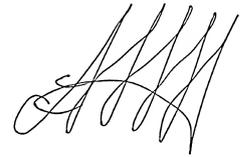


На правах рукописи



Антонов Николай Николаевич

**Формирование ионизированных потоков
веществ для плазменного разделения
компонентов, моделирующих отработавшее
ядерное топливо, и исследование их
распространения в буферной плазме со
стационарным электрическим полем**

01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Гавриков Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Филиппов Анатолий Васильевич

кандидат физико-математических наук,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук

Солдаткина Елена Ивановна

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится «26» декабря 2018 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), расположенном по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Отзывы и замечания по автореферату просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02,
кандидат физико-математических наук



Васильев М. М.

Общая характеристика работы

Работа посвящена формированию и исследованию характеристик направленных плазменных потоков веществ, моделирующих компоненты отработавшего ядерного топлива, в буферной плазме с пространственным распределением электростатического потенциала.

Актуальность темы исследования

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 года предусматривает более чем двукратный рост мощностей атомных электростанций. В связи с этим заявляют о себе такие проблемы как: неполное вовлечение ресурсов в топливный цикл, дефицит природного урана, связанная с хранением и транспортировкой радиоактивных отходов (РАО) экологическая нагрузка на окружающую среду. Для решения этих проблем необходимы эффективные технологии переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и РАО. Производственные мощности существующих химических технологий могут осуществить переработку всего топлива (на данный момент перерабатывается около 10%), выгружаемого из реакторов, однако только экстенсивным путем с производством дополнительных жидких отходов разной степени радиоактивности. На данный момент в Российской Федерации накоплено около 24 000 тонн отработавшего ядерного топлива (в мире около 400 000 тонн). По этой причине задача разработки альтернативных методов переработки ОЯТ является актуальной. На сегодняшний день среди разрабатываемых методов можно выделить гидрометаллургический, газофторидный, пироэлектрохимический и не менее перспективный плазменный. В отличие от электромагнитных способов сепарации плазменные подходы обеспечивают движение ионов в условиях скомпенсированного объемного заряда, что концептуально позволит достичь производительностей промышленного уровня.

Концепцию плазменной сепарации, можно разделить на 3 главных этапа: перевод твердого вещества в плазменный поток, разделение потока в специальной конфигурации электрического и магнитного поля по группам масс, сбор разделенных веществ на коллекторы. Исследование процессов конвертации конденсированного вещества в плазменный поток с заданными свойствами, параметров движения направленных плазменных потоков в скрещенных электрическом и магнитном полях в буферной плазме, а также процессов осаждения и сбора разделенных элементов являются актуальными задачами для развиваемого метода плазменной переработки ОЯТ.

Число публикуемых работ, посвященных разработке и исследованию источников плазмы и ионов различных веществ, а также воздействию плазменных потоков на вещество, неуклонно растет в последнее время. Широкое практическое использование данных устройств явилось причиной повышенного интереса к физике газового разряда, способам генерации плазмы в целом, а также к развитию методов диагностики параметров плазмы и направленных плазменных потоков. Выбор того или иного способа генерации плазмы обусловлен исходными требованиями рассматриваемой задачи. Основными параметрами плазмы являются энергетический спектр ионов и электронов, степень ионизации, распределение по зарядовым состояниям и элементный состав. Не менее важными параметрами с технологической точки зрения являются производительность, энергоэффективность, ресурс, эксплуатационные температурные режимы, радиационная стойкость конструкционных материалов, стабильность, эффективность расходования рабочего вещества, геометрия конструкции и периферии источника, а также работоспособность под влиянием внешних факторов (электрических и магнитных полей, ионизирующих излучений). Необходимость получения определенных параметров потока плазмы и специфика научных и инженерно-физических задач вынуждают разработчиков обращаться к различным типам разряда (тлеющему, коронному, дуговому, искровому, плазменно-пучковому, отражательному, ВЧ-разряду, СВЧ-разряду, магнетронному, оптическому и другим разрядам, основанным на действии ионизирующих излучений) и способам генерации.

Цели и задачи диссертационной работы

Основными целями работы являются формирование и исследование характеристик направленных плазменных потоков веществ, моделирующих динамику компонентов ОЯТ, в буферной плазме с замагниченными электронами и с пространственным распределением электростатического потенциала. Для достижения сформулированных целей были поставлены следующие задачи: разработать и создать источник плазмы модельных веществ, провести исследования параметров формируемого потока ионизированных веществ, исследовать взаимное влияние потока плазмы и буферного отражательного разряда с пространственным распределением электростатического потенциала.

Научная новизна

- Разработан и создан источник направленного потока металлической плазмы для модельной установки по плазменной сепарации ОЯТ, работающий на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым

катодом (гексаборид лантана) в магнитном поле и независимой инъекцией паров плазмообразующего вещества в разрядный промежуток.

- Найдены режимы горения разряда, при которых в потоке плазмы отсутствуют многократно ионизированные атомы модельных веществ.
- 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 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.
- Получены экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в аргоновой плазме отражательного разряда при инъекции в её объём плазменной струи свинца.
- Получены экспериментальные данные об эффективности осаждения направленных потоков нейтралов свинца с тепловыми энергиями.
- 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 и плотности тока инжектируемых электронов.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, изложенные в научной квалификационной работе, могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся формированием направленных потоков плазмы и изучением их воздействия на вещество. Проведенные исследования представляют также значительный самостоятельный интерес с точки зрения понимания процессов распространения потоков многокомпонентного ионизированного вещества в буферной плазме с замагниченными электронами и макроскопическими скрещенными полями. 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.

