

На правах рукописи

СОРОКИН Иван Александрович

ДИАГНОСТИКА ПРИМЕСИ ВОДЫ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

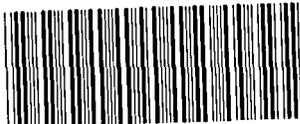
17 МАЙ 2017

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор



006656397

Москва 2017

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:

Визгалов Игорь Викторович кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика плазмы» НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

Метель Александр Сергеевич доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Высокоэффективные технологии
обработки», Московского государственного
технологического университета «СТАНКИН»

Шахатов Вячеслав Анатольевич доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник лаборатории «Плазмохимия и
физикохимия импульсных процессов», Института
нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН

Ведущая организация:

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится «26» июня 2017 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте: <http://ods.mephi.ru>.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «5» июня 2017.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.130.05, д.ф.-м.н.



Р.С. Стариков

Общая характеристика работы

Наличие примесей в остаточном газе для большинства термоядерных установок (ТЯУ) создает ограничение на эффективность преобразования вкладываемой мощности, ведет к значительным радиационным потерям, а также препятствует достижению необходимых параметров для осуществления термоядерной реакции в случае таких проектов как JET и ITER. Помимо резкого увеличения радиационных потерь вплоть до коллапса плазменного шнура, примесные компоненты также вытесняют компоненты рабочего газа из горячей области плазмы. В ТЯУ примеси в виде молекул и атомов как правило образуются в пристеночной области в периферии плазмы. Посредством диффузии примесные ионы достигают горячей области плазмы, где происходит их дальнейшая ионизация. Далее рано или поздно такие ионы должны попасть на первую стенку установки или в область лимитера/дивертора. Такой ион, прилетевший из горячей области плазмы, значительно ускоряется в плазменном слое за счет высокой кратности ионизации, сохраненной им благодаря низкому сечению рекомбинации в пристеночной области [1]. Коэффициент распыления материалов стенки в данном случае может достигать больших значений [2], что может в дальнейшем привести к попаданию сверхтяжелых примесей распыленного материала первой стенки или материалов лимитера/дивертора ТЯУ в плазму и значительным потерям запасенной энергии.

Одной из актуальных проблем, возникших при строительстве первого международного термоядерного реактора ITER, не имеющих на данный момент удовлетворительного решения, является оперативное обнаружение и локализация микротечей воды системы охлаждения первой стенки реактора внутрь вакуумной камеры, которая уже на этапе активного строительства установки требует решения в рамках утвержденного проекта и имеющихся диагностических систем. В сложившейся ситуации, когда небольшая течь воды может привести к труднопредсказуемым последствиям (начиная с возникновения лишней нагрузки на первую стенку, заканчивая радиационным коллапсом плазменного шнура и потерей герметичности камеры, состоящей из элементов с наведенной радиацией), необходимо оценить возможность использования диагностических систем реактора в рамках оперативного обнаружения микротечей воды системы охлаждения первой стенки.

Наличие кислородосодержащих соединений в камере плазменных установок также может приводить к множеству последствий. Изменение эмиссионных свойств поверхности из-за наличия диэлектрической пленки может провоцировать внутренние неустойчивости разряда, перераспределение компонент плазмы, изменение характера поверхностно-плазменного взаимодействия, а также еще ряд других эффектов. Наличие окислов на поверхности ухудшает условия многих технологических процессов, например, травления, осаждения покрытий и др. Таким образом, изучение природы возникновения неустойчивого зарядового обмена при поверхностно-плазменном взаимодействии представляется актуальной задачей, которая позволит использовать вторично-эмиссионные механизмы свойств неустойчивого поверхностно-плазменного контакта в технологии и более эффективном применении вкладываемой энергии.

Проблема контроля состава рабочей смеси газов и уровня примесных составляющих остро стоит не только для ТЯУ, где осуществляются или моделируются условия реализации термоядерной реакции, но и для большинства плазменных установок, в которых их наличие не приводит к серьезным последствиям, однако сильно искажает условия проведения экспериментов. Для моделирования условий пристеночной плазмы ТЯУ в большинстве случаев используются линейные плазменные симуляторы с различными способами формирования плазменных потоков. Одним из преимуществ линейных установок является возможность реализации плазмы смеси газов с произвольным соотношением ионных компонент. В этом случае для точного соблюдения условий эксперимента необходимо контролировать состав ионных потоков на образцы. Оптическая спектроскопия, обычно используемая для анализа состава, не дает адекватных данных о составе плазмы без дополнительных средств диагностики особенно, когда речь идет о многозарядных ионах, имеющих низкое сечение возбуждения в таких условиях. Таким образом, создание *in-situ* методики измерения состава ионных плазменных потоков, применимой в линейных плазменных симуляторах пристеночной плазмы ТЯУ, представляется актуальной задачей.

Вышесказанное предопределило цель настоящей работы и решаемые при этом задачи.

