

На правах рукописи

УДК 533.924

Серушкин Сергей Валерьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМА-СТЕНКА
В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С ПОМОЩЬЮ
МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Вуколов Константин Юрьевич**
доктор физико-математических наук,
заместитель начальника отдела ИТЭР Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты: **Лесневский Леонид Николаевич**
доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Шаненков Иван Игоревич
кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Ведущая организация: **ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН**

Защита диссертации состоится «____» 2025 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправлять электронные копии отзывов на электронную почту kharit@bmstu.ru.

Автореферат разослан «____» 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н.



Харитонов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. В высокотемпературных плазменных системах, к которым относятся термоядерные установки (ТЯУ), температурные градиенты между плазмой и окружающими ее элементами конструкции существенно выше, чем для традиционных низкотемпературных плазменных устройств. Существенную роль в энергобалансе высокотемпературной плазмы ТЯУ играет тормозное излучение электронов в кулоновском поле ионов. Попадание в такую плазму, состоящую из ионов изотопов водорода (протия, дейтерия и трития), даже малого количества тяжелых примесей вызовет существенное падение температуры из-за возрастания удельной мощности тормозного излучения, которая тем значительнее, чем выше средний заряд ядер примесей. По этой причине компоненты ТЯУ, обращенные к плазме (КОП), во многих исследовательских токамаках изготавливаются из материалов, состоящих из элементов со сравнительно малым зарядом ядра Z , в первую очередь бериллия и углерода. Однако в токамаках реакторного масштаба для покрытия самого теплонапряженного элемента конструкции – дивертора, требуется использовать наиболее тугоплавкие материалы. Кроме того, углерод или токсичный бериллий в качестве материалов КОП приводят к повышенному накоплению изотопов водорода, в том числе радиоактивного трития, в элементах конструкции. По этим причинам в международном проекте ИТЭР в конструкции первой стенки и дивертора предполагается использовать вольфрам с высоким значением $Z = 74$.

Для ТЯУ крайне важными являются проблемы взаимодействия плазмы с твердым телом, связанные с переносом через границу горячей плазмы энергии и массы. Первостепенными задачами для обеспечения работоспособности ТЯУ являются снижение потоков энергии на стенку и ограничение потоков частиц, поступающих в плазму со стенки в результате эрозии последней. Одним из основных эрозионных процессов в приповерхностном слое элементов конструкции при номинальном режиме работы ТЯУ является физическое распыление поверхности.

Испытания материалов КОП непосредственно в токамаках и других ТЯУ дороги и требуют существенных затрат времени. В связи с этим актуальны исследования на достаточно простых экспериментальных стендах, моделирующих процессы взаимодействия плазмы со стенкой для требуемых условий при помощи низкотемпературных плазменных устройств. В данной диссертационной работе для исследований взаимодействия плазма-стенка использовалась магнетронная распылительная система (МРС). Она позволяет подвергать исследуемые образцы-мишени воздействию интенсивных потоков ионов изотопов водорода. Достоинствами применения такой моделирующей системы являются диапазоны энергий и плотностей потока ионов, схожие с энергетическими спектрами и потоками нейтралов перезарядки в условиях ИТЭР и других токамаков, возможность использования различных материалов мишеней и получения пленок из этих материалов, осажденных совместно с

атомами рабочего газа на экспериментальные подложки, возможность использовать различные плазмообразующие газы, а также дешевизна эксперимента и относительная простота конструкции МРС.

Цель работы: моделирование процессов взаимодействия плазмы со стенкой применительно к элементам конструкции термоядерных установок и создание методов расчетного и экспериментального определения параметров плазмы моделирующего устройства – магнетронной распылительной системы.

В диссертации решались следующие **основные задачи**:

- численное моделирование динамики потоков заряженных частиц плазмы магнетронного разряда в скрещенных электрическом и магнитной полях;
- исследование и анализ параметров плазмы магнетронного разряда и потоков заряженных частиц в МРС с целью обоснования их соответствия условиям и процессам в ТЯУ;
- разработка основ метода пространственного определения параметров плазмы магнетронного разряда в инертных газах по излучательным характеристикам с применением столкновительно-излучательной модели;
- разработка физико-математической модели взаимодействия плазмы с мишениями МРС и ее апробация;
- исследование структуры осаждаемых вольфрамовых пленок и накопления изотопов водорода в вольфраме – материале пластин дивертора ИТЭР.

Методы исследований. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. С помощью теоретических расчетных методов проведено численное моделирование динамики потоков заряженных частиц в магнетронном разряде, описаны физико-математические основы спектрального метода определения параметров магнетронной плазмы. В экспериментальной части работы проведено осаждение вольфрамовых пленок с помощью магнетронного распыления материала в среде дейтерия, моделирующее процессы соосаждения вольфрама и направленных потоков водорода на внутрикамерных элементах ТЯУ. Экспериментально определено содержание легких атомов изотопов водорода в полученных пленках.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана физико-математическая модель магнетронного разряда для расчета движения электронов в частично замагниченной плазме в скрещенных электрическом и магнитном полях и описания динамики потоков ионов на распыляемые мишени, дополненная учетом вероятностных процессов неупругих соударений электронов с атомами плазмообразующего газа;
- разработан и применен на практике новый расчетно-экспериментальный метод пространственного определения параметров плазмы осесимметричного магнетронного разряда в инертных газах (температура и концентрация электронов), основанный на оптической эмиссионной спектроскопии излучения плазмы с учетом радиационно-столкновительной кинетики энергетических состояний атомов плазмообразующего вещества;

- получены качественные и количественные зависимости содержания изотопов водорода в осажденных вольфрамовых пленках от давления плазмообразующего газа и расстояния до поверхности осаждения;

- получило объяснение аномальное накопление изотопов водорода в вольфрамовых пористых пленках, формирование которых может происходить на затененных элементах дивертора ИТЭР. Выявлено существенное влияние быстрых отраженных ионов водорода на процессы формирования и структуру таких пленок в камере ТЯУ.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется:

- теоретическим обоснованием используемых в диссертации математических моделей и применяемых в них уравнений;

- экспериментальной верификацией используемых расчетных моделей;

- сопоставлением полученных автором расчетно-экспериментальных данных с опубликованными в рецензируемых научных изданиях положениями и результатами исследований.

Практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

- разработанный экспериментально-расчетный бесконтактный метод пространственного определения локальных параметров плазмы инертных газов позволяет оптимизировать работу низкотемпературных плазменных систем (МРС) для возможности моделирования процессов переизлучения и радиационного теплообмена в пристеночной плазме диверторной области токамаков при работе в режиме отрыва плазмы (детachmenta);

- реализованные в работе экспериментальные подходы и расчетные модели для определения температуры электронов по излучательным характеристикам плазмообразующего газа могут быть адаптированы для исследования свойств плазмы в различных устройствах с тороидальной конфигурацией разряда;

- разработанный диагностический комплекс для исследования пространственных распределений излучательных характеристик плазмы магнетронного разряда внедрен в образовательный процесс и используется для практической подготовки студентов в области спектральной диагностики плазмы.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась на кафедре «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В диссертации использованы результаты, полученные при выполнении гранта РФФИ № 18-29-21039 «Генерация и коллимация тороидальных плазменных конфигураций в магнитных полях» и госзадания Минобрнауки РФ № FSFN-2024-0022. Выполнено внедрение результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедры. Полученные практические результаты применяются для проведения лабораторных работ в ряде образовательных дисциплин кафедры.

Положения, выносимые на защиту:

- физико-математическая модель магнетронного разряда, описывающая движение заряженных частиц в частично замагниченной плазме с учетом неупругих столкновений;

– физико-техническое обоснование спектроскопического метода на основе столкновительно-излучательной модели плазмы для измерения радиальных распределений электронной температуры и концентрации в магнетронном разряде;

– обоснование с помощью моделирования в МРС возможного механизма накопления изотопов водорода в пленках на внутрикамерных элементах ТЯУ в процессе соосаждения вольфрама и направленных потоков водорода.

Личный вклад автора. Представленные результаты диссертационной работы получены лично автором или при его равноправном участии:

- разработаны математическая модель движения заряженных частиц в плазме магнетронного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, расчетно-экспериментальный метод определения электронной температуры и концентрации плазмы осесимметричного магнетронного разряда по эмиссионным спектрам с применением столкновительно-излучательной модели;

- принято участие в разработке, сборке и подготовке к эксплуатации элементов и систем автоматизированного спектрометрического комплекса для исследования пространственных распределений излучательных характеристик плазмы магнетронного разряда;

- получены результаты пространственного определения параметров плазмы магнетронного разряда в среде аргона, включая регистрацию эмиссионных спектров, их обработку и расчетный анализ по разработанному методу;

- проведены эксперименты по напылению вольфрамовых пленок в среде дейтерия;

- проведены экспериментальные измерения количественного содержания атомов изотопов водорода в полученных образцах вольфрамовых пленок методами резерфордовского обратного рассеяния и спектрометрии атомов отдачи, а также обработка и анализ полученных данных по накоплению дейтерия в пленках.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы представлялись на следующих конференциях:

1. XXXXII Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2012).

2. Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами (ИНISM'14). V международная конференция им. А.А. Курдюмова (Саров, 2014).

3. XVIII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП-2019) (Москва, 2019).

4. Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2020) (Казань, 2020).

5. 15-я международная конференция «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» (GDP-2021) (Екатеринбург, 2021).

6. 8-й международный конгресс «International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects» (EFRE 2022) (Томск, 2022).

7. XIII конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2022).

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, в том числе 5 – в изданиях из списков SCOPUS и Web of Science (общий объем опубликованных работ – 3,4 п.л./1,1 п.л.), 8 тезисов докладов на конференциях, получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы 155 страниц, 143 страниц основного текста, 70 рисунков и 6 таблиц. Список литературы состоит из 109 источников информации, приведенных на 11 страницах. Информация о внедрении результатов работы в учебный процесс размещена в Приложении на 1 странице.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложена научная новизна полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор работ и исследований в области экспериментального моделирования процессов взаимодействия плазмы со стенкой применительно к плазмообращенным компонентам термоядерных установок. Сформулированы основные параметры потоков частиц и энергии на конструктивные элементы внутри камеры токамаков, реализация которых требуется для построения корректных моделирующих экспериментов. Указана тенденция на проведение экспериментального моделирования описанных процессов с применением упрощенных низкотемпературных моделирующих плазменных систем, в том числе магнетронных распылительных систем. Обоснована актуальность применения МРС для исследования взаимодействия плазмы с элементами конструкции ТЯУ, описаны основные преимущества магнетронов в качестве систем экспериментального моделирования.

Важность и перспективность работ по моделированию воздействия плазмы на внутрикамерные материалы и элементы конструкции термоядерных установок подтверждена трудами отечественных ученых Ю.В. Мартыненко, К.Ю. Вуколова, А.В. Рогова, А.М. Зимина, Н.Г. Елистратова, М.И. Гусевой, Ю.М. Гаспаряна, В.П. Будаева и др.

Анализ результатов работ, посвященных исследуемой проблематике, показывает, что основными недостатками полномасштабных исследований взаимодействия плазма-стенка непосредственно в токамаках являются их дороговизна и временные затраты. В связи с использованием вольфрамового дивертора и вероятным переходом на вольфрамовую первую стенку в конструкции международного проекта ИТЭР актуальным является развитие экспериментального моделирования на упрощенных установках процессов распыления и осаждения вольфрама в среде изотопов водорода, в том числе

для анализа захвата и накопления радиоактивного трития. Также представляет интерес возможность моделирования и отработки новых бесконтактных методов определения параметров пристеночной плазмы диверторной области в режиме детачмента с использованием низкотемпературных плазменных устройств тороидальной конфигурации. Применение планарной цилиндрической МРС для решения этих проблем, математическое моделирование процессов в плазме моделирующего устройства и создание расчетно-экспериментального метода моделирования пристеночной плазмы и определения ее параметров составили вышеизложенные цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена физико-математическому моделированию процессов в разряде магнетронной распылительной системы.

