

**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 № 11)

Защита диссертации **Кавыршина Дмитрия Игоревича**
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
**«Получение и исследование сильноионизованной квазистационарной
плазмы гелия атмосферного давления»**

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 № 11 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 Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

к.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик	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	01.04.08	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	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 2.2.2.1 - экспериментальных исследований гетерогенных плазменных потоков Научно-исследовательского центра физико-технических проблем энергетики (НИЦ-2 ФТПЭ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) Кавыршина Дмитрия Игоревича на тему «Получение и исследование сильноионизованной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 2.2.2.1 - экспериментальных исследований гетерогенных плазменных потоков Научно-исследовательского центра физико-технических проблем энергетики (НИЦ-2 ФТПЭ) ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Научный руководитель:

Чиннов Валерий Федорович – д.ф.-м.н., с.н.с., 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:

Огинов Александр Владимирович - гражданин РФ, к.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории проблем новых ускорителей Отделения ядерной физики и астрофизики, ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН (119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, Т. 8-499-132-64-68, e-mail: oginov@lebedev.ru, website: lebedev.ru);
Шахатов Вячеслав Анатольевич – гражданин РФ, д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории №14 «Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов» Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 29, ИНХС РАН, т. 8-985-15-80-586; e-mail: shakhatov@ips.ac.ru, website: ips.ac.ru).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН; Россия, 119991, г. Москва,

ул. Вавилова, д. 38).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н Шахатов В. А. и к.ф.-м.н. Огинов А. В., научный руководитель Кавыршина Д. И. д.ф.-м.н., с.н.с. Чиннов В. Ф.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Добрый день, уважаемые члены совета и все присутствующие. Сегодня мы продолжаем работу нашего совета. У нас это первое заседание осенней сессии, да? Сегодня две защиты и другие вопросы, связанные с дальнейшей работой нашего совета. Программа довольно напряженная и давайте перейдем к первому вопросу, если нет возражений. Вы Михаил Михайлович нас познакомите с имеющимися материалами?

Ученый секретарь

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

Председатель

Похоже, что вопросов нет, поэтому мы можем перейти к рассмотрению работы по существу. Дмитрий Игоревич, пожалуйста, Вам слово. На доклад 20 минут.

Кавыршин Д.И.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Кавыршина Д.И. прилагается).

Председатель

Спасибо. Вопросы какие есть? Да, пожалуйста.

Амиров Р.Х.

Последний слайд с результатами, где баланс с концентрацией электронов. Судя по всему Вы учитываете только тройную рекомбинацию, да? Но в гелии очень часто большую роль играет диссоциативная рекомбинация, когда образуется гелий $2+$ и это достаточно доминирующий процесс. В азоте так тем более. Здесь что, вообще нет гелий $2+$ либо константы маленькие? Температуры слишком высокие?

Кавыршин Д.И.

Во-первых да, мне этот вопрос также был задан в одном из отзывов. Гелия $2+$ во-первых мало потому что у нас слишком высокие температуры и будет очень высокая скорость его диссоциации, к тому же я выполнял оценки, скорость образования иона гелий $2+$ примерно в 1000 раз медленнее скорости ионизации, поэтому он не окажет влияния на баланс заряженных частиц в этом разряде.

Амиров Р.Х.

Спасибо.

Председатель

Еще вопросы? Да, пожалуйста.

Васильев М.М.

Дмитрий, вот в вашей работе представлены результаты в основном для гелия, при этом как влияет обратная диффузия? Я так понимаю, что гелий у вас горит в атмосферу, как влияет обратная диффузия воздуха, как влияют примеси эрозии электрода и там испарения электродов на характеристики. Которые вы измеряете?

Кавыршин Д.И.

У нас плазмотрон герметичен, подмеса воздуха в него нет, и электроды у нас тоже

на самом деле не разрушаются, иначе бы мы видели в спектре линии металла как минимум, которые очень легко ионизируемые, имеют низкие энергии возбуждения, и линии других примесных элементов, но мы их не видим. К тому же косвенно свидетельствует о том, что у нас эрозия электродов пренебрежимо мала то, что мы этот электрод использовали очень подолгу. У нас эксперименты длились иногда более часа, и этот катод переходил из эксперимента в эксперимент по нескольку раз. Это обеспечивалось тем, что у нас было очень эффективное его водяное охлаждение, как катода, так и анода. Потому что это плазмотрон спроектированный когда-то еще давно в отделе Исакаева, это очень такая хорошая доработанная машина, которая используется и в промышленности, в общем это очень хорошая система.

Председатель

Понятно. Еще, пожалуйста.

Сон Э.Е.

Я хотел бы обратиться опять к слайду с балансом энергии и концентрацией электронов, потому что в вашей работе, я ее первый раз слышу, меня удивляет то, что в плазмотроне ситуация является сильно неравновесной, поэтому что Вы брали за радиус разряда, вот оценка члена с амбиполярной диффузией.

Кавыршин Д.И.

У нас радиус токового канала, определенный нами его видеосъемкой и съемкой спектра, составляет около одного миллиметра, то есть у нас очень и очень узкий этот плазменный шнур и поэтому, конечно, у нас возникает очень сильный градиент концентрации электронов, так как у нас еще этот канал стабилизирован холодной стенкой, тоже водоохлаждаемой, что и приводит к большим градиентам и, соответственно, большим коэффициентам амбиполярной диффузии.

Сон Э.Е.

А абсолютная температура какая? Плазмотрона, дуги плазмотрона?

Кавыршин Д.И.

Дуги 3 электронвольта.

Сон Э.Е.

То есть 35 там тысяч градусов. Но при этих температурах излучение очень сильное, поэтому оно должно было бы выравнивать профиль, и он не должен был бы иметь такие градиенты.

Кавыршин Д.И.

Нет, у нас радиус, я как раз тоже это оценил, у нас время высвечивания намного меньше времени ударного расселения, то есть у нас фактически только ударные процессы.

Сон Э.Е.