Целью диссертационной работы является:

Исследование влияния примесных компонентов на свойства пристеночной плазмы термоядерных установок и характер зарядового обмена при поверхностно-плазменном взаимодействии, а также разработка спектроскопических, зондовых и корпускулярных методов их диагностики. Отдельно рассматривается экспериментальная проверка принципиальной возможности диагностики паров воды в условиях и средствами анализа термоядерного реактора ITER.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальную проверку применимости оптической спектроскопии в качестве методики мониторинга присутствия микротечей паров воды системы охлаждения первой стенки ITER:

- а) Разработать калиброванный, прецизионный, регулируемый инжектор паров воды, отвечающий требованиям условий отработки методик оперативного обнаружения течей системы охлаждения.
- б) Определить чувствительность методики обнаружения полосы ОН, как осколка молекулы воды, в условиях близких к рабочим режимам ITER.
- в) Провести экспериментальную проверку возможности использования проектно-утвержденной диагностической системы Vis/IR в качестве системы мониторинга присутствия паров воды. Оценить чувствительность предполагаемой методики в условиях пристеночной плазмы ТЯУ.

2. Исследовать влияние кислородосодержащих примесей на характер зарядового обмена при поверхностно-плазменном взаимодействии:

- а) Разработать методику численного расчета мгновенной вольт-амперной характеристики электрода с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности, помещенного в сильнонеравновесную плазму.
- б) Разработать методику мониторинга уровня кислородосодержащих соединений, основанную на переходе диагностического разряда в автоколебательный режим по вторично-эмиссионному механизму.

3. Разработать методику *in-situ* измерения состава ионных плазменных потоков, применимую в линейных плазменных симуляторах пристеночной плазмы ТЯУ:

- а) Разработать конструкцию встраиваемого магнитного масс-анализатора ионного состава плазмы пучково-плазменного разряда для установки ПР-2.
- б) На основе численной модели движения заряженных частиц разработать методику интерпретации экспериментальных масс-спектров.
- в) Провести измерения относительных ионных потоков на двух линейных плазменных симуляторах пристеночной плазмы ТЯУ (ПР-2 и PSI-2).

Научная новизна результатов работы, полученных в диссертации, состоит в следующем:

1. Показана принципиальная возможность регистрации появления микротечей воды системы охлаждения первой стенки ИТЕР средствами оптической диагностики в диапазонах 306-310 нм (полоса OH^*) и диапазоне максимальной чувствительности системы Vis/IR (600 - 700 нм - линии H_α и D_α), а также экспериментально оценена чувствительность

2. Показано значительное влияние покрытия из боруглеродной пленки, применяемой при кондиционировании стенки ТЯУ, на время регистрации появления паров воды

3. Построена модель мгновенной вольтамперной характеристики электродов с тонкопленочным диэлектрическим покрытием

4. Разработана методика диагностики кислородосодержащих компонентов, основанная на переходе разряда в автоколебательный режим

5. Усовершенствована и апробирована *in-situ* диагностика ионного состава плазменных потоков на основе встраиваемого масс-анализатора, работающего в собственном магнитном поле имитационных установок. На данном этапе два прибора успешно внедрены на установках ПР-2 (НИЯУ МИФИ) и PSI-2 (Юлих, Германия).

Практическая значимость работы

1. Апробированные спектроскопические методики диагностики появления микротечей воды системы охлаждения могут быть

использованы в рамках бесконтактной диагностики плазмы ITER и других крупных термоядерных установок, что позволит повысить безопасность их эксплуатации

2. Предложенная модель мгновенной вольтамперной характеристики (ВАХ) электродов с тонкопленочным диэлектрическим покрытием может быть использована в качестве базы для расчета энергоэффективных режимов разряда с автовозбуждением колебаний, а также для диагностики состояния поверхности

3. Разработанная методика диагностики кислородосодержащих компонентов, основанная на переходе разряда в автоколебательный режим, позволяет проводить количественную диагностику таких примесей, а также подходит для локализации течи системы охлаждения ITER

4. Усовершенствованная и апробированная in-situ диагностика ионного состава плазменных потоков на основе встраиваемого масс-анализатора, работающего в собственном магнитном поле имитационных установок, может быть использована в линейных симуляторах с продольным магнитным полем. На данном этапе два прибора успешно внедрены на установках ПР-2 (НИЯУ МИФИ) и PSI-2 (Юлих, Германия)

5. Разработанный инжектор паров воды может быть использован в высоковакуумных установках для создания потоков паров воды в широком диапазоне. На данный момент инжекторы используются на установках:

- стелларатор J-2M (ИОФ РАН)
- линейный симулятор ПР-2 (НИЯУ МИФИ)
- большой масс-монохроматор МИФИ (НИЯУ МИФИ)
- установка с магнетронным разрядом МР-2 (НИЯУ МИФИ)

Положения, выносимые на защиту:

1. Порог регистрации в стеллараторе J-2M микротечи паров воды спектроскопическим методом по интенсивности полосы радикала OH^* в режимах близких к L-режиму ITER составляет $\sim 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (3×10^{16} молекул/с) и определяется скоростью эрозии бор-углеродного покрытия на стенке

2. Наличие защитной бор-углеродной пленки приводит к временной задержке появления сигнала и к экспоненциальному характеру нарастания интенсивности полосы радикала OH^*

3. При малом потоке (до 10^{18} молекул/с) соотношение интенсивностей линий H_{α}/D_{α} пропорционально концентрации воды, что позволяет диагностировать появление паров воды на уровне $\sim 6,0 \times 10^{-4} \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$ (10^{17} молекул/с)