Изложены принципы работы систем магнетронного распыления и технические особенности формирования различных магнитных конфигураций арочного типа. Описаны конструкция и характеристики МРС, используемой в диссертационной работе.

Разработанная физико-математическая модель магнетронного разряда позволяет рассчитывать движение свободных электронов в частично замагниченной плазме с учетом их неупругих соударений с атомами плазмообразующего газа. В основе модели лежит численное решение дифференциального уравнения движения заряженных частиц в скрещенных $\vec{E} \times \vec{B}$ полях методом Рунге-Кутты. Модель позволяет расчетным путем определить потоки ионов из плазмы на мишень и интенсивность оптического излучения из разряда. Проведен анализ применимости более простых моделей для описания движения заряженных частиц в магнетроне, в частности, магнитогидродинамического и дрейфового приближений. Указаны основные недостатки данных моделей и сделан вывод об актуальности предложенного и описанного в диссертации расчетного подхода.

Сечения неупругих процессов возбуждения и ионизации электронным ударом зависят от параметров магнетронного разряда, таких как напряжение и род плазмообразующего газа. Делается вывод об универсальности описанной в диссертационной работе расчетной модели, которая при корректном учете свойств плазмообразующего газа и материала катодамишени позволяет оценить выполнение условия самостоятельности магнетронного разряда для различных параметров его зажигания, включая разрядное напряжение, давление плазмообразующего газа и магнитную конфигурацию, реализуемую в МРС. В результате проведенного численного моделирования получены распределения количества актов ионизации плазмообразующего газа за время нахождения электронов в слое частично замагниченной плазмы. На Рис. 1 представлена полученная в результате расчета траектория электрона, покинувшего катод МРС в результате вторичной ион-электронной эмиссии. На Рис. 2 представлено расчетное распределение по радиусу осесимметричного разряда количества актов ионизации и возбуждения в результате неупругих столкновений электронов с атомами плазмообразующего газа.

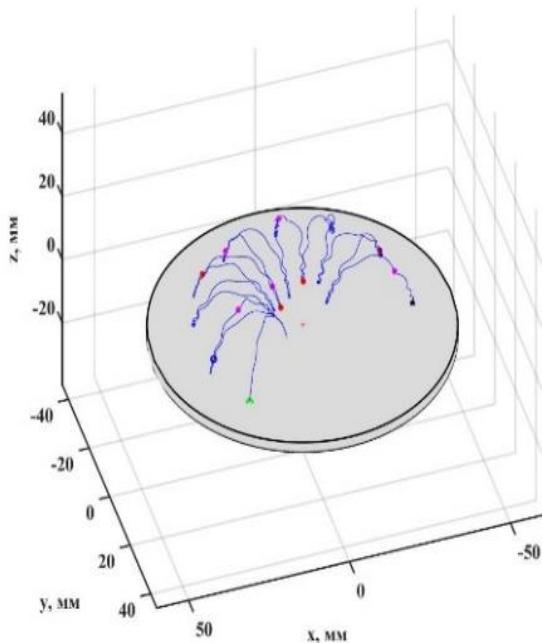


Рис. 1. Расчетная траектория движения электрона в магнетронном разряде с фиксацией актов ионизации и возбуждения

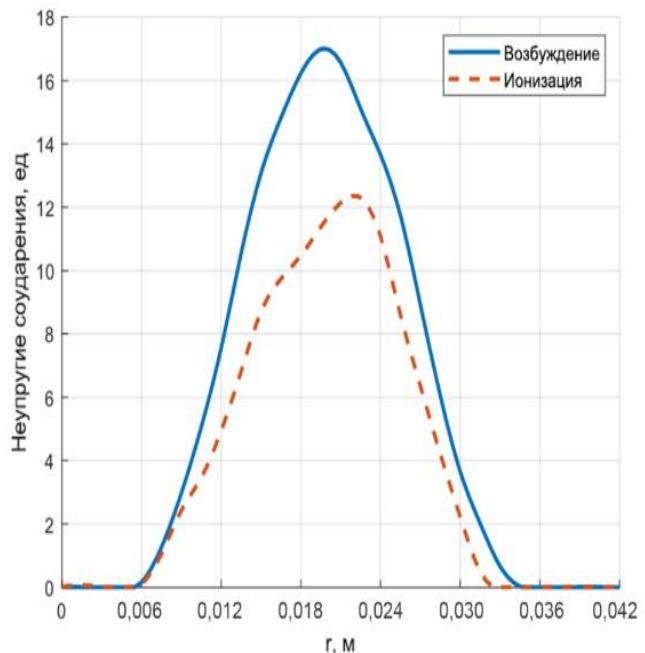


Рис. 2. Распределение по радиусу количества актов ионизации и возбуждения атомов плазмообразующего газа в слое плазмы магнетронного разряда в единицу времени

Полученные расчетные результаты хорошо соотносятся с типичными для планарных цилиндрических МРС распределениями плотности ионного тока по радиусу катода и радиальными распределениями интенсивности излучения из плазмы.

В расчетной модели взаимодействия плазмы с мишенями МРС и осаждения распыленного материала на экспериментальные подложки учитываются распределения по энергиям ионов, приходящих на катод-мишень из плазмы магнетронного разряда, пространственное распределение плотности ионного тока по радиусу катода и угловые распределения распыленных атомов мишени и отраженных ионов плазмообразующего газа. Выполнена экспериментальная верификация результатов расчета. Можно сделать вывод, что несмотря на относительно большое количество допущений, сделанных как при разработке расчетной модели, так и при анализе полученных экспериментальных результатов, наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетом и экспериментом. Таким образом, можно говорить о применимости предложенной расчетной модели для оценки параметров потоков частиц и энергии на поверхности мишеней и экспериментальных подложек при моделировании взаимодействия плазма-стенка с помощью планарных магнетронных распылительных систем.

