

**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 26 декабря 2018 г. (протокол № 25)

Защита диссертации **Антонова Николая Николаевича**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Формирование ионизированных потоков веществ для плазменного  
разделения компонентов, моделирующих отработавшее ядерное  
топливо, и исследование их распространения в буферной плазме со  
стационарным электрическим полем»**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

## 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 № 25 от 26 декабря 2018 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 24 человека, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы» и 12 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

д.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	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Отсутствует
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	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
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	Отсутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	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	Отсутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
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	Присутствует
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, д.ф.-м.н., профессор	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	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
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 2.1.4.2 – диагностики и измерительных систем НИЦ–2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Антонова Николая Николаевича** на тему «Формирование ионизированных потоков веществ для плазменного разделения компонентов, моделирующих отработавшее ядерное топливо, и исследование их распространения в буферной плазме со стационарным электрическим поле». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы». Диссертация выполнена в лаборатории 2.1.4.2. – диагностики и измерительных систем НИЦ–2 ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

**Гавриков Андрей Владимирович** – к.ф.-м.н., доцент, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

**Филиппов Анатолий Васильевич** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., директор отделения центра теоретической физики и вычислительной математики Акционерного общества Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).

**Солдаткина Елена Ивановна** – гражданин РФ, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаб. 9-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук «ИЯФ СО РАН» (630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук** (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Филиппов А.В. и к.ф.-м.н. Солдаткина Е.И., научный руководитель Антонова Н.Н. к.ф.-м.н., доцент Гавриков А.В.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Уважаемые члены диссертационного совета и все присутствующие сегодня, у нас по плану 4 защиты диссертации, поэтому я прошу всех желающих выступить быть максимально концептуальными и по возможности краткими. Переходим к первой защите Антонова Николая Николаевича. Михаил Михайлович, пожалуйста ознакомьте нас с материалами личного дела.

### 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 ли вопросы по материалам дела? Если нет, тогда переходим к существу защиты. Пожалуйста, Николай Николаевич, не более 20 минут.

### Антонов Н.Н.

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

### Председатель

Спасибо, Николай Николаевич, за весьма ясное и компактное изложение ваших результатов. Пожалуйста, какие вопросы есть? Да, Игорь Львович.

### Иосилевский И.Л.

Николай, до каких температур вы, как сообщество, нагреваете исследуемое вещество в тигле? Каково при этом равновесное давление паров этого вещества?

### Антонов Н.Н.

Максимальная температура около 1550 К и давление насыщенных паров серебра при данной температуре порядка 1 Торр.

### Председатель

Еще есть желающие спросить? Да, пожалуйста.

### Савватимский А.И.

У вас катод — это бор и лантан. Это сплав, фактически, или это покрытие лантана на боре?

### Антонов Н.Н.

Нет. Это монокристалл гексаборида лантана.

**Савватимский А.И.**

То есть это молекулярная структура?

**Антонов Н.Н.**

Да.

**Председатель**

Да, пожалуйста, Равиль Хабибулович.

**Амиров Р.Х.**

У меня вопрос, связанный с графиком распределения потенциала, там большой разброс точек. Наблюдали ли вы неустойчивости в вашей системе, когда вы инжектируете? Если наблюдали, то какие факторы стабилизации могут быть и какие факторы дестабилизации?

**Антонов Н.Н.**

Прямых факторов неустойчивостей мы не наблюдали, помимо вариаций значения потенциала в радиальном распределении. То есть они есть и в отсутствии инъекции струи плазмы и в присутствии.

**Амиров Р.Х.**

Но принципиально они возникнут в такой системе?

**Антонов Н.Н.**

К сожалению, да. Отражательный разряд подразумевает наличие неустойчивостей.

**Председатель**

Да, пожалуйста, Леонид Михайлович.

**Василяк Л.М.**

Скажите пожалуйста, какой состав отработавшего ядерного топлива? Будут ли, к примеру, ионы кислорода мешать процессу деления, ведь модельная смесь состоит из чистых металлов?

**Антонов Н.Н.**

Данная смесь используется только для моделирования кинетики и динамики тяжелых и легких частиц. Отработавшее ядерное топливо в составе в основном имеет диоксид урана, для которого характерен неконгруэнтный фазовый переход, поэтому возможно появление отрицательных ионов кислорода и других соединений. Это действительно может повлиять на процессы деления. Мы сейчас занимаемся изучением данных процессов.

### **Васильев М.Н.**

Николай Николаевич, на одном из первых слайдов вы показали возможные альтернативные способы создания плазмы и испарения материалов в процессе. Не могли бы вы прокомментировать чем оказался плох электронный пучок как испаритель и как создатель плазмы.

### **Антонов Н.Н.**

К сожалению, чтобы достигнуть высокой мощности электронного пучка необходимо обеспечить большую энергию электронов. Наличие высокоэнергетичных электронов приведет к многократной ионизации, что недопустимо для концепции плазменного разделения элементов.

### **Васильев М.Н.**

А просто как испаритель? Вы же испаряли вещества разными способами. Ведь электронный пучок как испаритель прекрасен.

### **Антонов Н.Н.**

Я с вами полностью согласен, но к сожалению, необходимо учитывать распределение магнитного поля внутри камеры разделения. Электронный пучок будет делать расплав из модельного вещества, поэтому необходимо его направлять вертикально, а распределение магнитного поля имеет горизонтальное направление.

