

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 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)  
от 04 октября 2017 г. (протокол № 12)

Защита диссертации **Ефимова Александра Валерьевича**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Развитие методов комплексного спектрального анализа  
многокомпонентной движущейся плазмы импульсных разрядов»**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Москва – 2017

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 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)  
Протокол № 12 от 04 октября 2017 г.

Диссертационный совет Д 002.110.02 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 22 человека, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – зам.председателя диссертационного совета  
Д002.110.02 д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета  
Д002.110.02 к.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Васильев М.М.	К.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
12	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
16	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
18	Иванов М.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
25	Петров О.Ф.	академик	01.04.08	Присутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Отсутствует
28	Сон Э.Е.	академик	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует

## **ПОВЕСТКА ДНЯ**

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории №2.2.2.2. – оптической спектроскопии Научно-исследовательского центра физико-технических проблем энергетики (НИЦ-2 ФТПЭ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Ефимова Александра Валерьевича** на тему «Развитие методов комплексного спектрального анализа многокомпонентной движущейся плазмы импульсных разрядов». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории №2.2.2.2 – оптической спектроскопии НИЦ-2 ФТПЭ ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

**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), г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

**Лебедев Юрий Анатольевич**–гражданин РФ, д.ф.-м.н., 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](mailto:lebedev@ips.ac.ru)).

**Шибков Валерий Михайлович**–гражданин РФ, д.ф.-м.н., 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](mailto:shibkov@phys.msu.ru).

### **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](mailto:postmaster@lebedev.ru).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н. Лебедев Ю.А. и д.ф.-м.н. Шибков В.М., научный руководитель Ефимова А.В. д.ф.-м.н. Чиннов В.Ф.

## СТЕНОГРАММА

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Есть вопросы? Если вопросов нет, тогда переходим к основной части. Александр Валерьевич, пожалуйста, 20 минут для представления результатов вашей работы.

### Ефимов А.В.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Ефимова А.В. прилагается).*

### Председатель

Спасибо, какие есть вопросы к Александру Валерьевичу? Пожалуйста.

### Гордон Е.Б.

Я вижу, что результаты в основном связаны с программным комплексом. Не могли бы вы сказать, что вы получили после того как создали комплекс? Что собственно является отражением того, что вы хотите быть кандидатом физико-математических наук, а не технических?

### Ефимов А.В.

Т.е. вы хотите услышать про методы, которые позволили...

### Гордон Е.Б.

Нет, нет. Какие новые физические результаты вами получены?

### Ефимов А.В.

Собственно, полученные результаты распределений параметров в сверхзвуковом режиме являются новыми. Особенно с учётом того, что они получены с использованием методов высокоскоростной спектроскопии.

### Гордон Е.Б.

Что в этих распределениях нового? Чем отличаются? Раньше тоже ведь получали.

### Ефимов А.В.

Для эрозионных разрядов, для капиллярного разряда с подобным пространственным разрешением результатов не было.

### Гордон Е.Б.

Т.е. никогда не получали в капиллярном разряде распределений?

### Ефимов А.В.

По крайней мере, не публиковали распределений в сверхзвуковом режиме истечения.

### Гордон Е.Б.

Это есть в основных результатах?

### Председатель

На слайде с защищаемыми положениями. Это важно. Какой пункт? Покажите, пожалуйста. Наверно третий, да?

### Ефимов А.В.

Пункт 4. Пространственные распределения  $n_e$ ,  $T_e$  плазмы приосевой области струи, формируемой разрядом в  $C_5H_8O_2$  капилляре в диапазоне удельных энергокладов  $10\div 35$  МВт/см<sup>3</sup>, отличающиеся высокой пространственной неоднородностью, находятся в качественном согласии с результатами, полученными для стационарных сверхзвуковых плазменных струй. Но эти плазменные струи – некапиллярные струи. И результаты,

которые там получены, они в большей мере качественные, чем количественные.

**Гордон Е.Б.**

Т.е. ваш результат состоит в том, что в капиллярном разряде получаются те же результаты, что и для обычных стационарных плазменных струй?

**Ефимов А.В.**

Часть из этих результатов действительно согласуются между собой.

**Гордон Е.Б.**

Вот у вас сейчас написано, что они находятся в качественном и количественном согласии.

Пункт 3.

**Ефимов А.В.**

Пункт 3 - это дозвуковой режим, пункт 4 - это сверхзвуковой режим.

**Гордон Е.Б.**

Но всё находится в количественном согласии с результатами. Правильно? Так у вас написано, я же ничего не добавил.

**Ефимов А.В.**

И да, и нет.