Третья глава посвящена исследованию пространственных распределений теплофизических параметров магнетронной плазмы методами оптической эмиссионной спектроскопии. Режим отрыва плазмы (детachment)

рассматривается в качестве основного режима работы дивертора ИТЭР и будущих токамаков-реакторов. Этот режим характеризуется высокой плотностью диверторной плазмы и высокой мощностью радиационных потерь. Для реализации таких физических условий может потребоваться напуск примесей с повышенным зарядом ядра в зону дивертора. В качестве подходящих для этого веществ рассматриваются в том числе инертные газы (Ne , Ar). Поэтому актуальным является определение излучательных характеристик и параметров радиационного теплообмена пристеночной плазмы инертных газов бесконтактными спектральными методами в моделирующем взаимодействие плазма-стенка устройстве – магнетронной распылительной системе.

В работе приведено описание созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана автоматизированного диагностического комплекса для исследования пространственных распределений параметров плазмы магнетронного разряда и разработанного автором диссертации метода пространственной регистрации эмиссионных спектров для дальнейшего исследования излучательных характеристик плазмы магнетронного разряда. Основу комплекса составляет четырехканальный спектрометр *AvaSpec-2048*, рассчитанный на диапазон длин волн от 355 до 810 нм.

На Рис. 3, а приведена схема аппаратной части диагностического комплекса с двухкоординатной системой перемещения оптического коллиматора и его интеграции в вакуумный экспериментальный стенд. Схема сбора излучения магнетронного разряда вдоль хорд наблюдения, перпендикулярных оси магнетрона, представлена на Рис. 3, б.

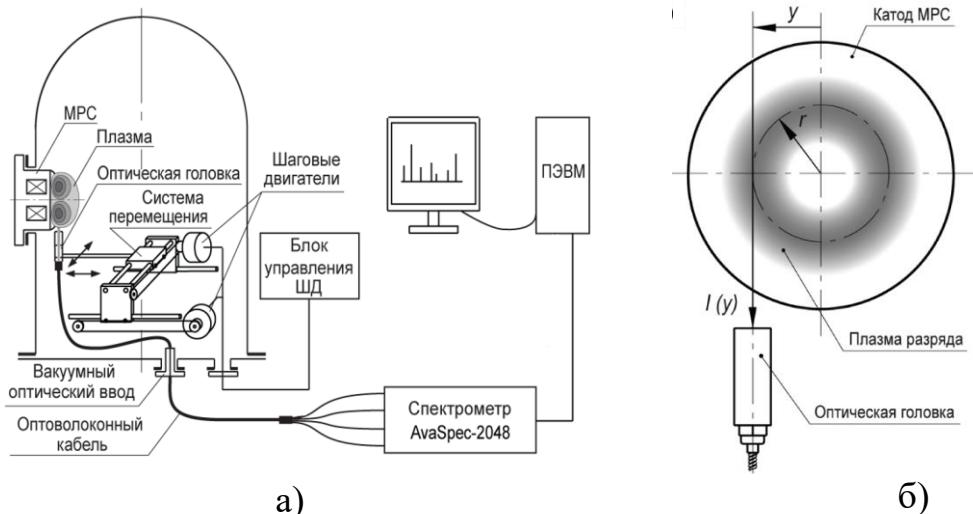


Рис. 3. Автоматизированный диагностический комплекс для исследования пространственных распределений параметров плазмы магнетронного разряда: а) – схема интеграции комплекса в экспериментальный вакуумный стенд; б) – схема сбора излучения плазмы МРС вдоль хорд наблюдения

Излучение из локальных областей разряда после прохождения через систему круговых диафрагм коллиматора (оптической головки) фокусируется на торце оптоволоконного кабеля, расположенного в вакуумной камере. Для

проведения пространственных измерений используется двухкоординатная система перемещения с двумя шаговыми двигателями, обеспечивающими движение коллиматора с шагом до 0,2 мм. Это позволяет проводить хордовую регистрацию излучения в параллельных катоду-мишени сечениях, находящихся на различных расстояниях от его поверхности. С помощью специального вакуумного оптического ввода излучение выводится из вакуумной камеры и по разветвленному оптоволоконному кабелю подается на входные щели спектрального прибора – четырехканального спектрофотометра. С его помощью регистрируется эмиссионный спектр разряда в видимом диапазоне длин волн с оптическим разрешением от 0,05 до 0,2 нм. В работе описана конструкция специально разработанного оптического коллиматора для выделения излучения из локальных областей плазмы магнетронного разряда. Определены пространственное разрешение системы сбора излучения и аппаратная функция коллиматора. Приведены результаты калибровки оптического тракта системы сбора и регистрации излучения. Описаны принципы управления работой диагностического комплекса.

Для обоснования применяемых методов обработки и анализа спектральных распределений приведено описание математического аппарата, основанного на обратном преобразовании Абеля (1), которое применяется для перевода полученных в результате пространственной оптической эмиссионной спектроскопии хордовых распределений интенсивности излучения $I(y)$ в радиальные распределения излучательной способности $\varepsilon(r)$ плазмы осесимметричного магнетронного разряда в предположении оптически тонкой плазмы:

$$\varepsilon(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(y)}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (1)$$

Для проведения операции дифференцирования экспериментально полученной зависимости $I(y)$ в работе применяется разработанный в среде MatLab алгоритм, основанный на кусочно-полиномиальной аппроксимации функции. Преобразование применялось к результатам хордовых измерений интенсивностей спектральных линий, выполненных с помощью описанного спектрометрического комплекса. На Рис. 4, а приведены примеры графиков зарегистрированных зависимостей интенсивности излучения (в относительных единицах) аргоновой плазмы на длине волны 763,5 нм при смещении хорды наблюдения перпендикулярно оси магнетронного разряда на различных удалениях от плоскости катода магнетрона. Рис. 4, б иллюстрирует результат перевода этих распределений в радиальные зависимости $\varepsilon(r)$. На Рис. 5 показана представленная в виде цветовой диаграммы графическая интерпретация распределения $\varepsilon(r)$ в плоскости, параллельной катоду МРС.