Положения, выносимые на защиту:

- Плазмотрон и результаты исследования инжектируемого им в рабочий объем экспериментальной установки по плазменному разделению элементов потока ионизированных веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо.
- Результаты экспериментального исследования взаимного влияния электрического поля, создаваемого электродами в буферной плазме отражательного разряда, и потока плазмы, инжектируемого вдоль силовых линий магнитного поля.
- Результаты исследования коэффициентов осаждения свинца на различные подложки.
- Результаты исследований разряда в парах свинца с накаливаемым катодом.

Апробация работы

Основные результаты научной квалификационной работы докладывались на следующих конференциях:

55-60 Научных конференциях «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» (Москва, Долгопрудный, 2012-2017);

XXX, XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Kabardino-Balkaria, Russia, 2015, 2017);

XXXI, XXXIII International Conference on Equation of State for Matter (Kabardino-Balkaria, Russia, 2016, 2018);

40-й Международной звенигородской конференция по физике плазмы и УТС, (Звенигород, 11-15 февраля 2013);

Научной сессии НИЯУ МИФИ (Москва, 2015);

Международной отраслевой научной конференции «АТОМТЕХ 2015 ЭЛЕКТРОФИЗИКА» (Москва, 2015г);

XIII Международной конференции посвященной 100-летию со дня рождения академика М.Ф. Жукова. Газоразрядная плазма и её применение (Новосибирск, 2017);

XXIV Международной конференции Europhysics Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases ESCAMPIG2018 (Scotland, Glasgow, 2018);

IX International conference on Plasma Physics and Plasma Technology PPPT-9 (Minsk, Belarus, 2018).

Результаты исследований были представлены на конкурсе научных работ ОИВТ РАН, посвященному памяти академика Шейндлина А.Е., где были удостоены второй премии в номинации «Работы аспирантов и молодых ученых без степени в возрасте до 28 лет».

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 23 печатных работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах [1–6], 17 публикаций в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации экспериментальные результаты получены лично автором. Результаты расчетов параметров разряда с накаливаемым катодом, представленные во второй главе, были получены А.А. Самохиным. Диссертант принимал активное участие в создании и формулировке граничных и начальных условий модели, а также в обсуждении результатов расчетов и экспериментальной проверке модели.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 101 страница, из них 86 страниц текста, включая 43 рисунка. Библиография включает 123 наименования на 15 страницах.

Благодарности

Автор искренне признателен всему коллективу лаборатории 2.1.4.2 и 2.1.4.1. ОИВТ РАН и в особенности научному руководителю А.В. Гаврикову за поддержку, переданный опыт, формулирование задач и направлений исследований, внимание к работе и обсуждения получаемых результатов. Автор чистосердечно хотел бы поблагодарить Усманова Р.А., Лизякина Г.Д. и Жабина С. Н. за помощь в проведении экспериментов и обсуждения результатов. Самохина А. А. хотелось бы поблагодарить за проведение расчетов и теоретическое сопровождение. Особой благодарности заслуживают Крестелев Е.Г., Тугушев В.И., Быков Ю. А. и Лукин О.Ю. за практические советы и помощь в изготовлении необходимых для проведения экспериментов узлов

и деталей. Отдельную благодарность автор хотел бы высказать идеологу концепции, разрабатываемой в рамках лаборатории, Смирнову В.П..

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и приведена научная новизна исследований, описана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе описаны результаты научных групп, достигнутые в области плазменного разделения элементов [7], а также в области перевода веществ из конденсированного состояния в плазменное. Представлена концепция плазмооптической сепарации с потенциальной ямой [8], предложенная академиком В. П. Смирновым. Одним из возможных способов инъекции разделяемых потоков веществ в данной концепции является ввод вдоль силовых линий магнитного поля [9]. **В разделе 1.3** представлены требования к источнику плазмы, который необходим для отработки инженерно-физических основ метода плазменной сепарации на модельных веществах, и в **разделе 1.2** рассмотрена возможность применения различных методов генерации плазмы в применении к данной задаче. Основными требованиями к источнику плазмы, который необходим для апробации метода, являются: зарядовый состав (ионы кратности 1), элементный состав (слабая зависимость параметров работы устройства от плазмообразующего вещества и необходимость работы на смесях, имеющих сложный состав), низкоэнергетичность (средняя энергия около 20 эВ), высокая степень ионизации инжектируемого потока плазмы (около 100%). На основании анализа литературы выделен один из наиболее перспективных методов генерации плазмы для задачи плазменного разделения элементов с потенциальной ямой — несамостоятельный дуговой разряд с накалимым катодом и независимой инъекцией паров конденсированного вещества в разрядный промежуток. Данный тип разряда обладает хорошей управляемостью напряжением горения [10] в силу возможности варьирования такого параметра как отношение количества инжектируемых атомов рабочего вещества к количеству инжектируемых электронов (атом-электронное отношение). **В разделе 1.4** приведено обоснование выбора серебра и свинца в качестве веществ, моделирующих легкую (менее 160 а.е.м.) и тяжелую (более 235 а.е.м.) компоненты ОЯТ.

Во второй главе в рамках кинетического приближения был проанализи-

зирова́н разряд с накаленным катодом в парах свинца, инжестируемых в межэлектродный промежуток. Были получены вольт-амперные характеристики, эффективности ионизации, распределения электростатического потенциала и концентрации ионов и электронов в разрядном промежутке в зависимости от плотности тока разряда и концентрации пара модельного вещества. Экспериментальные данные находятся в качественном и количественном согласовании с построенной теоретической моделью в определенном диапазоне параметров. Анализ расчетных данных, полученных с помощью численной модели, позволил подобрать параметры, при которых эффективность ионизации в эксперименте может быть доведена до уровня нескольких десятков процентов. Результаты моделирования показали, что при плотности тока разряда около $3,5 \text{ A/cm}^2$ и концентрации паров свинца $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ эффективность ионизации близка к 60% (рисунок 1).