**Председатель**

Нет, ну написано так, давайте действительно разберёмся.

**Ефимов А.В.**

Оказалось не просто изложить подробно положения, выносимые на защиту, так чтобы они имели приемлемый размер.

**Гордон Е.Б.**

В этом и состоит искусство изложения.

**Ефимов А.В.**

Да, согласен. На самом деле не все полученные результаты совпадают с литературными данными. Из представленных здесь результатов только правый график с невысокой степенью нерасчетности совпадает с качественной картиной.

**Председатель**

Хорошо, еще вопросы есть? Значит, мы все-таки выяснили, что есть отличия, но сформулировано не очень четко. Хорошо, вы удовлетворены? Тогда мы перейдем к следующему. Эдуард Евгеньевич.

**Сон Э.Е.**

У меня вопрос такой. Вот вы мерили в капиллярном разряде диски Маха, ударные волны, параметры электронов, а много экспериментов было в ударных трубах, в других устройствах, но тоже с выходом в атмосферу. Они, например, сопровождаются входом в атмосферу с Махом 10, установки ЦНИИМАШ и другие. Вы сравнивали свои результаты с этими?

**Ефимов А.В.**

Я пытался сравнивать с любыми результатами, поэтому здесь и указывается монография Лукьянова Г.А. «Сверхзвуковые струи плазмы». Главное отличие состоит в том, что в большинстве работ использовался однородный состав плазмы. У меня же плазма сложного состава, многокомпонентная.

**Сон Э.Е.**

Но эта книга 1985 года. Сейчас в 2015, 2016 году огромное количество работ было опубликовано.

**Ефимов А.В.**

Из новейших работ по обычным сверхзвуковым плазменным струям – нет, не сравнивал. Из новых работ по эрозионным разрядам – я пытался найти что-то свежее из работ за 2000-е годы. Как правило, исследуется не плазменная струя, а параметры плазмы внутри капилляра.

**Сон Э.Е.**

Спасибо. Ещё один вопрос. Можете показать положения? Вот у вас первое положение. Написано: «На защиту выносятся методы и результаты получения пространственных временных профилей». Вы новый метод предложили? Что под этим подразумевается?

**Ефимов А.В.**

Новый подход. Действительно, ни обратное абелевское преобразование, ни метод больцмановской экспоненты не являются новыми. Но подход в том, что я использую это в эти и иные методы в совокупности, использую автоматизированную обработку, то есть обрабатываю большие массивы экспериментальных данных. Распределения, которое вы видите, получены с шагом в 14 микрометров, разрешая начальный участок в 5 миллиметров. Новый методический подход есть совокупность и нового быстродействующего оборудования, и новых решений при обработке данных, и совместный, комплексный анализ совокупности получаемых результатов. Например, я получаю по одной компоненте, по ионам углерода, результаты только для узкой приосевой зоны, но в периферийной зоне ионы уже не светят, то есть там я должен использовать что-то ещё, атомные линии и т.п.

**Сон Э.Е.**

Понятно.

**Председатель**

Комплексное рассмотрение при обработке большого количества данных. И в такой совокупности этого не было, так я понимаю?

**Ефимов А.В.**

Да.

**Голуб В.В.**

Вот у вас большие горбы на распределении концентрации электронов перед диском Маха. Это что? Вы сравнивали с другой картинкой. Это то место где проходит висячий скачок?

**Ефимов А.В.**

Перед ним.

**Голуб В.В.**

Это перед диском Маха, правильно, но вот перед диском Маха у нас есть висячий скачок, который к нему подходит. Эти данные проходят по висящему скачку?

**Ефимов А.В.**

Частично да, проходят.

**Голуб В.В.**

Спасибо.

**Председатель**

Ещё вопросы, пожалуйста?

**Амиров Р.Х.**

Уточняющий вопрос. У Вас некая комбинация выбрана методик и соответствующих материалов электродов и стенки.

**Ефимов А.В.**

Да.

**Амиров Р.Х.**

Какая мотивация таких комбинаций?

**Ефимов А.В.**

Органический материал использовался изначально для исследования различных кластерных образований. По электродам имелись технологические причины. Материалом внутреннего электрода менялся. В качестве внутреннего электрода использовались и медь, и углерод и алюминий. Например, мы меняли медь на углерод, чтобы избавиться от переналожения медных линий с кислородными и углеродными линиями и т.д., искали различные спектральные компоненты для возможности оценки температурных параметров.

**Председатель**

Спасибо, ответ понятен. Ещё есть вопросы?

Если вопросов нет, то вы присаживайтесь. Валерий Фёдорович, научный руководитель.

