

На правах рукописи



Лизякин Геннадий Дмитриевич

**Создание управляемого стационарного
электрического поля в плазме
масс-сепаратора**

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: кандидата физико-математических наук,
доцент **Гавриков Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Юрий Григорьевич Калинин
НИЦ «Курчатовский институт»

кандидата физико-математических наук
Николай Сергеевич Климов
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Ведущая организация: **ИОФ РАН**

Защита состоится « 30 » мая 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,
расположенном по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2,
экспозиционный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН, на сайте
http://www.jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/ или по запросу на электронную
почту glizyakin@gmail.com

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью,
просьба выслать по вышеуказанному адресу.

Телефон для справок: 8(495)485-79-77.

И.о. ученого секретаря

диссертационного совета Д 002.110.02,

Л.М.

д.ф.-м.н.



Василяк

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2018

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований

В настоящее время одной из задач атомной энергетики является переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Переработка необходима для перехода к замкнутому топливному циклу с целью более полного вовлечения ресурсов топлива реакторов. Более полное вовлечение осуществляется за счет выделения продуктов распада урана из отработавшего топлива для повторного использования рефабрикованного топлива.

Кроме традиционно применяемых и вновь разрабатываемых химических методов переработки весьма многообещающими являются плазменные методы переработки ОЯТ [1]–[7]. Плазменные методы предполагают перевод конденсированного вещества ОЯТ в плазменное состояние и последующее разделение компонентов в электрических и магнитных полях.

Ключевыми преимуществами метода плазменной сепарации являются: работа с твердым и газообразным веществом ОЯТ, отсутствие дополнительных химических реагентов, нет увеличения объемов радиоактивных отходов (РАО), невозможно выделение оружейных материалов, потребность исключительно в электроэнергии. Кроме того, используя плазменные методы переработки ОЯТ, возможна реализация пристанционной переработки и рефабрикации топлива. Реализация пристанционной переработки резко сократит объем перевозок высокоактивных РАО и повысит безопасность и экологическую приемлемость атомной энергетики. Для пристанционной переработки необходимы технологии, отвечающие требованиям минимизации радиоактивных отходов и размеров оборудования.

Энергетические затраты на сепарацию ОЯТ в плазме зависят от приведенной цены ионов, учитывающей все затраты на преобразование вещества ОЯТ в плазму и разделение. По оценкам затраты составят доли процента от электрической мощности реактора, а цена иона 500 – 1000 эВ [1]. Ионный ток равновесия, при котором сравниваются скорости наработки и переработки ОЯТ для реактора с электрической мощностью 1 ГВт ~ 100 – 200 А. Приведенные оценки являются приемлемыми для атомных электростанций, так как потребляемая мощность может быть включена в расходы на собственные нужды станции. В особенности, это подходит для пристанционной переработки, где цена электричества существенно ниже отпускной.

Важнейшее отличие плазменного подхода от общепринятых электромагнитных способов разделения ионов в магнитном поле [8], состоит в том, что ионы сепарируемых элементов все время движутся в условиях компенсированного объемного заряда. При таком движении снимается ограничение на величину ионного тока и может быть достигнута производительность, необходимая для практического применения в промышленности.

Не смотря на то, что на сегодняшний день предложено большое число различных физических способов разделения вещества по массам с помощью плазмы все они находятся в стадии научных исследований, а не промышленного применения.

Одним из ключевых вопросов, для плазменных методов, базирующихся на применении масс-фильтра Окавы Т. [2], [9] и сепаратора Смирнова В.П., [7], [10] является создание заданного пространственного распределения электростатического потенциала в плазме с замагниченными электронами. В цилиндрической камере, заполненной плазмой и помещенной в магнитное поле параллельное ее оси, должно быть создано радиальное электрическое поле заданной конфигурации. Для этого применяются электроды, расположенные на торцах цилиндрической камеры. Возможность создания электрического поля в плазме существует благодаря различию подвижности электронов поперек и вдоль магнитного поля. К торцевым электродам прикладывается заданное стационарное распределение электрического потенциала, этот потенциал вдоль магнитных силовых линий распространяется вглубь плазмы. Возможность такого подхода была описана ранее, в частности в [11], [12]. Однако до сих пор практически отсутствуют экспериментальные работы, определяющие границы применимости подобного рассмотрения. Данная работа посвящена исследованию именно этого вопроса.

Цель диссертационной работы

Основной целью работы является экспериментальное исследование механизмов создания управляемого стационарного электрического поля погруженного в замагниченную плазму и ориентированного поперек линий магнитного поля.

Научная новизна

1. Разработан и создан экспериментальный блок установки плазменного масс-сепаратора для изучения и генерации электрических полей в плазме с замагниченными электронами.

2. Получены новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в плазменном столбе отражательного разряда со сложной геометрией катода. Размер разрядной ячейки 200×85 см, отношение диаметра анода к диаметру катода $d_a: d_c = 17 - 1.7$.
3. Найдены экспериментальные режимы отражательного разряда, при которых возможно создание в плазме пространственного распределения электростатического поля, необходимого для осуществления разделения компонентов (160 и 240 а.е.м.) отработавшего ядерного топлива.
4. Получены новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в замагниченной плазме высокочастотного разряда с погруженными в нее торцевыми электродами и градиентом потенциала порядка 10 В/см.

