 200$ Тд (4).

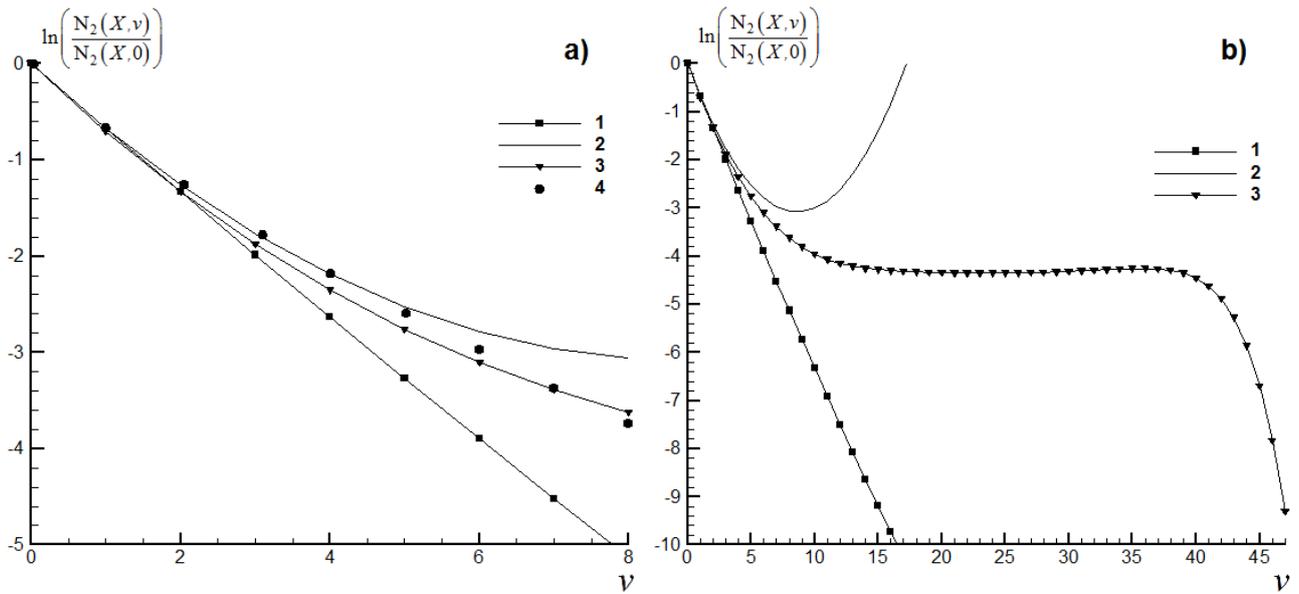


Рис. 2 Колебательная функция распределения молекул азота в плазме тлеющего разряда при $p = 2 \text{ Тор}$, $T = 500 \text{ К}$, $N_e = 2 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для первых 8 (а) и 47 (б) колебательных уровней основного состояния: 1 - бoльцмановское распределение, $T_v = 5000 \text{ К}$, 2 – триноровское распределение, $T_v = 5000 \text{ К}$, $T = 500 \text{ К}$, 3 – данный расчет, 4 – результаты расчета [4].

В третьей главе выполнен анализ плазмохимических процессов с участием электронов, протекающих в слабоионизованной плазме пеннинговского разряда. С использованием нульмерной (расчет в элементарном физическом объеме без учета потоков массы и энергии через его границы) кинетической модели исследовалось влияние различных кинетических механизмов на концентрацию молекулярных и атомарных ионов водорода в плазме пеннинговского разряда. Разработаны подробная и упрощенная кинетические модели, позволяющие рассчитывать концентрацию атомарных и молекулярных ионов водорода в плазме пеннинговского разряда. В серии численных экспериментов изучалось влияние функции распределения и средней энергии электронов на компонентный состав плазмы, а также влияние ударов второго рода (столкновения электрона с колебательно-возбужденной молекулой).

Результаты, полученные в данной главе, позволили установить ряд особенностей, связанных с кинетикой плазмохимических процессов в механике пеннинговского разряда:

1. Показано, что в импульсном пеннинговском разряде доля колебательно-возбужденных молекул мала и не оказывает существенного влияния на концентрацию ионов водорода.
2. Основными механизмами диссоциации молекул водорода в пеннинговском разряде являются ступенчатый механизм диссоциации молекулы электронным ударом, протекающий через возбужденное состояние $\text{H}_2(b^3\Sigma_u^+)$, а также процессы диссоциативной ионизации молекулы водорода.