4. Модель ВАХ электрода с диэлектрической пленкой на поверхности, помещенного в сильнонеравновесную плазму, учитывающая повышенную вторичную эмиссию поверхности и полевую эмиссию сквозь пленку

5. Методика диагностики уровня кислородосодержащих примесей по возникновению колебаний в цепи разряда, позволяющая регистрировать поток примесей на уровне $< 10^{16}$ молекул/с

6. In-situ методика корпускулярной диагностики ионного состава плазменных потоков для линейных плазменных симуляторов с собственным магнитным полем, включающая в себя универсальную конструкцию встраиваемого магнитного масс-анализатора, разработанную для установки ПР-2 и позволяющую регистрировать как положительные, так и отрицательные компоненты, и методику пересчета экспериментальных масс-спектров в относительные ионные потоки

Личный вклад автора

Следующие работы были произведены лично автором:

1. разработка, калибровка управляемого источника паров воды и экспериментальная проверка на плазменных установках применимости оптической спектроскопии в качестве методики мониторинга присутствия микротечей паров воды системы охлаждения первой стенки ITER. Изучение влияния присутствия паров воды на ионный состав плазмы

2. разработка методики обнаружения кислородосодержащих соединений с помощью регистрации появления вторично-эмиссионной автоколебательной неустойчивости. Разработка численной модели расчета ВАХ электрода с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности, помещенного в сильнонеравновесную плазму

3. разработка методики in-situ измерения состава ионных плазменных потоков в линейных имитационных установках на основе встраиваемого масс-анализатора, работающего в собственном магнитном поле плазменной установки

Содержание работы

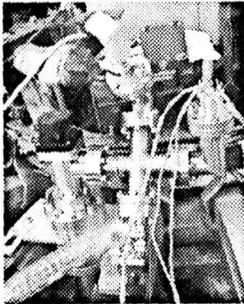
Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, изложены научная новизна и практическая ценность работы, описана структура и объем диссертации, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме исследования.

В первой главе на основе обзора литературы проведен анализ методов *in-situ* диагностики ионного состава плазмы и плазменных потоков в термоядерных установках и линейных плазменных симуляторах пристеночной плазмы ТЯУ с помощью встраиваемых диагностических систем, основанных на пространственном и временном разделении ионов с различными значениями отношения массы к заряду в электромагнитных полях. Проведено сравнение существующих встраиваемых масс-анализаторов ионного состава плазмы ТЯУ и имитационных установок. Сделаны выводы о применимости описанных приборов для *in-situ* диагностики ионного состава плазмы.

Во второй главе описывается экспериментальное моделирование микротечи воды в камеру ITER и отрабатываются *in-situ* методики ранней диагностики появления паров воды в плазме с помощью спектроскопических методов. Моделируются режимы чистящего разряда, предусмотренного во время частичной остановки реактора или кондиционирования поверхности первой стенки, на линейной установке ПР-2 (НИЯУ МИФИ), а также режимы, эквивалентные условиям на краю плазмы при L-режиме ITER, на стеллараторе L-2M (ИОФ РАН). Представлены два спектроскопических метода диагностики паров воды. Методы разрабатывались в рамках технических заданий контрактов с международной организацией ITER и позволяют использовать уже имеющиеся диагностические комплексы реактора.

Для отработки методик ранней диагностики течей системы охлаждения ITER был разработан термохимический источник паров воды (ТИПВ), основанный на термическом разложении гидратированной негашеной известня. Созданная модель течи паров воды в выключенном состоянии практически не влияет на фон остаточного газа вплоть до давлений 10^{-6} Па, имеет воспроизводимые режимы работы и возможность быстрого отключения потока паров воды. Для экспериментов по имитации близких к пристеночной плазме L-режима ITER на стеллараторе L-2M был разработан и установлен модуль для локальной инжекции паров воды в камеру ТЯУ, основанный на ТИПВ (рисунок 1).

а



б

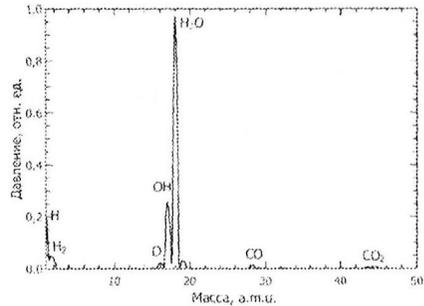


Рисунок 1 Инжектор паров воды, установленный на Л-2М: а - фотография инжектора, б - характерный масс-спектр газа в процессе калибровки инжектора

Проведенные эксперименты по моделированию течи системы охлаждения ИТЕР в условиях, близких к пристеночной плазме L-режима реактора, на стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН) показали, что возможно детектирование потока паров воды менее $10^{-4} \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$ с помощью спектроскопического метода в спектральной полосе 305–310 нм. Рост интенсивности излучения плазмы в области полосы OH^* проходит экспоненциально (рисунок 2).