Анализ литературных данных показал, что проблема создания распределения электрического потенциала в плазме уже изучалась ранее. Существуют данные об исследованиях радиального профиля потенциалов в центробежных термоядерных ловушках с характерными полями в 0.3-10 кВ/см при полном перепаде напряжения 10-500 кВ [13]–[15]. Исследованы фундаментальные проблемы влияния потока плазмы с поперечным градиентом скорости (shear flow) на турбулентный транспорт частиц поперек магнитного поля [16], [17]. Характерный перепад напряжения в них составляет 200 В и величина электрических полей 10 В/см. Кроме того исследовано влияние радиального профиля электрического потенциала на удержание плазмы в газодинамической ловушке [18], [19]. В этих экспериментах эффективное удержание плазмы реализовалась при полном перепаде напряжения на торцевых электродах 150 В и максимальным значением электрического поля 25 В/см.

Несмотря на сходство настоящей работы с имеющимися на сегодняшний день, она обладает существенными отличиями, как условий эксперимента, так и их направленности. Эти отличия во многом обусловлены предполагаемым практическим применением плазменного сепаратора. Хотя в уже существующих работах радиальный профиль регистрировался, при этом не велось детального исследования влияния различных параметров на форму этого профиля. В настоящей работе исследуется влияние магнитного поля, давления газа, разрядного напряжения, формы и количества электродов на генерируемый профиль потенциала. Исследуется случай, когда плазма создается внешним безэлектродным ВЧ разрядом.

Обзор также выявил, что все исследованные устройства являются импульсными работающими в квазистационарном режиме с характерным временем импульса 1-10 мс. Таким образом, в этих исследования не учитываются различные особенности, которые могут проявиться при создании стационарного устройства. В частности, характерное время рекомбинации плазмы оказывается значительно больше импульса [20], [21]. В настоящей работе представлены исследования стационарного разряда.

Практическая значимость

Выполненные исследования продемонстрировали возможность создавать различные конфигурации электрических полей в плазме отражательного разряда, в частности реализована конфигурация, необходимая для метода плазменной переработки ОЯТ. При создании плазмы внешним источником ионизации показана возможность передачи потенциала электродов в плазменный объем. Данные исследования кроме фундаментального интереса, связанного с расширением представлений о физике плазмы отражательного разряда и, прежде всего, особенностях поведения потенциала плазмы в широком диапазоне параметров разряда, представляют интерес и для прикладных задач, связанных с необходимостью реализации в плазменном объеме профиля потенциала заданной конфигурации. Как уже отмечалось, последнее является крайне актуальным для вопросов плазменного разделения элементов различных масс, в том числе и для переработки ОЯТ и РАО.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальный блок установки плазменного масс-сепаратора для изучения и генерации электрических полей в плазме с замагниченными электронами.
2. Новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в плазменном столбе отражательного разряда со сложной геометрией катода. Размер разрядной ячейки 200×85 см, отношение диаметра анода к диаметру катода $d_a : d_c = 17 - 1.7$.
3. Режимы отражательного разряда, при которых возможно создание в плазме пространственного распределения электростатического поля, необходимого для осуществления разделения компонентов (160 и 240 а.е.м.) отработавшего ядерного топлива.
4. Новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в замагниченной плазме высокочастотного разряда с погруженными в нее торцевыми электродами и градиентом потенциала порядка 10 В/см.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: XXXIII International Conference On Phenomena In Ionized Gases (ICPIG), Estoril, Portugal. 9-14 July 2017; 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, October 2–7, 2016; XLII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС; г. Звенигород 9-13 февраля 2015; Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва, 16-21 февраля, 2015; 57 научная конференция МФТИ, Долгопрудный, ноябрь 2014; XXXI International Conference on Equations of State for Matter (EOS), Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 1-6 March, 2016; The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), Belek, Turkey, 24-28 May, 2015;

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [A1,A2,A3,A4,A5], 10 публикаций в сборниках трудов конференций [A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10].

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 результаты получены при непосредственном участии автора.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 100 страниц, включая 52 рисунка и 8 таблиц. Библиография включает 71 наименование на 8 страницах.

Благодарности

Автор искренне признателен своему научному руководителю к.ф.-м.н. Гаврикову А.В. за постановку задач и постоянное внимание к работе. Автор выражает благодарность коллеге-экспериментатору и другу Усманову Р.А. за искреннее участие и помощь при проведении экспериментов, Антонову Н.Н., к.ф.-м.н. Вороне Н.А., к.ф.-м.н. Тимирханову Р.А., Мурзаеву Я.А., за полезные обсуждения практические советы, помощь в проведении экспериментов и создание экспериментального стенда. Отдельно Автор благодарен Смирнову В.П. за создание условий благоприятствующих проведению всей работы.