**Чиннов В.Ф.**

Саша Ефимов тоже выпускник кафедры «Общей физики и ядерного синтеза» МЭИ.

Закончил её на 3 года раньше Дмитрия. Первые 4 года своей работы в ИВТАНе занимался исследованием алюмоводородной плазмы в лаборатории Анатолия Ивановича Климова. Приобрёл хорошие навыки по спектроскопии. У него появился вкус к анализу сложных, сильно неоднородных систем. К этому времени в отделе появился Пащина А.С., который предложил ему участвовать в исследовании вот этого уникального объекта, под названием импульсный эрозионный разряд. И Саша взял на себя заботу по исследованию параметров плазмы в этой системе. В широком диапазоне изменения вводимых мощностей был проанализирован и дозвуковой и сверхзвуковой режим истечения плазмы. Результаты Саша доложил нам. Действительно, вкус к обработке больших массивов экспериментальных данных заставил его всерьёз заниматься написанием программ комплексной обработки этих вещей, и в этом он преуспел. Если бы его слушал такой большой знаток физики низкотемпературной плазмы, как профессор Эрик Иванович Асиновский, он бы в качестве изюминки работы назвал тот метод, в котором, имея единственный быстродействующий регистрирующий прибор с узким спектральным диапазоном, удалось найти в этом диапазоне тот участок спектра, который позволил одновременно измерить концентрацию и температуру электронов. Это особенно важно было сделать в условиях, когда от выстрела к выстрелу условия плазмы меняются. Он проявил изобретательность и талант именно в этой части работы. Поэтому к сегодняшнему дню, действительно, он получил набор данных доселе не получаемых, особенно в сверхзвуковом режиме истечения, когда имеются очень большие неоднородности и большая неизобаричность системы. Если говорить о Саше как об исследователе, то его отличает тщательность эксперимента и большое чувство ответственности к тому, что он делает. В течение последних двух лет он работал при поддержке РФФИ «Мой первый грант», это способствовало тому, что работа завершилась сегодняшней защитой. Мне кажется, что у нас есть все основания поддержать Сашу и присвоить ему степень кандидата наук.

#### **Председатель**

Спасибо. Михаил Михайлович, ознакомьте, пожалуйста, нас с имеющимися письменными отзывами.

#### **Васильев М.М.**

*Зачитывает данные о ведущей организации и имеющиеся замечания в её положительном отзыве. Отзыв ведущей организации прилагается. Зачитывает поступившие отзывы на автореферат и отмеченные в них замечания. Отзывы на автореферат прилагаются.*

#### **Председатель**

Пожалуйста, ответе на то, что считаете нужным.

#### **Ефимов А.В.**

Я могу ответить на все замечания.

#### **Председатель**

Но, если можно, то сгруппируйте их, чтобы не отвечать побуквенно по каждому пункту.

#### **Ефимов А.В.**

По поводу ведущей организации и по поводу источника. Да, действительно, я и сам упоминал, что весьма большое ограничение то, что у нас капилляр довольно быстро разрушается. Но выбор этого источника был вызван исследованием непосредственно свойств формируемой плазменной струи и наличием в ней необходимой углеродной компоненты. Поэтому именно такой источник мы и использовали. Я работал с тем, что было в распоряжении нашей группы. По поводу замечания о положении. По-видимому, неудачная формулировка была сделана, отсутствовали какие-то необходимые глаголы, хотя сам программный комплекс – это краеугольный результат всей работы, без него никаких результатов получить невозможно. По поводу результатов в дозвуковом режиме. Часть из них уже представлял. В диссертации об этом сказано несколько больше. Вот здесь я просто попытался сохранить какие-то общие оценки. По поводу отрыва

температуры. Да, некоторые оценки температур в характерных точках были сделаны. Отрыв температуры для центральной области дозвуковой струи составляет всего лишь несколько процентов по оценке сверху, в приближении, что вся получаемая электронами энергия расходуется на упругие потери. Тем не менее, на начальном участке дозвуковой струи ионизационное равновесие, если и может нарушаться, то в результате амбиполярной диффузии, но наши оценки показывают, что, скорее всего, ионизационное равновесие выполняется в дозвуковом режиме истечения на начальном участке для центральной области. По поводу схемы течения и скоростей. Но вопрос о распределении скоростей - сложный и в задачи диссертации не входил. Это результаты, которые получил Анатолий Степанович Пащина. Видно, что существуют такие возвратные потоки в плазменной струе, видно, что скорость в плазме, вообще говоря, больше чем скорость фронта плазменной струи. Трудно сказать что-то большее. Больше Вам может рассказать А.С. Пащина, который эти результаты получал. Передо мной вопрос по распределению скоростей не стоял.