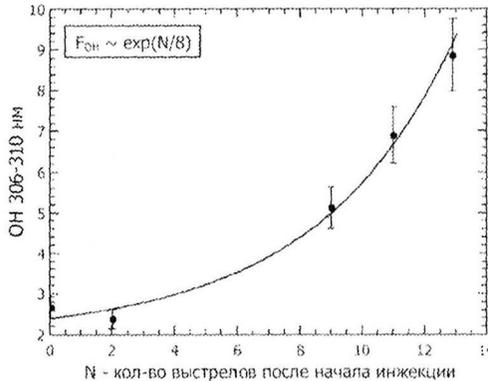


Рисунок 2 Рост интенсивности линии OH после открытия течи

Наблюдается накопительный эффект влияния паров воды на плазму, обусловленный активным взаимодействием с бор-углеродной пленкой на поверхности вакуумной камеры, приводящий к ее разрушению, увеличению тяжелых примесей в плазме (бор и углерод), повышенным радиационным потерям и коллапсу плазменного шнура. Активное

взаимодействие с материалами пленки на поверхности камеры также увеличивает время детектирования появления осколков молекул воды в плазме разряда. В проведенных экспериментах на Л-2М эта задержка составила ~30 минут. Такое же явление можно ожидать при появлении течи в ITER, где предполагаемые материалы для покрытия первой стенки (Be, Li) также химически взаимодействуют с водой.

Верификация спектроскопического метода обнаружения микротечей паров воды в ТЯУ, основанного на регистрации излучения в спектральной полосе 305 – 310 нм, показала достаточную чувствительность методики для раннего обнаружения на уровне $3,0 \times 10^{-5} \text{ Па} \times \text{м}^3 \text{ с}^{-1}$ и может быть использована в качестве стационарной диагностики ITER на первых стадиях работы установки. Ресурс применимости методики регистрации излучения в рассматриваемом диапазоне будет ограничен процессами постепенной деградации оптических элементов, отвечающих за УФ диапазон, под действием нейтронного излучения по мере перехода установки в более мощные режимы. Таким образом, возникла необходимость рассмотреть возможность диагностики появления течей охлаждения первой стенки с помощью штатной системы оптической диагностики IO Vis/IR [3], позволяющей производить диагностику всей поверхности дивертора реактора с пространственным разрешением 4,3 мм и 10 мм. Проведены тестовые эксперименты по регистрации динамики соотношения интенсивностей линий H_{α} и D_{α} при инжекции паров воды с помощью ТИПВ на установке ПР-2. Эти линии имеют довольно высокую интенсивность в разрядах низкого давления (например, тлеющий, RF и т.д.) и соответствуют области максимальной чувствительности IO Vis/IR (600 – 700 нм). В нормальных условиях чистящий разряд на гелии будет стимулировать десорбцию дейтерия и фонового протия с поверхности тайлов.

Параметры разряда в ПР-2 были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали условиям, предполагаемым в чистящем разряде ITER ($n_e = 2,0 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $T_e = 3 \text{ эВ}$), а также были оптимизированы по интенсивности линии H_{α} (как линии регистрируемого фрагмента молекул воды). В гелиевую плазму пучково-плазменного разряда (ППР) была добавлена небольшая примесь дейтерия (~ 7 %) для того, чтобы можно было проследить динамику относительной интенсивности линий H_{α}/D_{α} во время инжекции паров воды. Далее в камеру ПР-2 инжестировался поток паров воды с помощью ТИПВ без точечной локализации места инжекции. Поток паров воды варьировался до 10^{18} молекул/с постепенным

увеличением мощности нагревателя ТИПВ. На рисунке 3 представлено изменение формы оптического спектра при напуске паров воды из ТИПВ.

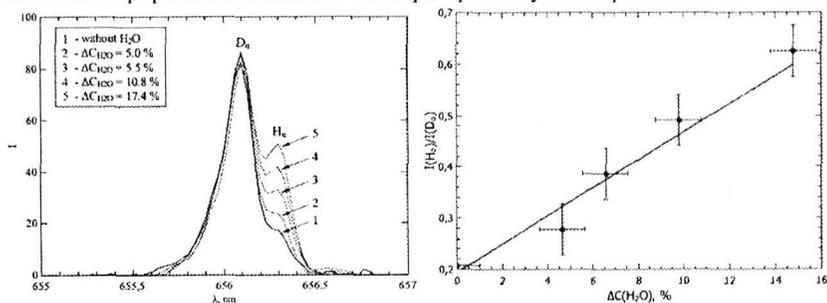


Рисунок 3 Динамика оптического спектра и относительной интенсивности линий H_{α}/D_{α} гелиевого ППР при напуске паров воды

Относительная интенсивность линий H_{α}/D_{α} пропорциональна приросту концентрации воды в камере ПР-2. Экспериментальная чувствительность в данном случае была оценена по превышению фонового уровня H_{α} и составила $\sim 10^{17}$ молекул/с, что находится в рамках требований ИТЕР к системе диагностики микротечи воды.

В третьей главе описывается влияние примеси кислородосодержащих соединений (в том числе воды) на эмиссионные свойства поверхности электродов, приводится стационарная модель протекания тока через электрод с пленочным покрытием, которая качественно объясняет N-образную форму ВАХ.