Содержание работы

Во введении дается краткое обоснование, научной новизны и практической значимости задач, рассматриваемых в работе, формулируются цели работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава имеет обзорный характер. В ней представлены существующие методики определения электрического поля в плазме отражательного разряда. Характерной особенностью этих методик является то, что они работают при наличии магнитного поля. Также представлен обзор работ, посвященных исследованию аксиальных плазменных систем с магнитным полем и радиальным электрическим полем, созданным торцевыми электродами.

В **разделе 1.1** представлен обзор методов исследования электрических полей в скрещенных $E \times B$ полях. Рассмотрены методы: плавающий зонд, термозонд, анализ энергий ионов, вылетающих через отверстие в катоде, электронное зондирование плазмы, зондирование плазмы пучком тяжелых ионов при энергии зондирующего пучка E_i сопоставимой с потенциалом плазмы, то есть $E_i \approx eV_p$, спектральный метод, основанный на эффекте Штарка. Также определить электрическое поле возможно по скорости вращения плазмы. Скорость вращения исследуется по доплеровскому уширению спектральной линии, анализу нейтральных атомов перезарядки, зондом Маха, корреляцией сигналов с двух зондов разнесенных в пространстве, измерение флуктуаций на двух полуцилиндрах анода отражательного разряда.

В **разделе 1.2** представлен обзор работ, в которых применялись торцевые электроды в аксиальных системах с радиальным электрическим полем. Представлены данные об исследованиях пространственного распределения радиального профиля потенциала плазмы в центробежных термоядерных ловушках с характерными полями 0.3-10 кВ/см при полном перепаде напряжения 10-500 кВ [13], [14], [22]. Также приведены данные об исследованиях влияния радиального профиля электрического потенциала на удержание плазмы в газодинамической ловушке [18]. В этих экспериментах эффективное удержание плазмы реализовалась при полном перепаде напряжения на торцевых электродах 150 В и максимальным значением электрического поля 25 В/см. Кроме того приводятся данные об исследовании влияния потока плазмы с поперечным градиентом скорости (shear flow) на турбулентный транспорт частиц поперек магнитного поля [20]. В них отмечается, что при наличии потенциала смещения на торцевых электродах

выше некоторого значения меняется характер диффузии поперек магнитного поля. Если без смещения радиальные потери частиц скорее описывались диффузией Бома, то при наложении азимутального вращения они стали практически классическими.

В **разделе 1.3** сформулированы выводы к главе 1. Из представленного обзора методик измерений потенциала плазмы в $E \times B$ полях видно, что на сегодняшний день их существует достаточно много. Однако не все из представленных методов применимы при исследованиях на плазменном сепараторе. В итоге учитывая преимущества и недостатки каждого из методов, а также большой размер создаваемой установки был выбран зондовый метод диагностики.

Обзор устройств использующих торцевые электроды для создания радиального электрического поля в замагниченной плазме показал, что много различных аспектов этой темы хорошо изучены. В частности исследованы вопросы создания открытых ловушек с высокими энергиями ионов в разряде со скрещенными полями. Исследованы вопросы влияния азимутально вращения плазмы в скрещенных полях на удержание высокотемпературной плазмы. Также продолжают исследование влияние азимутального вращения на транспорт плазмы поперек магнитного поля для плотной и разреженной низкотемпературной плазмы. Однако, все исследованные устройства являются импульсными работающими в квазистационарном режиме с характерным временем импульса 1-10 мс. Таким образом, в этих исследованиях не учитываются различные особенности, которые могут проявиться при создании стационарного устройства. В частности, характерное время рекомбинации плазмы оказывается значительно больше импульса [20], [21].

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки (рис. 1). Установка состоит из вакуумной камеры с возможностью секционного наращивания размеров установки (**раздел 2.1**), системы генерации магнитного поля способной создавать магнитное поле на оси камеры вплоть до 0,2 Тл отклонение величины магнитного поля на расстоянии до 30 см от оси соленоида не превышает 10% от среднего значения поля на оси (**раздел 2.2**), системы генерации буферной плазмы с возможностью передачи в плазму мощности до 40 кВт (**раздел 2.3**), системы торцевых электродов различных конфигураций (**раздел 2.4**).