### **Председатель**

Если животрепещущих вопросов больше нет, тогда, Андрей Владимирович, пожалуйста сообщите нам несколько слов. Только как о человеке.

### **Гавриков А.В.**

Уважаемые коллеги, работа Николая Николаевича характеризуется положительно. Я полностью поддерживаю все полученные результаты. То есть их достоверность не вызывает сомнений. У нас большая команда, но вклад диссертанта во все представленные работы был определяющим. Отзывы самые положительные. Если нужно что-то добавить, то я готов ответить на вопросы.

### **Председатель**

Спасибо, я думаю все ясно, поэтому мы можем перейти к следующему пункту. Михаил Михайлович познакомьте нас с отзывами.

### **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги, на автореферат Николая Николаевича поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные. Ряд отзывов имеет замечания. Я, с вашего позволения, зачитаю именно замечания.

Первый отзыв поступил из **Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»**. Отзыв подписал заведующий кафедрой № 21 «Физика плазмы», д.ф.-м.н., профессор, В.А. Курнаев. Отзыв положительный. Имеет следующие замечания:

- К сожалению, в автореферате не обсуждается резкие (более чем в 3 раза) вариации в ходе эксперимента ионного тока при примерно одинаковых значениях тока разряда (рис.3).

- В автореферате не отражается проблема ресурса работы подобного источника, учитывая «отравление»  $LaB_6$  рабочим веществом и эрозию катода во время работы.

- Результаты исследований сами по себе новы, очень интересны и бесспорно полезны для дальнейших исследований в данной области, однако в формулировке положений, выносимых на защиту, автор отмечает повсюду лишь «результаты исследований...» без какой-либо конкретики, которая, с другой стороны, содержится в заключении к автореферату.

Следующий отзыв поступил из **Института космических исследований**. Отзыв подписал с.н.с. лаборатории плазменно-пылевых процессов в космических объектах (№513), к.ф.-м.н., С.И. Копнин. Отзыв положительный, без замечаний.

Следующий отзыв поступил из **Московского Физико-технического института «МФТИ» НИИ ГУ**. Отзыв подписал заведующий лабораторией импульсных плазменных систем, д.ф.-м.н., профессор, Н.Л. Александров. Отзыв положительный, имеются замечания:

- Автор уделил недостаточное внимание вопросам влияния пространственного распределения электростатического потенциала в буферной плазме ВЧ-разряда на движение потока плазмы модельных веществ. Исследование в этом направлении имеет большое практическое значение с точки зрения обеспечения совместимости систем разрабатываемой установки плазменной сепарации.

- Из представленных экспериментальных данных следует, что инжекция струи плазмы свинца существенным образом влияет на исходное распределение потенциала в буферной плазме. В конечном итоге это приведет к изменению траекторий движения разделяемых элементов в процессе сепарации, но автор не уделил внимания вопросу о том, какие методы и подходы планируется использовать для подавления данного эффекта.

- Автор уделил недостаточное внимание вопросам влияния флуктуаций исследуемых параметров на процессы разделения в рамках концепции плазмооптической сепарации с потенциальной ямой.

Четвертый отзыв поступил из **Физического института им. П.Н. Лебедева РАН**. Подписан м.н.с. отдела физики высоких плотностей энергии, к.ф.-м.н., А.И. Хирьяновой. Отзыв положительный, без замечаний.

И наконец, последний отзыв поступил из **Иркутского государственного университета**. Отзыв подписал заведующий кафедрой общей и космической физики, д.ф.-м.н., профессор В.Л. Паперный. Отзыв положительный, с замечаниями:

- Результаты модельных расчетов эффективности ионизации в разработанном источнике плазмы не подкреплены данными экспериментов, так что эти результаты выглядят неубедительно.

- Несколько загадочно выглядит текст на с. 15 автореферата: «Это свидетельствует о том, что при включении отражательного разряда струя свинцовой плазмы не отклоняется как целое, а ее концентрация ионов постепенно спадает. Таким образом, была продемонстрирована возможность отклонения потока плазмы свинца, инжектируемого вдоль, силовых линий магнитного поля.». Тем более что выше ни о каком отклонении речи не шло.

Это, что касается отзывов на авторефераты. Есть отзыв из ведущей организации. В качестве ведущей организации был **Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук**. С вашего позволения, я не буду зачитывать отзыв целиком.

В отзыве отражена структура и объем диссертации, выводы и заключение. С вашего позволения, остановлюсь только на замечаниях:

- Можно предположить, что для успешной работы плазменного сепаратора существенную роль могут играть макро и микротурбулентности в плазменной струе. Однако этот вопрос вообще не затрагивается диссертантом при анализе результатов измерений. Тем не менее, на графиках радиального распределения потенциала разброс точек соответствует временным флуктуациям потенциала при движении плавающего зонда. Но это замечание относится к буферной плазме, которая может быть создана и иным способом, а не с помощью отражательного разряда. Более существенны флуктуации тока двойного зонда (рис. 3.4), которые свидетельствуют о флуктуациях тока в плазменном источнике. Поэтому в дальнейшем, с точки зрения рецензента, следовало бы уделить некоторое внимание проблемам возможных неустойчивостей в источнике плазмы.