Я говорю не про высвечивание, а я говорю про теплопроводность, у вас какая, приближение там оптически тонкий слой или толстый.

Кавыршин Д.И.

Оптически тонкий.

Сон Э.Е.

Оптически тонкий, то есть высвечивается?

Кавыршин Д.И.

Он у нас оптически тонкий для переходов с маленькой энергией, для оптически толстых переходов в основное состояние, которые должны быть ультрафиолетовыми, наша плазма оптически толстая, так как у нас очень большая концентрация атомов возникает. В результате у нас то излучение, которое должно было бы выносить основную энергию, оказывается запертым.

Председатель

Это является ответом на ваш вопрос. Еще есть вопросы? Да, пожалуйста.

Гордон Е.Б.

Вот у меня вопрос такой. Значит вы гелий брали очищали специально?

Кавыршин Д.И.

Мы покупали гелий особо чистый, с примесью остальных элементов... с концентрацией примесей пять тысячных процента.

Гордон Е.Б.

Сколько?

Кавыршин Д.И.

Пять тысячных процента.

Гордон Е.Б.

Пять тысячных процента, то есть 10 минус 4.

Кавыршин Д.И.

Да, 5 на десять в минус четвертой процента.

Гордон Е.Б.

Значит у вас количество ионов порядка 10 в одиннадцатой. Количество в сантиметре кубическом.

Кавыршин Д.И.

Ионов у нас 10 в семнадцатой.

Гордон Е.Б.

А?

Кавыршин Д.И.

Ионов 10 в семнадцатой. Ионов гелия.

Гордон Е.Б.

А вот Вы показали... Вот можно график, на котором Вы показывали концентрации? И там концентрации были где-то 10 в одиннадцатой. Еще дальше.

Кавыршин Д.И.

А, это концентрации возбужденных состояний атомов.

Гордон Е.Б.

Да-да-да, в возбужденных состояниях. Значит у вас порядка 10 в одиннадцатой. Это 10 в одиннадцатой концентрация в возбужденных состояниях, а полная концентрация у Вас 10 в восемнадцатой, да, учитывая температуру.

Кавыршин Д.И.

10 в семнадцатой.

Гордон Е.Б.

Это у вас такая большая температура? Ну число Лошмидта оно дает несколько на 10 в девятнадцатой, а раз у нас температура значит на порядок ниже значит 10 в восемнадцатой да и у Вас синим было указано, ну то есть у вас получается, что у Вас 10 в минус седьмой доля в возбужденных состояниях от полного числа частиц, а количество грязи у вас 10 в минус четвертой. То есть у вас значит количество, значит, кислорода там азота, я вот работал с гелием, поэтому знаю, значит, по этому у вас там очень большое количество по сравнению с анализируемыми вами частицами очень большое количество молекул примесей. Но наверное вы его у вас нет не видно в спектрах, да?

Кавыршин Д.И.

Нет, не видно.

Гордон Е.Б.

Ну просто они послабее. Но тем не менее в балансе они должны как-то участвовать? То есть вы никак не учитывали?

Кавыршин Д.И.

В балансе заряженных частиц они не будут участвовать, потому что у нас фактически полностью ионизованная плазма. У нас 10 в семнадцатой концентрация зарядов имен за счет ионизации атомов, так что их там вклад будет тоже тысячные доли процента. В балансе зарядов.

Гордон Е.Б.

То есть именно за счет того, что у Вас, значит, высокая температура, и поэтому..

Кавыршин Д.И.

Да, высокая температура и за счет этого огромная плотность электронов.

Председатель

Он с этого начинал, что полуионизованная плазма.

Гордон Е.Б.

Не-не, тут не, она ионизованная, но, тем не менее, очень большое количество, значит, примесей. И тоже ионизованных.

Председатель

Верно, но *(смеется)*. Хорошо, спасибо. Еще вопросы есть? Если вопросов нет, то тогда у нас есть возможность руководителя заслушать. Валерий Федорович, Вы должны говорить о человеке, а не о работе.

Чиннов В.Ф.

Добрый день, уважаемый председатель, коллеги. Дима Кавыршин был слушателем моих лекций по излучению и спектроскопии плазмы и доставлял мне много неудобств своими трудными вопросами. Он трудолюбивый, любящий и ценящий знания, поэтому, несмотря на те неудобства, которые он мне создавал, я пригласил его в аспирантуру ОИВТ РАН и пять лет назад он поступил в нее, закончил осенью прошлого года. В работе, которую он выполнил, он столкнулся с задачей обработки очень больших гигабайтных массивов информации, получаемой на ПЗС устройствах, и в совершенстве овладел системами автоматизированной обработки экспериментов, что позволило ему

сравнительно быстро закончить свою диссертационную работу. Он человек, который уже, было полтора года назад примерно, стал лауреатом призером конкурса молодых ученых, посвященного памяти, столетию Леона Михайловича Бибермана, и как раз на этом докладе он первые фрагменты своей работы по исследованию неравновесной сильно ионизированной гелиевой плазмы, это действительно звучит странно, но оказалось, что все объяснимо, все неравновесные моменты, обнаруженные им, ему удалось пояснить. Я считаю, что Дима сложившийся молодой исследователь, к тому же любящий науку и знания, я в частности предполагаю в ближайшее время передать ему тот курс, который я читаю на его родной кафедре по излучению и спектроскопии низкотемпературной плазмы. Считаю его достойным иметь степень кандидата наук.

Председатель

Спасибо, Валерий Федорович. Я так думаю, что достаточно ясная характеристика диссертанта у нас есть, так что спасибо, мы можем перейти к следующему пункту. Михаил Михайлович, вы нас познакомите со всеми письменными отзывами.

Ученый секретарь

Отзывы поступили на работу...

Председатель

Дмитрий Игоревич, вы присаживайтесь, а то эта процедура...