Наличие диэлектрических пленок на электродах или материалах вакуумной камеры может приводить к значительному увеличению эффективного коэффициента вторичной электронной эмиссии как за счет повышенного коэффициента вторичной эмиссии диэлектриков, так и за счет полевого усиления туннельным током электронов сквозь пленку. ВАХ такого электрода имеет N-образную форму с характерной областью малого тока в окрестности плавающего потенциала, а также областью отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), которая позволяет реализовывать режимы разряда с автогенерацией интенсивных колебаний. Пример характерной экспериментальной ВАХ алюминиевого электрода помещенного в неравновесную водородную плазму ППР ($n_e = 4,7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $T_e = 5,5 \text{ эВ}$) представлен на рисунке 4.

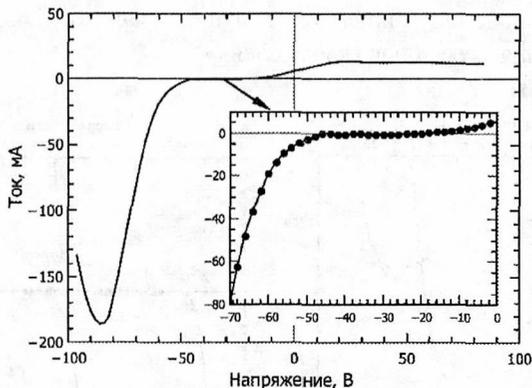


Рисунок 4 - Экспериментальная ВАХ алюминиевого коллектора в ППР. Увеличенная область с особенностью вблизи плавающего потенциала (справа).

Для объяснения экспериментально наблюдаемых особенностей N-образной ВАХ таких электродов, помещенных в неравновесную плазму, была разработана стационарная модель протекания тока, в основе которой лежит расчет равновесного потенциала поверхности пленки для каждого значения потенциала электрода из условия равенства нулю суммарного тока на поверхность. В балансе токов (1) учитываются токи ионов и электронов плазмы (j_i , j_e), соответствующие им токи вторичной электронной эмиссии ($j_{s.i.e}$, $j_{s.e.e}$), а также ток полевой эмиссии электронов из электрода сквозь диэлектрическую пленку ($j_{f.e.e}$). Геометрия задачи считается одномерной, что соответствует плоскому электроду большой площади. Моделируется область потенциалов, отрицательных относительно потенциала плазмы. Влияние мощности, вкладываемой от источника питания смещения электрода, на параметры плазмы не учитываются. Коэффициент прохождения электрона через потенциальный барьер на поверхности пленки ($0 < D < 1$) является единственным варьируемым параметром в расчетной модели.

$$j_i + j_{s.e.e} + j_{s.i.e} - j_e - j_{f.e.e}(1 - D) = 0 \quad 1$$

Результат расчета ВАХ для алюминиевого электрода с пленкой собственного оксида толщиной 10 нм представлен на рисунке 5 (кривая 1). Кривой 2 на рисунке 5 соответствует случай электрода с нулевым по толщине слоем собственного оксида, то есть без учета полевого усиления за счет зарядки внешнего слоя диэлектрика. Это

позволяет продемонстрировать влияние зарядки поверхности и туннелирования электронов сквозь пленку.

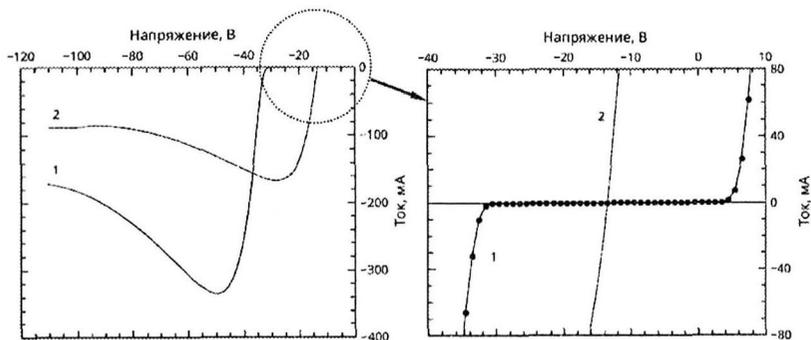


Рисунок 5 - Пример расчетных ВАХ с пленкой (1) и без пленки (2).

Полученные результаты расчетов ВАХ качественно согласуются с экспериментальными данными. В области плавающего потенциала достигается хорошее количественное соответствие с экспериментом. Протяженность «полочки» определяется началом роста тока полевой эмиссии в момент, когда напряженность поля достигает 2×10^9 В/м, что для пленки толщиной 10 нм дает разность потенциалов 20 В. Итоговая протяженность составляет 40 В. Толщина пленки однозначно связана с размером горизонтального участка ВАХ вблизи плавающего потенциала, что дает возможность определять толщину слоя диэлектрика на поверхности электрода по его ВАХ.

Область ОДС N-образной ВАХ, где возможна автогенерация колебаний, позволяет детектировать появление кислородосодержащих соединений в камере. В случае смещения потенциала такого электрода в область ОДС, рабочая точка становится неустойчивой [4]. При соблюдении баланса между окислением и травлением поверхности пленки, система будет очень чувствительной к малейшей добавке кислорода, который в свою очередь нарушит равновесие в сторону роста пленки и спровоцирует генерацию колебаний.