- К недостаткам изложения материала диссертации следует отнести некоторую фрагментарность в изложении технических вопросов и отсутствие пояснений к конструктивным элементам эксперимента, затрудняющим понимание рассматриваемых вопросов. Например, безусловно требовалось бы пояснение к оригинальной конструкции узла нагрева катодного дугового источника плазмы.

Однако, делается заключение, что эти замечания не изменяют высокой оценки выполненного исследования. В конце приводится заключение, что работа соответствует требованиям, изложенным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», а её автор Николай Николаевич Антонов заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил главный научный сотрудник отдела физики плазмы, д.ф.-м.н., профессор Батанов Г. М. и его подпись заверена ученым секретарем.

### **Председатель**

Спасибо, это все материалы, которые у нас есть?

### **Ученый секретарь**

Да.

### **Председатель**

Хорошо, Николай Николаевич, пожалуйста ответьте.

### **Антонов Н.Н.**

Я постараюсь ответить на вопросы. Первый вопрос связан с флуктуациями тока ионов, регистрируемых коллектором. Дело в том, что данные скачки тока были зарегистрированы в переходном режиме. Где пары свинца практически были исчерпаны, а пары серебра только начинали активно появляться в разрядном промежутке. На данном этапе изменялось огромное количество параметров: концентрация паров модельного вещества, мощность накала термокатада и другие. Что привело к значительному изменению тока, которое было зарегистрировано.

Второй вопрос от Курнаева В.А. относится к ресурсу данного источника плазмы и деградации катода. Один катод позволяет провести несколько десятков экспериментов и



значительно более существенным оказывается его эрозия, а не изменение параметров термоэмиссии. Эрозия катода приводит к изменению распределения электрического поля вблизи его поверхности из-за определенной инженерной конструкции источника, что существенным образом влияет на экстракцию электронов из катодного узла.

Перейдем к вопросам Н.Л. Александрова. Первый вопрос о недостаточном изучении влияния ВЧ-плазмы и совместимости узлов установки. Мы сейчас исследуем взаимное влияние высокочастотного разряда и плазменной струи, но данные исследования еще не завершены и не вошли в квалификационную работу. Следующий вопрос о способах борьбы с существенным изменением распределения потенциала. Мы полагаем, что наиболее эффективным методом будет увеличение концентрации буферной плазмы. Так как концентрация плазмы в струе и в буферном разряде отличаются на два порядка.

Перейдем к вопросам ведущей организации. Вопрос о недостаточном внимании к флуктуациям параметров. Модельные расчеты в рамках концепции плазменной сепарации с потенциальной ямой подразумевают некоторое варьирование параметров и эти параметры были указаны ранее. Мы полагаем, что вариации тока источника не являются критичными. Варьирование энергии инжектируемых частиц является более существенным. Средняя энергия частиц не должна превышать 20 эВ.

### **Председатель**

Спасибо, мы должны перейти к оппонентам. И слово предоставляется Филиппову Анатолию Васильевичу. Прошу вас сконцентрироваться на вашей оценке, замечаниях и выводах.

### **Филиппов А.В.**

Добрый день, уважаемые коллеги. Диссертация посвящена плазменному разделению изотопов. Проблема действительно актуальна, потому что накоплено очень много радиоактивных отходов именно в жидком состоянии. Сегодня отработавшее ядерное топливо перерабатывается гидрометаллургическими методами. Его переводят сначала в жидкое состояние. В прошлом году в УФН вышла обзорная статья на эту тему, что лишний раз подтверждает актуальность исследований. Автор (Николай Николаевич) проделал огромную работу. Диссертация содержит как экспериментальные данные, так и теоретические вкрапления. Замечания, высказанные к автореферату, показывают, что работа еще в самом начале. Полученные значения коэффициентов осаждения модельных веществ недопустимы, потому что при работе с реальным веществом недопустима потеря радиоактивных материалов. Работа еще предстоит, но работа очень хорошая. Перейдем к замечаниям:

- Что означает 3D модель экспериментальной установки? В чем трехмерность представленной на рис. 1. 5 и 3.1 картин (фотографий)?

- В проблеме подавления двукратной ионизации разделяемых химических элементов выбор серебра, как аналога продуктов деления урана, не является удачным, так как серебро имеет достаточно высокий потенциал ионизации иона, почти в три раза превышающий потенциал ионизации атома: 21,49 против 7,5763 эВ. А многие полезные изотопы в радиоактивных отходах и ОЯТ имеют менее чем в два раза отличающиеся потенциалы первой и второй ионизации: например, стронций имеет 2-ой потенциал ионизации, равный 11,03 эВ, а 1-ый – 5,69490 эВ, прометий – 10,9 эВ и 5,58 эВ, соответственно. Такое небольшое отличие потенциалов ионизации облегчает появление двукратно ионизованных ионов этих атомов.

- Учет процесса перезарядки ионов свинца является неоправданным превышением

точности, так как длина свободного пробега иона свинца  $l_{\text{exch}} = (n_a \sigma_{\text{exch}})^{-1}$  при максимальной концентрации атомов свинца  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  составляет 20 см, что много больше размера межэлектродного промежутка в 1 см в расчетах. Следовательно, процессом перезарядки ионов свинца в условиях экспериментов в диссертационной работе можно пренебречь.