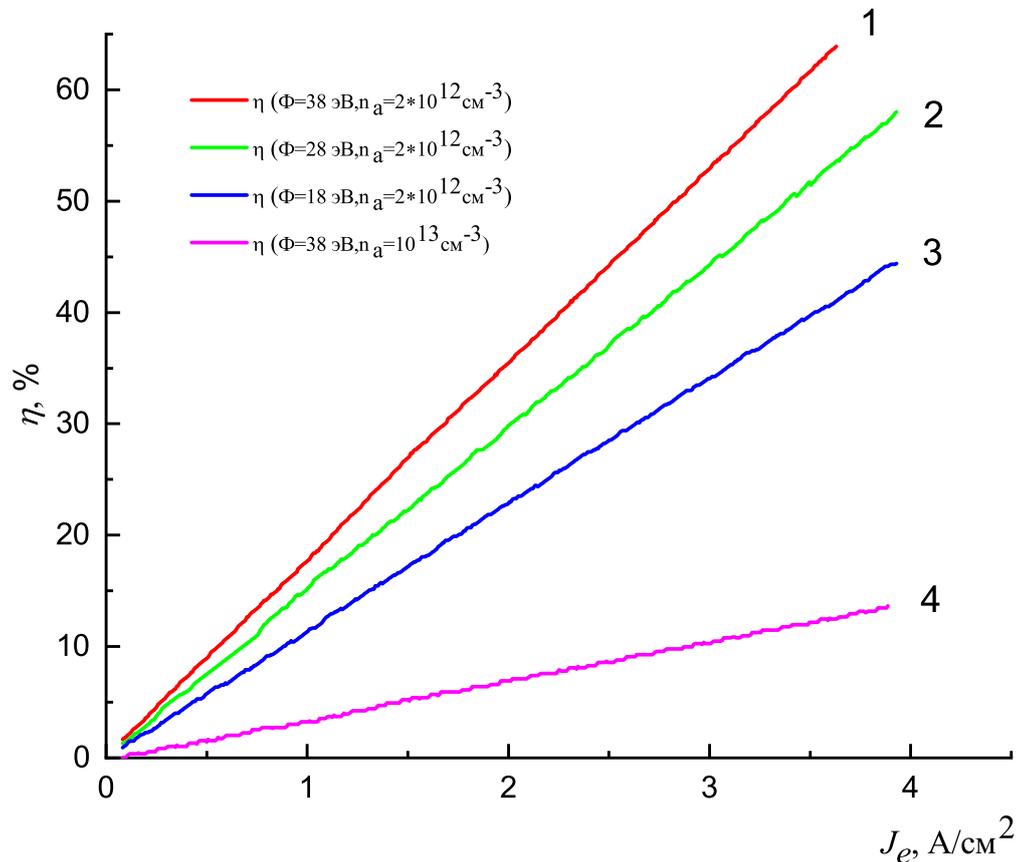


Рис. 1: Эффективность однократной ионизации в зависимости от плотности тока электронов J_e , разности потенциалов и концентрации атомов свинца. Начальная энергия электронов вблизи катода $\varepsilon_e = 8,4 \text{ эВ}$. Φ — энергия электронов вблизи анода. n_a — концентрация атомов свинца.

Эффективность однократной ионизации при $\Phi = 38 \text{ эВ}$ и $n_a = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Эффективность однократной ионизации при $\Phi = 28 \text{ эВ}$ и $n_a = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Эффективность однократной ионизации при $\Phi = 18 \text{ эВ}$ и $n_a = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Эффективность однократной ионизации при $\Phi = 38 \text{ эВ}$ и $n_a = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Основным результатом проведенного моделирования является демонстрация важности такого параметра как атом-электронное отношение. Инжекция дополнительных электронов приводит к росту эффективности ионизации паров плазмообразующего вещества в разрядном промежутке. Также приведенные результаты говорят о том, что для достижения наибольшей эффективности ионизации необходимо осуществлять контроль и управление скоростью испарения плазмообразующего вещества. Это подчеркивает необходимость создания двух независимых систем: блока ионизации и блока испарения.

В **третьей главе** приведено описание разработанного для апробации метода плазменной сепарации источника плазмы смеси модельных веществ (серебра и свинца) и результаты исследования характеристик формируемого ионизированного потока [5; 11].