Разработанная кинетическая схема может применяться для расчета компонентного состава плазмы пеннинговского разряда в диффузионно-дрейфовых [5-7] и PIC (particle-in-cell) моделях [8]. При этом в данных моделях важно правильно определять функцию распределения по энергиям самих частиц, участвующих в химических превращениях, (электронов, молекулярных и атомарных ионов), для чего может понадобиться учет дополнительных процессов, отвечающих за потерю и набор заряженными частицами кинетической энергии.

На основе выполненного исследования сделан вывод, что в пеннинговском разряде, по-видимому, упругие столкновения электронов с молекулами будут слабо влиять на среднюю энергию электронов, в силу того, что они набирают очень высокую энергию в электрическом поле. Поэтому основные каналы сброса энергии для электронов - это возбуждение внутренних степеней свободы, ионизация и диссоциация нейтральных молекул. Для правильного определения энергии молекулярных и атомарных ионов также необходимо учитывать процессы упругого столкновения и перезарядки, т.к. они имеют значительно большие сечения, чем процессы диссоциации и ионизации ионным ударом, при этом в этих столкновениях ионы могут терять значительную часть своей энергии, передавая ее более холодным нейтральным молекулам водорода.

Четвертая глава посвящена разработке компьютерных моделей тлеющего и пеннинговского разрядов, основанных на согласованном решении уравнений механики газового разряда (диффузионно-дрейфовая модель) и уравнений, описывающих физико-химические процессы, протекающие в плазме газового разряда.

С использованием разработанных компьютерных моделей выполнено численное моделирование электродинамической структуры тлеющего разряда в молекулярном азоте, а также численное моделирование двумерной электродинамической структуры тлеющего и пеннинговского разрядов в молекулярном водороде.

В основе описанных в данной главе моделей лежат уравнения диффузионно-дрейфовой модели [5-7], но в отличие от работ [6-7], кинетические параметры модели (1-й коэффициент Таунсенда, коэффициенты диффузии и подвижности электронов, мощность джоулева тепловыделения) рассчитывались на основе расчетов неравновесной функции распределения электронов по энергиям из решения кинетического уравнения Больцмана и уравнений поуровневой кинетики для заселенностей электронных и колебательных уровней молекул. Выполненные расчеты позволили установить ряд особенностей, связанных с неравновесными физико-химическими процессами, протекающими в пеннинговском и тлеющем разрядах:

1. Практически во всей области тлеющего разряда в молекулярном азоте, кроме приэлектродных слоев, в исследованных условиях доля джоулева тепла, затрачиваемая на нагрев молекул газа, составляет $\eta \approx 0.4 \div 0.5$. На Рис. 3 даны осевые распределения энергии возбуждения не только отдельных электронных состояний, но и различных колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$. Видно, что в катодном слое наибольшая энергия тратится на возбуждение

состояния C^3P , а в положительном столбе на возбуждение электронного состояния B^3P_g .

2. Результаты численного моделирования тлеющего разряда в молекулярном водороде показали, что степень диссоциации равна $\delta_{ioniz} = 10^{-7} - 10^{-6}$ в положительном столбе тлеющего разряда и $\delta_{ioniz} = 10^{-4}$ катодном слое. Основным ионом в плазме является H_2^+ . Степень диссоциации в плазме тлеющего разряда в молекулярном водороде составляет $\delta_{dissoc} \approx 10^{-3}$. Концентрация колебательно возбужденных молекул водорода с колебательным квантовым числом ($v \geq 5$) на порядок выше, чем концентрация в положительном столбе. Основным механизмом образования молекулярного иона H_2^+ в тлеющем разряде является ионизация электронным ударом. 85% всех молекулярных ионов в плазме тлеющего разряда образовались из основного колебательного состояния, 9% с 1-го возбужденного уровня, и 6% с более высоких колебательных уровней. Основным механизмом образования атомарных ионов является ионизация нейтрального атома электронным ударом.
3. Показано, что степень диссоциации в основном объеме плазмы пеннинговского разряда в молекулярном водороде составляет около ~2%, а степень ионизации равна ~0.1. Численные расчеты показали, что число колебательно возбужденных молекул на 2 порядка ниже, чем концентрация молекул в основном колебательном состоянии.