- Есть недочеты в оформлении диссертации и автореферата, в целом выполненные достаточно хорошо. Особенно досадной является ошибка в выходных данных статьи под вторым номером в списке основных публикаций по теме диссертации. Здесь уместнее было бы привести ссылку на исходную статью в журнале "Ядерная физика и инжиниринг", который входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а не на перевод в журнале "Physics of Atomic Nuclei".

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку. Прделанная Николаем Николаевичем работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, а сам Николай Николаевич заслуживает присуждения степени.

### **Председатель**

Спасибо, Анатолий Васильевич, за тщательное рецензирование. Пожалуйста, Николай Николаевич.

### **Антонов Н.Н.**

Первый вопрос относится к подписи к рисункам. Я выбрал неудачную формулировку для подписи к рисункам. В данном случае приведены рисунки изометрического вида 3D модели, которая была создана в студенческой версии Autodesk Inventor. Второй вопрос о не совсем удачном выборе модельных веществ. Целью данной работы являлось моделирование именно кинетики и динамики тяжелой и легкой компоненты ОЯТ. Конечно вопрос выбора модельного вещества для такого сложно компанда как ОЯТ – это очень сложный вопрос. Различные аспекты процесса будут моделироваться разными смесями и элементами. Третий вопрос об учете эффекта резонансной перезарядки. Я согласен с этим замечанием, однако, в рамках работы были проанализированы концентрации до  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  и разрядные промежутки до 3 см. При концентрации  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  эта поправка порядка 5%, а при концентрации  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  она близка к 10%. В целом я согласен с тем, что это некоторое превышение точности. Четвертый вопрос о выборе переводной версии статьи. Выбор англоязычной версии связан с её вхождением в Scopus и наличием индекса цитируемости.

### **Председатель**

Спасибо большое. Давайте перейдем к мнению второго оппонента. Елена Солдаткина из института имени Будкера. Пожалуйста.

### **Солдаткина Е.И.**

Я, с вашего позволения, для краткости зачитаю основные ключевые моменты отзыва. Как уже было неоднократно сказано, актуальность диссертации не вызывает сомнений. Я с этим полностью соглашаюсь. Скажу только в нескольких словах о значимости данной работы как практической, так и теоретической. Научная значимость работы заключается в расширении знаний о поведении потоков ионизированного вещества в буферной плазме

со скрещенными электрическим и магнитным полями. Нетривиальность механизмов радиального распределения электрического поля в таких системах делает диссертационную работу ценным источником экспериментальных данных, на основе которых должны быть улучшены существующие теоретические и численные модели. Практическая значимость работы заключается в разработке методов создания потоков ионизированных веществ, моделирующих ОЯТ, а также определении оптимальных режимов работы будущего плазменного сепаратора. Данная работа является очередным шагом на пути к созданию промышленного сепаратора ОЯТ на основе источника плазмы с несамостоятельным дуговым разрядом в магнитном поле, и результаты этого исследования должны стать основой для дальнейших исследований поведения потоков плазмы в установках такого типа. Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Перейдем к замечаниям:

- Стр. 32: в формуле (2.1) не указано, какую смысловую нагрузку несет функция  $V_i$ .
- Стр. 47: в экспериментах по изучению эффективности ионизации паров свинца было показано, что эффективность ионизации при плотности тока разряда  $300 \text{ mA/cm}^2$  и разности потенциалов  $40 \text{ В}$  находится на уровне  $1 \%$ . Это согласуется с численной моделью, которая предсказывает возможную эффективность ионизации на уровне нескольких десятков процентов. Хотелось бы понять, почему невозможно показать в модельном эксперименте такую эффективность, каковы ограничения методики.

- Стр. 60-62: в рассуждениях об управляемости разрядом главным показателем эффективности является возможность поддержания постоянного напряжения в разрядном промежутке, в то время как плотность ионного тока, которая все же кажется определяющим фактором эффективности, меняется в широких пределах. Автор уже отвечал на этот вопрос.

- Из рисунка 4.2 следует, что инжекция струи плазмы свинца существенным образом влияет на исходное распределение потенциала в буферной плазме. Это приведет к изменению траекторий движения разделяемых элементов в процессе сепарации. Какие методы и подходы планируется использовать для подавления данного эффекта? Глава 4 кажется незаконченной в силу отсутствия выводов о движении ионов струи в буферной плазме. По всей видимости, эта работа должна быть продолжена в дальнейшем.

- В главе 5 в качестве материалов подложки, на которую происходит осаждение модельных веществ, рассмотрены нержавеющая сталь и углерод, сделаны оценки эффективности осаждения, а затем приведено исследование адгезионных свойств материала подложки, но в качестве материалов взяты уже нержавеющая сталь и дюралюминий, хотя кажется логичным изучение всех трех материалов по двум описанным критериям.

- В тексте работы присутствует некоторое количество мелких грамматических и пунктуационных ошибок.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки проделанной диссертантом работы.

Диссертация Антонова Николая Николаевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для понимания физических основ плазменной сепарации ОЯТ.

Работа соответствует требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Антонов Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы».

### **Председатель**

Спасибо Елена. Пожалуйста, Николай, ответьте. Особенно обратите пожалуйста внимание на вопрос об эффективности ионизации.