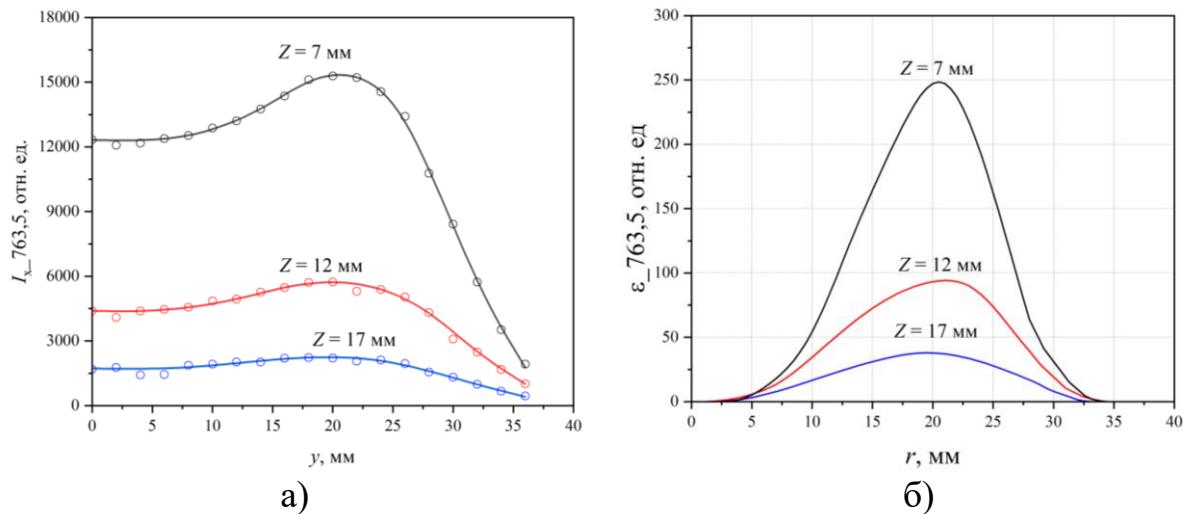


Рис. 4. Пространственные распределения излучательных характеристик аргоновой плазмы на длине волны 763,5 нм на различных удалениях от плоскости катода МРС (в относительных единицах): а) – хордовые распределения интенсивности излучения; б) – радиальные распределения объемной плотности мощности излучения

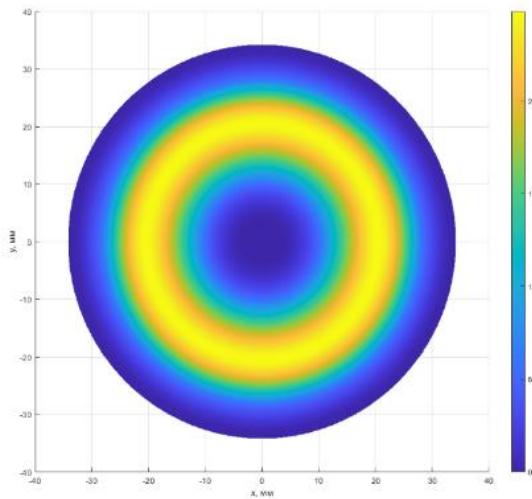


Рис. 5. Цветовая диаграмма распределения интенсивности излучения аргоновой плазмы осесимметричного магнетронного разряда в плоскости, параллельной катоду МРС

Основой предложенного в работе метода определения параметров плазмы с помощью эмиссионной спектроскопии является использование столкновительно-излучательной модели плазмы для теоретического определения интенсивности спектральных линий. Более простые модели, использующие Больцмановское распределение населенности энергетических состояний атомов, не всегда корректно описывают процессы в магнетронной плазме. Наличие у атомов аргона нескольких метастабильных энергетических состояний не дает возможности использовать для корректных расчетов корональную модель, в которой разрушение уровней возможно только за счет спонтанного излучения. Поэтому применение в расчетном методе

определения параметров плазмы инертных газов столкновительно-излучательной модели является обоснованным и актуальным. Эта модель позволяет рассчитывать населенности квантовых состояний и вытекающие из них излучательные свойства с использованием скоростей излучательных и столкновительных процессов в плазме.

Математическое описание столкновительно-излучательной модели, используемой в диссертационной работе, представляет из себя систему балансовых уравнений:

$$\sum_{j \neq i} n_e n_j K_{ji}^{ex} + \sum_{j > i} n_j A_{ji} = n_i \sum_{j \neq i} n_e K_{ij}^{ex} + n_i \sum_{j < i} A_{ij} + n_e n_i K_i^{iz}. \quad (2)$$

Модель описывает кинетику основного и первых 40 возбужденных состояний атома аргона и учитывает следующие столкновительные и радиационные процессы: возбуждение электронным ударом (скоростной коэффициент K_{ij}^{ex}), безызлучательное девозбуждение (скоростной коэффициент определяется в соответствии с правилом детального равновесия), ионизация электронным ударом с различных энергетических уровней (скоростной коэффициент K_i^{iz}) и спонтанное излучение (скорость процесса определяется коэффициентом Эйнштейна A_{ij}). Самопоглощение излучения не учитывается согласно предположению об оптически тонкой плазме магнетронного разряда. Результатом решения системы (2) при заданных значениях концентрации и температуры свободных электронов является массив плотностей населенности всех рассматриваемых возбужденных состояний атомов аргона n_i . После этого плотность мощности I_{ij} любого оптического перехода с уровня i на уровень j можно вычислить по формуле

$$I_{ij} = \frac{hc}{\lambda_{ij}} n_i A_{ij}. \quad (3)$$

По описанному расчетно-экспериментальному методу диагностики проведено определение концентрации и температуры аргоновой плазмы в различных областях осесимметричного магнетронного разряда по радиальным распределениям интенсивностей спектральных линий атомов аргона в красном и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне.