Полученные в данной главе результаты по пространственному распределению электронов, молекулярных и атомарных ионов, плотности тока представляют практический интерес при производстве источников ионов, газонаполненных нейтронных трубок, плазмохимических реакторов, различных энергетических устройств.

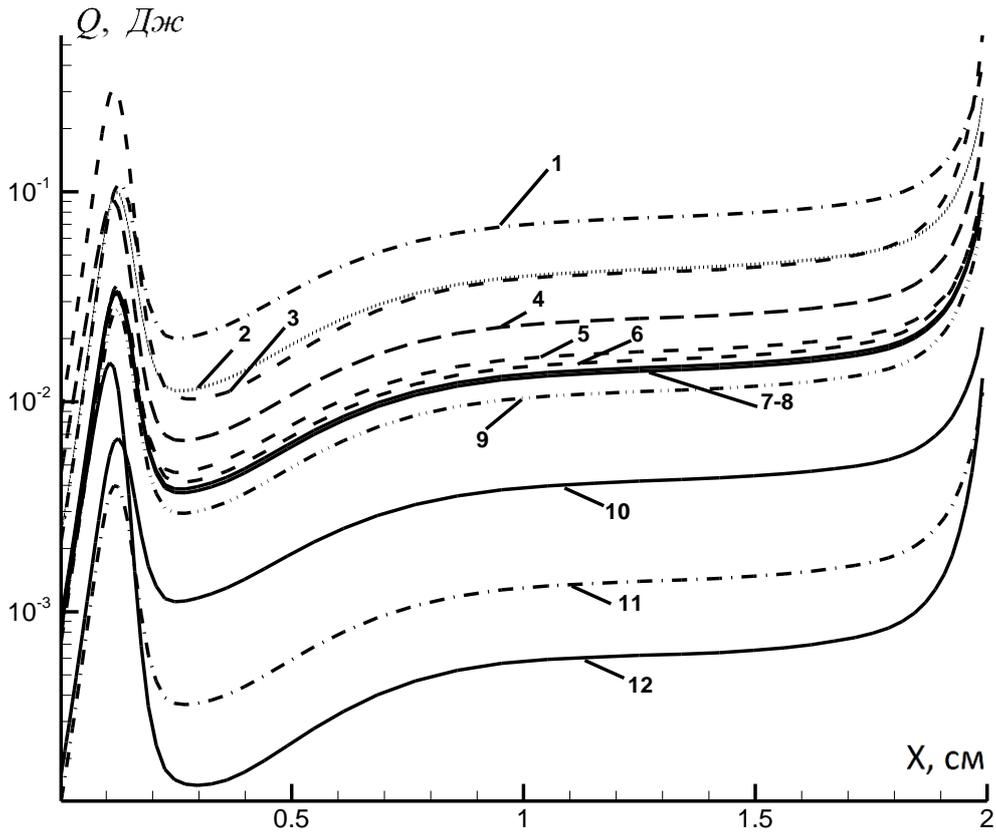


Рис. 3. Энергия, запасаемая в различных электронно-возбужденных уровнях N_2 : 1 - $B^3\Pi_g$, 2 - $W^3\Delta$, 3 - $C^3\Pi$, 4 - $A^1\Pi$, 5 - $A^3\Sigma_u^+(v=5-9)$, 6 - $W^1\Delta$, 7 - $A^3\Sigma_u^+(v > 10)$, 8 - $B'^3\Sigma$, 9 - $A'^1\Sigma$, 10 - $A^3\Sigma_u^+(v > 10)$, 11 - $E^3\Delta$, 12 - $A''^1\Sigma$

В пятой главе изложена модель, описывающая механику струи продуктов сгорания, основанная на решении уравнений движения для вязкого, теплопроводного, химически-реагирующего газа. Разработанные в данной главе модели использовались для численного моделирования истечения струи продуктов сгорания из сопел малоразмерных летательных аппаратов. Представлено сравнение результатов численного моделирования струй продуктов сгорания твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей, а также струи плазмы с расчетными и экспериментальными данными.

В силу высокой трудоемкости решаемой задачи (численное интегрирование уравнений механики сплошной среды на подробных сетках, решение жесткой системы уравнений химической кинетики), особое внимание

при разработке численной модели, описанной в данной главе, уделяется способам ускорения численных расчетов.