### **Антонов Н.Н.**

Первый вопрос относится к значению функции  $V_i$ . Данные были приведены немного ниже по тексту диссертации. Я согласен с тем, что расшифровку обозначения функции следовало бы расположить вблизи формулы. Второй вопрос об эффективности ионизации и почему в рамках модельного эксперимента не удалось показать такие значения эффективности ионизации как в модели. Дело в том, что параметры при которых достигается высокая эффективность ионизации было довольно трудно реализовать в рамках схемы экспериментов. В особенности плотности тока электронов на уровне  $4 \text{ А/см}^2$ . Возникновение таких токов приведет к возрастанию роли объемного заряда, что существенным образом затруднит диагностирование образующихся ионов. Поэтому ответ на вопрос заключается в инженерных и физических ограничениях модельного эксперимента. Следующий вопрос о существенном искажении потенциала. Одним из возможных способов борьбы с данным эффектом является повышение плотности плазмы буферного разряда. И вопрос о выборе материала исследуемых подложек. К сожалению, на подложке из углерода, которая обладает существенной пористостью, невозможно провести исследование адгезии покрытия с помощью индентора, так как при воздействии подложка разрушается. Поэтому был выбран дополнительный материал, который является наиболее доступным.

### **Председатель**

Давайте перейдем к дискуссии, если есть желание высказаться у кого-то. Пожалуйста, Леонид Михайлович.

### **Василяк Л.М.**

На мой взгляд, мы заслушали очень интересную и прекрасно выполненную экспериментальную работу. Она очень сложная. Хотел бы обратить внимание, что автор не останавливался на тех сложностях, которые ему пришлось преодолеть. Не буду их перечислять. Поверьте, имея большой экспериментальный опыт, я могу сказать, что ему действительно пришлось несладко. Мы видим замечательные результаты. Продемонстрирован хороший профессиональный уровень. Плюс к этому сделана теоретическая модель. Мое предложение заключается в том, чтобы поддержать эту работу.

### **Председатель**

Мне представляется несомненно обоснованной точка зрения. Пожалуйста, Олег Федорович.

### **Петров О.Ф.**

Я бы тоже хотел сказать несколько слов. Сегодняшний день можно рассматривать как отчетное мероприятие двух кафедр МФТИ. «Кафедры физики высоких плотностей энергии» и «кафедры высокотемпературных процессов». Из 4 соискателей 3 относятся к «кафедре физики высоких плотностей энергии», а 1 к «кафедре высокотемпературных

процессов», то есть 100% относятся к базовым кафедрам МФТИ. Это все создает некоторую предысторию. Николай Николаевич пришел на кафедру традиционным путем. Вначале в бакалавриат, а затем поступил магистратуру и аспирантуру. Тут следует сказать, что этот отбор на наших кафедрах очень жесткий. Он исключает какие-либо случайности. Человек должен доказать предшествующими четвертым, пятым и шестым курсами (своей работой на этих курсах), что он достоин поступления в аспирантуру. Еще один важный момент. У нас есть установившаяся традиция, что пришедший в аспирантуру должен защититься в срок. Я назову ориентировочную цифру с учетом флуктуаций. Защищается в срок около 90 %. Николай Николаевич абсолютно заслуженно поступил в аспирантуру. Сделал очень хорошую экспериментальную работу и, конечно, по моему представлению, достоин степени кандидата физико-математических наук.

### **Председатель**

Спасибо, Олег Федорович. В дополнение к тому, что вы сказали, я бы хотел обратить внимание руководителя. Было бы гораздо лучше, если бы защищающиеся в срок представляли диссертации не на конец декабря. Эта традиция, которую можно было бы и прервать. Кто-нибудь еще хочет что-то сказать? Я думаю, что ситуация действительно достаточно ясная, поэтому, Николай Николаевич, вам заключительное слово.

### **Антонов Н.Н.**

В первую очередь я бы хотел поблагодарить всех членов совета за проделанную работу. Своего научного руководителя хотел бы поблагодарить за бесконечное терпение и формирование направления исследований и помощь в их проведении. Также хотел бы поблагодарить весь коллектив лаборатории 2.1.4.2. Отдельной благодарности заслуживают оппоненты и мои «боевые» товарищи, вместе с которыми мы проводили многие эксперименты.

### **Председатель**

Переходим к выбору счетной комиссии. Есть предложение выбрать В.К. Грязнова, Л.Г. Дьячкова и А.Ю. Вараксина. Кто за? Все за. Тогда давайте преступим к работе комиссии. Уважаемые члены совета, давайте проголосуем.

### **Дьячков Л.Г.**

Результаты голосования за Н.Н. Антонов. Присутствовало 24 члена совета. В урне оказалось 24 бюллетеня. За проголосовало 24, против 0 и воздержавшихся тоже 0.