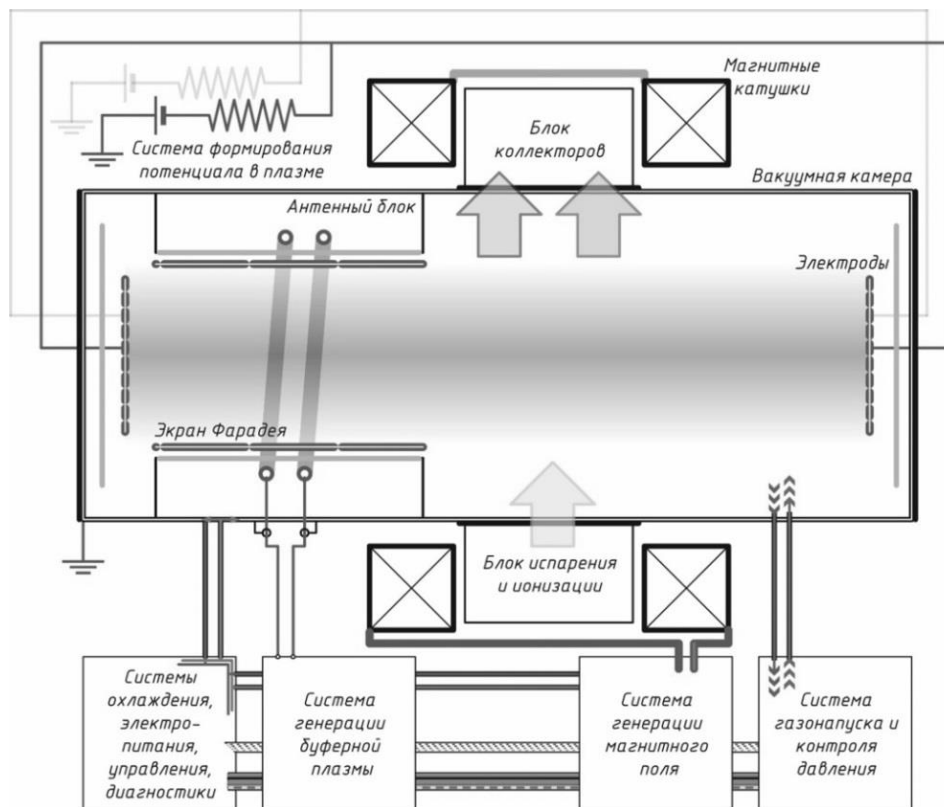


Рис. 1 Схема экспериментальной установки.

Важной частью этой установки является система торцевых электродов. Реализовано три типа такой системы (рис. 2). Все три типа системы размещаются на торцевых фланцах вакуумной камеры и обеспечивают эргономичность в сборке, обслуживании и эксплуатации системы. Электроды имеют непосредственный контакт с буферной плазмой. Первый тип системы предназначен для исследования конфигураций электрических полей в широком диапазоне геометрических параметров. Он предусматривает возможность создания несимметричных профилей электрического потенциала. Электроды такой системы являются большое число (до 200 штук) электрически изолированных отдельных элементов, питание которых обеспечивается через отдельные вакуумные вводы электричества. Такое решение позволяет изменять геометрию электрических полей без разгерметизации вакуумной камеры. Второй тип система торцевых электродов предназначен для работы в плотной плазме под воздействием больших температурных нагрузок. Торцевой изолятор в такой системе выполнен из жаропрочной стеклокерамики (до 750°C), а электроды обеспечены водяным охлаждением. Третий тип электродной системы исключает контакт плазмы с торцевым изолятором. Электроды в такой системе имеют форму усеченного конуса. Конусность системы равна 2 и подобрана таким образом, чтобы ни одна линия магнитного поля не опиралась

на торцевой изолятор или заземленную часть камеры. В разделе 2.5 сформулированы выводы ко второй главе.



Рис. 2. Торцевые электроды.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию распределения электростатического потенциала плазмы в отражательном разряде. Эксперименты проводились в широком диапазоне значения таких параметров как магнитное поля 0-0,2 Тл, давление 1-200 мТорр, разрядное напряжение 0-2 кВ. В **разделе 3.1** описана принципиальная схема эксперимента. В **разделе 3.2** описана методика измерения электрического потенциала плазмы с помощью метода плавающего зонда. В **разделе 3.3** определен характер влияния параметров разряда на пространственное распределение потенциала плазмы. В **разделе 3.3.1** исследовано влияние давления, магнитного поля, и разрядного напряжения на потенциал плазмы. В этом разделе проводились эксперименты с катодами из нержавеющей стали диаметром 55 мм. С ростом магнитного поля потенциал плазменного столба растет линейно и при 200 мТл достигает 180 В. С ростом разрядного напряжения, наблюдается изменение характера зависимости. В диапазоне 500-700 В потенциал меняется линейно, в диапазоне 600-1200 В квадратично, а в диапазоне 1200-1800 В от напряжения не зависит. Показано, что зависимость потенциала плазмы на оси разряда от давления имеет два максимума, положение которых, определяется магнитным полем. Эти зависимости получены для 200 и 40 мТл.

В **разделе 3.3.2** рассмотрены различные геометрии электродов (рис. 3): осесимметричные конфигурации, состоящие из круговых катодов диаметром 55 и 295 мм, кольцевые электроды со средними диаметром 265 и 490 мм, комбинация из двух кольцевых электродов, а также асимметричная

конфигурация, состоящая из кругового катода диаметром 55 мм сдвинутого на 130 мм от оси разряда. Эксперимент с ассиметричным катодом показал, что невозможно увеличить градиент электрического потенциала простым перемещением катода по поверхности торца. Это означает, что одним из важных параметров, определяющих максимальное значение потенциала плазменного столба, является кратчайшее расстояние между анодом и катодом поперек магнитного поля. Также важным результатом оказалось, что использование одновременно двух пар вложенных друг в друга кольцевых электродов, при подачи на них одинакового потенциала 1 кВ ($P = 4$ мТорр, $B = 200$ мТл), приводит к увеличению потенциала плазмы на оси разряда по сравнению с потенциалом, приобретаемым плазмой разряда при использовании каждой пары колец по отдельности.