Одним из таких способов ускорения является квазимаршевый подход к численному интегрированию исходной системы уравнений. Данный подход состоит в следующем: выбирается маршевое направление (направление истечения струи продуктов сгорания), сетка вдоль этого направления разбивается на несколько блоков, далее решается исходная система уравнений, описывающая механику струи продуктов сгорания в каждом из блоков, начиная с блока, примыкающего к соплу двигателя, при этом решение, полученное в предыдущем блоке, используется в качестве граничных условий при получении решения в следующем блоке. Численные эксперименты показали, что использование такого подхода позволяет значительно сократить временные затраты на получение решения в задачах истечения струи продуктов сгорания.

В данной главе также описывается способ ускорения численных расчетов, основанный на распараллеливании компьютерного кода. Предложенный метод распараллеливания, основанный на использовании технологии MPI (message passing interface), позволил запустить компьютерную программу более, чем на 100 процессорах, что значительно сократило время решения задачи об истечении струи продуктов сгорания.

Стоит также отметить, что описанные в данной главе способы ускорения не являются взаимоисключающими, и наибольшее ускорение численных расчетов было получено при одновременном использовании квазимаршевого метода и распараллеливания.

В шестой главе приводятся результаты численного моделирования спектральной излучательной способности (сигнатуры) струи продуктов сгорания на примере модельных и реальных светорассеивающих струй продуктов сгорания твердотопливных тактических ракет (Рис. 4), что сделано с целью проверки достоверности разработанной компьютерной модели.

Выполнены прогностические расчеты сигнатуры струи продуктов сгорания перспективного гиперзвукового летательного аппарата X-51.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе, отражающие ее новизну и практическую значимость.