Принципиальная возможность использования такой методики регистрации кислородосодержащих компонентов была исследована на установке ПР-2. В качестве источника кислородосодержащих соединений был выбран ТИПВ. Моделировалось глобальное поступление воды в вакуумную камеру ПР-2 без точной локализации потока вблизи

исследуемого электрода. Эквивалентная электрическая схема для обнаружения перехода ППР в автоколебательный режим (АКР) представлена на рисунке 6.

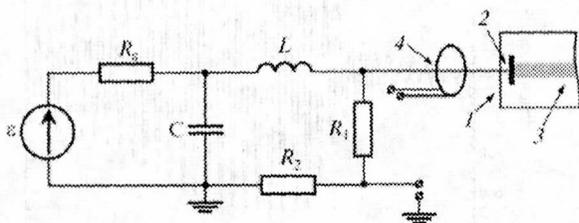


Рисунок 6 - Эквивалентная электрическая схема для обнаружения перехода разряда в автоколебательный режим: 1 - вакуумная камера установки ПР-2, 2 - коллектор электронного пучка, 3 - плазма, 4 - пояс Роговского.

С помощью источника ЭДС на коллектор электронного пучка подается напряжение смещения рабочей точки в области ОДС ВАХ. С – выходная емкость источника питания, индуктивность L предназначена для изменения параметров генерируемых колебаний потенциала на контактом электроде. Для измерения напряжения на электроде и тока в цепи коллектора предусмотрены высоковольтный делитель и пояс Роговского, соответственно.

После настройки неустойчивого равновесия с фиксированной рабочей точкой блока смещения производилась нелокализованная инжекция паров воды с помощью ТИПВ. Поток паров воды на поверхность электрода, помещенного в плазму ППР, составлял 3×10^{15} молекул/с. Менее чем через 30 с после начала напуска паров воды стали наблюдаться вспышки колебаний напряжения/тока в цепи коллектора, а уже через 40 с наблюдался переход ППР в АКР. Колебания потенциала электрода в момент перехода в колебательный режим представлены на рисунке 7. После выключения источника паров воды автоколебания существуют еще 30-100 с и исчезают после очистки поверхности коллектора от оксидной пленки под действием распыления ионами аргона.

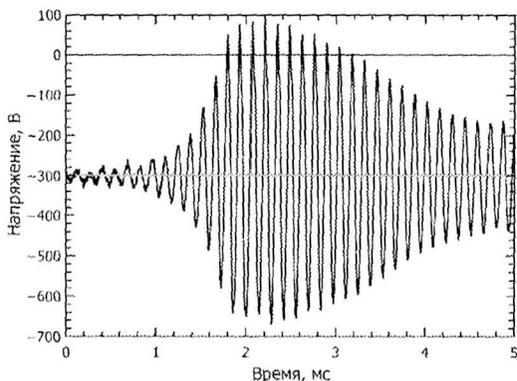


Рисунок 7 - Сигнал напряжения в цепи коллектора электронного пучка в момент перехода ППР в автоколебательный режим.

Эксперименты показывают, что описанный метод регистрации колебаний может применяться для быстрой регистрации превышения уровня кислородосодержащих соединений над базовым уровнем, при котором производилась настройка неустойчивого равновесия рабочей точки электрода с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности. Экспериментальная чувствительность методики составила 3×10^{15} молекул/с. В случае локализованной инжекции паров воды и использовании данной методики для определения местоположения образовавшейся микротечи можно увеличить чувствительность до 10^{14} молекул/с.

В четвертой главе рассматривается вопрос in-situ масс-спектропии замагниченной плазмы в линейных плазменных симуляторах пристеночной плазмы токамаков ПР-2 и PSI-2. Приводятся результаты исследования влияния напуска паров воды на ионный состав плазменных потоков в водородной плазме ППР на ПР-2, а также результаты измерения масс-спектров дугового разряда на PSI-2.

Масс-спектрометр замагниченной плазмы (MSMP) [5-6], разработанный в НИЯУ МИФИ для in-situ анализа ионного состава плазмы на установке PSI-2, был модернизирован и протестирована новая двухколлекторная система регистрации ионного тока. Новая версия (MSMP-03) оснащена одиночным зондом Ленгмюра для измерения локальных параметров плазмы и датчиком Холла для мониторинга локального магнитного поля. MSMP может работать совместно с другими экспериментальными программами по изучению процессов

взаимодействия плазмы с поверхностью, использующими другой манипулятор образцов или мишенной узел. Линейный вакуумный ввод может перемещать измерительную часть MSMP в положения, близкие к центру плазмы. Схема масс-спектрометра показана на рисунке 8. MSMP работает в режиме ионного зонда, извлекая ионы непосредственно из плазмы. Ионы, достигающие входную щель, ускоряются электрическим полем, которое приложено к ускоряющему промежутку. Затем они отклоняются магнитным полем самой установки ($\sim 0,1$ Т) и в результате разделяются по отношению массы к заряду. Масс-спектр ионов плазмы получается путем изменения ускоряющего напряжения, ионы регистрируются двумя коллекторами, расположенными на разных радиусах ионной траектории ($R_1 = 2,5$ см, $R_2 = 5$ см).

