

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Шибкова Валерия Михайловича на диссертацию **Дмитрия Алексеевича Сторожева «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 разработке компьютерных моделей неравновесных физико-химических процессов, протекающих в плазме тлеющего и пеннинговского разрядов, а также расчету спектральной излучательной способности струй продуктов сгорания высокоскоростных летательных аппаратов.

### **Актуальность темы**

Актуальность исследования неравновесных физико-химических процессов в струях и плазме связана с разработкой эффективных генераторов плазмы, источников ионов и высокоскоростных летательных аппаратов. Для проведения математического моделирования таких систем необходимо использовать согласованные компьютерные модели, включающие систему уравнений движения газа и плазмы, кинетическое уравнение Больцмана для электронов, систему кинетических уравнений для расчета заселенностей колебательных и электронных уровней молекул, а также методы прямого статистического моделирования Монте-Карло. Именно этим актуальным вопросам посвящена диссертационная работа Д.А.Сторожева.

### **Краткий анализ содержания работы**

Структурно диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 209 страницах, содержит 86 рисунков и 30 таблиц. Библиография включает 157 наименований.

**Во введении** обсуждается современное состояние исследований, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, конкретизированы методы исследований, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, приводятся сведения об апробации работы, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы

Подробный анализ состояния исследований в области изучения неравновесных физико-химических процессов, протекающих в низкотемпературной плазме тлеющего и пеннинговского разрядов, представлен **в первой главе** диссертации. Проведена также систематизация теоретических и экспериментальных данных по сечениям рассеяния и кинетическим схемам, используемым различными авторами для расчета компонентного состава газовых разрядов.

**Во второй главе** на основе решения кинетического уравнения Больцмана рассчитаны коэффициенты ионизации, подвижности и диффузии, а также константы скоростей различных процессов и заселенности колебательных и электронных уровней в плазме молекулярного азота.

**В третьей главе** исследовано влияние различных механизмов в кинетической схеме на концентрацию атомарных и молекулярных ионов водорода в плазме пеннинговского разряда. Разработаны подробная и упрощенная кинетические модели, позволяющие определить концентрацию молекулярных и атомарных ионов.

**В четвертой главе** приводятся результаты численного моделирования электродинамической структуры тлеющего разряда в молекулярном азоте, а также двумерной электродинамической структуры тлеющего и пеннинговского разрядов в молекулярном водороде. С использованием разработанных в диссертации кинетических моделей рассчитаны концентрации атомарных и молекулярных ионов в плазме, потери энергии электронов на возбуждение различных колебательных и электронных уровней молекул в разных областях тлеющего разряда в молекулярном азоте.

**В пятой главе** изложена квазимаршевая модель, предназначенная для численного расчета распределения температуры, давления, мольных долей химических компонент топлива в двумерной осесимметричной недорасширенной струе продуктов сгорания. С использованием разработанной модели рассчитано распределение параметров в струе продуктов сгорания ракетного двигателя. Рассчитано также осевое распределение температуры в струе плазмы молекулярного водорода, которое удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами.

Результаты численного моделирования направленной спектральной излучательной способности модельных и реальных струй продуктов сгорания твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей представлены **в шестой главе**. Получено удовлетворительное согласие с расчетными данными других авторов. Выполнен также расчет спектральной сигнатуры струи продуктов сгорания перспективного гиперзвукового летательного аппарата.

**В Заключении** кратко формулируются основные выводы, полученные в диссертации.

### **Оценка новизны и практической значимости**

Научную новизну представленной диссертационной работы можно охарактеризовать следующим образом:

- Разработана компьютерная модель тлеющего разряда, основанная на двухмерной диффузионно-дрейфовой системе уравнений, кинетическом уравнении Больцмана для электронов, системе кинетических уравнений для расчета компонентного состава плазмы. Выполнены численные исследования тлеющего разряда в молекулярном азоте и водороде.
- Разработана кинетическая модель, описывающая образование атомарных и молекулярных ионов в плазме пеннинговского разряда в молекулярном водороде.
- Проведено численное двухмерное моделирование электродинамической структуры тлеющего и пеннинговского разрядов с использованием решения системы уравнений механики сплошной среды.