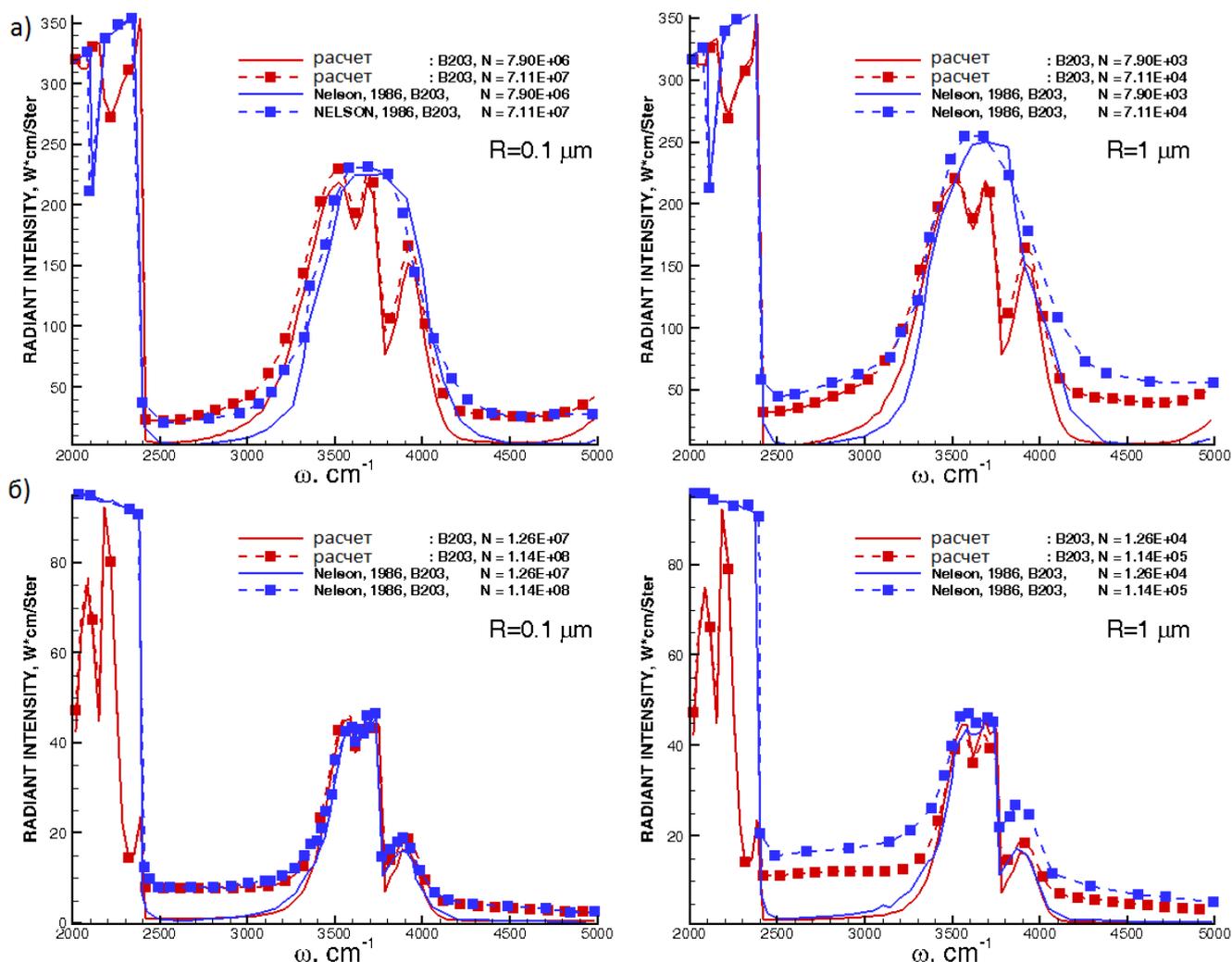


Рис. 4. Сравнение спектральной сигнатуры (Вт*см/Ср) струи продуктов сгорания с частицами В₂О₃ с данными [9] для различного химического состава 14% СО₂, 6% Н₂О, 3% СО (а) и 30% СО₂, 2% Н₂О, 2% СО (б), а также разных концентраций и радиуса светорассеивающих частиц топлива В₂О₃.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана согласованная модель механики тлеющего разряда, основанная на решении двумерной диффузионно-дрейфовой системы уравнений для расчета электродинамической структуры разряда, решении кинетического уравнения Больцмана для определения функции распределения электронов, коэффициентов переноса в плазме и констант скорости, а также решении системы уравнений поуровневой кинетики для расчета компонентного состава плазмы тлеющего разряда. Проведены численные исследования электродинамической структуры тлеющего и пеннинговского разрядов с использованием решения системы уравнений физической механики. Выполненное исследование двумерной структуры нормального тлеющего разряда позволило установить ряд особенностей, связанных с физико-химической кинетикой частично ионизованного газа. Было показано, что при давлении порядка нескольких Тор использование решения кинетического уравнения Больцмана при расчете 1-го коэффициента Таунсенда приводит к росту плотности ионов и электронов на катоде и в положительном столбе тлеющего разряда.
2. Разработана структурированная база данных констант скоростей и сечений рассеяния на молекулах и атомах водорода для процессов, протекающих в плазме газовых разрядов. Разработаны подробная уровневая и упрощенная кинетические модели для расчета концентрации молекулярных и атомарных ионов водорода в плазме пеннинговского разряда. Выполнены расчеты компонентного состава пеннинговского разряда с использованием разработанных кинетических моделей. На основе выполненных расчетов была разработана упрощенная кинетическая схема, позволяющая рассчитывать концентрацию молекулярных и атомарных ионов в плазме пеннинговского разряда.

3. Разработана квазимаршевая методика решения системы уравнений движения вязкого теплопроводного химически реагирующего газа в задачах истекания струи продуктов сгорания из сопла ВЛА и разработана параллельная версия компьютерного кода, решающего данную задачу. Это позволило значительно сократить время расчетов. С использованием разработанной методики рассчитаны струи продуктов сгорания, истекающих из сопла тактической ракеты, РН Atlas, РН Titan и ВЛА X-51.
4. Разработана серия авторских компьютерных кодов, предназначенных для численного моделирования неравновесных физико-химических процессов в механике газовых разрядов и струй продуктов сгорания (программы расчета: функции распределения электронов по энергиям и коэффициентов переноса в плазме газового тлеющего и пеннинговского разрядов, компонентного состава плазмы, двухмерной электродинамической структуры разряда, параметров в струе продуктов сгорания ВЛА на основе двухмерных и трехмерных моделей, спектральной излучательной способности струи продуктов сгорания ВЛА).
5. Проведены многопараметрические расчеты спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания, истекающих из сопел твердотопливных (тактическая ракета) и жидкостных (РН Atlas, РН Titan) ракетных двигателей, а также прогностические расчеты сигнатуры гиперзвукового летательного аппарата (ВЛА X-51).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоренц Х. А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры, 1956.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.