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги! В качестве **ведущей организации** у Дмитрия Игоревича был **Институт общей физики имени Прохорова Российской академии наук**. В деле имеется отзыв от ведущей организации, с вашего позволения я не буду зачитывать его целиком, только остановлюсь на основных моментах. В отзыве указана структура диссертации с перечислением результатов, представленных в различных главах, обозначена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, выделены основные положения, выносимые на защиту. Вместе с тем отмечен ряд **недостатков** представленной работы, в том числе:

1. Столкновительно-радиационная модель гелиевой плазмы, представленная в главе 1, по-видимому, будет иметь некоторые сложности с описанием экспериментально исследованной в работе сильно неоднородной плазмы.

2. Плазма гелия, как элемента с самым высоким потенциалом ионизации, должна быть очень чувствительна к присутствию в ней даже незначительных примесей. Однако в диссертации вопрос о влиянии возможных примесей на состояние плазмы практически не затрагивается.

3. Не рассмотрена, а лишь упомянута, возможность определения электронной температуры по абсолютным и относительным интенсивностям непрерывного излучения плазмы гелия.

Вместе с тем отмечено, что указанные замечания не затрагивают основного научного содержания работы и не снижают общей высокой оценки, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидат физ.-мат. наук по специальности 01.04.08 физика плазмы.

Также **на разосланный автореферат поступило 6 отзывов, все отзывы положительные**, в ряде отзывов имеются замечания.

(Первый отзыв). Так в отзыве из **Национального Исследовательского Центра Курчатовского института** в качестве недостатков работы отмечено отсутствие в автореферате описания системы электрических измерений, благодаря которым была получена осциллограмма силы тока при импульсном подогреве плазмы стационарно горящего дугового разряда.

(Второй отзыв). В отзыве ФГУП “Центральный научно-Исследовательский Институт “Прометей” Санкт-Петербург замечаний не было, отзыв положительный.

(Третий отзыв). В отзыве, поступившем из Национального исследовательского университета “МЭИ” замечаний не было, отзыв положительный.

(Четвертый отзыв). В отзыве, поступившем из Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ” было отмечено следующее замечание:

-Незначительным замечанием к автореферату является отсутствие погрешностей на кривых распределения электронной плотности, хотя в тексте приведены данные о погрешности определения ширины линий (~10-20%).

В то же время отзыв положительный.

(Пятый отзыв). Отзыв поступил из Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники СО РАН, отзыв положительный без замечаний.

(Шестой отзыв). И наконец отзыв поступил из Государственного научного центра Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований ТРИНИТИ, отзыв положительный, имеется замечание:

- Известно, что в плазме гелия могут образовываться молекулярные ионы гелия. Возможно, что в гелиевой плазме они разрушаются за счет высокой температуры, однако анализ, подтверждающий малость вклада молекулярных ионов в состав заряженных частиц плазмы гелиевой дуги, в автореферате отсутствует.

Но, тем не менее, отзыв положительный, а соискатель заслуживает присуждения искомой степени.

Председатель

Спасибо. Дмитрий Игоревич, тогда слово Вам для ответа на вопросы. Но на два вопроса уже по крайней мере ответы мы обсуждали здесь, роль примесей и молекулярного гелия, так что на остальные пожалуйста.

Кавыршин Д.И.

Так, с какого начать?

Председатель

Как удобнее Вам.

Кавыршин Д.И.

Михаил Михайлович, напомните какой-нибудь.

Ученый секретарь

Давайте тогда начнем с ведущей организации.

Столкновительно-радиационная модель гелиевой плазмы, представленная в главе 1, по-видимому, будет иметь некоторые сложности с описанием экспериментально исследованной в работе сильно неоднородной плазмы.

Кавыршин Д.И.

Да, эту модель я писал в самом начале своей деятельности по исследованию плазмы гелия. Эта модель учитывает только ударные процессы и высвечивание, в ней я не учитывал явления неидеальности для высоковозбужденных состояний, так как до этой идеи в то время еще не дошел, и поэтому она не описывает вот этого завала при приближении к границе ионизации, однако в расчете по этой модели мне удалось получить верное значение концентрации электронов.

Ученый секретарь

Не рассмотрена, а лишь упомянута, возможность определения электронной температуры по абсолютным и относительным интенсивностям непрерывного излучения плазмы гелия.

Кавыршин Д.И.

Да, я упомянул гипотетическую возможность этого метода, просто чтобы обозначить, что мы о нем знаем, но в нашей системе это сделать сложно, так как съемка проводилась вблизи катода, и поэтому в инфракрасном и видимом диапазоне у нас континуум был засвечен бликами катода, которые было очень сложно отделить от электронного континуума, а в ультрафиолетовой области, где можно определять температуру по экспоненциальному спаду континуума, у нас уже сильно падала спектральная чувствительность приборов, что привело бы к большой погрешности.

Ученый секретарь

В автореферате отсутствует описание системы электрических измерений, благодаря которой была получена осциллограмма силы тока при импульсном подогреве плазмы стационарно горящего дугового разряда. Имеет смысл согласиться, да отсутствует...

Кавыршин Д.И.

Да, отсутствует.

Ученый секретарь

...что является недостатком. Значит, про примеси Вы ответили, ну и замечание об отсутствии погрешности на кривых распределения электронной плотности.

Кавыршин Д.И.

Да, я с ним согласен. Так как распределения гладкие. Я посчитал, что это будет не очень информативно, но с замечанием согласен.

Председатель

Ну я так понимаю, что основные, основные ответы мы получили, и достаточно ясные, поэтому если Вы сами больше ничего не считаете нужным добавить, то я думаю мы можем перейти к отзывам оппонентов. Хорошо, тогда первым слово предоставляется Шахатову Вячеславу Анатольевичу. Будьте любезны, пожалуйста.

Шахатов В. А.

(Зачитывает отзыв на диссертационную работу Кавыршина Дмитрия Игоревича «Получение и исследование сильноионизованной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления»).

Председатель

Спасибо большое! Дмитрий Игоревич, пожалуйста тогда, ответ ваш на замечания, которые мы слышали.

Кавыршин Д.И.