Для определения электронной концентрации n_e и температуры T_e в различных областях разряда применяется следующий принцип. Производится расчет по столкновительно-излучательной модели теоретических нормированных значений интенсивности излучения для набора спектральных линий атомов аргона ($I_{ij}^{\text{СИМ}}$) при варьировании пары независимых значений T_e , n_e . Далее выполняется их сравнение с интенсивностями $I_{ij}^{0\text{ЭС}}$, полученными экспериментально в различных областях разряда с помощью метода пространственной оптической эмиссионной спектроскопии и подвергнутыми преобразованию по методу Абеля. При этом предполагается, что наиболее близкими к реальным параметрам в эксперименте будут значения электронной концентрации и температуры, соответствующие минимальному

среднеквадратичному отклонению $\sigma = \sqrt{\sum (I_{ij}^{0\text{ЭС}} - I_{ij}^{\text{СИМ}})^2}$. На Рис. 6 приведены результаты определения параметров магнетронной плазмы в среде аргона, полученные по разработанному и описанному в диссертационной работе экспериментально-расчетному методу.

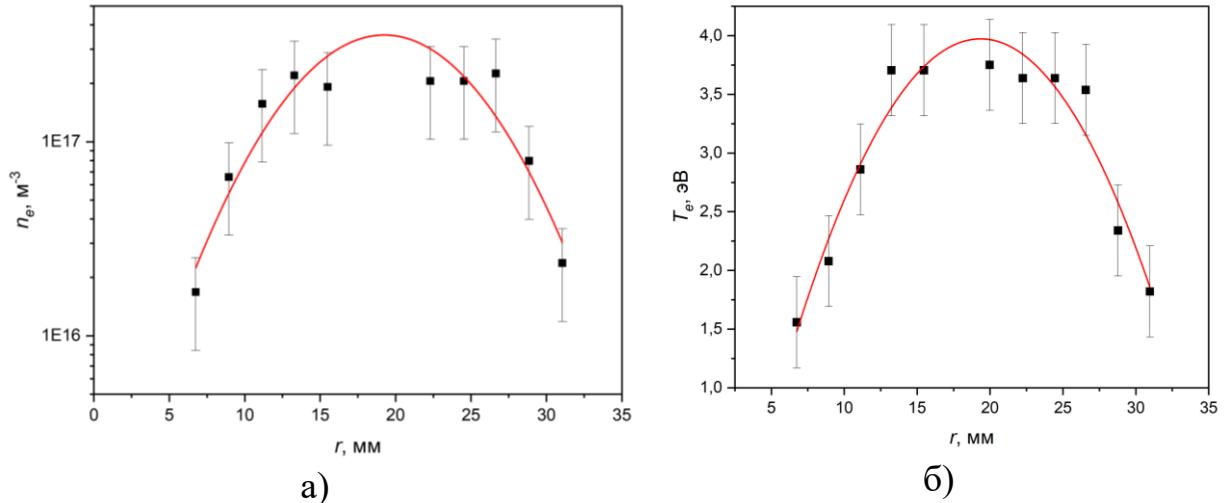


Рис. 6. Результаты определения параметров плазмы осесимметричного магнетронного разряда в среде аргона на удалении 7 мм от плоскости катода MPC: а) – радиальное распределение концентрации электронов (м^{-3}); б) – радиальное распределение температуры электронов (эВ)

Результаты коррелируют с литературными данными и соответствуют пространственному распределению интенсивности излучения, что подтверждает работоспособность и эффективность разработанной системы диагностики.

В четвертой главе рассмотрены вопросы влияния изотопов водорода на формирование тонких пленок при распылении вольфрама в дейтериевой плазме магнетронного разряда. Проблема накопления изотопов водорода в материалах плазмообращенных компонентов разрядных камер ТЯУ с магнитным удержанием плазмы остается до сих пор актуальной с точки зрения топливного цикла и радиационной безопасности в связи с использованием в будущих реакторах трития. Одним из важных аспектов этой проблемы является вопрос о закономерностях накопления и удержания изотопов водорода в пленках, образующихся при совместном осаждении распыляемых атомов материала облицовки камеры и атомов изотопов водорода из плазмы. Вольфрам, который на данный момент рассматривается как основной материал пластин дивертора и в качестве замены бериллия для внутренней облицовки вакуумной камеры ИТЭР, привлекает к себе особое внимание, так как по имеющимся литературным данным содержание изотопов водорода в вольфрамовых пленках, образующихся на поверхностях КОП на первой стенке и в затененных областях диверторной области ИТЭР, может оказаться на порядки величины выше их равновесной растворимости в кристаллическом вольфраме. В связи с этим актуальной является задача экспериментального

моделирования осаждения таких вольфрамовых пленок в среде изотопов водорода с применением магнетронной распылительной системы и дальнейшее исследование их морфологии и свойств.

В работе приведено описание выполненных экспериментов по напылению вольфрамовых пленок на экспериментальные кремниевые подложки при распылении вольфрамовой мишени ионами дейтерия в магнетронном разряде. Давление дейтерия во время горения разряда составляло 5 Па. Напряжение разряда U_p находилось в пределах 490... 500 В, ток составлял 0,5 А, а средняя плотность тока на мишень - около 200 мА/см², что соответствовало потоку ионов на мишень $1,2 \cdot 10^{18}$ ион D/(см²·с). Средняя энергия ионов, бомбардирующих поверхность мишени, принималась равной $0,85 \cdot U_p$, что составляет около 400 эВ. При таких условиях значительная часть ионов дейтерия отражается от вольфрамового катода и в виде быстрых атомов попадает на подложку вместе с распыленными атомами мишени.