Я, честно говоря, не помню какие ещё важные замечания были.

**Председатель**

Да вроде, все основные перечислили.

**Чиннов В.Ф.**

Там про ударные волны просили показать.

**Ефимов А.В.**

Ударные волны. Но у меня схемы ударных волн как таковой то и нет.

**Председатель**

Нет, так нет

**Ефимов А.В.**

Вот здесь приблизительно распределение прямой ударной волны, косой ударной волны, скачка уплотнения. Но в целом, да, замечание имеет место быть.

**Председатель**

Ну, это замечание по поводу, можно сказать, представления иллюстраций результатов, которые не затрагивают существо работы.

**Ефимов А.В.**

Да.

**Председатель**

Поэтому я думаю, что на этом можем остановиться и перейти к заслушиванию оппонентов. Слово предоставляется Лебедеву Юрию Анатольевичу.

**Лебедев Ю.А.**

Если можно, я не буду читать.

**Председатель**

Да, это совсем не нужно, потому что мы с работой уже познакомились. Поэтому желательно услышать ваше мнение по основным вопросам.

**Лебедев Ю.А.**

По этим вопросам я и скажу. Сразу скажу, что работа мне очень понравилась. Она очень хорошая экспериментальная работа. Вот здесь уже были вопросы. Действительно, каждый метод, который использовал автор, он описан в учебниках. Но каждый не даёт надёжный и достаточной информации. Только вот тот подход, который использовал автор, вот он позволил решить задачу. А задача, скажем так, не радостная, объект очень сложный, нестационарный, неоднородный, многокомпонентный. И вот именно этот подход позволил получить все эти новые сведения о параметрах разряда, которые были сегодня представлены. Если говорить о том, что мне больше всего понравилось, так это как раз разработанные методы. Далее программные комплексы. Это тоже очень важно, потому что старыми доморощенными методами вряд ли сейчас можно претендовать на получение новых результатов. Вот здесь автор тоже преуспел, и получил пространственные распределения концентрации, температуры плазмы и т.д. Результаты докладывались на разных конференциях и в статьях хороших. Но как обычно есть и замечания. Наверно я про замечания и скажу. Например, здесь автор говорит об отсутствии больцмановского



распределения заселённости возбуждённого состояния, а в диссертации этому уделено мало внимания, и в ряде случаев даже этих распределений не приведено. Потом автор пишет об аксиальной симметрии разряда, и в этом предположении делается расчет, но у него есть анод и, вообще говоря, симметрия нарушается, и здесь нужны какие-то пояснения. Теперь замечание по поводу нормальной температуры. Во-первых, она появляется в диссертации раньше, чем объясняется, что это такое. Во-вторых, она используется для определения провала на оси концентрации электронов. Мне это не очень понятно, потому что я привык к другому формализму. Есть уравнение баланса заряженных частиц, рождения и гибели. Автор утверждает, что у него в основном гибель диффузионная. Вот как в этой ситуации получить провал на оси я не очень понимаю. При любом распределении процессов образования всегда будет полка либо какой-нибудь колокольчик. Есть замечания по оформлению, но это уже не столь существенно. Могу сказать, что всё это не снижает хорошего очень впечатления о диссертации, и считаю, что автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук.

**Председатель**

Я услышал, как мне кажется, два замечания. Связанное с симметрией первое и с провалом второе.

**Ефимов А.В.**

Симметрия. Да есть внешний электрод, который должен эту симметрию нарушать. Но привязка - такая замыкающая дуга между внешним электродом и плазменной струей - привязывается не к какой-то конкретной точке плазменной струи, она по ней перемещается. Если мы попадаем в момент регистрации на эту привязку, то некоторое нарушение симметрии действительно есть. Эти данные просто отбраковываются и не используются. В остальном, по крайней мере, здесь на фотографии плазменной струи вы видите, что нарушение симметрии не наблюдается. Для метода однокурсной томографии она должна быть идеальной, чтобы этому соответствовать, просто использовалась одна половина данных, она отображалась, сглаживалась и дальше использовалась для расчёта.

**Чиннов В.Ф.**

Видео, покажи видео.

**Ефимов А.В.**

Видео чего? Ах да, как раз появление этих линий на данном видео – это вот момент, когда в область регистрации попадает привязка от замыкающей дуги.

**Председатель**

А электрод на этой картинке с какой стороны?

**Ефимов А.В.**

Вот с этой стороны.

**Председатель**

Так, и провал теперь.