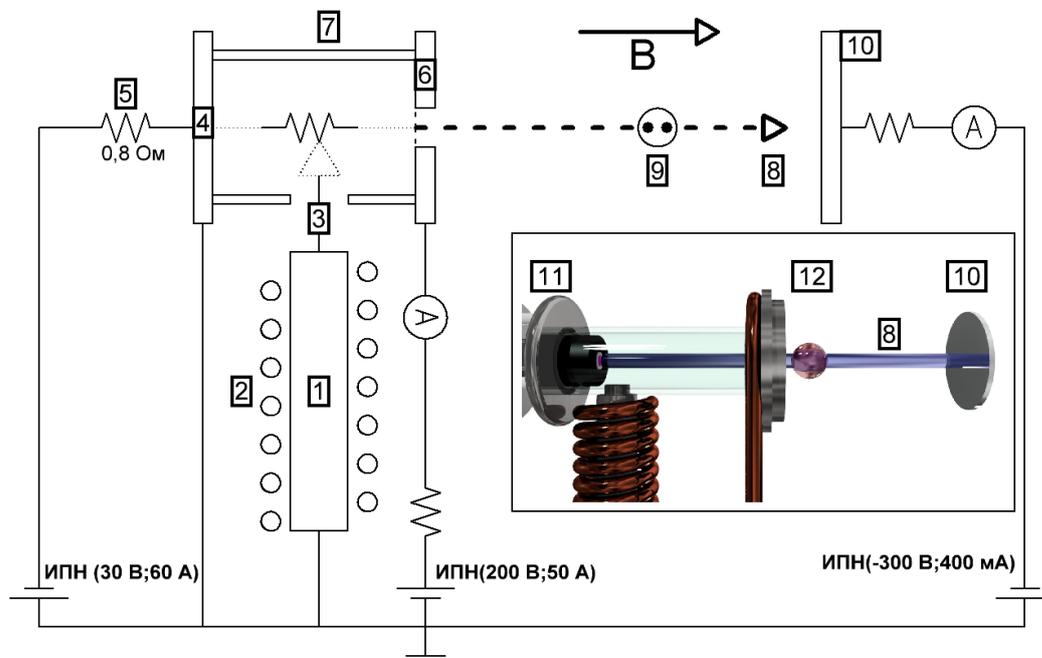


Рис. 2: Схема источника плазмы. 1 — тигель, 2 — индуктор, 3 — поток атомов свинца, 4 — термокатод (LaB_6), 5 — карбид кремния (нагреватель катода), 6 — полый анод, 7 — кварцевый защитный экран, 8 — формируемый поток плазмы, 9 — двойной зонд Ленгмюра, 10 — коллектор, 11 — 3D модель основных узлов источника, 12 — область анализа оптического спектра излучения плазмы.

Принципиальная схема источника плазмы и его 3D модель представлены на рисунке 2. Исследуемое модельное вещество или смесь помещались в тигель, который нагревался индукционно. Мощность генератора около 2,5 кВт (резонансная частота контура около 100 кГц). Объем тигля около 20 см³. В качестве термокатада использовался LaB_6 (диаметром 6 мм). Варьирование мощности накала термокатада позволило изменять количество электронов,

инжектируемых в разрядный промежуток, а варьирование мощности нагрева тигля количество инжектируемых атомов модельного вещества. В ходе экспериментов катодный узел был заземлен, а на охлаждаемом кольцевом аноде поддерживался потенциал до 200 В. Расстояние между катодом и анодом было 50 мм. Ток разряда ограничивался балластным сопротивлением. Для диагностики потока замагниченной плазмы в области за анодом устанавливался коллектор и двойной зонд Ленгмюра.

Были проведены измерения концентрации плазмы ($10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$), температуры электронов (1 – 7 эВ) и спектрального состава излучения плазменной струи вблизи анода (были установлены режимы, в которых не было обнаружено многократно ионизованных ионов). Максимальная плотность тока ионов, регистрируемая на коллекторе, находилась на уровне 100 мА/см^2 . Плотность тока разряда в экспериментах не превышала 15 А/см^2 . Средний заряд потока ионов, измеренный методом конденсационного зонда, в зависимости от режимов работы источника достигал значения до 1,3. Эксперименты проводились при давлении остаточных газов 10^{-5} Торр и магнитном поле 1,3 кГс.

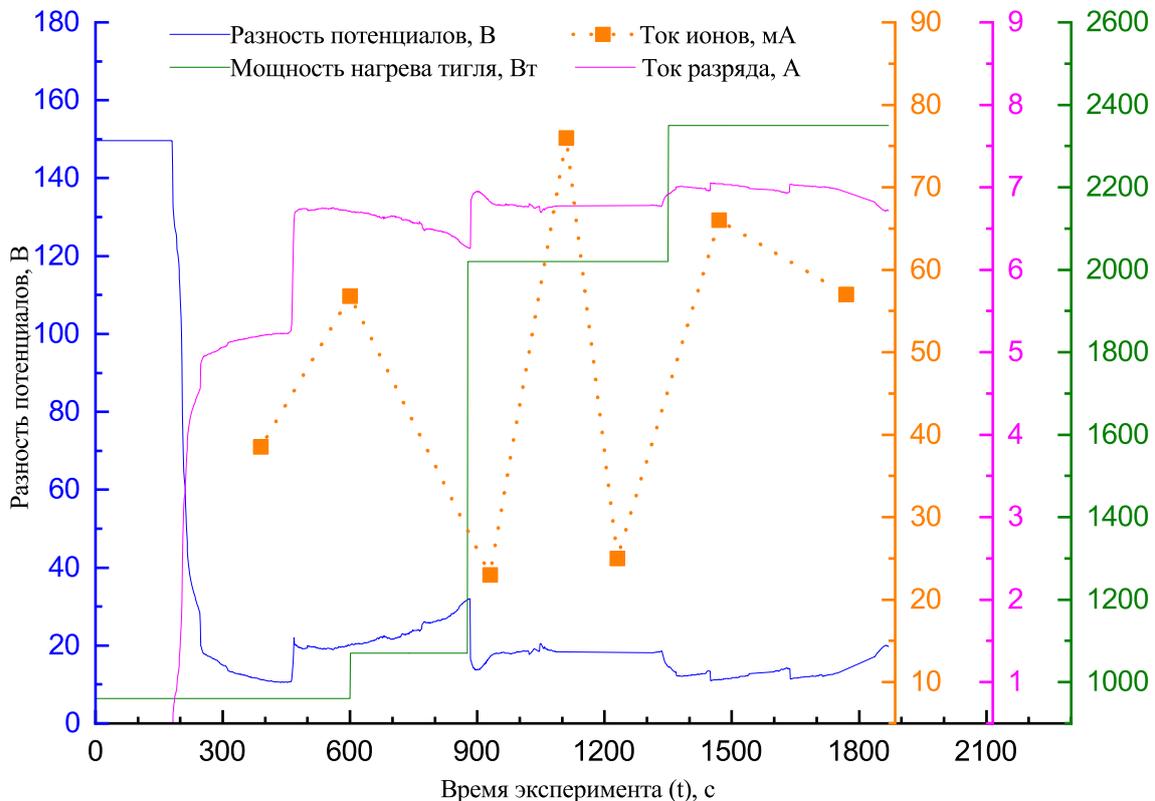


Рис. 3: Эксперимент со скачкообразным увеличением мощности нагрева тигля. Плазмообразующее вещество — смесь серебра и свинца. Увеличение разности потенциалов источника постоянного напряжения $t \approx 450$ с. Увеличение напряжения горения разряда за счет уменьшения концентрации пара $t \approx 450 - 900$ с. Управление напряжением горения разряда за счет термоэмиссии катода $t \approx 900 - 1400$ с.