Да. У нас имеется термическая дуга с самоустанавливающейся длиной, стабилизированная стенками плазмотрона. Термоэмиссия происходит с нагретого катода с водяным охлаждением. Также отвечу, что у нас в плазмотроне имеется для стабилизации дуги закрутка, в результате чего помимо того что дуга стабилизируется пятно анодной привязки вращается по анодной секции, в результате чего снижается тепловой поток, и эта водоохлаждаемая секция, хотя и является медной, не разрушается в эксперименте.

Для того, чтобы оценить температуру дуги нам было достаточно знать только ток, потому что у нас плазма полностью ионизованная, мы легко можем определить спитцеровскую электропроводность для гелия, в результате оценить погонную мощность, выделяемую на единице длины дуги.

Райзер и Грановский в своих работах оценивали то, что плазма гелия при таких условиях будет равновесной исходя из того, что роль излучения невелика в сравнении с ударными процессами, которые приводят к равновесности распределения, но наша именно дуга она неравновесна пространственно, что приводит именно к сильным диффузионным потокам, что и выводит плазму из состояния равновесия. Вот в своей книжке Грановский 71 года Грановский допускал уже возможность неравновесия в случае наличия высоких потоков, и как раз ссылаясь при этом именно на работу по гелию, подчеркивая, что в его случае наличие равновесности/неравновесности должно подтверждаться экспериментально.

Председатель

Спасибо. Тогда мы переходим к выступлению следующего оппонента. Александр Владимирович, пожалуйста. Я думаю, что сейчас уже нет необходимости перечислять содержание диссертации, поэтому мы хотели бы услышать ваши мнения по работе в целом.

Огинов А. В.

В целом работа Кавыршина Дмитрия Игоревича посвящена была, об этом уже говорилось, в общем, структура диссертации состоит из трех глав и выводов, полный объем 143 страницы, рисунки и так далее. В целом, значит, научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- 1) Спроектирован и создан экспериментальный стенд для получения и исследования сильноионизованной (со степенью ионизации более 50%) стационарной плазмы гелия атмосферного давления с температурой электронов около 30 000 К при стационарном нагреве и до 40 000 К при импульсном квазистационарном подогреве плазмы.
- 2) Впервые получено экспериментальное распределение абсолютных заселенностей атомов гелия по возбужденным состояниям в широком диапазоне энергий возбуждения $20.9 \div 24.2$ эВ. Установлено, что заселенности высоковозбужденных состояний атомов гелия с энергией связи, много меньшей реализованной в эксперименте температуры электронов, существенно ниже своих равновесных значений.
- 3) Предложены подходы к интерпретации экспериментально наблюдаемого явления неравновесности, его описанию и определению температуры электронов на основе регистрируемых спектроскопических данных.

Достоверность и обоснованность представленных в работе результатов обеспечивается одновременным использованием нескольких автоматизированных методов спектральной диагностики плазмы, ее модельных описаний и критического анализа границ их применимости, и не вызывает сомнений. Результаты, представленные в диссертации Кавыршина Дмитрия Игоревича, изложены в шести печатных работах, в том числе в статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, а также журналах из базы данных отслеживания цитируемости Web of Science. Основные результаты работы были представлены на восьми Международных конференциях.

Ну, по результатам работы можно сделать следующие замечания:

- 1) В работе не выделен раздел «обзор литературы», цитируемые экспериментальные работы других авторов и теоретические подходы к их описанию приводятся в главе «Введение».
- 2) В работе лишь вскользь говорится об интересном наблюдаемом в работе эффекте – полном «растворении» высоколежащих атомных состояний HeI с главным

квантовым числом n больше 7. И совсем не упоминается о возможном «растворении» высоколежащих энергетических уровней иона HeII .

- 3) В работе не анализируется влияние отклонения от осесимметричности плазменного объекта на точность процедуры абелизации при обработке хордовых измерений спектров.
- 4) При обсуждении неравновесности исследуемой плазмы гелия по сравнению с плазмой аргона и азота в условиях, идентичных рассматриваемым в работе, приведен вид заселенностей возбужденных состояний однократных ионов аргона и азота, свидетельствующий о справедливости больцмановского распределения. Но не рассматриваются возбужденные состояния атомов аргона и азота, для которых в гелии автором экспериментально получены существенные отклонения от равновесия (Рисунок 55-56, страницы 114-115 полного текста).
- 5) Роль параметра неравновесности, введенного в выражении для отношения интенсивностей спектральных линий разной кратности ионизации (формула (75), страница 119) следовало бы пояснить. Не указано, как соотносится утверждение о слабом влиянии на вычисленную электронную температуру варьирования параметра на 2 порядка с динамическим диапазоном спектрографов и экспериментально измеренными соотношениями интенсивностей линий, например, приведенными на рисунке 59-60 на странице 123-124.

Ну и технические:

- 6) Принятая структура работы в целом несколько усложняет ее восприятие: в тексте присутствуют отсылки «об этом далее» и «см. пункт номер».
- 7) В тексте диссертации встречаются опечатки.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации Дмитрия Игоревича Кавыршина. Все поставленные цели исследования были достигнуты и сформулированные задачи выполнены. Материал диссертации изложен понятным языком, графический материал качественный. В автореферате диссертации достаточно полно и точно передано основное содержание работы. В целом представленная работа выполнена на высоком научном уровне, она содержит новую информацию об особенностях неравновесной сильноионизованной плазмы гелия и является законченным научно-квалификационным исследованием на актуальную тему.

Диссертационная работа Кавыршина на тему «Получение и исследование сильноионизованной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации, установленным в п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Кавыршин Д. И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Председатель

Спасибо, Александр Владимирович. Пожалуйста, Вам есть возможность ответить.

Кавыршин Д.И.

Так, начну с чувствительности метода к неосесимметричности. Для этого я вам могу привести картинку, на которой показаны радиальные распределения интенсивностей двух линий атома гелия. Видно, что они достаточно симметричны, и даже после проведения процедуры абелизации, хотя она, как отметил оппонент, очень чувствительна к ошибкам, разница получается невысокой, вот этом маленький пичок в центре

(показывает слайд), то есть процедура абелизации и неосесимметричность разряда не вносят сколь либо значимой погрешности в обработку спектральных данных.