**Ефимов А.В.**

Ах да, провал. Плохо написал по поводу провала. Нет «нормальной температуры» для концентрации электронов. Но этот провал появляется в результате того, что в центральной области плазма уже полностью ионизована и при этом ничем не ограничена. Просто происходит её расширение по закону идеального газа  $p=nkT$ . Из-за чего с ростом температуры в какой-то момент плотность начинает снижаться. Это не есть что-то удивительное, у Асиновского же самое наблюдается. Куда происходит сток? Сток происходит в область с меньшей температурой.

**Председатель**

То есть это последствие выравнивания давления?

**Ефимов А.В.**

Да.

**Председатель**

Хорошо. Я так понимаю, основные ответы мы получили. Мы можем перейти к заслушиванию мнения второго оппонента - Шибкова Валерия Михайловича.

## **Шибков В.М.**

Я благодарю совет, что назначили меня официальным оппонентом. Объясняю почему. Я вообще-то не люблю быть оппонентом, очень много времени тратится на это. Тем не менее, мне диссертация очень понравилась. Она вернула меня к 80-м годам прошлого века, когда мы занимались на физическом факультете таким разрядом – капиллярным разрядом с испаряющейся стенкой. Но тогда у нас была аппаратура, конечно, еще старая, мы регистрировали спектры на фотопленку, после этого проявлялась фотоплёнка, фотометрировалась, потом расшифровывали и т.д. и т.п., после этого получали некий результат, в том числе и радиальные распределения. У нас тоже есть радиальные распределения этой струи, только в дозвуковом режиме. Я понимал, когда читал эту диссертацию, насколько же продвинулись технологии диагностики такой сложной нестационарной пространственно неоднородной плазмы по сравнению с тем, что у нас было в прошлом веке. В этом отношении, хотя разработка этого автоматизированного диагностического комплекса и не является заслугой физико-математической науки, но без этого комплекса диссертант не смог бы получить результаты. Во-первых, они получаются очень быстро, во-вторых, надежнее, чем то, что делали мы. Теперь немного об этом разряде. Капиллярный разряд очень не стабильный, не надёжный во времени от пуска к пуску. Как правило, первый пуск невозможно диагностировать. Бывает, что струя вообще не выходит из капилляра. Второй пуск иногда бывает хороший, иногда плохой. И при малых энерговкладах уже 7-8 пуск невозможно проводить. Мы обычно проводили опыты, начиная с 3 по 6 пуск. Аспирант тоже это делал, в диссертации это указывается. Я потом в замечаниях скажу, когда мы делали, мы всё-таки усредняли по 4-5 пускам, и работа была, как мне кажется, надежнее, в том плане, что от пуска к пуску струя меняется. А в диссертации не сказано, какой именно пуск. Есть много результатов, хороших результатов, но не сказано к какому конкретному пуску. Надо было прозондировать каждый пуск и посмотреть, как меняется. Потом получить что-то среднее и уже сравнивать с теми результатами, которые были получены в прошлом веке. Наши результаты были опубликованы, точно так же были опубликованы несколько групп, которые этим занимаются. Этот разряд был предложен Авраменко. И тогда наш физический факультет попросили продиагностировать этот разряд. Он имеет очень интересные свойства, например, бумагу не прожигает, а металл прожигает. Очень много интересных вещей было, тогда любили заниматься всякими чудесами, и вот нас попросили продиагностировать. Поэтому я очень рад, что мне досталась эта диссертация. Но так как я вредный, я не буду рассказывать о достоинствах. Достоинств очень много. А я сразу перейду к замечаниям. Сразу говорю, что я призываю совет голосовать за присуждение ученой степени. По существу первое замечание я уже сказал. В какие моменты времени проводилось измерение и это касается не только температуры, но и концентрации электронов. Второе замечание, не знаю, стоит ли зачитать его. В диссертации получен большой объем экспериментальных данных о пространственно-временной эволюции температуры и концентрации электронов в плазме эрозионной струи, истекающей в затопленное пространство в дозвуковом и сверхзвуковом режимах. Однако, кроме констатации того факта (смотри, например, стр. 128-129), что концентрация электронов изменяется в продольном направлении по экспоненциальному закону с различными постоянными спада  $n_e$  (внутри капилляра медленно, а вдоль начального участка струи быстрее), в тексте диссертации не обсуждается физический механизм. Я уже слышал, что тут было одно из замечаний про физический механизм. Почему так меняется? Как и первый оппонент, я привык к оценкам по балансным соотношениям. Как бы ни говорилось, что тут плазма термически равновесная, все-таки полностью термически равновесной она не является. Даже в некоторых условиях нет локального термического равновесия. Это когда вы измеряете в радиальном направлении. Поэтому желательно иметь какой-нибудь механизм, хотя бы предложить, почему разные спады в капилляре и вне его. Третье замечание. В режиме дозвукового истечения эрозионной струи на стр. 118-120 представлены данные о продольном распределении температуры электронов, полученные различными методами. Далее я начинаю