3. Hagelaar G. J. M., Pitchford L. C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 14, № 4, P. 722, 2005.
4. Бодронос А. В., Верещагин К. А., Гордеев О. А., Смирнов В. В., и Шахатов В. А. О возможности локальной невозмущающей диагностики электронного компонента в плазме тлеющего разряда в азоте методом спектроскопии КАРС/ *Теплофизика Высоких Температур*, т. 34, вып. 5, с. 666–675, 1996.
5. Райзер Ю. П. и Суржиков С. Т. Диффузия зарядов вдоль тока и эффективный метод устранения счетной диффузии при расчетах разрядов типа тлеющего. *Теплофизика Высоких Температур*, т. 28, вып. 3, с. 439–443, 1990.
6. Суржиков С. Т. *Физическая механика газовых разрядов*. федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет имени НЭ Баумана (национальный исследовательский университет), 2006.
7. Суржиков С. Т. Численное моделирование двухмерной структуры тлеющего разряда с учетом нагрева нейтрального газа. *Теплофизика Высоких Температур*, т. 43, вып. 6, с. 828–844, 2005.
8. Дикалюк А. С., Куратов С. Е. Реализация метода частиц-в-ячейках на неструктурированных сетках для численного моделирования плазменных устройств // *Математическое моделирование*. – 2017. – Т. 29. – №. 9. – С. 33-48.
9. NELSON H. F., TUCKER E. O., Boron slurry-fueled jet engine exhaust plume infrared signatures. *J. Spacecr. Rockets*, Vol. 23, № 5, P. 527–533, 1986.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Storozhev D.A. and Surzhikov S.T., Numerical Simulation of Two-Dimensional Structure of Glow Discharge considering kinetics // *AIAA 2014-1193*, 52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, 2014.
2. Сторожев Д. А., Суржиков С. Т. Численное моделирование двухмерной структуры тлеющего разряда в молекулярном азоте с учетом колебательной кинетики // *Теплофизика высоких температур*. – 2015. – Т. 53. – №. 3. – С. 325-336.
3. Storozhev D. A., Surzhikov S. T., Kuratov S.E., Numerical Simulation of Two-Dimensional Structure of Glow Discharge in Molecular Hydrogen // *AIAA 2015-3108*, 45th AIAA Thermophysics Conference, AIAA AVIATION Forum, 2015.

4. Storozhev D.A, Surzhikov S.T, Kuratov S.E., Numerical simulation of dissociation kinetics in the Penning discharge plasma using 2D modified drift-diffusion model //55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. – 2017. – С. 1966.
5. Storozhev D. A., Kuratov S. E. Numerical simulation of the kinetics of dissociation and ionization of molecular hydrogen in the penning discharge plasma with the use of the reduced kinetic model //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 815. – №. 1. – С. 012002.
6. Storozhev D. A. Numerical simulation of the underexpanded plume spectral radiance using Monte-Carlo method //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1009. – №. 1. – С. 012039.
7. Сторожев Д. А. Кинетические процессы в плазме тлеющего разряда//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т.14, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-3/articles/417/>
8. Сторожев Д. А. Численное моделирование кинетики ионизации и диссоциации водорода в плазме разряда Пеннинга в приближении ЛТР//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/229/>
9. Сторожев Д. А., Суржииков С. Т., Куратов С. Е. Анализ кинетических процессов в тлеющем разряде в молекулярном водороде//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-6/articles/267/>
10. Сторожев Д. А., Куратов С. Е., Суржииков С. Т. Численное моделирование 2D структуры тлеющего разряда в молекулярном водороде с учетом кинетики ионизации и диссоциации//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т.16, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/566/>

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н., проф., академику РАН С.Т. Суржиикову за постоянное внимание, ценные советы и большую помощь в подготовке работы. Автор благодарит коллективы лаборатории радиационной газовой динамики Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН и Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова», а также коллектив кафедры физической и химической механики Московского физико-технического института за многолетнее сотрудничество, плодотворные обсуждения и полезные замечания, сделанные при подготовке диссертации.