- Разработан квазимаршевый метод решения задачи о расчете параметров истекающей из сопла ракетного двигателя струи продуктов сгорания. Рассчитаны давление, температура, компонентный состав струй продуктов сгорания, а также их направленные спектральные излучательные способности в диапазоне длин волн  $\lambda=2-5$  мкм.
- Выполнены расчеты спектральной излучательной способности струи продуктов сгорания гиперзвукового летательного аппарата.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На рис. 10 и 11 представлены зависимости констант возбуждения электронным ударом первых восьми колебательных уровней основного состояния молекулы азота от температуры электронов и приведенного электрического поля. Полученные в диссертации константы имеют одинаковую зависимость от температуры и приведенного поля, кроме константы возбуждения второго уровня, которая имеет принципиально отличающуюся от других констант зависимость. В диссертации следовало бы объяснить полученный результат.
2. В тексте диссертации четыре раза приводится выражение для соотношения между сечениями прямых и обратных процессов. На стр. 46, 53 и 125 приведена одна и та же формула, в которой в экспоненте стоит размерная величина, и только на стр. 64 представлена правильная формула.
3. В пятой главе подробно описывается разработанная двумерная модель истечения струи продуктов сгорания ракетного двигателя, однако численному методу решения данной системы уделяется мало внимания.
4. Замечания по оформлению диссертации. В списке литературы дублируются ссылки на одну и ту же статью. Например, ссылка [42] тождественна ссылке [43], ссылка [56] тождественна ссылке [57]. На стр. 133 и стр. 144 приводятся ссылка на рис. 104 и рис. 109-110. Однако рисунков с такими номерами в тексте диссертации нет, последним рисунком является рис. 86. В тексте диссертации и на рисунках обозначения в основном приведены в русской транскрипции, но на стр. 120-133, 147-148, 155-159 и 183-196

используется английская транскрипция. На стр. 128 автор пишет, что при увеличении давления радиальные размеры положительного столба тлеющего разряда сильно увеличиваются, хотя на рис. 45 и 46, где представлены полученные в диссертации правильные результаты, радиальные размеры уменьшаются.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку рассмотренной диссертационной работы, качество проведенных исследований, ее научную и практическую ценность

### **Заключение**

Все материалы диссертации Д.А.Сторожева достаточно обоснованы, широко апробированы на различных российских и международных научных конференциях, обсуждены на семинарах, отражены в научных журналах. Достоверность полученных результатов подтверждается строгой постановкой задачи, сравнением с теоретическими и экспериментальными работами других авторов, публикациями в ведущих рецензируемых изданиях международного уровня. Развитые автором математические модели и современные численные методы расчета низкотемпературной плазмы сами по себе представляют практический интерес для исследований в различных областях физики плазмы.

Результаты работы Д.А. Сторожева, опубликованные в 10 статьях, представляются значимыми для практических и научных исследований и свидетельствуют о научной зрелости автора.

Автореферат работы правильно отражает содержание диссертации, дает ясное представление о достоверности и обоснованности научных результатов и выводов, а также о практической значимости результатов, изложенных в диссертационной работе.

Диссертация Сторожева Д.А. является завершенной научно-квалификационной работой. По важности решаемых задач, уровню развитых подходов и полученных выводов диссертация Сторожева Дмитрия Алексеевича «Исследование неравновесных физико-химических процессов в механике сверхзвуковых струй и плазмы газового разряда» отвечает всем требованиям

«Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ. Автор диссертационной работы, несомненно, достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Профессор физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук



30.10.2018

В.М. Шибков

Рабочий адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Рабочий телефон: 8(495)939-13-37 или 8(495)939-25-47

E-mail: shibkov@phys.msu.ru

Подпись В.М. Шибкова удостоверяю.

Декан  
Физического факультета МГУ,  
профессор



Н.Н. Сысоев