зачитывать отзыв. Температура электронов, измеренная по относительным интенсивностям линий атомов меди, изменяется в диапазоне 0.9-0.6 эВ. Температура электронов, определенная по относительной интенсивности атомарной и ионной линиям меди, изменяется в диапазоне 1.1-1.3 эВ. Использование для измерения линий бальмеровской серии водорода дает значение для температуры электронов 0.7-1.0 эВ. В тексте на стр. 122 приводится значение температуры электронов на начальном участке струи и внутри капилляра, равное 1.7 эВ (смотри также рис. 4.1.2.2). Следовало бы подробно описать возможность применения данных методов. Всё-таки, если Вы говорите о локальном термодинамическом равновесии, то в этом случае все методы должны дать одну и ту же температуру. А тут не наблюдается. Я понимаю, что есть отступления, на периферии может быть мы регистрируем одну температуру, потому что по пространству регистрируется. Надо было в тексте диссертации тоже подчеркнуть, какой метод считается о более надежным и где. Четвертое. На стр. 135 автор утверждает, что «... в периферийной зоне температура плазмы существенно ниже температуры приосевой зоны...». Можно использовать понятие температура плазмы только для системы, находящейся в термодинамическом равновесии или локальном термодинамическом равновесии. Неправоммерно применять понятие температура плазмы для неравновесного случая. А там говорится: колебательная одна, поступательная другая, температура плазма третья. Такого не бывает. В локальном равновесии температуры должны быть одинаковые. Я считаю, что эти замечания абсолютно не подрывают работу. Еще раз подчеркну, что без автоматизированного комплекса, который создал аспирант, не было бы результатов. Конечно, у меня тоже есть замечание о том, что диссертация большая, много идёт описания методов, а результаты - одна глава страниц на 20-30. Можно было бы сократить то, а вот экспериментальные результаты - дать полнее. Но, тем не менее, работа мне понравилась. Я считаю, что она отвечает всем требованиям ВАК, аспирант, несомненно, заслуживает ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.04.08.

#### **Председатель**

Спасибо, Валерий Михайлович. Пожалуйста, вам слово.

#### **Ефимов А.В.**

По поводу первого замечания и по поводу привязки результатов ко времени пуска. Да, действительно верное замечание. Я привязку не делал. Хотя говорю, что через 10 выстрелов капилляр менялся. Но что значит не делали? Я оценивал соседние выстрелы, буквально 3-4 соседних выстрела, в которых параметры плазмы, на мой взгляд, менялись не существенно. Вот здесь, например, видно, что диаметр капилляра - один миллиметр, это как раз случай первых пусков, а здесь диаметр - полтора миллиметра, это как раз уже последующие пуски. Просто я их разделяю как результаты, полученные для плазменных струй с разными капиллярами.

Второе. По поводу обсуждения механизма. Вообще говоря, имеется в виду распределение, захватывающее дополнительно участок внутри капилляра, но в нём параметры меняются достаточно плавно. Поэтому гораздо интереснее начальный участок, его вам и показывал. Результаты в распределении здесь и в том, которое указывается в отзыве, совпадают. Так. Можно попытаться воспользоваться объяснением, которое приводится для обычных сверхзвуковых плазменных струй. В этом случае мы имеем расходно-тепловое сопло с недорасширением плазменной струи, то есть при котором давлении на срезе сопла больше атмосферного давления. И распределение параметров определяется, в общем-то, балансом энергий, которые расходуются на ионизацию вещества со стенки капилляра и на формирование плазменной струи. Здесь вы видите участок свободного расширения, при котором общее давление струи резко падает по сравнению с капилляром. Внутри капилляра давление, вообще говоря, составляет десятки атмосфер в этом режиме.

Считается, что в вязком скачке происходит торможение тяжелой компоненты, которая в этом скачке может быть выше температуры электронов. Но я, вообще говоря, значение температуры тяжелых компонентов в центре плазменной струи не знаю, поскольку

молекулы уже там не светят и напрямую оценить трудно. Поэтому это предположение. И вот эта тяжелая компонента - атомная и ионная - влияет уже на электронную компоненту, которая имеет высокую теплопроводность, и имеется поток тепла, направленный навстречу течению. В общем-то, это и определяет такое сложное распределение. Но ещё раз, плазмодинамика не относится к вопросам, рассматриваемым в данной работе, я имею в виду распределение скоростей и прочее.