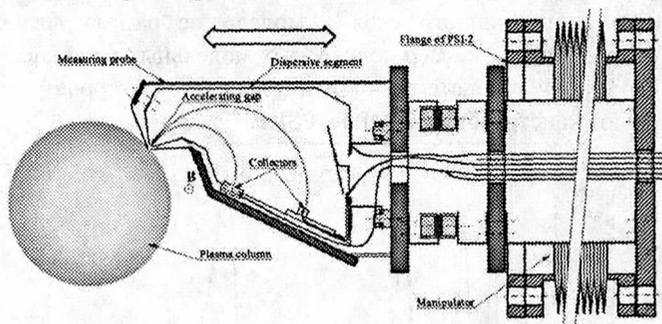


Рисунок 8 - Схема MSMP.

С помощью MSMP на PSI-2 были измерены ионные масс-спектры плазмы для четырех рабочих газов (дейтерий, гелий, неон, аргон) при различных настройках мощности дугового плазменного источника и давления в камере установки. В обычных режимах дейтериевой плазмы атомарная доля ионов преобладает над молекулярной (D_2^+ и D_3^+). В режимах с низкой мощностью разряда и большим газовым потоком доля молекулярных ионов существенно повышалась (режим рекомбинационной плазмы). Для He, Ne и Ag вклад дважды ионизованных ионных компонентов увеличивается с мощностью разряда и электронной температурой. Для He дважды ионизованная компонента достигает нескольких процентов, для Ne – до 10 % и для Ag – более 50 %. Разница объясняется разными энергиями ионизации He, Ne и Ag, а также изменением в плазмохимической кинетике разряда. Данные, полученные для многозарядных ионов аргона, уже сейчас активно используются в работах по моделированию эрозии конструкционных материалов ТЯР [7].

Поскольку экспериментальное определение аппаратной функции для рассматриваемой конструкции масс-спектрометра с помощью модельного источника невозможно, для оценки процентного соотношения ионных компонентов было проведено численное моделирование движения заряженных частиц в реальной геометрии существующего прибора, а также предложена методика количественного пересчета выходного сигнала анализатора. В модели рассматривается стационарное решение уравнения движения заряженных частиц в одночастичном приближении (взаимодействие между частицами и влияние объемного заряда не учитывается). Магнитное поле в области масс-анализа считается постоянным, локальные флуктуации электромагнитного поля – пренебрежимо малыми. Механизмы формирования эмитирующей поверхности и плазменного слоя в модели не рассматриваются. На рисунке 9 представлен пример получаемых модельных масс-спектров для двух-коллекторной системы, радиусы коллекторов которых соответствуют конструкции MSMP на PSI-2.

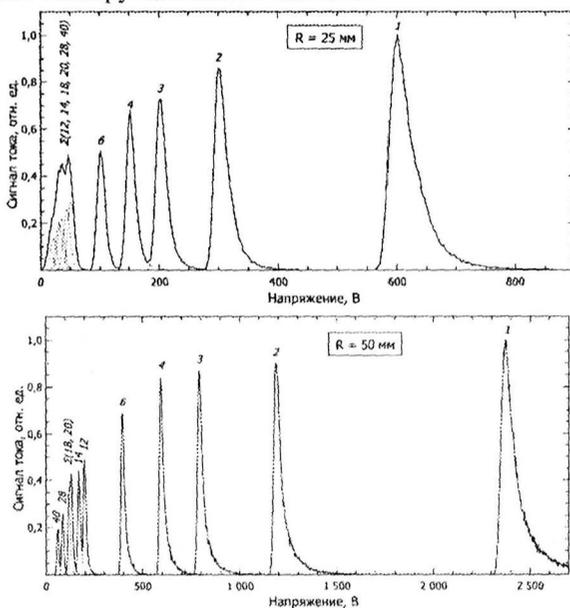


Рисунок 9 - Модельные масс-спектры в геометрии анализатора MSMP-03. Цифры над пиками - соответствующее значение отношения M/Z; прерывистые линии - модельный сигнал тока для конкретной массы

Результаты моделирования показали, что для того, чтобы по измеренному спектру определить истинные полные потоки ионов соответствующей массы необходимо учесть несколько факторов. Во-первых, поскольку анализатор работает в режиме ионного зонда, необходимо измеренный сигнал разделить на общий ток ионного насыщения на весь сегмент анализатора, что уменьшит влияние постепенного роста ионного тока. Во-вторых, нужно разделить полученный сигнал тока на напряжение развертки, что исключит линейный рост площади под пиками ионных компонентов, связанный со спецификой рассматриваемого анализатора. В случае неразрешенных пиков этот шаг также применим, но дальнейший анализ для них необходимо производить по амплитудному значению пика. В третьих, полученные значения площадей пиков (амплитудных значений - для неразрешенных масс), нормированные на общий интеграл, необходимо умножить на $M^{0.5}$ в соответствии с формулой Бома для ионного тока насыщения. Далее полученные значения будут характеризовать вклад отдельных ионных компонентов в общий ионный поток.