При проведении серии экспериментов на смеси серебра и свинца было показано, что поддержание постоянной разности потенциалов в разрядном промежутке, несмотря на существенное различие в давлениях насыщенных паров модельных веществ, является возможным, за счет подбора алгоритма нагрева тигля, управления количеством инжектируемых электронов и напряжением источника постоянного напряжения. На рисунке 3 представлены результаты эксперимента, в котором нагрев смеси осуществлялся сложным образом. Скачкообразное увеличение напряжения разряда ($t \approx 450$ с) вызвано преднамеренным увеличением разности потенциалов на постоянном источнике напряжения, поддерживающем разряд. На следующем временном участке ($t \approx 450 - 900$ с) плавное увеличение разности потенциалов между катодом и анодом вызвано уменьшением концентрации паров свинца в разрядном промежутке. На 900 секунде эксперимента мощность подогрева была скачкообразно увеличена до 2 кВт, что привело к существенному снижению напряжения горения разряда. Далее ($t \approx 900 - 1400$ с) напряжение поддерживалось постоянным за счет управления мощностью нагрева термокатода (дополнительной инъекцией термоэлектронов).

Четвертая глава посвящена исследованию взаимного влияния потока плазмы свинца, инжектируемого вдоль силовых линий магнитного поля, и аргоновой плазмы отражательного разряда [12]. Инъекция вдоль силовых линий магнитного поля является одним из возможных путей ввода смеси разделяемых элементов, который приводит к сепарации [9] в плазмооптической концепции с потенциальной ямой [7; 8]. Формирование необходимого распределения электрического потенциала в буферной плазме при наличии магнитного поля является одной из важных задач для разрабатываемого метода плазменной сепарации.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4. Эксперименты по изучению взаимного влияния проводились в атмосфере аргона при давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Торр. Характерное значение магнитного поля составляло 1,3 кГс. Струя свинцовой плазмы генерировалась при помощи источника плазмы, ось которого размещалась на расстоянии около 17 см от оси отражательного разряда и была параллельна ей. Коллекторы размещались на расстоянии 54 см от полого анода и представляли собой систему из 5 электродов. Диаметр центрального коллектора 2 см, а внешний диаметр всей системы 4 см. Данная система была предназначена прежде всего для диагностики ионного тока, поэтому на электродах коллекторов поддерживался потенциал -50 В, заведомо позволяющий отсечь электронную компоненту потока плаз-

мы. Такое значение было выбрано в связи с тем, что согласно зондовым измерениям, температура электронов в условиях экспериментов не превышала 7 эВ, а характерное напряжение на разрядном промежутке источника плазмы в установившемся режиме принимало значение около 18 В. Измерения распределения электростатического потенциала плазмы выполнялись с помощью метода плавающего зонда, который мог перемещаться вдоль радиуса вакуумной камеры и располагался на расстоянии 34 см от анода источника плазмы.

Вначале в буферном газе инициировался отражательный разряд. Напряжение на торцевых электродах -1,2 кВ (ток разряда 450 мА). Затем включался источник свинцовой плазмы и выводился на стационарные параметры (напряжение между катодом и анодом 18 В при токе разряда 14 А). В результате формировалась суперпозиция аргоновой буферной плазмы (концентрация $\approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$) и вытекающего из источника потока свинцовой плазмы (концентрация $\approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Стоит отметить, что на внешней поверхности полого анода размещался диэлектрик. Его присутствие позволило уменьшить влияние анода на распределение электрического потенциала в плазменном объеме.