**Председатель**

Да, об этом вы уже говорили. А квазиравновесие по разным степеням свободы?

**Ефимов А.В.**

Так. Насчёт равновесия. В сверхзвуковом режиме равновесия перед центральным скачком уплотнения мы и не ждем. Можно утверждать, что его вообще нет на начальном участке. Но что собой представляет равновесие? Выполнение больцмановского распределения по энергиям возбуждения, ионизационное равновесие, описываемое формулой Саха, и максвелловское распределение по скоростям. Ионизационное равновесие и максвелловское распределение по скоростям в работе мы не измеряем. Равновесие по энергиям возбуждения для определённых компонент выполняется. Следующее замечание касается разных результатов в определении температур по разным методам. Моя ошибка в том, что я давал оценочные результаты, не привязывая к конкретным зонам. Используя, например, оценку по линиям разной кратности нужно понимать, что у этих линий разное положение максимумов интенсивности. Используя разные пары, получаются оценки для разных периферийных зон. Это в принципе решается методами плазменной томографии. Просто мало этому внимание уделил. И последнее замечание о том, что я неверно применял термин температуры плазмы для периферийной зоны. Эта моя ошибка, я имел в виду температуру электронов. Там есть температурный отрыв, и температуры электронов и молекул отличаются. Это, кажется, все замечания.

**Председатель**

Спасибо, Александр Валерьевич. Теперь можно подискутировать на тему диссертации.

**Сон Э.Е.**

Выступить можно?

**Председатель**

Можно, Эдуард Евгеньевич.

**Сон Э.Е.**

Валерий Михайлович сегодня правильные слова произнёс. Эта работа возвращает нас в 80-е годы, потому что тематика, связанная с плотной плазмой, была очень актуальна. Огурцова, Подмошенский и другие. Много было работ, где всё это измерялось десятки раз. И проблемы были связаны как раз с тем, что недостаток измерений не позволял детально посмотреть. А сейчас по разным направлениям происходит революция, связанная с двумя вещами. Это диагностика, которая позволяет и пространственное и временное разрешение получить. И численное моделирование, которое существенно всё изменяет. В качестве недостатка могу сказать, что в одном лице мы все видели сегодня работу экспериментальную, достаточно хорошую, которая есть фундамент для построения теории, но, вообще говоря, много обещает расчет, который можно сделать, начиная от одномерных расчетов для истечения через сверхзвуковое сопло, двумерных расчетов и т.д. Есть и комплексы программ и много специалистов, поэтому если бы такая комбинация была, то было бы еще лучше. Но её не было, что означает - этому надо уделить большое внимание. И второе, что я хотел бы сказать по прикладной части этой задачи. Сейчас мы довольно активно занимаемся гиперзвуком и плазменной аэродинамикой. Эти задачи, конечно, являются принципиально важными и существенно отличающимися от нагрева, например, в электрическом поле, потому что, правильно он сказал, в этих задачах при торможении в ударной волне греются тяжёлые частицы, а электронам энергия передается потом. Это как раз то, что происходит в задачах входа в плотные слои атмосферы. И вот таких задач довольно много, и я думаю, что в дальнейшем мы совместно посмотрим работы, которые могут быть выполнены. Третье, что я хочу сказать. Здесь правильно говорилось о том, что был создан диагностический комплекс,

который позволяет проводить измерения. Я в какой-то мере сам воспользовался этим. У меня много групп есть, которые со мной работают в разных местах, в России и зарубежом. Одна группа у меня работает в Казани, которая занимается разрядами с жидкими электродами. Когда там потребовалось провести спектральные измерения, то по программе «Университеты России» в Федеральном Казанском университете приобрели оборудование, но пользоваться не умели. Поэтому группа Гайсина обратилась сюда, диссертанта пригласили как преподавателя, оплатили за обучение, он научил их, как пользоваться этим комплексом, и они опубликовали, по-моему, 2-3 статьи. По крайней мере ученики Чиннова Валерия Федоровича, соответственно, Ефимов известны не только в Москве, но и в других местах, в центрах, которые занимаются экспериментальной физикой плазмы. Но надо сказать, что здесь в аудитории Юрий Анатольевич выступал, первый оппонент, мы с ним входим в комитет по плазме, по организации конференций. В этом году была Казанская конференция по плазме, была конференция в Португалии по плазме. Но и видно, что экспериментальных работ в России не очень много. Мало сейчас групп, которые занимаются экспериментальной физикой. По разным причинам. Диагностика хорошая, но ее цена всё время растет, поэтому не все коллективы могут. У нас даже возникает иногда проблема найти рецензента для статьи, которая в ИВТАНе написана, или оппонента для диссертации. Выясняется, что кроме ИВТАНа таких мест очень мало. Черноголовка есть, есть ФизТех, но всё-таки очень мало. Поэтому то, что такие экспериментальные работы развиваются у нас в ИВТАНе, это очень хорошо. Поэтому, учитывая все эти положительные стороны работы диссертанта, я прошу проголосовать за него.

