

“УТВЕРЖДАЮ”

ВРИО Директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук,
член-корреспондент РАН



С.В. Гарнов

26 апреля 2018 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Лизякина Геннадия Дмитриевича

«Создание управляемого стационарного электрического поля
в плазме масс-сепаратора», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.08 – физика плазмы

Разделение компонентов отработавшего ядерного топлива с помощью плазменных методов является насущной задачей ядерной энергетики. Её решение позволит перейти к пристанционной переработке и рефабрикации топлива, а также получить ряд преимуществ по сравнению с химическими методами переработки. Важной задачей изучаемого в работе плазменного метода разделения является получение в замагниченной плазме заданного распределения электростатического потенциала и электрического поля, которые необходимы для реализации электромагнитного метода разделения радиоактивных изотопов.

В своей диссертационной работе Г.Д. Лизякин исследовал возможность практического создания в плазме отражательного разряда и в плазме ВЧ разряда ранее рассчитанного распределения электростатического потенциала,

необходимого для практической реализации метода плазменной масс-сепарации.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование механизмов создания и управления стационарным электрическим полем, ориентированным перпендикулярно линиям магнитного поля в плазме.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 72 наименования. Объём работы – 100 страниц, 52 рисунка и 8 таблиц. В заключении каждой главы сформулированы основные результаты. Структура и содержание работы отражает поэтапное решение задач, позволяющее достичь поставленной в диссертации цели.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели работы, перечислены задачи, решенные в диссертации, обоснованы научная новизна и практическая ценность результатов работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Литературный обзор, приведенный в **первой главе**, дает представление об экспериментальных методах исследования распределения потенциала в плазме, таких как зондовые измерения, электронное зондирование, зондирование пучком тяжелых ионов, измерения электрических полей на основе эффекта Штарка. В обзоре подробно изложен мировой опыт по исследованию распределения потенциала в экспериментальных установках (ИСП, ГДЛ, ПСП-1, PSP-2, LAPD, SPSC) с замагниченной плазмой, в том числе и способы задания управляемого распределения потенциала.

Вторая глава диссертации посвящена описанию всех основных элементов (вакуумной камеры, магнитной системы, торцевых электродов, ВЧ генератора) экспериментальной установки ЛаПлаС, на которой планируется отработать метод плазменной сепарации. Особо подчеркивается создание трех вариантов торцевых электродов, непосредственно контактирующих с плазмой: система из большого числа электродов, которая позволяет изменять геометрию электрических полей без разгерметизации вакуумной камеры; система электродов для работы в плотной плазме; система из электродов, имеющих

форму усеченного конуса, для исключения контакта плазмы с изолятором. В целом, данная глава отражает глубокую вовлеченность Г.Д. Лизякина в процесс создания данной установки и овладения им техникой эксперимента.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования возможности создания управляемого профиля электростатического потенциала в плазме отражательного разряда. Изучено влияние давления, магнитного поля, и разрядного напряжения на потенциал плазмы. При исследовании влияния давления было установлено, что в рамках использованного диапазона давлений 1 – 200 мТорр на графике зависимости потенциала плазмы от давления существуют два максимума, причем их положение на оси абсцисс (давление) определяется величиной магнитного поля. Большой интерес вызывает обнаружение неустойчивых режимов разряда (при давлениях выше 10 мТорр и в некоторых случаях ниже 2 мТорр), в которых наблюдаются флуктуации величины потенциала с частотой 1 кГц, что, как указывает автор, может быть связано с желобковой неустойчивостью и осцилляциями плазменного столба как целого возле положения равновесия. С помощью зондовых измерений были получены радиальные профили потенциала при магнитных полях 40 мТл, 130 мТл (для двух давлений 3.8 мТорр и 2.4 мТорр) и 200 мТл и установлено, что с увеличением магнитного поля возрастает значение электрического потенциала на оси разряда и сокращается область, в которой электрическое поле отлично от нуля. Еще одно немаловажное исследование, представленное в третьей главе – это исследование влияния формы электродов и их положения относительно оси разряда на радиальный профиль потенциала плазмы. В ходе данных экспериментов было установлено, что одним из важных параметров, определяющих максимальное значение потенциала плазменного столба, является кратчайшее расстояние между анодом и катодом и что невозможно увеличить градиент электрического потенциала простым перемещением катода по поверхности торца. Также обнаружен эффект скачкообразного повышения потенциала при изменении давления в конфигурации с алюминиевым катодом,

связанный с зарядкой оксидной пленки положительными ионами из плазмы до потенциала, достаточного для вытягивания электронов с поверхности металла в разряд сквозь данную пленку. Итогом серии экспериментов с отражательным разрядом можно считать получение на практике распределения потенциала плазмы, необходимого, согласно теоретическим расчетам, для осуществления разделения компонентов (160 и 240 а.е.м.) отработавшего ядерного топлива.