### **Председатель**

Вопросов я думаю, что нет. Есть предложение утвердить результаты голосования (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*). Спасибо! Мы Вас поздравляем. Обсуждение проекта заключения у нас произошло. (*Проект заключения принят единогласно*). Спасибо большое, на этом первый пункт нашей обширной программы закончен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02, СОЗДАННОГО 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 26.12.2018г. протокол № 25

О присуждении Антонову Николаю Николаевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Формирование ионизированных потоков веществ для плазменного разделения компонентов, моделирующих отработавшее ядерное топливо, и исследование их распространения в буферной плазме со стационарным электрическим полем» в виде рукописи по специальности 01.04.08 – Физика плазмы, принята к защите 24.10.2018г., (протокол заседания № 20) диссертационным советом Д 002.110.02, созданным 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), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Антонов Николай Николаевич 1991 года рождения, в 2014 году окончил Московский физико-технический институт (государственный университет).

В 2018 году окончил очную аспирантуру факультета «Проблем физики и энергетики» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского физико-технического института (государственного университета)».

Диссертация выполнена в лаборатории № 2.1.4.2 – диагностики и измерительных систем НИЦ – 2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Гавриков Андрей Владимирович, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

-д.ф.-м.н., директор отделения центра теоретической физики и вычислительной математики Акционерного общества Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, тел.: (495) 841-52-62, (910) 469-82-39, [triniti.ru](http://triniti.ru), e-mail: [fav@triniti.ru](mailto:fav@triniti.ru)), Филиппов Анатолий Васильевич;

- к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаб. 9-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук «ИЯФ СО РАН» (630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11, тел.: (913)-771-28-00, [inp.nsk.su](http://inp.nsk.su), e-mail: [E.I.Soldatkina@inp.nsk.su](mailto:E.I.Soldatkina@inp.nsk.su)), Солдаткина Елена Ивановна;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, +7 (499) 135-41-48, [gpi.ru](http://gpi.ru), [office@gpi.ru](mailto:office@gpi.ru)), в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником отдела физики плазмы, д.ф.-м.н., профессором Батановым Г. М. (утвержденном генеральным директором ИОФ РАН, чл.-корр. РАН Гарновым С.В.), указала что:

1. Наибольшая глубина исследований достигнута при создании плазменного источника. На основе изучения параметров разряда получены результаты, позволяющие рассматривать созданный плазмотрон как перспективный для использования в рамках

проекта по созданию плазменного сепаратора ОЯТ.

2. Была построена модель разряда в парах свинца с накаливаемым катодом, и проведены вычисления его характеристик, позволившие определить режимы поддержания стационарного разряда.

3. Регулирование потока свинца и серебра, тока эмиссии бор-лантанового катода и напряжения на разряде позволяет получить высокую степень ионизации паров, однозарядность инжектируемых источником ионов при их низкой средней энергии и плотности электронов порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Это именно те параметры, которые приемлемы для использования в модельной технологической установке по переработке ОЯТ.

4. Взаимодействие инжектируемой свинцовой плазмы с концентрацией электронов  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и аргоновой плазмы отражательного разряда с концентрацией электронов  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  вызывает существенное искажение радиального распределения потенциала внутри камеры сепарации.

5. Рост плотности плазмы в отражательном разряде вызывает увеличение инжекции плазмы модельного вещества из формируемого потока в объём отражательного разряда. Это подчеркивает необходимость повышения плотности буферной плазмы для успешной работы плазменного сепаратора.

6. Включение отражательного разряда (радиального электрического поля) вызывает понижение ионного тока в сечении инжектируемой струи на 95%. При этом происходит равномерное понижение плотности тока по сечению всей струи. Таким образом, было получено свидетельство, что происходит равномерная потеря ионов свинца по сечению струи и нет отклонения струи как целого.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в организациях, ведущих исследования по физике плазменно-поверхностного взаимодействия: НИЦ "Курчатовский институт", АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ИОФ РАН, ИПФ РАН, ФИ РАН, НИЯУ МИФИ, ИЯФ СО РАН, ИСЭ СО РАН, МФТИ, МГУ и в других научных и образовательных учреждениях.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы по теме диссертации, из них 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК и 17 публикаций в сборниках трудов конференций.

Основные работы:

1. Антонов Н. Н., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Самохин А. А., Смирнов В. П. Разработка модельного источника ионов свинца для задач плазменной сепарации отработанного ядерного топлива // Журнал Технической Физики. — 2016. — Т. 86, вып. 2. — С. 23—29.

2. Antonov N. N., Gavrikov A. V., Samokhin A. A., Smirnov V. P. Heavy component of spent nuclear fuel: efficiency of model-substance ionization by electron-induced discharge // Physics of Atomic nuclei. — 2016. — Vol. 79, no. 14. — P. 1625-1631.

3. Antonov N. N., Bochkarev E., Gavrikov A. V., Samokhin A. A., Smirnov V. P. The study of ionization by electron impact of a substance simulating spent nuclear fuel components // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012162.

4. Antonov N. N., Samokhin A. A., Zhabin S., Gavrikov A. V. and Smirnov V. P. The study of lead vapor ionization in discharge with a hot cathode and efficiency of its deposition on the substrates applied for plasma separation method // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012196.

5. Antonov N. N., Gavrikov A., Smirnov V., Liziakin G., Usmanov R., Vorona N., Timirkhanov R. The study of the plasma jets of lead and silver simulating spent nuclear fuel components // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946. — P. 012171.