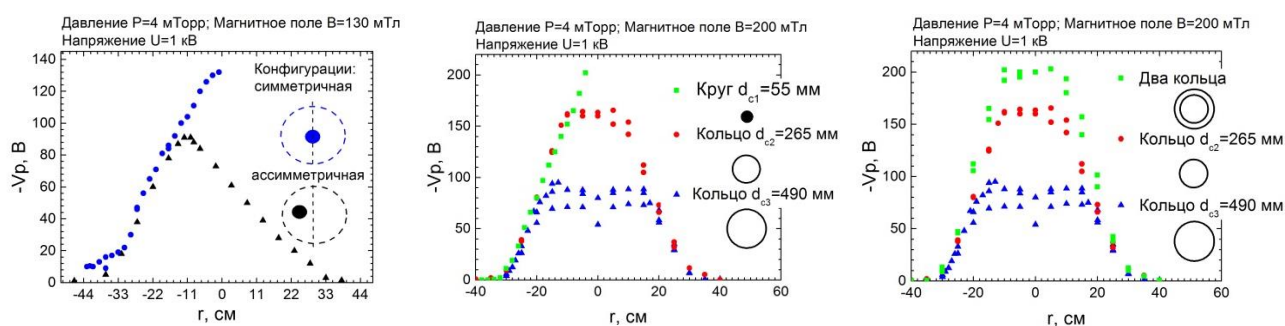


Рис. 3. Радиальное распределение потенциала плазмы в отражательном разряде с различными катодами.

Изучен эффект увеличения потенциала плазмы с увеличением размера катода. Так при давлении 1 мТорр для кругового катода из нержавеющей стали с диаметром 55 мм потенциал плазмы на оси разряда не превышает 350 В, а для катода диаметром 295 мм не превышает 400 В. Показано, что материал катода оказывает значительное влияние на потенциал плазмы. На катоде из алюминия с диаметром 295 мм потенциал плазменного столба достигал 800 В.

В работе [10] рассчитана конфигурация электрических и магнитных полей необходимая для осуществления разделения компонентов (160 и 240 а.е.м.) отработавшего ядерного топлива. В разделе 3.3.3 используя данные, полученные в этой главе, о зависимостях пространственного распределения потенциала плазмы от различных параметров удалось реализовать экспериментальные условия, при которых потенциал плазмы отражательного разряда распределен схожим образом (рис. 4). Использовались следующие параметры: давление 4 мТорр, магнитное поле 200 мТл, ток разряда 370 мА,

напряжение на разрядном промежутке 700 В, материал катода – алюминий, форма катода – круг диаметром 295 мм.

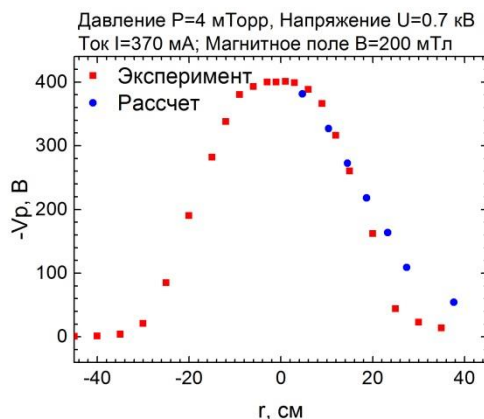


Рис. 4. Сопоставление экспериментально полученного радиального распределения потенциала и расчетного потенциала, необходимого для реализации метода плазменной сепарации ОЯТ.

В **разделе 3.4** даны комментарии к полученным результатам. В **разделе 3.5** сформулированы выводы к третьей главе. Выполненные исследования показали, что для задач, когда необходимо получить заданное распределение электростатического потенциала в гелиевой плазме в ряде случаев его можно реализовать в отражательном разряде. Для этого стоит работать в диапазоне давлений 2-10 мТорр, при этих давлениях амплитуда колебаний потенциала мала. Для достижения максимальных значений потенциала целесообразно использовать катоды с большой площадью. Важным параметром является расстояние между анодом и катодом – для кольцевого электрода, чем это расстояние меньше, тем меньше электростатический потенциал, воспроизводимый в плазменном объеме.

В **четвертой главе** исследована возможность создания электрического поля в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда с помощью торцевых электродов. ВЧ разряд генерировался на частоте ~5 МГц в аргоне. Поглощенная плазмой ВЧ мощность лежала в диапазоне 0,5-1,5 кВт. При магнитном поле 65 мТл.

В **разделе 4.1** описана принципиальная схема эксперимента. Она в значительной степени совпадает с той, которая была описана в третьей главе, однако добавился важный элемент, это дополнительный объем в камере, в котором размещался индуктор высокочастотного поля. В **разделе 4.2** представлена конструкция двойного зонда и электрическая схема зонда оборудованного каскадом резонансных фильтров пробок и фильтром

подавления синфазной наводки для компенсации высокочастотных искажений зондовой характеристики. В разделе 4.3 описана методика эксперимента.