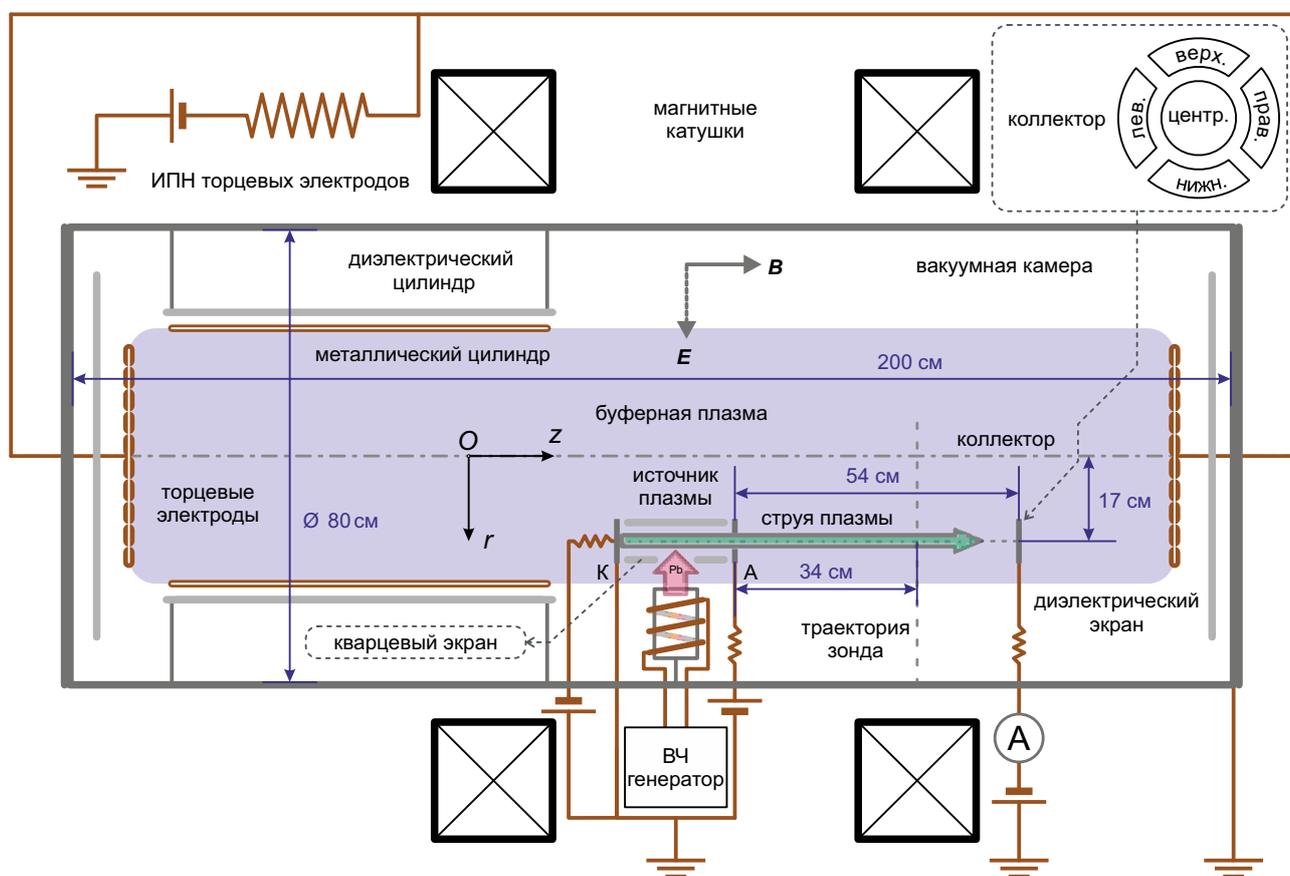


Рис. 4: Схема экспериментального стенда.

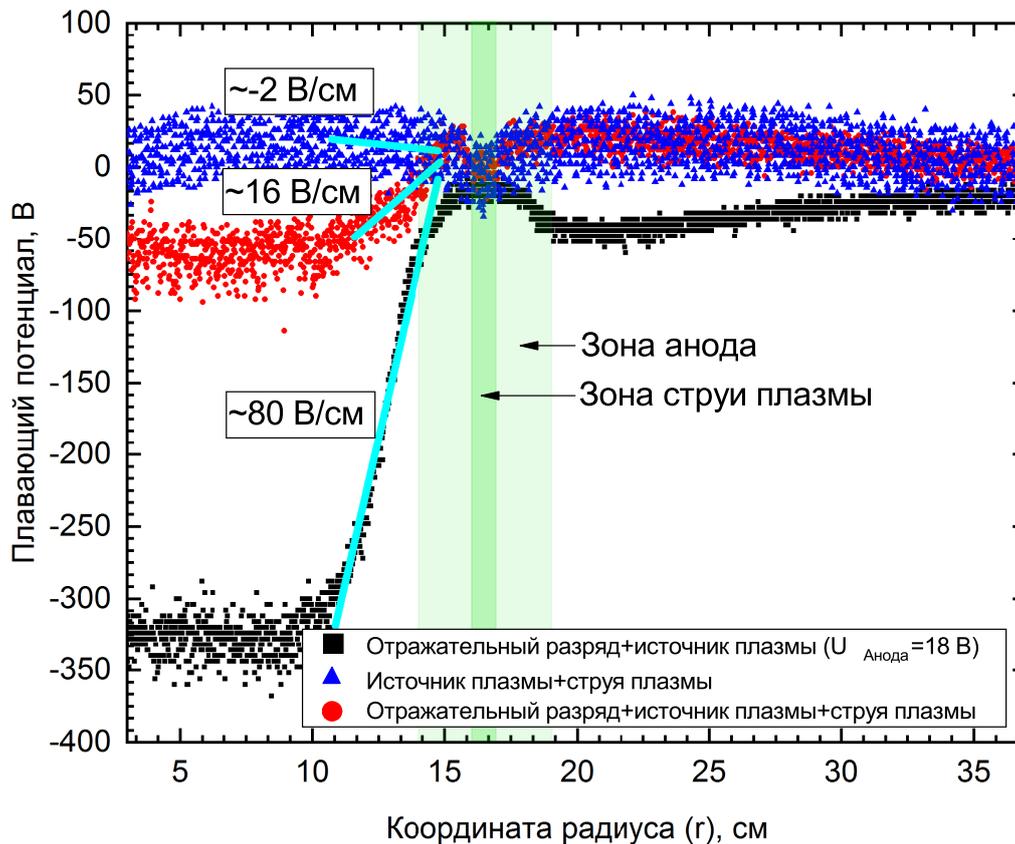


Рис. 5: Радиальное распределение электростатического потенциала при совместной работе отражательного разряда и источника плазмы ($r = 0$ совпадает с осью симметрии экспериментальной установки).

На рисунке 5 представлены результаты измерения радиального распределения электрического потенциала в плазменном объеме как для случая функционирования только отражательного разряда и только источника плазмы, так и для случая одновременного существования плазмы отражательного разряда и плазмы из источника. Из рисунка 5 видно, что поток свинцовой плазмы оказывает значительное влияние на распределение потенциала, причем вдоль оси источника плазмы воспроизводится потенциал катода, а напряженность электрического поля вблизи источника достигает значения около 16 В/см (см. рис. 5). При отключенном источнике плазмы характерное электрическое поле в объеме отражательного разряда составляло 80 В/см. Стоит отметить, что электрическое поле вблизи от оси источника в отсутствие отражательного разряда было около -2 В/см. Представленные данные получены в результате одиночного сканирования вдоль радиуса. Разброс значений потенциала связан с флуктуациями параметров исследуемого объекта. Стоит подчеркнуть, что измеренное усредненное значение профиля потенциала обладает хорошей воспроизводимостью.