Четвертая глава завершает цикл экспериментальных исследований, проведенных в рамках представленной диссертационной работы. С целью перехода к большим плотностям плазмы, по сравнению с отражательным разрядом, были проведены эксперименты по исследованию возможности создания управляемого распределения потенциала в плазме ВЧ разряда, который создавался 5 МГц генератором. С помощью зондовых измерений были получены профили плотности и температуры плазмы при работе с торцевыми электродами диаметром 55 мм. При напряжении на таких электродах в диапазоне значений $-300 \dots -700$ В потенциал на оси разряда был практически неизменным и не превышал -20 В. Для минимизации потерь электронов, как в плазменном объеме, так и за счет пристеночной проводимости по поверхности торцевого диэлектрика, были проведены эксперименты с электродами большего диаметра (450 мм). Было установлено, что в такой конфигурации электродов существуют два принципиально отличающихся режима ВЧ разряда. При напряжении на электродах в пределах $0 \dots -30$ В реализуется первый режим, а при напряжениях $-50 \dots -200$ В – второй. В первом режиме изменение напряжения на электродах приводит к изменению потенциала плазмы, а во втором – нет. При этом при переходе во второй режим наблюдается уменьшение тока разряда в 4 – 5 раз и уменьшение поглощения ВЧ мощности на $1/3$. Для обоих режимов также были получены профили плотности и температуры электронов, из которых видно, что при переходе во 2-й режим профиль плотности становится более плоским, а температура приосевой плазмы увеличивается.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы Д. Г. Лизякина, представляющими практический и научный интерес, являются следующие:

- создана экспериментальная установка для исследования способов создания управляемого распределения потенциала и подтверждения возможности практического создания плазменного масс-сепаратора в скрещенных $E \times B$ полях;
- получен большой объем экспериментальных данных о распределении потенциала в плазме отражательного разряда в широком диапазоне значений различных параметров;
- в отражательном разряде найдены операционные режимы, в которых получено распределение электростатического потенциала, точно соответствующее расчетному распределению, необходимому для разделения компонентов 160 а.е.м. и 240 а.е.м. отработавшего ядерного топлива;
- обнаружены два режима ВЧ разряда, в одном из которых, изменяя напряжение на торцевых электродах, возможно управлять потенциалом плазмы.

Научная ценность работы обусловлена тем, что получены новые знания по физике отражательного и ВЧ разряда:

- обнаружен эффект скачкообразного повышения потенциала при изменении давления в конфигурации с алюминиевым катодом;
- зависимость потенциала плазмы отражательного разряда от давления, а именно наличие двух максимумов, которая отличается от «классического» отражательного разряда и объясняется автором более сложной геометрией катодов, использованных в экспериментальной установке;
- обнаружен режим ВЧ разряда, в котором происходит значительное ухудшение поглощения мощности ВЧ генератора и уменьшение тока разряда;

- обнаружены «неустойчивые» режимы отражательного разряда со значительными флуктуациями потенциала плазмы.

Практическая значимость работы состоит в том, что был исследован широкий диапазон операционных параметров отражательного и ВЧ разрядов и найдены режимы, в которых возможно получение распределения электростатического потенциала плазмы, требуемого для реализации плазменного масс-сепаратора (160/240 а.е.м.) в скрещенных $E \times B$ полях.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются тем, что:

- большинство полученных закономерностей поведения потенциала и тока в разрядах находят объяснение в современных представлениях теории отражательного и ВЧ разряда;
- для исследования потенциала плазмы, температуры и концентрации электронов применялись хорошо изученные и надежные зондовые диагностики;
- результаты исследований представлены в 15 научных публикациях, 5 из которых в рецензируемых зарубежных и отечественных журналах из списка ВАК.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в организациях, ведущих исследования по физике плазменно-поверхностного взаимодействия: НИЦ "Курчатовский институт", ТРИНИТИ, ИОФ РАН, ОИВТ РАН, ИПФ РАН, ФИ РАН, НИЯУ МИФИ, ИЯФ СО РАН.

Недостатками работы являются:

- 1) Недостаточно четкое объяснение физического механизма, приводящего к уменьшению поглощения ВЧ мощности генератора в разряде при работе в диапазоне значений напряжений на электродах ниже -50 В.
- 2) Отсутствие оценки влияния обнаруженных в отражательном разряде флуктуаций потенциала на искажение траекторий разделяемых в плазме частиц.

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертации Геннадия Дмитриевича Лизякина. Работы Г.Д. Лизякина, представленные в диссертации, внесли вклад в физику отражательного и ВЧ разряда. Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Достоверность полученных Г.Д. Лизякиным результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также представленными докладами на международных и российских конференциях. Эти работы известны специалистам в данной области физики плазмы и цитируются в научных изданиях.

В целом в представленной диссертантом работе решена принципиальная задача получения заданного распределения потенциала плазмы в отражательном разряде, для которого найден операционный диапазон величин магнитного поля, давления, конфигурации и напряжения торцевых электродов и определена функциональная зависимость потенциала плазмы разряда от этих параметров. Для ВЧ разряда хотя и не удалось получить распределения потенциала идентичного теоретически рассчитанному, было определено направление дальнейших исследований, которые позволят достигнуть такого соответствия в будущем.

В лице Г.Д. Лизякина мы несомненно имеем высокопрофессионального специалиста, знания и умения которого отвечают высоким требованиям, предъявляемым к учёным, удостоиваемым степени кандидата физико-математических наук.

Оригинальные результаты диссертации **безусловно** являются достижением в области экспериментальных исследований условий формирования радиальных электрических полей в отражательном и ВЧ разрядах.

Диссертационная работа соответствует требованиям, изложенным «Положении о порядке присуждения ученых степеней» (пунктам 9 - 11, 13 и 14), утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от

24.09.2013 г. № 842, является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор Лизякин Геннадий Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составлен старшим научным сотрудником ИОФ РАН, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 физика плазмы Борзосековым В. Д., тел.: (8)-499-135-80-39, email: borzosekov@fpl.gpi.ru на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН, который состоялся 18 апреля 2018 г.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 445 от 18 апреля 2018 г.

Старший научный сотрудник отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.ф.-м.н. Борзосеков В.Д.



Подпись старшего научного сотрудника к.ф.-м.н. Борзосекова В.Д. заверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН, д.ф.-м.н.

С.Н. Андреев



Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

тел.: +7 499 503 8327

e-mail: nauka@gpi.ru

<http://www.gpi.ru/>