Так, что касается исследования нереализации высоковозбужденных уровней для иона, да, это вопрос интересный и требует дальнейшего исследования, однако в моей работе я сумел зарегистрировать только 3 линии иона, по которым тяжело сделать сколь либо значимые выводы, к тому же они отстоят от границы ионизации существенно больше, чем линии атома, для которых этот эффект наблюдался, поэтому на их основе скорее всего пока никаких выводов сделать нельзя.

Что же касается того, почему я в качестве примера приводил распределения для азота и аргона, с их помощью я как раз и хотел показать, что вообще в дуговой плазме атмосферного давления в принципе возможна ситуация, когда даже по больцмановскому распределению возбужденных уровней атома, если оно в достаточно широком диапазоне энергетическом находится и достаточно далеко отнесено от границы ионизации, существует равновесие, и можно с его помощью определять температуру электронов. Про атомы я в том случае не говорил, так как потенциал ионизации азота и аргона существенно ниже потенциала ионизации атома гелия, и именно ион в той плазме является основной компонентой, а атома там фактически уже нет.

Так, какие-нибудь там вопросы остались?

Огинов А. В.

Тут роль параметра неравновесности.

Кавыркин Д.И.

А! Параметр неравновесности я внес в эту формулу чтобы показать, что я отдаю себе отчет в том, что эта формула равновесная, и я ее применяю в неравновесных условиях, грубо говоря, должен внести какую-то поправку, учитывающую эту неравновесность. Но этот метод оказался настолько нечувствительным для наших условий, что даже неучет этой поправки позволял нам с помощью этой формулы определить температуру электронов с достаточной точностью, до 20%. И что я также проверил, варьированием этого параметра, даже на порядок, что также не приводило к каким-то там катастрофическим потерям точности.

Председатель

Спасибо. Мне представляется, что ответы на основные вопросы мы получили, поэтому у нас есть возможность перейти к дискуссии. Кто хочет высказаться по существу работы? Да, пожалуйста.

Амиров Р.Х.

Я хотел раскрыть вопрос, по которому тут вопросов не возникало, актуальность и практическая ценность. Дело в том, что мы подобную систему используем сейчас для синтеза углеродных наноструктур. Мы берем гелиевую плазму, варьировем давление, расход, геометрию. Значит, истекает струя плазмы, в которую к гелию добавляются добавки углеводородов, пропан, бутан, ацетилен, метан, и в области нуклеации этой плазменной струи мы наблюдаем многочисленные углеродные наноструктуры. И такая система очень высокопроизводительная, нами сейчас фактически установлен мировой рекорд по синтезу графенов, также мы получаем углеродные нанотрубки. Значит, кроме того получаем топированные системы, топированные азотом, водородом, и вот совсем недавно мы получили уже графан, систему, топированную водородом. И мы задались таким вот вопросом, как состояние плазмы в области нуклеации влияет на структуру твердых продуктов, которые мы получаем, и начали вопрос. Вот естественно составили некую команду, которая пытается промоделировать состав плазмы, истекающей плазменной струи вместе с углеводородами. И в качестве начальных данных мы будем использовать состояние гелиевой плазмы с добавками углеводородов, мы знаем примерно

температуру, значит в ИВТРАНе есть соответствующие программы расчета термодинамического состава на основе базы данных Ивтантермо, дальше мы пригласили специалиста Елену Александровну Филимонову, которая может промоделировать вот эту углеводородную струю, где порядка ста компонентов надо учитывать, и поэтому вот грамотное задание начальных условий, разобраться в том, можем ли мы действительно верить термодинамике, либо надо вводить какие-то поправки на состав этой струи. Значит, и мы уже начали спектральные измерения, проводим их в гелиевой плазме с добавкой углеводородов, но как раз вот возникла необходимость как раз соискателя пригласить в наш творческий коллектив, мы ему предложили войти, сейчас составили заявку соответствующую там в РФФИ, потому что вопрос очень важный, чтоб заранее знать, во-первых оптимизировать сточки зрения КПД, большое количество углерода на самом деле улетает в трубу, не попадает в конверсионный продукт, а в конверсионном продукте есть еще определенный процент содержания сажи и так далее, но, тем не менее, мы нащупали эти условия, по поводу графена нам удастся 10 процентов углерода переводить в твердую фазу, и в этой твердой фазе мы имеем 95 процентов графена, вот что касается других структур, которые мы видим, там пока не все так хорошо. Вот, а все это очень имеет большую практическую ценность, потому что сейчас возник пик интереса, вот сейчас идет такая графеновая революция, и возникла необходимость в таком крупнотоннажном производстве, значит фактически конкуренцию вот такому методу только составляют chemical vapor deposition, когда на катализатор вы осаждаете углеродные наноструктуры, и сейчас идет такая своеобразная гонка, вот на последней конференции по ионизованным явлениям в Португалии там как раз было всего 5 пленарных докладов, как раз вот наши конкуренты из Португалии и Болгарии, ни там представляли так сказать вот результаты плазмоструйной системы, только используя СВЧ-плазмотрон мощностью в 20 раз меньше, чем у нас, и, соответственно, с намного меньшей производительностью. Так что вот с точки зрения и актуальности и практической ценности здесь в общем у меня сомнений нет, и я считаю, что эту работу нужно поддерживать, потому что в своей методической части и чисто такой академической она выполнена на очень высоком уровне, мне например было очень интересно и полезно. Рекомендую всем проголосовать ЗА.

Председатель

Спасибо, Равиль Хабибулович. Я думаю, что никакой проблемы со значимостью у нас теперь нет после такого обширного выступления вашего. Вот да. пожалуйста.

Василяк Л.М.