В ходе исследований было показано, что электрического поля напря-

женностью 16 В/см достаточно для отклонения более 95% тока ионов струи плазмы (было отклонено 53 мА из 56 мА). В процессе инициации отражательного разряда и создания электрического поля вблизи струи свинцовой плазмы перераспределения тока между электродами коллекторного блока не происходило. Было отмечено синхронное уменьшение тока на каждом из электродов. 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 в объем, занимаемый буферной аргоновой плазмой отражательного разряда. При генерации струи свинцовой плазмы электрический потенциал искажается во всем объеме плазмы с замагниченными электронами, причем сам объем заметно превосходит по размерам габариты источника и диаметр плазменной струи.

В пятой главе представлены результаты исследования эффективности осаждения направленных потоков нейтралов свинца с тепловыми энергиями на различные подложки [4; 6]. Исследование этого параметра является важным для развиваемой концепции плазменной сепарации, так как эффективность сбора вещества влияет на производительность метода в целом.

Для исследования эффективности осаждения свинца на различные подложки была разработана схема эксперимента, суть которой заключается в том, что коллимированный поток пара, попадая в пространство между двумя плоскими дисками, спустя определённое число соударений конденсируется на поверхности одного из них (схема эксперимента представлена на рисунке 6).

Диаметр дисков должен быть много больше расстояния между ними и много больше диаметра входного отверстия. При этом, длина свободного пробега частиц пара должна быть много больше диаметра входного отверстия. Выполнение данных геометрических соотношений необходимо для того, чтобы пар мог многократно отражаться от поверхностей дисков, и напыление покрытий осуществлялось в молекулярном режиме. Из соотношения профилей покрытий на поверхности отраженного осаждения и поверхности прямого осаждения при помощи численной модели, основанной на методе Монте-Карло, был сделан вывод о значении эффективности конденсации.

Основными параметрами, изменение которых допускает модель, являются: вероятность конденсации при взаимодействии с поверхностью, угловая функция распределения вероятности переиспарения, радиус дисков и рассто-

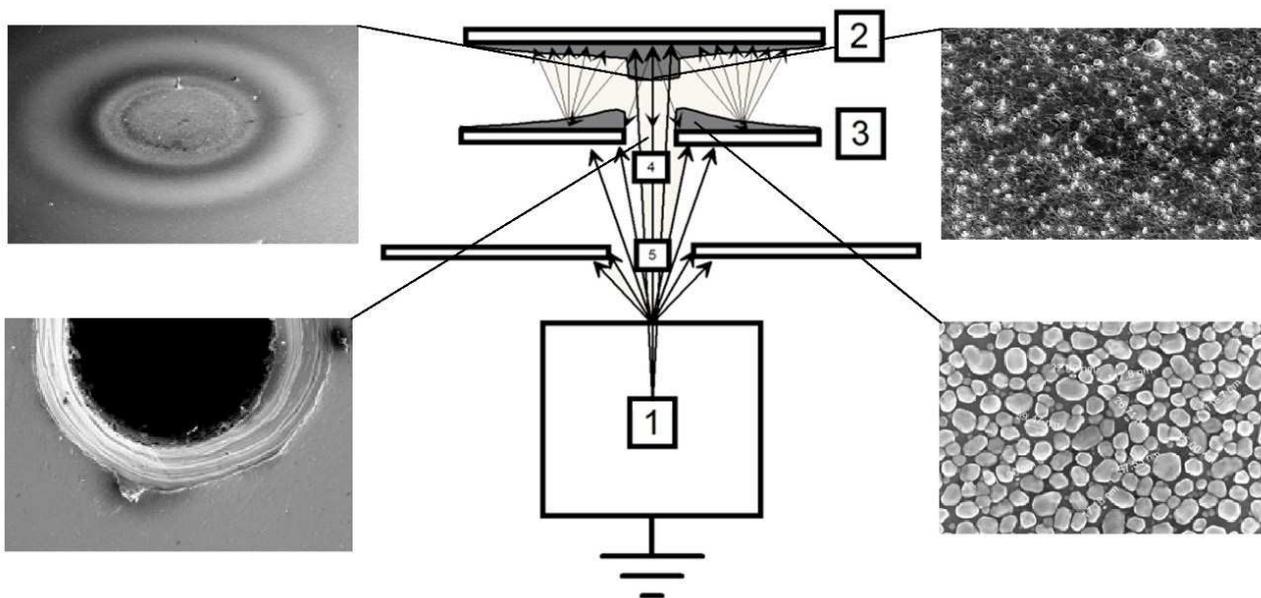


Рис. 6: Схема эксперимента: 1 — испаритель, 2 — исследуемый образец (поверхность прямого осаждения), 3 — исследуемый образец (поверхность отраженного осаждения), 4 и 5 — коллимационные отверстия.

яние между ними. Угловая функция распределения вероятности переиспарения и другие параметры в расчете подбирались так, чтобы результаты моделирования профилей пленок были наиболее близки к профилям пленок, полученным экспериментально. Наилучшее соответствие экспериментальных и численных данных наблюдалось при равновероятном испарении в телесный угол $\frac{2\pi}{3}$ вдоль нормали к поверхности осаждения.

Расчетная зависимость отношения толщины отраженного покрытия h_r (вблизи от входного отверстия) к толщине покрытия прямого напыления h_d от вероятности конденсации P при первом соударении (эффективность осаждения) хорошо аппроксимируется линейной функцией. Это позволяет получить формулу для оценки эффективности осаждения из отношения толщин покрытий на поверхности прямого и отраженного осаждения:

$$\frac{h_r}{h_d} = 0,082(1 - P) \quad (1)$$

Применение результатов моделирования для интерпретации полученных экспериментальных данных было затруднено неоднородностью толщины покрытий. Однако, вывод об эффективности осаждения был сделан из характерного размера образующихся агломераций и средних значений толщин плёнки. В экспериментах с нержавеющей сталью эффективность осаждения близка к 75% при средней температуре подложек во время эксперимента около 70°C, а в экспериментах с использованием подложек из углерода вероятность

конденсации была близка к 81% (при средней температуре подложек около 60°C).