#### **Председатель**

Аргументированно. Спасибо. Еще кто-нибудь хочет высказаться? Александр Викторович, пожалуйста. Вы не говорили сегодня вообще ничего.

#### **Ерёмин А.В.**

На самом деле просто хочу еще раз акцентировать внимание на том, о чём очень хорошо говорил Юрий Анатольевич, Валерий Михайлович и сейчас Эдуард Евгеньевич. Все мы хорошо понимаем, насколько сложный объект – сверхзвуковые плазменные струи. Особенно сложные они, если еще и капиллярные. Это сочетание сложной газодинамики с неравновесной кинетикой плазмы. Поскольку мы имеем дело с такими объектами, я в состоянии оценить, насколько сложная диагностика вот такого газодинамически неоднородного, неоднородного и неравновесного процесса. Обязательно нужно мерить много параметров. И поэтому сам факт создания программного комплекса, основанного на всех современных методах диагностики, это уже большое достижение. И оно, конечно, имеет отношение не к технике, а именно к физико-математическим достижениям. Потому что на основании такого комплекса автору удалось измерить огромное количество параметров. И вот следующее, о чем уже все говорили, отмечая как недоработки, эти пространственные распределения по интенсивности, по температуре разных компонент, они действительно еще содержат большой потенциал для анализа кинетики и всех механизмов и процессов, происходящих в этой плазме. Поэтому эта работа имеет очень большой потенциал, и я призываю её поддержать.

#### **Председатель**

Спасибо.

#### **Голуб В.В.**

Я, собственно говоря, хотел остановиться только на одном вопросе, который здесь прозвучал. Насчёт сверхзвукового режима, а именно насчет ударной волны. Дело в том, что ударная волна в таких исследованиях – это очень сложная тема, и смело можно сказать, что это вечно зеленая тема. А тут мы получили на косой ударной волне, которая называется в сверхзвуковой струе висячий скачок, мы получили заселённости излучающих состояний иона углерода, водорода и т.д. И мы в результате смогли увидеть структуру ударной волны в таком сложном случае. Я не знаю таких работ, где это получено, может быть, они где-то есть, но я их не видел. Мне казалось, что это

фундаментальная вещь, необходимая для понимания этих процессов. А если говорить о прикладной, то почему она импульсная, почему она вот такая? Дело в том, что в космосе большинство двигателей коррекции именно на этом принципе и работают. И это, безусловно, всегда важно. Может быть, не очень много работ таких из-за того, что часто они бывают закрытыми.

**Председатель**

Спасибо, Виктор Владимирович. Если больше желающих нет, тогда мы переходим к заключительной части, для которой нам нужна счётная комиссия, и мне представляется, что как члены Совета, так и соискатель, были удовлетворены работой комиссии на первой защите. Поэтому предлагается счётная комиссия в прежнем составе. Проголосуем. Единогласно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИОННОМУ СОИСКАНИЮ 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](http://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](mailto: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. Пашина, 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. Пашина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов. Оптические исследования многокомпонентной плазмы капиллярного разряда. II. Сверхзвуковой режим истечения// ТВТ, 2017, том 55, № 5.

3) А.С. Пашина, 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, H<sub>2</sub>O, AR //ТВТ, 2014 ,52 ,1 ,с. 3-13.

5) Т.Ш. Беялетдинов, 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. 75-81.0
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, инжектируемого 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 острейшего 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 данных 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. **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  $1 \times 5$  мм в диапазонах удельного энерговклада  $2.5 \div 35$  МВт/см<sup>3</sup> 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/см<sup>3</sup>, 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/см<sup>3</sup>, 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  $2.5 \div 35$  МВт/см<sup>3</sup>, 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 ( $2.5 \div 5$  МВт/см<sup>3</sup>) и сверхзвуковом ( $10 \div 35$  МВт/см<sup>3</sup>) 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 однокурсной 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  $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ ), 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 малокурсной 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.

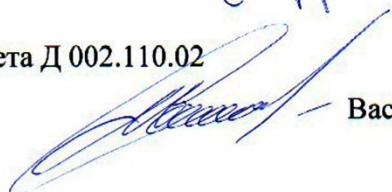
Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

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.