Я знакомился с этой работой и до заседания настоящего ученого совета, поскольку я ее представлял, поэтому я читал внимательно диссертацию и прослушав выступление я только утвердился в мысли, что работа очень хорошая и достойна того, чтобы ее автор получил искомую степень. Создан очень хороший стенд с автоматической обработкой, с хорошим разрешением и с подогревом, который позволил вот автору получить экстремально высокие параметры и показать неравновесность. И здесь интересно, просто хотелось бы отметить два момента, на мой взгляд, интересных, которые эту диссертацию характеризуют. Во-первых он показал, что если равновесно считать и сравнивать по Саха и сравнить с экспериментально измеренным штарком, то мы получаем концентрацию электронов, мы получаем разницу вдвое, в общем-то большая величина, и это достойно, чтобы это было учтено, ну как бы это несомненная заслуга автора. И второй момент, который мне понравился, это вот влияние амбиполярной диффузии. Потому что в общем знакомясь со многими работами по пробою и так далее, когда температура, вот, несколько тысяч градусов там и прочее, в аргоне, в гелии там как правило основную роль играет диссоциативная ионизация молекулярного, скажем, иона аргона 2 и гелия 2. Вот в данной работе настолько высокие температуры и настолько большие получились

неоднородности, что изучение получилось запертым, а основную роль, оказывается, влияет даже уже не трехчастичная рекомбинация, не радиационная которая, а амбиполярная диффузия. Ну для меня это вот довольно неожиданно, тоже очень интересный результат и достойный того, чтобы он был отмечен. Я буду голосовать ЗА и считаю, что члены ученого совета поступят правильно, если поддержат эту работу.

Председатель

Спасибо большое, есть ли еще желающие выступить? Ну мне представляется, что достаточная ясность о работе у членов совета есть, поэтому заключительное слово соискателю, пожалуйста.

Кавыршин Д.И.

Я хочу поблагодарить своего научного руководителя, Валерия Федоровича, который вел меня на моем научном пути со времен диплома до вот этого моего доклада. Также хочу поблагодарить, хотел поблагодарить, многих людей, которые мне помогали в моей работе, которые, к сожалению, здесь не присутствуют, такие как Миша Саргсян, Алексей Агеев. Также я, конечно, хочу поблагодарить диссертационный совет, который меня выслушал и такие обо мне хорошие лестные слова сказал, ну и надеюсь, что моя научная деятельность и дальше будет насыщенной и продуктивной. Всем большое спасибо за внимание.

Председатель

Тогда мы переходим к заключительной организационной части, которая невозможна без счетной комиссии. И есть такое предложение, Евгений Борисович, Вас предложить в счетную комиссию (*Гордон Е. Б., председатель счетной комиссии*), Виктора Владимировича (*Голуб*) и Михаила Федоровича (*Иванов*). Если нет возражений, то, пожалуйста, мы должны проголосовать. (*Счётная комиссия выбирается единогласно*). Тогда приступаем к голосованию. (*Проводится процедура тайного голосования*).

Председатель

Хорошо, счетная комиссия готова. Да, пожалуйста, Евгений Борисович.

Гордон Е.Б.

Счетная комиссия была избрана в составе трех человек: Голуб, Иванов, Гордон. Состав диссертационного совета утвержден в количестве **31** человека, не введено никого, присутствовало на заседании **22**, членов совета докторов по профилю рассматриваемой диссертации **11**, роздано бюллетеней **22**, осталось не розданных **9**, оказалось в урне **22**. Результаты голосования по вопросу присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук Кавыршину Дмитрию Игоревичу: **за - 22, против – нет, недействительных бюллетеней - нет.**

Председатель

Спасибо большое. Предлагаю утвердить это, как называется, протокол счетной комиссии. (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*).

Спасибо и мы переходим к заключительному этапу – обсуждению проекта заключения. Кто-нибудь может сказать что-нибудь? Потому что мы должны дальше проголосовать. (*Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения*).

Хорошо, если больше предложений нет, тогда предлагаю принять это заключение с теми дополнениями и исправлениями, которые были предложены. Кто за? Против нету? Спасибо. (*Проект заключения принят единогласно*).

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 04.10.2017г., протокол № 11

О присуждении Кавыршину Дмитрию Игоревичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Получение и исследование сильноионизированной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления» по специальности 01.04.08 – физика плазмы, принята к защите 31.05.2017г., протокол № 7, 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, 8(495)485-83-45), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012 г. №105/нк.

Соискатель Кавыршин Дмитрий Игоревич 1988 года рождения, в 2012 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

В 2016 году окончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Работает научным сотрудником лаборатории 2.2.2.1 (экспериментальных исследований гетерогенных плазменных потоков) 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 2.2.2.1 (экспериментальных исследований гетерогенных плазменных потоков) Научно-исследовательского центра физико-технических проблем энергетики (НИЦ-2 ФТПЭ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенном институте 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:

- к.ф.-м.н. Огинов Александр Владимирович, в.н.с. лаборатории проблем новых ускорителей Отделения ядерной физики и астрофизики, ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН (119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, Т. 8-499-132-64-68, e-mail: oginov@lebedev.ru, website: lebedev.ru);

- д.ф.-м.н. Шахатов Вячеслав Анатольевич, в.н.с. лаборатории №14 «Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов» Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 29, ИНХС РАН, т. 8-985-15-80-586; e-mail: shakhatov@ips.ac.ru, website: ips.ac.ru).

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН, Т. 8 499 135 41 65, e-mail: kossyi@fpl.gri.ru, gri.ru) в своем положительном заключении, составленном зав. лаб. газодинамических явлений в СВЧ-разряде д.ф.-м.н. Коссым Игорем Антоновичем и утвержденным зам. председателя Учёного совета отдела физики плазмы, д.ф.-м.н. Щепетовым Сергеем Викторовичем отметила актуальность, научную новизну и практическую значимость работы. Вместе с тем по диссертации имеются следующие замечания:

1. Столкновительно-радиационная модель гелиевой плазмы, представленная в главе 1, по-видимому, будет иметь некоторые сложности с описанием экспериментально исследованной в работе сильно неоднородной плазмы.

