

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»  
Россия, 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1.

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель генерального  
директора по науке и инновациям

Н.Г. Айрапетова

2018 г .



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

Диссертация Сторожева Д. А. посвящена разработке расчетно-теоретических методов и численному моделированию неравновесных кинетических процессов в плазме тлеющего и пеннинговского разрядов.

#### **Актуальность темы**

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью разработки и совершенствования таких электрофизических приборов, как источники ионов, используемые в генераторах нейтронов газонаполненные нейтронные трубки, плазматроны.

В связи с высокой трудоемкостью и дорогостоящей экспериментальных исследований неравновесных физико-химических процессов, протекающих в данных устройствах, важной задачей является развитие расчетно-теоретических моделей, способных описывать изучаемые процессы и явления. Рост

производительности компьютерных процессоров, а также современные технологии распараллеливания позволяют разрабатывать компьютерные модели, включающие все большее количество физических процессов.

Численное моделирование электродинамической структуры газового разряда имеет ряд особенностей, связанных с решением кинетического уравнения Больцмана для расчета функции распределения электронов по энергиям, описанием заселенностей колебательных и электронных уровней молекул, расчетом атомно-молекулярного состава плазмы, а также разработкой самосогласованных компьютерных моделей. Также наблюдается нехватка доступных и хорошо документированных, а также структурированных экспериментальных и расчетных данных по сечениям рассеяния электронов на молекулах и атомах.

Решение задачи математического моделирования пеннинговского и тлеющего разрядов позволит получить важную информацию об особенностях пространственной электродинамической структуры разряда и компонентном (концентрация молекулярных и атомарных ионов) составе образующейся в разряде плазмы. Данные параметры имеют высокую практическую значимость для разработчиков таких устройств, как источники ионов и газонаполненные нейтронные трубки.

### **Краткий анализ содержания работы.**

Представленная к защите диссертация структурирована следующим образом:

Во введении обоснована актуальность темы исследований. Сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

**В первой главе** изложен обзор работ, посвященных численному моделированию неравновесных физико-химических процессов с участием водорода, протекающих в плазме тлеющего и пеннинговского разрядов, плазменных струях. В данной главе также описываются кинетические модели,

используемые в данных работах. Разработана база данных кинетических процессов с участием водорода в низкотемпературной плазме газового разряда.

**Во второй главе** приводится описание двух методов решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям (метод Шермана [Sherman A, Journal of mathematical analysis and applications, 1960] и метод Шарфеттера-Гуммеля [Scharfetter D.L., Gummel H.K., IEEE Trans. Electron Devices. – 1969]). Приводятся результаты численного моделирования функции распределения электронов, а также коэффициентов переноса в низкотемпературно плазме тлеющего разряда в молекулярном азоте. В условиях, характерных для положительного столба тлеющего разряда (давление  $p=1-5$  Торр, значения приведенного электрического поля  $E=20-500$  Тд), выполнены расчеты констант скоростей возбуждения различных колебательных и электронных степеней свободы молекулы, коэффициента ионизации, рассчитаны заселенности колебательных уровней основного электронного состояния молекулы азота. Выполнена верификация изложенной модели на примере сравнения с расчетными данными ([Бодронос А. В., Верещагин К. А., Гордеев О. А., Смирнов В. В., и Шахатов В. А., ТВТ, 1996]).

**В третьей главе** рассмотрены вопросы, связанные с численным моделированием компонентного состава плазмы пеннинговского разряда в молекулярном водороде. Описываются подробная уровневая и упрощенная кинетические модели для расчета компонентного состава плазмы пеннинговского разряда. Выполнен анализ влияния различных механизмов в кинетической схеме на атомно-молекулярный состав плазмы. Приводятся результаты численного моделирования с использованием нульмерной кинетической модели (при отсутствии потоков массы и энергии через границы элементарного физического объема).

**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 разряда. С использованием разработанных согласованных физико-математических моделей выполнено численное моделирование электродинамической структуры тлеющего разряда в молекулярном азоте, а также численное моделирование двумерной электродинамической структуры тлеющего (давление  $p=3-10$  Торр, ЭДС источника тока  $E=1$  кВ) и пеннинговского разрядов (давление  $p=1$  мТорр, ЭДС источника тока  $E=3$  кВ) в молекулярном водороде.