В разделе 4.4 исследована возможность создания электрического поля в плазме ВЧ разряда с помощью торцевых электродов. Изучены две конфигурации электродов, круговые электроды с диаметрами 55 и 450 мм. Показано, что электроды диаметром 55 мм при давлении 5 мТорр и магнитном поле в центре камеры 65 мТл не оказывают влияния на потенциал плазмы в исследуемом диапазоне напряжений. Показано, что круговые электроды с диаметром 450 мм в тех же условиях влияют на потенциал плазмы.

Выявлено существование двух режимов функционирования разряда. Режим 1 существует при напряжениях на электродах 0...-30 В и током насыщения 2.5 А. В этом режиме с изменением напряжения на электродах потенциал плавающего зонда также изменяется и при -30 В достигает -28 В. При напряжении более отрицательных (менее -30 В) параметры ВЧ разряда резко изменяются и разряд переходит во второй режим. Режим 2 существует при напряжении на электродах -50...-200 В. При переходе во второй режим ток на электроды уменьшается в 4-5 раз. Потенциал плавающего зонда достигает -70 В (рис. 5), однако при дальнейшем уменьшении напряжения на электродах он остается неизменным. При переходе между режимами также изменяется и распределение концентрации плазмы и температуры электронов (рис. 6). Во втором режиме максимум на профиле концентрации уменьшается в 3 раза, однако на оси разряда концентрация увеличивается, то есть плазма в большей степени начинает проникать к оси. Также при переходе увеличивается температура электронов находящихся в приосевой плазме.

В разделе 4.5 сформулированы выводы к четвертой главе. Данное исследование подтверждает возможность создания в плазменном объеме электрического поля с характерным значением 10 В/см, а также позволяет наметить шаги, необходимые для создания в плазме пространственного распределения потенциала, требуемого для реализации метода плазменной сепарации ОЯТ.

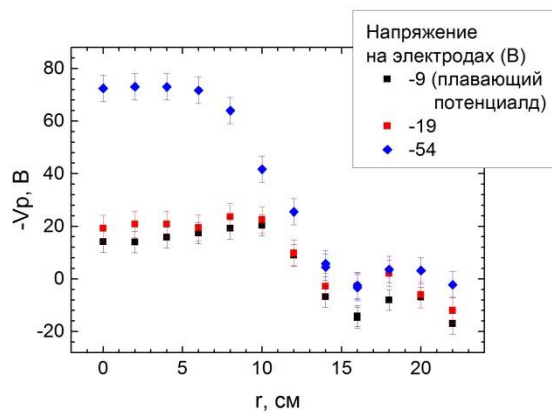


Рис. 5. Распределение потенциала плазмы вдоль радиуса.

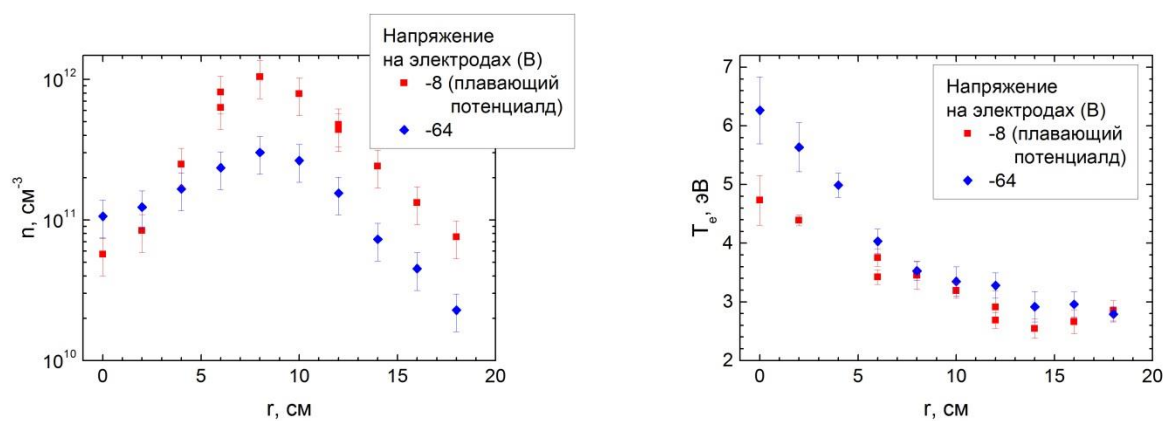


Рис. 6. Распределение концентрации плазмы (а) и температуры электронов вдоль радиуса.

Заключение

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию механизмов создания управляемого стационарного электрического поля погруженного в замагниченную плазму масс-сепаратора и ориентированного поперек линий магнитного поля.

