

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 04.10.2017 протокол № 12

О присуждении Ефимову Александру Валерьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Развитие методов комплексного спектрального анализа многокомпонентной движущейся плазмы импульсных разрядов» в виде рукописи по специальности 01.04.08 – физика плазмы, принята к защите 31.05.2017г., протокол № 8, диссертационным советом Д 002.110.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Ефимов Александр Валерьевич, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Московский энергетический институт).

В 2013 году окончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Работает научным сотрудником лаборатории №2.2.2.2 (оптическая спектроскопия) Научно-исследовательского центра физико-технических проблем энергетики (НИЦ-2 ФТПЭ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории №2.2.2.2 (оптическая спектроскопия) Научно-исследовательского центра физико-технических

проблем энергетики (НИЦ-2 ФТПЭ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., с.н.с. Чиннов Валерий Федорович, г.н.с. лаборатории №2.2.2.2 -оптической спектроскопии, (НИЦ-2 ФТПЭ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. Лебедев Юрий Анатольевич, заведующий лабораторией «Плазмохимия и физикохимия импульсных процессов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук» (ИНХС РАН), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, дом 29, Лаборатория «Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов» (№14), (905) 718-1987, lebedev@ips.ac.ru

д.ф.-м.н. Шибков Валерий Михайлович, профессор Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет МГУ, (495) 939-1337, shibkov@phys.msu.ru.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук» (ФИАН), г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, 8(499)135-42-64, postmaster@lebedev.ru ,

в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником, руководителем семинара отдела Оптики низкотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), д.ф.-м.н. В. Н. Очкиным (утвержденном д.ф.-м.н. С. Ю. Савиновым, заместителем директора ФИАН) отметила, что достаточно четко сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

В целом, автор демонстрирует хороший уровень проведения эксперимента и пониманием физических принципов, лежащих в основе используемых методик обработки результатов измерений.

Полученные в работе результаты являются новыми, научно обоснованными, и их достоверность не вызывает сомнений. Основные результаты работы опубликованы в научных журналах и докладывались на конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Результаты работы могут быть использованы при проведении научных исследований в ФИАН, ИОФАН, ИНСХ, МГУ и др. научных организациях. Практические выводы могут быть востребованы научно-исследовательскими институтами, инновационными малыми предприятиями, российскими и зарубежными фирмами, работающими в секторе высоких технологий.

По материалам диссертации автором опубликовано 9 работ. Работы 1 – 5 нижеследующего списка опубликованы в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве образования и науки РФ. Работы 6 – 9 опубликованы в материалах конференций.

1) А.С. Пащина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов. Оптические исследования многокомпонентной плазмы капиллярного разряда. Дозвуковой режим истечения// ТВТ, 2016, том 54, № 4, с. 513–528.

2) А.С. Пащина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов. Оптические исследования многокомпонентной плазмы капиллярного разряда. II. Сверхзвуковой режим истечения// ТВТ, 2017, том 55, № 5.

3) А.С. Пащина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов, А.Г. Агеев. Особенности радиального распределения параметров плазмы начального участка сверхзвуковой струи, формируемой импульсным капиллярным разрядом// Прикладная физика, 2016, № 2, с. 29-35.

4) Битюрин В.А., Григоренко А.В., Ефимов А.В., Климов А.И., Коршунов О.В., Кутузов Д.С., Чиннов В.Ф. Спектральный и кинетический анализ газоразрядной гетерогенной плазмы в потоке смеси AL, H₂O, AR //ТВТ, 2014 ,52 ,1 ,с. 3-13.

5) Т.Ш. Белялетдинов, С.В. Горячев, А.В. Ефимов, Э.Х. Исакаев, В.Ф. Чиннов. Спектральное определение локальных значений концентрации и температуры электронов в сильно-ионизованной азотной плазме с использованием ПЗС – матриц// Оптика и спектроскопия, 2010, том 109, № 5, с. 721–727.

6) Pashchina A.S., Klimov A.I., Efimov A.V.. Influence of Nano-Scale Clusters on Gas Dynamics Parameters of Plasma Jet Created by Capillary Type Discharge (AIAA 2014-0517). 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014, p.1-11.

7) A.G. Ageev, V.A. Bityurin, V.F. Chinnov, A.V. Efimov and A.S. Pashchina. Features of spatial distribution of the parameters on the initial section of a supersonic plasma jet, created by pulsed discharge in a capillary with ablative wall// Journal of Physics: Conference Series, Volume 774, Number 1.

8) Pashchina A.S., Chinnov V.F., Andriyanova Y.N., Efimov A.V. The Space-Time Spectroscopy of the Pulsed High Enthalpy Plasma Jet// Physics of Extreme States of Matter. Moscow, 2014, P. 176-178.