**В пятой главе** изложена модель, описывающая механику струи продуктов сгорания, основанная на решении уравнений движения для вязкого, теплопроводного, химически-реагирующего газа. Полученные в данной главе результаты использовались в дальнейшем для расчета направленной спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания.

**В шестой главе** описываются результаты численного моделирования спектральной излучательной способности (сигнатуры) струи продуктов сгорания на примере модельных и реальных струй твердотопливных тактических ракет, а также для струи продуктов сгорания перспективного гиперзвукового летательного аппарата (число маха  $M=7$ , высота  $H=30$  км).

В заключении кратко формулируются основные выводы, полученные в диссертации.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Обоснованность и достоверность расчетно-теоретических моделей и использованных методов расчета 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.

## Оценка новизны и практической значимости

Отметим основные результаты автора, являющиеся новыми и представляющими, на наш взгляд, значительный научный и практический интерес:

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 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. Показано, что при давлении порядка нескольких Тор использование решения кинетического уравнения Больцмана при расчете 1-го коэффициента Таунсенда приводит к незначительному росту плотности ионов и электронов на катоде и в положительном столбе тлеющего разряда по сравнению с табличными значениями ([Райзер Ю. П. Физика газового разряда., 1987]).
2. Разработаны подробная уровневая и упрощенная кинетические модели для расчета концентрации молекулярных и атомарных ионов водорода в плазме пеннинговского разряда. На основе выполненных расчетов была разработана упрощенная кинетическая схема, позволяющая рассчитывать концентрацию молекулярных и атомарных ионов в плазме пеннинговского разряда. Разработана структурированная база данных констант скоростей и сечений рассеяния на молекулах и атомах водорода для процессов, протекающих в плазме газовых разрядов.
3. Разработана квазимаршевая методика решения системы уравнений движения вязкого теплопроводного химически реагирующего газа в

задачах истечения струи продуктов сгорания из сопла тактической ракеты. Разработана параллельная версия компьютерного кода, решающего данную задачу, что позволило значительно сократить время расчетов. С использованием разработанной методики рассчитаны струи продуктов сгорания, истекающих из сопла модельной тактической ракеты, РН Atlas, РН Titan, а также из сопла гиперзвукового летательного аппарата Х-51.

4. Разработана серия 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 Х-51).

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. При решении кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям используется лоренцево приближение. Однако в работе не указаны границы применимости данного приближения.
2. При расчете компонентного состава плазмы пеннинговского разряда не учитываются реакции с колебательно возбужденными молекулами

3. В автореферате диссертации недостаточно подробно описана физико-математическая модель, используемая для расчета параметров струи продуктов сгорания.
4. В диссертации в главе 6, посвященной расчету спектральной направленной излучательной способности струи продуктов сгорания, недостаточно подробно описана методика расчета коэффициентов поглощения и рассеяния твердых частиц, присутствующих в струе продуктов сгорания твердотопливных ракетных двигателей.
5. В диссертации отсутствует общий список используемых обозначений, причём при этом не всегда введенные обозначения расшифровываются.

В диссертации затронуты весьма интересные, важные и актуальные проблемы. Отмеченные замечания не умаляют всех достоинств работы.

### **Заключение**

Работа является законченной и выполнена автором на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования можно охарактеризовать как научно-обоснованный систематический анализ важной фундаментальной и прикладной задачи разработки согласованных расчетно-теоретических моделей газо- и плазмодинамики. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчеты, написана технически квалифицированно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате, соответствующем содержанию диссертации.

По актуальности рассмотренных проблем, научной новизне решенных задач и практической значимости полученных результатов диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Российской Феде-

рации к кандидатским диссертациям, а ее автор Сторожев Дмитрий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Начальник лаборатории  
физических проблем АО «ГНЦ  
РФ – ФЭИ», к.ф.м-н., доцент



А.П. Будник

Подпись А.П. Будника заверяю

Заместитель генерального  
директора по науке и инновациям



Н.Г. Айрапетова

Контактные данные Будника Александра Петровича:

E-mail [budnik@ippe.ru](mailto:budnik@ippe.ru), тел. 84843998692, +79105249413, +79107077122