2. Плазма гелия, как элемента с самым высоким потенциалом ионизации, должна быть очень чувствительна к присутствию в ней даже незначительных примесей. Однако в диссертации вопрос о влиянии возможных примесей на состояние плазмы практически не затрагивается.

3. Не рассмотрена, а лишь упомянута, возможность определения электронной температуры по абсолютным и относительным интенсивностям непрерывного излучения плазмы гелия.

Полученные результаты могут быть применены в следующих организациях: ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, ТРИНИТИ, ФИАН, МИФИ, ИНХМ РАН, МФТИ, МГТУ и других научных учреждениях.

По материалам диссертационной работы опубликовано 6 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 5 из которых индексируемы в базе Web of Science:

1. Исакаев Э.Х., Чиннов В.Ф., Саргсян М.А., Кавыршин Д.И. «Неравновесность сильноионизованной гелиевой плазмы атмосферного давления». Теплофизика высоких температур, 2013, том 51, № 2, с. 163–169.

2. D.I. Kavyrshin, V.F. Chinnov and A.G. Ageev. “Model for describing non-equilibrium helium plasma energy level population”, Journal of Physics: Conference Series 653 (2015) 012115 IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/653/1/012115

3. O.V. Korshunov, V.F. Chinnov, D.I. Kavyrshin and A.G. Ageev. Spectral measurements of electron temperature in nonequilibrium highly ionized He plasma // Journal of Physics: Conference Series. 774 (2016). 012199 doi:10.1088/1742-6596/774/1/012199

4. V.F. Chinnov, D.I. Kavyrshin, A.G. Ageev, O.V. Korshunov, M.A. Sargsyan and A.V. Efimov. Study of spatial distributions of highly ionized nonequilibrium helium plasma at atmospheric pressures // Journal of Physics: Conference Series. 774 (2016). 012200 doi:10.1088/1742-6596/774/1/012200

5. А.В. Лазукин, Д.И. Кавыршин, С.А. Кривов, С.Д. Федорович. Влияние частоты питающего напряжения и материала диэлектрического барьера на спектральный состав излучения плазмы поверхностного разряда // Вестник МЭИ. 2016. №6. С. 24 -30

6. О. В. Коршунов, В. Ф. Чиннов, Д. И. Кавыршин. “Кинетическая модель окисления Al в гетерогенной алюмо-водяной плазме. Отрицательные ионы”. Теплофизика высоких температур. УДК: 533.92, 2017, том 55, № 2, с. 189–196 <http://mi.mathnet.ru/tvt9885>

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное Государственное Унитарное Предприятие “Центральный научно-Исследовательский Институт “Прометей” (ФГУП ЦНИИ КМ “Прометей”)**, г. Санкт-Петербург (к.ф.-м.н. Гаврилова Т.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

2. **Национальный исследовательский университет “МЭИ”**, г. Москва (профессор, д.ф.-м.н., Елецкий А.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт"), г. Москва** (д.ф.-м.н., в.н.с. Щеглов Д.А.) – отзыв положительный, с замечаниями:

-В числе недостатков работы следует отметить отсутствие в автореферате описания системы электрических измерений, благодаря которой была получена осциллограмма силы тока при импульсном подогреве плазмы стационарно горящего дугового разряда.

4. **Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва** (к.ф.-м.н. Казиев А.В.) – отзыв положительный, с замечаниями:

-Незначительным замечанием к автореферату является отсутствие погрешностей на кривых распределения электронной плотности, хотя в тексте приведены данные о погрешности определения ширины линий (~10-20%).

5. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск** (д.ф.-м.н., профессор Королев Ю.Д.) – отзыв положительный, без замечаний.

6. **Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"), г. Троицк** (д.ф.-м.н. Акишев Ю.С.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Известно, что в плазме гелия могут образовываться молекулярные ионы гелия. Возможно, что в гелиевой плазме они разрушаются за счет высокой температуры, однако анализ, подтверждающий малость вклада молекулярных ионов в состав заряженных частиц плазмы гелиевой дуги, в автореферате отсутствует.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается проводимыми ими исследованиями по теме диссертации.

Выбор Огинова Александра Владимировича в качестве оппонента обосновывается тем, что он является ведущим ученым в области исследования электрических дуг атмосферного давления. Основные публикации Огинова А. В., близкие к теме диссертации:

1. A. V. Agafonov, A. V. Oginov, K. V. Shpakov. Prebreakdown. Phase in Atmospheric Discharges // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2012, Vol. 9, No. 4–5, pp. 380–383.

2. В. А. Богаченков, А. В. Огинов, С. А. Чайковский, К. В. Шпаков. Исследование влияния внешней инжекции электронов и состава окружающей среды на развитие атмосферного разряда // *Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"*, 2012, том 1, № 2, с. 133–138.

3. A.V. Agafonov, A.V. Bagulya, O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, A. S. Rusetskiy, A. V. Oginov, V. A. Ryabov, K.V. Shpakov. Observation of Neutron Bursts Produced by Laboratory High-Voltage Atmospheric Discharge // *Phys.Rev.Lett.*, 2013, vol. 111, 115003. doi: 10.1103/PhysRevLett.111.115003.

Выбор Шахатова Вячеслава Анатольевича в качестве оппонента обосновывается тем, что он является известным специалистом в области спектроскопии и плазменной кинетики. Основные публикации Шахатова В. А., близкие к теме диссертации:

1. Шахатов В.А., Лебедев Ю.А. (2013). Метод эмиссионной спектроскопии в исследовании влияния состава смеси гелия с азотом на характеристики тлеющего разряда постоянного тока и свч-разряда // *Теплофизика высоких температур*. 2012. Т. 50. № 5. С. 705.

2. Shakhmatov V.A., Mavlyudov N.B., Lebedev Y.A. Studies of the distribution functions of molecular nitrogen and its ion over the vibrational and rotational levels in the dc glow discharge and the microwave discharge in a nitrogen-hydrogen mixture by the emission spectroscopy technique // *High Temperature*. 2013. Т. 51. № 4. С. 551-565.

