

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, (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, 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 отработавшего 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»  $\text{LaB}_6$  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.

**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., Barenholtz 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., Sarksyun 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 1-2m 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  $100 \text{ mA/cm}^2$ .

- 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  $10^{10}\text{см}^{-3}$ ) при инъекции в её объём плазменной струи свинца (концентрация электронов до  $10^{12}\text{см}^{-3}$ ) 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 накаливаемым катодом и получены значения степени ионизации, вольт-амперные характеристики и распределения электростатического потенциала в межэлектродном промежутке при различных значениях концентрации паров (до  $10^{13}\text{см}^{-3}$ ) и плотности тока инжектируемых электронов (до  $4\text{ А/см}^2$ ).

**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.