Еще одной важной задачей для процесса плазменной сепарации является удаление осажденного вещества с поверхности коллекторов. Исследования адгезионных свойств покрытий свинца, нанесённых на дюралюминий Д16Т и нержавеющей сталь (Aisi 304), показали, что в обоих случаях связь элементов покрытия сильнее, чем связь покрытия с поверхностью. Отслоение плёнки на нержавеющей стали (Aisi 304) начинается при нагрузке 0,45-0,9 Н, а отслоение плёнки на стали Д16Т начинается при нагрузке 0,35-0,9 Н.

В заключении к диссертации сформулированы наиболее важные полученные результаты:

1. Разработан и создан источник плазмы для отработки метода плазменной сепарации ОЯТ, позволяющий инжектировать мультикомпонентный плазменный поток в буферную плазму с учетом создаваемого в ней электростатического поля.
2. Экспериментально получены плазменные струи свинца, серебра, а также их смеси, отвечающие следующим требованиям: концентрации плазмы в потоке $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$, отсутствие многократно ионизированных атомов, энергия ионов в потоке $\approx 20 \text{ эВ}$, плотность тока ионов до 100 мА/см^2 .
3. Выполнена экспериментальная проверка корректности численной модели, описывающей поведение разряда в парах свинца с накаливаемым катодом. Получено хорошее качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных данных, в частности показано, что при разности потенциалов между катодом и анодом около 40 В достигаются плотности тока ионов свинца до 1 мА/см^2 при эффективности ионизации около 1%. Дополнительные расчеты при помощи верифицированной модели показали возможность существенного увеличения эффективности ионизации вплоть до уровня нескольких десятков процентов (при концентрации паров до 10^{13} см^{-3} и плотности тока инжектируемых электронов до 4 А/см^2).
4. Получены новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в аргоновой плазме отражательного разряда (диаметр разрядного столба $\approx 40 \text{ см}$, концентрация плазмы $\approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$) при инъекции в ее объем плазменной струи свинца

(диаметр ≈ 1 см, концентрация плазмы $\approx 10^{12}$ см $^{-3}$). Установлено, что при заземленном катоде источника плазменная струя существенно изменяет распределение потенциала, уменьшая максимальное значение с -325 В до -70 В и характерное значение электрического поля с 80 В/см до 16 В/см.

5. Экспериментально показано, что использование дополнительного диэлектрического (либо изолированного металлического) экрана на внешней поверхности анода позволяет подавить искажение пространственного распределения электрического потенциала в плазме отражательного разряда, вызываемое источником плазменной струи свинца (электрическое поле вблизи струи остается неизменным и может достигать 80 В/см).
6. 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 была продемонстрирована возможность отклонения более 95% потока плазмы свинца от первоначального направления ввода.
7. Получены новые экспериментальные данные об эффективности осаждения направленных потоков нейтралов свинца с тепловыми энергиями. Проведенные эксперименты и предложенная расчетная модель позволили установить, что эффективность осаждения свинца на подложки из нержавеющей стали и углерода составила 75% и 81% при средних температурах подложек 70°C и 60°C, соответственно. Также были получены данные об адгезии покрытий, осажденных на подложки из нержавеющей стали и дюралюминия, и было показано, что отрыв нанесенной пленки происходит при 0,45-0,9 Н и 0,35-0,9 Н соответственно. Это, в свою очередь, позволяет организовать эффективное удаление вещества с поверхности коллекторов с помощью механического воздействия.

По совокупности полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о перспективности описанного способа генерации плазмы для задач экспериментальной отработки на модельных веществах метода плазменной сепарации ОЯТ.

Список литературы

Основные публикации по теме диссертации

1. Антонов Н. Н., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Самохин А. А., Смирнов В. П. // Журнал Технической Физики. — 2016. — Т. 86, вып. 2. — С. 23—29.
2. Antonov N. N., Gavrikov A. V., Samokhin A. A., Smirnov V. P. // Physics of Atomic nuclei. — 2016. — Vol. 79, no. 14. — P. 012165.
3. Antonov N. N., Bochkarev E., Gavrikov A. V., Samokhin A. A., Smirnov V. P. // 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. // 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. // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946. — P. 012171.
6. Антонов Н., Жабин С., Гавриков А., Смирнов В., Тимирханов Р. // Прикладная Физика. — 2016. — Т. 4. — С. 70—74.

Цитированная литература

7. Долголенко Д. А., Муромкин Ю. А. // Успехи физических наук. — 2017. — Т. 187. — С. 1071—1096.
8. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Самохин А. А., Смирнов В. П., Хомяков Ю. С. // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 11/12. — С. 944—951.
9. Gavrikov A. V., Sidorov V. S., Smirnov V. P., Tarakanov V. P. // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946, no. 1. — P. 012172.
10. Musa G. S., Ehrich H., Schuhmann J. // IEEE Transactions on Plasma Science. — 1997. — Vol. 25, no. 2. — P. 386—391.
11. Antonov N. N., Usmanov R. A., Liziakin G. D., Gavrikov A. V., Smirnov V. P. // Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases. — 2018. — P. 362—363.
12. Antonov N., Liziakin G., Usmanov R., Murzaev Y., Gavrikov A., Smirnov V. // IX International conference Plasma Physics and Plasma Technology. — 2018. — P. 331—334.

Антонов Николай Николаевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Формирование ионизированных потоков веществ для плазменного
разделения компонентов, моделирующих отработавшее ядерное топливо, и
исследование их распространения в буферной плазме со стационарным
электрическим полем

Подписано в печать: 23.10.2018

Тираж 100 экз. Заказ

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2