9) Chinnov V., Efimov A., Goryachev S., Pashchina A. The Space-Time Spectroscopy of Pulse Heterogeneous Plasma Jet// 31st ICPIG, Granada, Spain, July 14-19, 2013, 6, PS2-040

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н. Лебедев Юрий Анатольевич является одним из ведущих ученых страны в области плазмохимии и физики неравновесной плазмы; его публикации по тематике диссертации:

1. В.А. Шахатов, Ю.А. Лебедев. Анализ данных по сечениям возбуждения электронных состояний и ионизации атома водорода электронным ударом. Успехи прикладной физики, 2016, Т. 54, № 6, С. 533-566

2. Шахатов В.А., Лебедев Ю.А. Эмиссионная спектроскопия дипольного источника плазмы в водороде при низких давлениях. Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 4. С. 491-499.

3. В. А. Шахатов, Ю. А. Лебедев, А. Lacoste, S. Vechu. Кинетика возбуждения электронных состояний молекул водорода в неравновесных разрядах. Основное электронное состояние. Теплофизика высоких температур, 2015, том 53, № 4, с. 601–622.

- д.ф.-м.н. Шибков В.М. является признанным специалистом в области исследования плазмы и плазменных течений. Его публикации по тематике диссертации:

1. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Параметры плазмы пульсирующего в сверхзвуковом потоке воздуха разряда постоянного тока. Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 3. С. 314-322.
2. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Температура электронов в плазме разряда постоянного тока, создаваемого в сверхзвуковом воздушном потоке. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2017. № 3. С. 75-81.
3. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А., Копыл П.В., Сурконт О.А. Пространственно-временная эволюция горения в условиях низкотемпературной газоразрядной плазмы жидкого спирта, инжестируемого в воздушный поток. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2012. № 1. С. 141-145.

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук» (ФИАН) в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ФИАН является крупнейшим и заслуженным научно-исследовательским центром России с широкой тематикой научных исследований, включающей работы по созданию и развитию основ спектральной диагностики плазмы. По теме диссертации имеются следующие работы ученых ФИАН:

1. Bernatskiy, A. V.; Ochkin, V. N.; Kochetov, I. V., Multispectral actinometry of water and water-derivative molecules in moist, inert gas discharge plasmas, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS, 2016, v. 49, No. 39.
2. Паркевич Е. В., Тиликин И. Н., Агафонов А. В., Шелковенко Т. А., Романова В. М., Мингалеев А.Р., Месяц Г. А., Пикуз С. А., Савинов С. Ю., Проекционная рентгенография высокого разрешения острейного катода в сильноточном вакуумном диоде в излучении Х-пинча, Письма в ЖЭТФ, 2016, том 103, вып. 5, с. 402 – 407.
3. Очкин В. Н., Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М. Физматлит, 2010, 592 с.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)** (Старший научный сотрудник лаборатории

низкотемпературной плазмы, д.ф.-м.н. Шемякин И.А.) – отзыв положительный, без замечаний.

2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (Заслуженный работник высшей школы РФ, д.ф.-м.н, профессор Гайсин Ф.М.) - отзыв положительный, с замечанием:

- В тексте автореферата не приводятся данные о результатах измерений температуры электронов в дозвуковом режиме истечения плазменной струи. Возникает вопрос о мере отклонения исследуемой плазмы от состояния ионизационного равновесия.

3. Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований (Начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы, д.ф.-м.н., профессор Акишев Ю.С.) - отзыв положительный, без замечаний.

4. 4. Московский физико-технический институт (государственный институт) (К.ф.-м.н., доцент, доцент МФТИ Соловьев В.Р.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- К сожалению, физический анализ результатов и разъяснение, почему полученные распределения имеют такой вид, явно не достаточны. Возможно, в диссертации этому уделено больше внимания. Для лучшего понимания результатов для сверхзвуковой струи следовало бы сопроводить рисунки с распределением параметров плазмы рисунками со схемой течения в струе. При этом важно, каково было распределение скорости струи на срезе капилляра;

- Для исследуемого сложного объекта важным аспектом является достоверность результатов измерений. Соискателю следовало бы четче выделить, чем применяемая методика измерений отличается от методики, использованной ранее другими авторами, и почему она позволяет выполнить поставленную задачу по измерению пространственно-временных распределений плотности и температуры электронов;

5. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет

"МЭИ" (Д.ф.-м.н., профессор кафедры Инженерной теплофизики МЭИ Синкевич О.А.) - отзыв положительный, с замечанием:

- Можно лишь сожалеть, что в автореферате не приведены снимки двумерной картины о положении фронтов ударных волн, возникающих при сверхзвуковом истечении эрозионной струи.

На все критические замечания даны исчерпывающие ответы (см. стенограмму).