Качественный и количественный анализ свойств полученных в экспериментах вольфрамовых пленок проводился с помощью различных методов исследования. Содержание дейтерия определялось методом спектрометрии атомов отдачи (САО) – эффективным методом определения содержания и распределения по глубине легких атомов изотопов водорода в пленках из тяжелых материалов. Элементный состав пленок оценивался методом обратного резерфордовского рассеяния (РОР). Исследование пленок методами РОР и САО проведено автором в лаборатории взаимодействия ионов с веществом НИИЯФ им. Д.В. Скobelьцына МГУ им. М.В. Ломоносова. Для получения спектров использовался пучок ионов гелия с энергией от 1,5 до 2,5 МэВ. На Рис. 7 представлены спектры обратного рассеяния и атомов отдачи для вольфрамовых пленок, напылённых на кремниевые подложки при различных расстояниях последних от катода-мишени МРС. По ширине вольфрамовых пиков на спектрах РОР можно судить о толщинах напыленных пленок, а по ширине спектров САО – о глубине залегания захваченных в пленках атомов дейтерия.

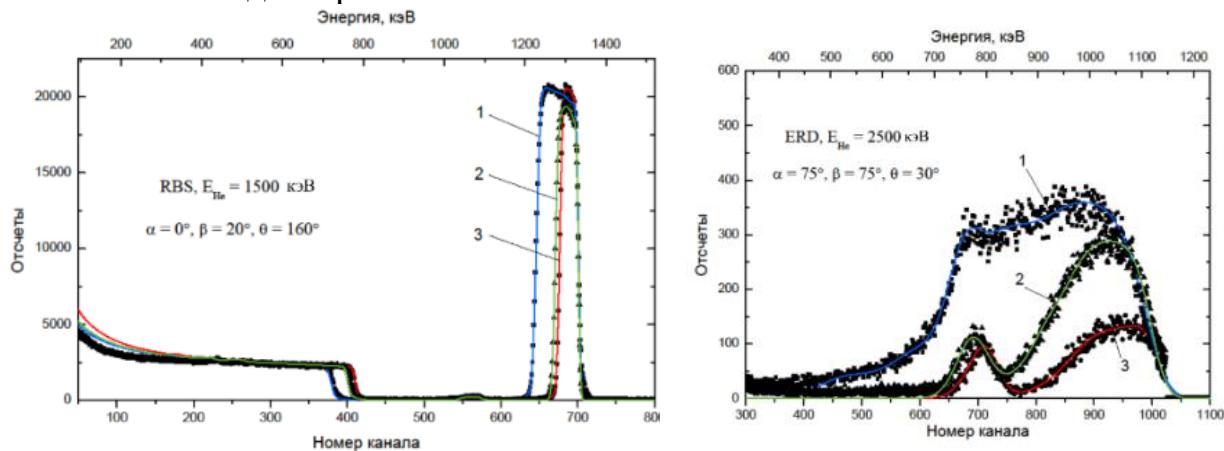


Рис. 7. Экспериментальное определение элементного состава напылённых пленок и содержания изотопов водорода в них: а) – спектры обратного резерфордовского рассеяния ионов Не; б) – спектры отдачи атомов дейтерия и протия, выбитых ионами Не

Морфология поверхностей пленок исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии. На Рис. 8 показаны микрофотографии поверхностей пленок, напыленных при различных расстояниях от мишени МРС до подложки (80 и 110 мм). Видно, что на поверхности имеется большое количество выпуклых округлых образований различных размеров. Черные пятна на микрофотографиях представляют собой материал подложки - кремний, что подтверждается микроанализом. Анализ показал, что количество выпуклых образований, как и содержание в пленках дейтерия, зависит от расстояния между мишенью и подложкой: чем больше это расстояние, тем меньше образований и меньше захваченного пленкой дейтерия. Эта корреляция позволяет предположить, что наблюдаемые образования представляют собой вздутия, заполненные дейтерием. По-видимому, атомы дейтерия, осаждающиеся вместе с атомами вольфрама, вследствие чрезвычайно низкой растворимости изотопов водорода в вольфраме, образуют зародыши газонаполненных пузырьков, центрами зарождения которых могут быть поры и дефекты. Давление в пузырьках увеличивается, в результате чего они растут, образуя проходящие сквозь пленку поры или поверхностные блистеры. При превышении давлением накопленного газа предела прочности материала пленки в некоторых пузырьках могут образовываться вскрывшиеся блистеры и сквозные поры.

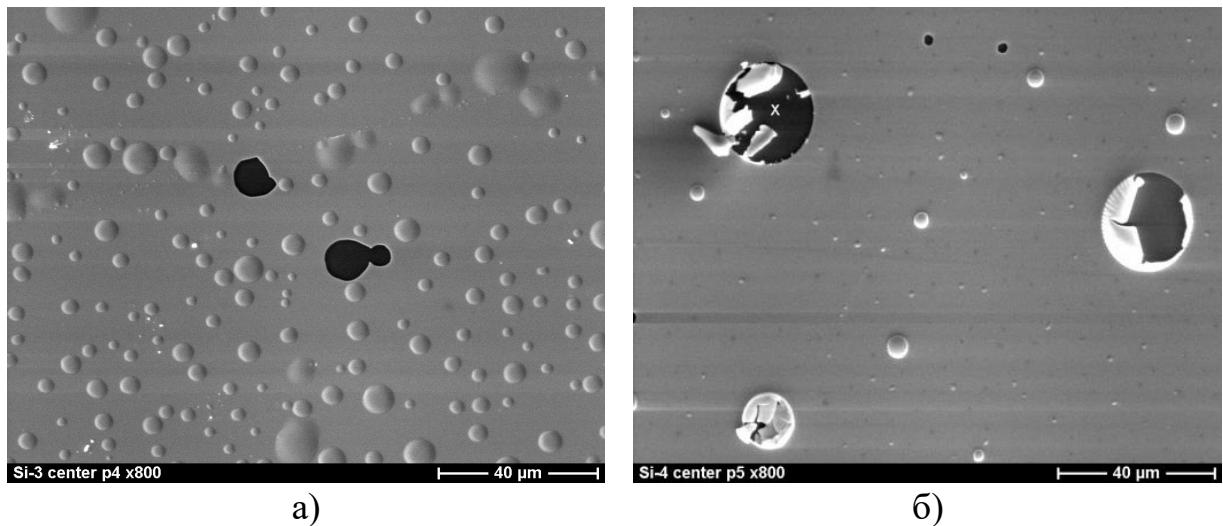


Рис. 8. Микрофотографии поверхностей вольфрамовых пленок, напылённых в среде дейтерия на кремниевые подложки. Расстояние от мишени МРС до подложки: а) – 80 мм; б) – 110 мм