В диссертации получены следующие основные результаты:

- Разработан и создан экспериментальный блок установки плазменного масс-сепаратора для изучения и генерации электрических полей в плазме с замагниченными электронами.
- Получены новые экспериментальные данные о пространственном распределении электрического потенциала в плазменном столбе отражательного разряда со сложной геометрией катодов в широком диапазоне значения таких параметров как магнитное поле 0-0,2 Тл, давление 1-200 мТорр, разрядное напряжение 0-2 кВ. Размер разрядной ячейки 200 × 85 см, отношение диаметра анода к диаметру катода $d_a: d_c = 17 - 1.7$.
- Изучен эффект увеличения потенциала плазмы с ростом радиуса катода. При давлении 1 мТорр для кругового катода из нержавеющей стали с диаметром 55 мм потенциал плазмы на оси разряда не превышает 350 В, а для катода с диаметром 295 мм не превышает 400 В.
- Показано, что материал катода может оказывать значительное влияние на потенциал плазмы. На катоде из алюминия с диаметром 295 мм потенциал плазменного столба достигал 800 В.
- Найдены экспериментальные режимы отражательного разряда, при которых возможно создание в плазме пространственного распределения электростатического поля, необходимого для осуществления разделения компонентов (160 и 240 а.е.м.) обработавшего ядерного топлива.
- Исследована возможность создания электрического поля в плазме высокочастотного разряда с помощью торцевых электродов. При магнитном поле 65 мТл выявлено существование двух режимов функционирования разряда. Режим 1 существует при напряжениях на электродах 0...-30 В и током насыщения 2.5 А. Режим 2 существует при напряжениях на электродах -50...-200 В. При переходе во второй режим ток на электроды уменьшается в 4-5 раз.

Список публикаций

- A.1. Liziakin G., Gavrikov A., Usmanov R., Timirkhanov R., Smirnov V. Electric potential profile created by end electrodes in a magnetized rf discharge plasma // AIP Advances. 2017. Vol. 7, no. 12, P. 125108.
- A.2. Liziakin G.D., Gavrikov A.V., Murzaev Y.A., Usmanov R.A., Smirnov V.P. Parameters influencing plasma column potential in a reflex discharge // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23, no. 12, Pp. 123502.
- A.3. Samokhin A., Gavrikov A., Liziakin G., Usmanov R., Smirnov V. Experiment and Numerical Simulation of Peculiarities in the Development of Helium DC Discharge in Reflex Geometry // Plasma and Fusion Research. 2016. Vol. 11. P. 1401116.
- A.4. Liziakin G., Usmanov R. Current-voltage characteristics of the high pressure reflex discharge in helium // Physics Procedia. 2015. Vol 71. Pp. 138-141.
- A.5. Liziakin G.D., Gavrikov A.V., Usmanov R.A., Smirnov V.P. Propagation of the end-face electrodes potential in the plasma volume of rf discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 946. P. 012173.
- A.6. Liziakin G., Gavrikov A., Usmanov R., Smirnov V. Formation of electrical potential profile in DC reflex discharge // Proceedings of the XXXIII International Conference On Phenomena In Ionized Gases. Estoril, Portugal. 2017. P. 106.
- A.7. Liziakin G.D., Gavrikov A.V., Usmanov R.A., Smirnov V.P. The propagation of the electrical potential of the butt-end electrodes in the radiofrequency discharge plasma volume// XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Book of Abstracts. Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. 2017. P. 422.
- A.8. Мурзаев Я.А, Лизякин Г.Д., Гавриков А.В., Смирнов В.П. «Профиль потенциала плазмы в отражательном разряде с секционными катодами» // 60-ая Научная конференция МФТИ. М. МФТИ. 2017.
- A.9. Liziakin G.D. Gavrikov A.V. Usmanov R.A. Smirnov V.P. Measurement Of The Radial Field Distribution In A Penning Discharge By Isolated Probe // 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Tomsk, Russia. 2016. P 180.

- A.10. Liziakin G.D. Gavrikov A.V. Usmanov R.A. Smirnov V.P. The parameters affecting the potential of the plasma column in the reflex discharge // XXXI International Conference on Equations of State for Matter. Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 2016. P.373.
- A.11. Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Усманов Р.А., Самохин А.А., Смирнов В.П. Зависимость радиального профиля потенциала от величины давления и магнитного поля в отражательном разряде большого размера // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Сборник тезисов докладов. Звенигород. 2015. С. 208.
- A.12. Liziakin G., Gavrikov A., Smirnov V., Usmanov R., Samokhin A. The sag of the potential in low pressure reflex discharge// The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science. Belek, Turkey. 2015. P. 265.
- A.13. Мурзаев. Я.А., Лизякин. Г.Д., Гавриков А.В. Расчет и измерение магнитного поля катушек Гельмгольца. Вычисление траекторий заряженных частиц в цифровой модели плазменного сепаратора. // Тезисы 59-й научной конференции МФТИ. М: МФТИ. 2016.
- A.14. Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Смирнов В.П., Усманов Р.А. Провисание потенциала на оси отражательного разряда в гелии // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. Аннотации докладов. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. Т. 2. С. 146.
- A.15. Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Смирнов В.П., Усманов Р.А. Вольт-амперная характеристика газового разряда постоянного тока в аксиальном магнитном поле. Влияние давления газа в камере на радиальный профиль распределения потенциала // Труды 57-й научной конференции МФТИ. Проблемы современной физики. М: МФТИ. 2014. С. 109.