3. Shakhmatov V.A., Lebedev Y.A. Radiation spectroscopy in the study of the influence of a helium-nitrogen mixture composition on parameters of dc glow discharge and microwave discharge // High Temperature. 2012. T. 50. № 5. С. 658-681.

Выбор Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) в качестве ведущей организации обусловлен тем, что данный институт проводит исследования, близкие по тематике к теме диссертации, в том числе посвященных оптической спектроскопии в УВИ диапазоне. Основные публикации ИОФ РАН, по теме диссертации:

1. Козлов Д.Н., Кобцев В.Д., Стельмах О.М., Смирнов В.В., Степанов Е.В. Определение локальных концентраций молекул H₂O и температуры газа в процессе нагрева водородно-кислородной газовой смеси методами линейной и нелинейной лазерной спектроскопии // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 1. С. 79-86.

2. Vavruk M.V., Stelmakh O.M., Tyshko N.L., Vasil'eva I.E. Continuous absorption and depression in the solar spectrum at wavelengths from 650 to 820 nm // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2016. T. 32. № 3. С. 129-144.

3. Кобцев В.Д., Козлов Д.Н., Кострица С.А., Смирнов В.В., Стельмах О.М., Туманов А.А. Лазерный спектрометрический измерительный комплекс для локальной экспресс-диагностики пламени при горении жидких углеводородных топлив // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 3. С. 519-527.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1) Создан экспериментальный стенд для получения и исследования сильноионизированной (со степенью ионизации более 50%) стационарной плазмы гелия атмосферного давления с температурой электронов до 35 000 К и до 43 000 К при импульсном квазистационарном подогреве. Созданы процедуры автоматизированной обработки эмиссионных спектров для определения на основе экспериментальных данных радиальных распределений концентрации и температуры электронов в столбе дуги и температуры тяжелых частиц на оси разряда;

2) Получено экспериментальное распределение абсолютных заселенностей атомов гелия по возбужденным состояниям в более широком, чем в прежних исследованиях, диапазоне энергий возбуждения 20.9 ÷ 24.2 эВ. Заселенности высоковозбужденных состояний HeI с энергией связи, много меньшей реализованной в эксперименте температуры электронов, существенно ниже своих равновесных значений, при этом наблюдаемая крутизна спада заселенностей возрастает по мере приближения к порогу ионизации;

3) Экспериментально получены данные о динамике изменений температуры и концентрации электронов при импульсном подогреве плазмы стационарной дуги и определение с их помощью величины отрыва электронной температуры от газовой;

4) Установлены характер и механизмы неравновесности исследованной сильно ионизированной пространственно неоднородной плазмы гелия. Обнаруженная в исследуемых дугах аномальная, неравновесная заселенность высоковозбужденных состояний HeI обусловлена ионизацией этих состояний электронным ударом и доминирующей, по отношению к обратному процессу трехчастичной электрон-ионной рекомбинации, ролью механизма потерь заряженных частиц в результате амбиполярной диффузии;

5) Сделан вывод о том, что наблюдаемая в стационарном и квазистационарном разрядах неравновесность ионизационного типа вызвана высокой пространственной неоднородностью среды, которая обуславливает интенсивный поток амбиполярной диффузии, соответствующий потоку ступенчатой ионизации в горячей зоне дуги.

Новых понятий и терминов не вводилось.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

Созданная установка обеспечивает получение сильноионизованной (со степенью ионизации более 50%) стационарной плазмы гелия атмосферного давления с температурой электронов T_e до 35 000 К, и до 43 000 К при ее импульсном квазистационарном подогреве.

Получены количественные данные о заселенностях возбужденных состояний HeI в более широком, чем в прежних исследованиях, диапазоне энергий возбуждения $20.9 \div 24.2$ эВ, экспериментальное распределение которых не описывается законом Больцмана с электронной температурой.

Установлены характер и механизмы неравновесности такой плазмы и обоснованы методики определения ее основных параметров. Для метода определения температуры электронов T_e по отношению интенсивностей атомарных и ионных спектральных линий даны рекомендации по выбору таких пар линий HeI и HeII, отношение интенсивностей которых наименее чувствительно к неравновесности заселения их излучающих уровней.

Показано, что обнаруженная ионизационная неравновесность вызвана амбиполярной диффузией, которая становится основным механизмом потерь заряженных частиц для исследованной плазмы.

Выполнено независимое измерение одного из важнейших параметров неравновесной плазмы – температуры тяжелых частиц, с использованием смешанного контура редко исследуемой инфракрасной линии HeI 1083 нм.

Благодаря абсолютной калибровке интенсивностей излучения и высокому спектральному разрешению были проверены и уточнены литературные данные о константах Штарк-эффекта и вероятностях спонтанных переходов большой группы линий HeI, используемых при анализе заселенностей возбужденных состояний и независимом определении концентрации электронов n_e в плазме.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Полученные количественные данные по неравновесной заселенности большого числа (более 20) возбужденных состояний HeI в диапазоне энергий

$20.9 \div 24.2$ эВ (при потенциале ионизации $I = 24.59$ эВ) послужат дальнейшему развитию теоретических моделей описания кинетики заселения-расселения возбужденных состояний атомов сильноионизованной гелиевой плазмы.

Разработанные методики определения параметров гелиевой плазмы и константы Штарк-эффекта линий HeI найдут применение в задачах диагностики неравновесной плазмы гелия.

Результаты работы могут быть использованы в следующих организациях: ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, ТРИНИТИ, ФИАН, МИФИ, ИНХМ РАН, МФТИ, МГТУ и других научных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

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

Личный вклад соискателя:

Все представленные в работе результаты были получены автором лично или при его определяющем участии. Автор принимал активное участие в постановке целей и задач научного исследования, в составлении программы экспериментов и их подготовке. Автором разработан и реализован экспериментальный стенд для получения и исследования сильноионизованной плазмы гелия атмосферного давления. Проведены экспериментальные исследования и анализ полученных результатов, на основе которых были сформулированы выводы и положения, вошедшие в диссертацию. 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 Кавыршину Д.И. 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.



04.10.2017 г.