Диссертационный совет отмечает основные результаты **выполненных соискателем исследований**:

- Разработаны методы определения и получены пространственно-временные распределения излучательных характеристик основных плазменных компонент в протяженных нестационарных плазменных струях, формируемых разрядом в $C_5H_8O_2$ капилляре с характерными размерами 1×5 мм в диапазонах удельного энерговклада $2.5 \div 35$ МВт/см³ при длительности разрядного импульса $1 \div 20$ мс.
- Создан программно-диагностический комплекс, включающий в себя выполнение процедур идентификации спектральных линий, локализации экспериментальных данных с использованием средств компьютерной томографии, определения концентрации и температуры электронов n_e и T_e на основе совокупных данных о наблюдаемых спектральных компонентах, оценки колебательной T_v и вращательной T_r температур на основе моделирования спектра излучения двухатомной молекулы AlO.
- Установлено, что пространственные распределения n_e и T_e плазмы приосевой области струи, формируемой разрядом в $C_5H_8O_2$ капилляре в диапазоне удельных энерговкладов $2.5 \div 5$ МВт/см³, соответствующих дозвуковому режиму истечения, находятся в качественном и количественном согласии с результатами для стационарной водородной дуги атмосферного давления при близких значениях разрядного тока и размерах канала разряда.
- Измеренные пространственные распределения n_e и T_e плазмы приосевой области струи в диапазоне удельных энерговкладов $15 \div 35$ МВт/см³, соответствующем сверхзвуковому режиму истечения, отличаются высокой пространственной неоднородностью и находятся в качественном согласии с результатами, полученными другими авторами для стационарных сверхзвуковых плазменных струй.

- Выполнена экспериментальная оценка T_v , T_r двухатомных молекул (C_2 , CN и AlO) плазменной оболочки струи в диапазоне удельных энерговыделений $2.5 \div 35 \text{ МВт/см}^3$, сравнение которых с измеренными локальными значениями n_e , T_e , указывает на значительную неизотермичность плазмы на ее периферии.
- Предложен метод совместного использования «нормальных» температур и модельной оценки состава многокомпонентной плазменной среды, которым получены радиальные распределения давления и электронной температуры плазмы в области вблизи диска Маха, характеризующейся неизобаричностью и высокой пространственной неоднородностью.

Научная новизна работы

Благодаря реализации совместной и синхронизированной работы высокоскоростных камер и быстродействующего спектроскопического оборудования исследована пространственно-временная эволюция эрозионных разрядов и получены новые представления о многослойной структуре и динамике развития плазменной эрозионной струи.

Создан программно-диагностический комплекс для автоматизированной обработки спектров и нахождения пространственных распределений концентрации и температуры электронов плазмы эрозионного разряда. В результате впервые получены надёжные и непротиворечивые данные о продольном и радиальном распределениях n_e и T_e в дозвуковом ($2.5 \div 5 \text{ МВт/см}^3$) и сверхзвуковом ($10 \div 35 \text{ МВт/см}^3$) режимах истечения. Выполнено сравнение полученных распределений n_e и T_e с экспериментальной оценкой колебательной и вращательной температур молекул C_2 и CN плазменной струи.

Использование развитых методов одноракурсной томографии (для анализа радиальных распределений основных излучателей плазмы) и результатов расчёта равновесного состава смеси H:C:O:Si позволило найти радиальные распределения температуры и давления сверхзвуковой эрозионной струи в области диска Маха, где особенно велика роль неизобаричности сверхзвукового течения.

Выполнено моделирование спектра излучения молекулы AlO (переход $V^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$), позволившее оценить колебательную T_v и вращательную T_r температуры молекул в плазме на периферии струи и в дуге вблизи катода (внешний электрод), а также в релаксационной плазме после окончания подвода энергии.

Научная и практическая значимость

Критически отобраны и экспериментально реализованы методы комплексной диагностики пространственно неоднородной неизобарической плазмы сложного состава. Получены самосогласованные данные о пространственно-временных распределениях основных параметров эрозионного разряда, позволяющие развивать теоретические модели его описания.

Развитые в работе методы комплексного спектрального анализа нестационарных плазменных объектов с использованием средств автоматизации и малоракурсной томографии, а также программные комплексы и методики обработки экспериментальных результатов находят применение в работах, проводимых по плану НИР ОИВТ РАН, а также по ряду проектов и договоров.

Результаты работы могут быть использованы при проведении научных исследований в ФИАН, ИОФАН, ИНСХ, МГУ и др. научных организациях. Практические выводы могут быть востребованы научно-исследовательскими институтами, инновационными малыми предприятиями, российскими и зарубежными фирмами, работающими в секторе высоких технологий.

Степень достоверности

Экспериментальные данные получены при помощи современных измерительных средств, обеспечивающих необходимое пространственно-временное и спектральное разрешение. Достоверность результатов анализа обеспечивается путём использования совокупности развитых в плазменной диагностике независимых спектроскопических методик и модельных описаний и критического анализа границ их применимости.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в постановке, подготовке, проведении экспериментальных исследований, анализе и обсуждении полученных результатов. При этом основной вклад автора в проводимых исследованиях заключается в метрологическом сопровождении плазменных экспериментов и решении комплекса вопросов, связанных с выбором, обоснованием и реализацией методов спектральной диагностики и обработкой экспериментальных результатов. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии.

Представление результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами. Результаты были представлены автором лично на российских и международных конференциях.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.

На заседании 04 октября 2017 года диссертационный совет Д 002.110.02 принял решение присудить Ефимову А.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

к.ф.-м.н.

Васильев М.М.

М.П.



04.10.2017г.