6. Антонов Н., Жабин С., Гавриков А., Смирнов В., Тимирханов Р. Исследование эффективности осаждения свинца для задач плазменной сепарации отработанного ядерного топлива // Прикладная Физика. — 2016. — Т. 4. — С. 70—74.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (заведующий кафедрой № 21 «Физика плазмы», д.ф.-м.н., профессор, В.А. Курнаев) – отзыв положительный, с замечаниями:

- К сожалению, в автореферате не обсуждается резкие (более чем в 3 раза) вариации в ходе эксперимента ионного тока при примерно одинаковых значениях тока разряда (рис.3).

- В автореферате не отражается проблема ресурса работы подобного источника, учитывая «отравление» LaB6 рабочим веществом и эрозию катода во время работы.

- Результаты исследований сами по себе новы, очень интересны и бесспорно полезны для дальнейших исследований в данной области, однако в формулировке положений, выносимых на защиту, автор отмечает повсюду лишь «результаты исследований...» без какой-либо конкретики, которая, с другой стороны, содержится в заключении к автореферату.

2. Институт космических исследований (с.н.с. лаборатории плазменно-пылевых процессов в космических объектах (№513), к.ф.-м.н., С.И. Копнин) – отзыв положительный, без замечаний.

3. Московский Физико-технический институт «МФТИ» НИИ ГУ (заведующий лабораторией импульсных плазменных систем, д.ф.-м.н., профессор, Н.Л. Александров) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Автор уделил недостаточное внимание вопросам влияния пространственного распределения электростатического потенциала в буферной плазме ВЧ-разряда на движение потока плазмы модельных веществ. Исследование в этом направлении имеет большое практическое значение с точки зрения обеспечения совместимости систем разрабатываемой установки плазменной сепарации.

- Из представленных экспериментальных данных следует, что инжекция струи плазмы свинца существенным образом влияет на исходное распределение потенциала в буферной плазме. В конечном итоге это приведет к изменению траекторий движения разделяемых элементов в процессе сепарации, но автор не уделил внимания вопросу о том, какие методы и подходы планируется использовать для подавления данного эффекта.

- Автор уделил недостаточное внимание вопросам влияния флуктуаций исследуемых параметров на процессы разделения в рамках концепции плазмооптической сепарации с потенциальной ямой.

4. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (м.н.с. отдела физики высоких плотностей энергии, к.ф.-м.н., А.И. Хирьянова) – отзыв положительный, без замечаний.

5. Иркутский государственный университет (заведующий кафедрой общей и космической физики, д.ф.-м.н., профессор В.Л. Паперный) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Результаты модельных расчетов эффективности ионизации в разработанном источнике плазмы не подкреплены данными экспериментов, так что эти результаты выглядят неубедительно.

- Несколько загадочно выглядит текст на с. 15 автореферата: «Это свидетельствует о том, что при включении отражательного разряда струя свинцовой плазмы не отклоняется как целое, а ее концентрация ионов постепенно спадает. Таким образом, была продемонстрирована возможность отклонения потока плазмы свинца, инжектируемого вдоль, силовых линий магнитного поля.» (Курсив Паперного В.Л.). Тем более что выше ни о каком отклонении речи не шло.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:



-д.ф.-м.н., директор отделения центра теоретической физики и вычислительной математики АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» Филиппов А.В. является одним из ведущих специалистов в области физики плазмы и физики газового разряда. Также Филиппов А.В. является признанным специалистом в области изучения вопросов взаимодействия макрочастиц в равновесной плазме;

1. Ю.С. Акишев, В.Б. Каральник, А.В. Петряков, А.Н. Старостин, Н.И. Трушкин, А.В. Филиппов «Сверхвысокая зарядка пылевых частиц пучково-плазменным методом для создания малогабаритного источника нейтронов» // Физика плазмы, — 2016. —Т.42, — №1, — С. 17-28;
2. А.В. Филиппов, И.Н. Дербенев «Влияние размера заряженных сферических макрочастиц на их электростатическое взаимодействие в равновесной плазме.» // ЖЭТФ, — 2016. —Т.150, —№5(11), — С. 1262-1274;
3. А.В. Филиппов, А.Н. Старостин, В.К. Грязнов «Кулоновский логарифм в неидеальной и вырожденной плазме» // ЖЭТФ, — 2018, —Т.153, —№3, — С. 514-524;

- к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаб. 9-1 «ИЯФ СО РАН» Солдаткина Е.И. является известным специалистом в области физики плазмы, газодинамических ловушек, создания электрического поля в плазме и зондовых измерений;

1. E.I. Soldatkina, M.A. Anikeev, P .A. Bagryansky, M.S. Korzhavina, V.V. Maximov, V.Ya. Savkin, D.Y. Yakovlev, P. Yushmanov, A. Dunaevsky «Influence of the magnetic field expansion on the core plasma an axisymmetric mirror trap»//Physics of Plasmas, 2017, — V. 24, — P. 022505.
2. P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, G.G. Denisov, E.D. Gospodchikov, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, Yu.V. Kovalenko, V.I. Malygin, V.V. Maximov, O.A. Korobeinikova, S.Y. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, O.B. Smolyakova, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev, K.V. Zaytsev «Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror» // Nuclear Fusion. —2015, —V. 55, — P. 053009;
3. P.A. Bagryansky, A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.Y. Yakovlev «Threefold Increase of the Bulk Electron Temperature of Plasma Discharges in a Magnetic Mirror Device» // Physical Review Letters, 2015, — V. 114, — P. 205001.