Список использованной литературы

- [1] V. A. Zhil'tsov *et al.*, "Plasma separation of the elements applied to nuclear materials handling," *At. Energy*, vol. 101, no. 4, pp. 755–759, 2006.
- [2] T. Ohkawa and R. L. Miller, "Band gap ion mass filter," *Phys. Plasmas*, vol. 9, no. 12, pp. 5116–5120, 2002.
- [3] R. Freeman *et al.*, "Archimedes plasma mass filter," in *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 694, no. 1, pp. 403–410.
- [4] V. L. Paperny, V. I. Krasov, N. V. Lebedev, and N. V. Astrakchantsev, "Mass separation of a multi-component plasma flow travelling through a magnetic transport system," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 20, no. 3, p. 35005, 2011.
- [5] V. M. Bardakov, S. D. Ivanov, and N. A. Strokin, "Advances and problems in plasma-optical mass-separation," *Phys. Plasmas*, vol. 21, no. 3, p. 33505, 2014.
- [6] Y. V. Kovtun *et al.*, "Study of the parameters of hydrogen-titanium plasma in a pulsed reflective discharge," *Plasma Phys. Reports*, vol. 36, no. 12, pp. 1065–1071, 2010.
- [7] N. A. Vorona, A. V. Gavrikov, A. A. Samokhin, V. P. Smirnov, and Y. S. Khomyakov, "On the Possibility of Reprocessing Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste by Plasma Methods," *Phys. At. Nucl.*, vol. 78, no. 14, pp. 1–7, 2015.
- [8] A. J. Dempster, "A new method of positive ray analysis," *Phys. Rev.*, vol. 11, no. 4, p. 316, 1918.
- [9] B. P. Cluggish *et al.*, "Density profile control in a large diameter, helicon plasma," *Phys. Plasmas*, vol. 12, no. 5, p. 57101, 2005.
- [10] V. P. Smirnov, A. A. Samokhin, N. A. Vorona, and A. V. Gavrikov, "Study of charged particle motion in fields of different configurations for developing the concept of plasma separation of spent nuclear fuel," *Plasma Phys. Reports*, vol. 39, no. 6, pp. 456–466, 2013.
- [11] M. N. Rosenbluth and A. Simon, "Finite Larmor Radius Equations with Nonuniform Electric Fields and Velocities," *Phys. Fluids*, vol. 8, no. 7, pp. 1300–1322, 1965.
- [12] A. I. Morozov, *Introduction to Plasma Dynamics*. CRC Press, 2012.
- [13] С. Г. Константинов, О. К. Мыскин, А. Ф. Сорокин, and Ф. А. Цельник, "Разреженная вращающаяся плазма в ловушке с магнитными пробками," *ЖТФ*, vol. XLI, no. 12, pp. 2527–2533, 1971.
- [14] В. Н. Бочаров *et al.*, "О равновесном состоянии вращающейся плазмы в зеркальной ловушке," *Физика Плазмы*, vol. 4, no. 3, pp. 488–491, 1978.
- [15] A. A. Bekhtenev, V. I. Volosov, V. E. Pal'chikov, M. S. Pekker, and Y. Yudin,

- “Problems of a thermonuclear reactor with a rotating plasma,” *Nucl. Fusion*, vol. 20, no. 5, pp. 579–598, 1980.
- [16] T. A. Carter and J. E. Maggs, “Modifications of turbulence and turbulent transport associated with a bias-induced confinement transition in the Large Plasma Device,” *Phys. Plasmas*, vol. 16, no. 1, p. 12304, 2009.
- [17] D. A. Schaffner *et al.*, “Modification of turbulent transport with continuous variation of flow shear in the large plasma device,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, no. 13, p. 135002, 2012.
- [18] Е. И. Солдаткина, П. А. Багрянский, and А. Л. Соломахин, “Влияние радиального профиля электрического потенциала на удержание двухкомпонентной плазмы с высоким бета в газодинамической ловушке,” *Физика плазмы*, vol. 34, no. 4, pp. 291–296, 2008.
- [19] A. D. Beklemishev, P. A. Bagryansky, M. S. Chaschin, and E. I. Soldatkina, “Vortex confinement of plasmas in symmetric mirror traps,” *Fusion Sci. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 351–360, 2010.
- [20] J. E. Maggs, T. A. Carter, and R. J. Taylor, “Transition from Bohm to classical diffusion due to edge rotation of a cylindrical plasma,” *Phys. Plasmas*, vol. 14, no. 5, p. 52507, 2007.
- [21] D. R. Bates, A. E. Kingston, and R. W. P. McWhirter, “Recombination between electrons and atomic ions. I. Optically thin plasmas,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, pp. 297–312, 1962.
- [22] G. F. Abdrashitov, A. V. Beloborodov, V. I. Volosov, V. V. Kubarev, Y. S. Popov, and Y. N. Yudin, “Hot rotating plasma in the PSP-2 experiment,” *Nucl. Fusion*, vol. 31, no. 7, p. 1275, 1991.

Лизякин Геннадий Дмитриевич
**Создание управляемого стационарного электрического поля
в плазме масс-сепаратора**

Автореферат

Подписано в печать	22.03.2018	Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

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