В работе проведен анализ полученных экспериментальных результатов, выполнены оценочные расчеты давления и концентрации дейтерия в обнаруженных вздутиях, проведено сравнение с результатами определения содержания дейтерия в пленках методом САО. Установлено, что количество захваченного в пористых пленках водорода может достигать величин $\sim 10^{16} \dots 10^{17}$ ат./см², что на много порядков превышает равновесную растворимость в вольфраме. Исследовано влияние давления дейтерия в вакуумной камере при проведении экспериментов по магнетронному

напылению на его содержание в полученных вольфрамовых пленках. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с ростом давления содержаниедейтерия в пленках уменьшается. Делается вывод, что на накопление изотопов водорода в осажденных вольфрамовых пленках практически не влияют термализованные атомы и молекулы рабочего газа с тепловыми скоростями. Содержание изотопов водорода в вольфраме определяется быстрыми атомамидейтерия, отраженными от поверхности мишени МРС при её бомбардировке потоком ионов из плазмы магнетронного разряда. Зависимость количества захваченного газа от давления в таком случае объясняется тем, что часть отраженных атомов по пути к подложке в результате столкновений с тепловыми атомами теряет энергию и рассеивается, не долетая до подложки. Чем больше давление, тем меньше доля тех атомов, которые достигают подложку и накапливаются в растущей пленке, что и приводит к уменьшению концентрации захваченногодейтерия.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В ходе диссертационной работы исследованы с помощью расчетных моделей и экспериментально реализованы режимы работы магнетронных распылительных систем, позволяющие получать потоки высокоэнергетичных ионов изотопов водорода на мишень более $10^{18} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что необходимо для моделирования процессов в диверторе, где потоки частиц превышают потоки на первую стенку.

2. Разработана физико-математическая модель разряда в магнетронной распылительной системе для расчета движения электронов в частично замагниченной плазме с учетом их неупругих соударений с атомами плазмообразующего газа.

3. Разработан и реализован расчетно-экспериментальный бесконтактный метод пространственного определения параметров (температура и концентрация электронов) плазмы осесимметричных разрядов в инертных газах. Он основан на пространственной оптической эмиссионной спектроскопии излучения плазмы с учетом радиационно-столкновительной кинетики энергетических состояний атомов плазмообразующего вещества. Метод актуален для применения в магнетронном разряде как моделирующей среде для экспериментального моделирования процессов осаждения пленок на стенки КОП ТЯУ и переизлучения энергии в зоне дивертора в режиме отрыва плазмы (детачмента). Полученные при использовании разработанного диагностического метода распределения параметров плазмы (температура электронов $1,5 \dots 4 \text{ эВ}$, концентрация $\sim 10^{17} \text{ м}^{-3}$) коррелируют с литературными данными и соответствуют пространственному распределению интенсивности излучения, что подтверждает работоспособность разработанной системы диагностики.

4. Получены качественные и количественные зависимости содержания изотопов водорода в осажденных в средедейтерия вольфрамовых пленках от давления плазмообразующего газа и расстояния до поверхности осаждения.

Полученное в экспериментах количество захваченного в пористых пленках водорода достигает величин $\sim 10^{16} \dots 10^{17}$ ат./см², что на много порядков превышает равновесную растворимость. Подтвержден и обоснован факт аномально высокого содержания в пленках атомовдейтерия, не связанного с их накоплением в твердом растворе с вольфрамом.

5. Выявлено и объяснено существенное влияние быстрых отраженных легких атомов на процессы формирования и структуру пористых вольфрамовых пленок, которые могут образовываться на поверхностях плазмообращенных элементов конструкции в затененных областях диверторной области ТЯУ.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1 Кривицкий С.Е., Тройнов В.И., Серушкин С.В. Экспериментальное моделирование взаимодействиядейтериевой плазмы с твердым телом для условий термоядерного реактора ИТЭР // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № SP3. С. 155-160. (0,5 п.л./0,2 п.л.).

2. Автоматизированная диагностика плазмы магнетронного разряда по эмиссионным атомно-молекулярным спектрам / С.В. Серушкин [и др.] // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 44-49. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

3. Deuterium and Hydrogen Distribution in a Stack of Ta|(CD₂)_n|Ta Foils under the Action of High-Temperature Pulsed Nitrogen Plasma / S.V. Serushkin [et al] // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. Vol. 8., №4. P. 814-820. (0,7 п.л./0,15 п.л.).

4. Effect of deuterium on thin-film formation during tungsten sputtering in magnetron discharge deuterium plasma / S.V. Serushkin [et al] // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. Vol. 9., №4. P. 673-678. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

5. Hydrogen and deuterium distribution in tungsten foils irradiated with high-temperature deuterium plasma in H₂O- or D₂O- filled hermetic chambers / S.V. Serushkin [et al] // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. Vol. 9., №4. P. 859-867. (0,8 п.л./0,2 п.л.).

6. Determination of Spatial Distributions of Plasma Parameters of a Compact Magnetron Discharge / S.V. Serushkin [et al] // Physics of Atomic Nuclei. 2019. Vol. 82, №10. P. 1376-1381. (0,4 п.л./0,15 п.л.).