

“УТВЕРЖДАЮ”

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



С.В. Гарнов

“26” ноября 2018 г

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Антонова Николая Николаевича

«Формирование ионизированных потоков веществ для плазменного разделения компонентов, моделирующих отработавшее ядерное топливо, и исследование их распространения в буферной плазме со стационарным электрическим полем», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы».

В настоящее время остро стоит вопрос о переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) ядерных электростанций. Разработка концепции плазменной сепарации ОЯТ и РАО представляет безусловный интерес для решения названной проблемы, и это делает актуальной тему представленной диссертации.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 123 наименования. Объём работы – 101 страница, 43 рисунка и 1 таблица.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и приведена научная новизна исследований, описана теоретическая и практическая значимость результатов работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Диссертантом рассмотрены отдельные этапы процесса плазменной сепарации: перевод твёрдого вещества в плазму, инжекция плазменного потока в буферную плазму со стационарным электрическим полем, сбор веществ на коллектор. Все эти вопросы изучены экспериментально с использованием в качестве рабочих веществ свинца и серебра, моделирующих как исходное вещество, так и результаты радиоактивного распада.

Анализ литературных данных, произведённый в **первой главе**, позволил автору удачно выбрать в качестве источника плазмы низковольтный сильноточный разряд с накаливаемым катодом. Во **второй главе** диссертантом построена модель разряда, и проведены вычисления его характеристик, позволившие определить режимы поддержания стационарного разряда. В **третьей главе** описан спроектированный и созданный на основе этих исследований дуговой источник с накаливаемым катодом и с независимым индукционным испарением смеси порошков свинца и серебра и результаты выполненных измерений характеристик плазмы такого источника в магнитном поле модели технологической установки.

Результаты этих исследований, описанные в **третьей главе**, показали, что с помощью регулирования потока свинца и серебра, тока эмиссии борлантанового катода и напряжения на разряде можно получить высокую степень ионизации паров, однозарядность инжектируемых источником ионов и их низкую энергию при плотности плазмы порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Это именно те параметры для плазменного источника, которые

приемлемы для использования в модельной технологической установке по переработке ОЯТ.

Здесь необходимо подчеркнуть подробность выполненных исследований и надёжность полученных результатов на установке с высокой удельной энергонапряжённостью и источниками пара смеси свинца и серебра, работающих при температурах выше 1000 К. Вызывает также восхищение оригинальность конструкции катодного узла источника плазмы.

Вопросы взаимодействия плазмы, инжектируемой из источника, с буферной плазмой сепаратора – модельной технологической установки выполнены при создании в модельной установке отражательного разряда (четвертая глава). Задача, которую решал диссертант, формулируется как вопрос о величине потока, инжектируемого из источника в буферную плазму, и искажении распределения потенциала в буферной плазме при инъекции плазменного потока из стороннего источника. Исследование выполнено с использованием отражательного разряда в аргоне с плотностью плазмы  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

В работе установлено, что включение отражательного разряда вызывает понижение ионного тока в сечении инжектируемой струи на 95%. При этом было показано, что 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. С точки зрения требований к сепаратору, это очень важный результат, показывающий, что отражательный разряд с плотностью плазмы  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  не пригоден для целей сепарации ионов.

Диссертантом показано, что рост плотности в отражательном разряде вызывает увеличение инъекции плазмы из потока в объём отражательного

разряда и тем самым показана необходимость повышения плотности буферной плазмы для успешной работы плазменного сепаратора.

Второй важный результат, полученный в этой части работы, заключается в том, что взаимодействие инжектируемой свинцовой плазмы с аргоновой плазмой отражательного разряда вызывает существенное искажение распределения потенциала в буферной плазме, что также недопустимо для работы сепаратора ОЯТ.

В данной части работы получен также важный результат о влиянии конструктивных элементов плазменного источника (инжектора) на распределение потенциалов буферной плазмы. Было установлено, что наименьшие искажения возникают либо при покрытии анода источника с внешней стороны диэлектриком, либо при экранировке анода металлическим экраном с плавающим потенциалом.

**Пятая глава** рецензируемой работы была посвящена изучению эффективности осаждения тепловых потоков свинца на подложки из дюрали, стали и углерода. Изучена толщина и микроструктура полученных плёнок, как при прямом попадании испаряемых атомов, так и переотражённых от поверхности, на которой осаждается первичный пучок. Изучена также сила сцепления осаждённой плёнки с поверхностью. Было проведено также моделирование процесса осаждения. Эти результаты представляют несомненный интерес для постановки последующих опытов с плазменными струями.

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

Оценивая материал диссертации в целом, необходимо отметить, что мы имеем разработку и исследование характеристик отдельных элементов

крупной технологической плазменной установки, разрабатываемой для решения крупной народно-хозяйственной проблемы.

Наибольшая глубина исследований достигнута при создании плазменного источника. Здесь на основе изучения параметров разряда получены результаты, позволяющие рассматривать данную разработку как перспективную для создания плазменного сепаратора ОЯТ. В решении изучаемых вопросов диссертант продемонстрировал высокий профессиональный уровень, полностью, а может быть, и с избытком соответствующий современному отечественному уровню кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

**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.

Остановимся далее на некоторых **замечаниях** к рецензируемой работе.

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

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

Эти замечания не изменяют высокой оценки выполненного Н.Н. Антоновым исследования. Им разработан, создан и исследован новый дуговой источник потоков плазмы свинца и серебра с регулируемой степенью ионизации и регулируемым содержанием однозарядных ионов и энергии ионов. Им продемонстрирована почти стопроцентная инжекция ионов плазменного потока в плазму буферного разряда модельной технологической установки для сепарации ОЯТ и существенное влияние инжекции плазмы на распределение потенциала буферной плазмы и показана необходимость увеличения плотности буферной плазмы. Таким образом, разрешён ряд вопросов, важных в исследованиях при создании плазменного сепаратора ОЯТ.

Содержание автореферата диссертации точно соответствует содержанию диссертации. Опубликованные диссертантом работы полностью раскрывают содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям, изложенным в «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 Николай Николаевич Антонов без сомнения заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы».

Доклад Антонова Н.Н. по материалам диссертации был представлен на научном семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН 20 ноября 2018 г. Отзыв составлен по итогам обсуждения этого доклада главным научным сотрудником отдела физики плазмы ИОФ РАН, д.ф.-м.н., профессором Батановым Г.М., тел.: 8 499 135 4165, email: batanov@fpl.gpi.ru на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре, изучения текстов диссертации и автореферата.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 450 от 20 ноября 2018 г.

Главный научный сотрудник отдела физики плазмы ИОФ РАН, д.ф.-м.н., профессор Батанов Г.М.



Подпись главного научного сотрудника д.ф.-м.н. Батанова Г.М. заверяю

И.о. Ученого секретаря 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/>