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ИОФ РАН является многопрофильной авторитетной научной организацией, ведущей исследования по целому ряду направлений, в частности в отделении физики плазмы ИОФ РАН ведутся работы по исследованию физики газового разряда и движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях в плазме, а также диагностике плазмы.

1. Shmelev D.L., Barenholts S.A., Shchitov N.N. The effect of cathode deuteration on the parameters of vacuum-arc plasma // Technical Physics Letters. 2014. Т. 40. № 9. С. 783-786.
2. Jia Q., Fisch N.J., Barth I., Edwards M.R., Mikhailova J.M. Distinguishing raman from strongly coupled brillouin amplification for short pulses // Physics of Plasmas. 2016. Т. 23. № 5. С. 053118.
3. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Kolik L.V., Malakhov D.V., Petrov A.E., Pshenichnikov A.A., Sarksyayn K.A., Skvortsova N.N., Kharchev N.K., Effect of electron-cyclotron resonance heating conditions on the local parameters of short-wavelength plasma turbulence in the I-2m stellarator // Plasma Physics Reports. 2014. Т. 40. № 4. С. 265-275.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Разработан и создан источник направленного потока металлической плазмы модельной установки по плазменной сепарации ОЯТ, работающий на основе несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом (гексаборид лантана) в магнитном поле и независимой инъекцией паров плазмообразующего вещества в разрядный промежуток. Плотность тока ионов до 100 мА/см<sup>2</sup>.
- Найдены режимы горения разряда, при которых поток плазмы однозарядных ионов.
- Продемонстрирована возможность поддержания постоянной разности потенциалов в разрядном промежутке источника (постоянной энергии формируемого потока плазмы) при использовании смеси серебра и свинца в качестве плазмообразующего вещества.
- Получены новые экспериментальные данные о влиянии электрического поля, созданного торцевыми электродами в буферной плазме отражательного разряда, на распространение плазменной струи свинца, инжектируемой вдоль силовых линий магнитного поля. Экспериментально продемонстрирована возможность отклонения более 95% ионов струи плазмы от первоначального направления их движения.
- Получены новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в аргоновой плазме отражательного разряда (концентрация электронов около 10<sup>10</sup>см<sup>-3</sup>) при инъекции в её объём плазменной струи свинца (концентрация электронов до 10<sup>12</sup>см<sup>-3</sup>) существенно меньшего объема.
- Получены новые экспериментальные данные об эффективности осаждения направленных потоков нейтралов свинца с тепловыми энергиями на различные подложки.
- Построена расчетная модель разряда в парах свинца с накалимым катодом и получены значения степени ионизации, вольт-амперные характеристики и распределения электростатического потенциала в межэлектродном промежутке при различных значениях концентрации паров (до 10<sup>13</sup>см<sup>-3</sup>) и плотности тока инжектируемых электронов (до 4 А/см<sup>2</sup>).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- проведенные исследования и полученные экспериментальные данные представляют интерес с точки зрения понимания процессов распространения потоков многокомпонентного ионизированного вещества в буферной плазме с замагниченными электронами и макроскопическими скрещенными электрическим и магнитным полями;
- на базе кинетического подхода построена расчетная модель несамостоятельного разряда в парах свинца с накалимым катодом. Экспериментальные данные находятся в качественном и количественном согласовании с построенной теоретической моделью в исследуемом диапазоне параметров.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- представленные в работе экспериментальные данные позволяют осуществить выбор режимов и параметров работы созданного источника плазмы для экспериментальной отработки метода плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива на модельных веществах.
- результаты исследования взаимного влияния отражательного разряда и потока плазмы, инжектируемого вдоль магнитных силовых линий, позволяют перейти к дальнейшим экспериментам по разделению смеси элементов в рамках концепции плазменной сепарации с потенциальной ямой;

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном институте высоких температур РАН, Иркутском государственном техническом университете, Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт», в Институте сильноточной электроники СО РАН, Московском инженерно-физическом институте, Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Московском энергетическом институте, Институте прикладной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Московском государственном техническом университете

им. Н.Э. Баумана, Казанском федеральном университете, в Санкт-Петербургском государственном университете и Московском государственном университете.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- идея диссертационной работы основана на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования и обобщении опыта работы других научных групп.
- результаты работы получены с использованием широко известных экспериментальных методов диагностики плазмы и обработки экспериментальных данных. Также присутствует воспроизводимость полученных результатов;
- установлено качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в литературных источниках по данной тематике;
- результаты работ многократно представлялись и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, а также были удостоены премии на конкурсе научных работ аспирантов ОИВТ РАН;

Личный вклад соискателя:

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. Все представленные экспериментальные результаты получены лично соискателем. Подготовка оборудования, разработка источника плазмы, схем диагностики параметров плазмы и обработка экспериментальных данных производилась автором самостоятельно. Апробация результатов исследования проводилась на более чем 17 российских и международных конференциях, в которых соискатель принимал личное участие. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Автор принимал активное участие в развитии основных этапов концепции плазменной сепарации с потенциальной ямой.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 26.12.2018г. диссертационный совет принял решение присудить Антонову Николаю Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 24 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 12 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 24, 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  
д.ф.-м.н.

Васильев М.М.

26.12.2018г.