Для анализа ионного состава плазмы ППР на установке ПР-2 был разработан встраиваемый диагностический модуль [8-9], состоящий из статического магнитного масс-анализатора с 180° фокусировкой, использующего собственное магнитное поле установки, и системы зондов Ленгмюра. Уникальность конструкции анализатора состоит в том, что с помощью него можно регистрировать как положительные ионы, так и отрицательные компоненты ионного потока благодаря симметричной конструкции корпуса анализатора. Схема анализатора и внешний вид прибора показаны на рисунке 10.

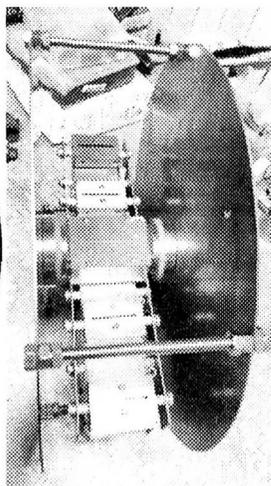
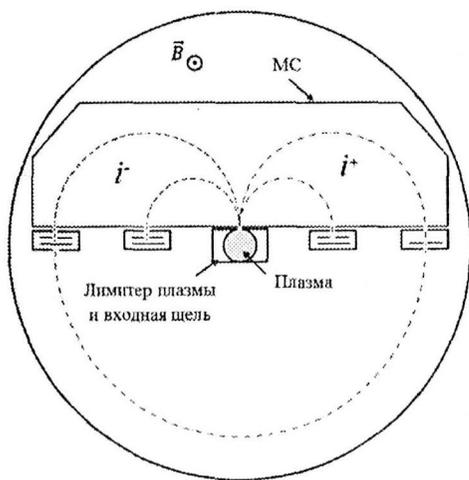


Рисунок 10 Схема и внешний вид комбинированного диагностического модуля на установке ПР-2 (система зондов Ленгмюра не показана)

Диагностический модуль устанавливается в область магнитной пробки установки ПР-2 для увеличения разрешающей способности масс-анализатора. Конструкция анализатора позволяет использовать его в качестве вакуумной диафрагмы. Также как и для анализатора на PSI-2 развертка массового спектра осуществляется изменением ускоряющего ионы потенциала, приложенного между входной щелью и сегментом анализатора. В анализаторе используются ионные траектории большего, чем в MSMP, радиуса (35 и 70 мм, соответственно), что обеспечивает лучшую разрешающую способность прибора во всем диапазоне масс. Пример масс-спектра ППП на смеси водорода и азота, снятый с одновременной регистрацией положительных и отрицательных ионных компонентов представлен на рисунке 11.

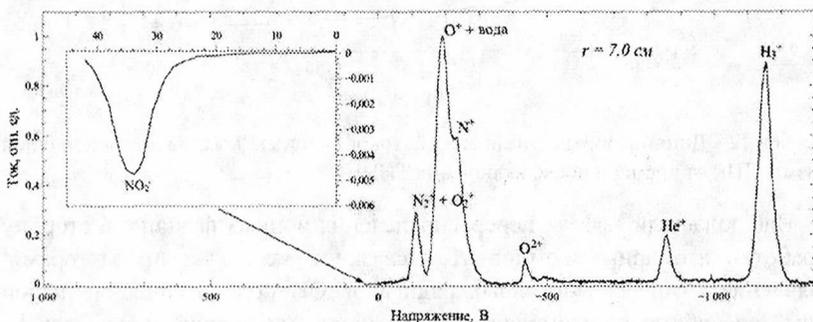
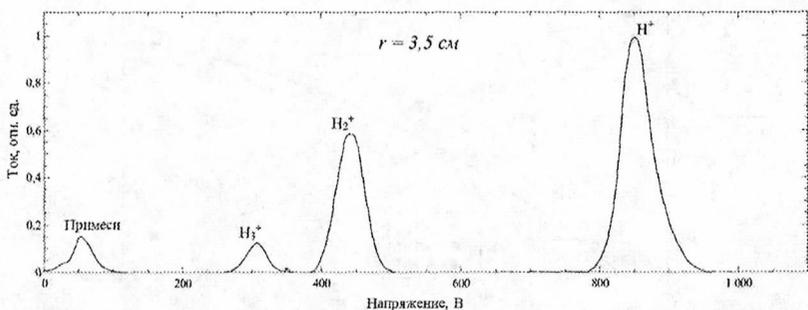


Рисунок 11 Масс-спектр ППР на смеси водорода и азота, снятый с одновременной регистрацией положительных и отрицательных ионных компонентов

Также в главе в рамках работ по изучению влияния присутствия паров воды на свойства пристеночной плазмы ТЯУ и возможности оперативной диагностики и локализации их источника было проведено исследование влияния малой примеси воды на ионный состав плазмы ППР на установке ПР-2 с помощью встраиваемого диагностического модуля.

Наблюдение за динамикой ионного состава проводилось при фиксированных параметрах ППР ($n_e = 5,2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, $T_e = 5 \text{ эВ}$). Эксперименты были проведены при постоянном потоке водорода (10^{19} молекул/сек) и линейном увеличении потока паров воды в течение часа, начиная от нижнего предела ТИПВ до 10^{18} молекул/сек. Динамика ионного состава водородной плазмы ППР при напуске паров воды представлена на рисунке 12.

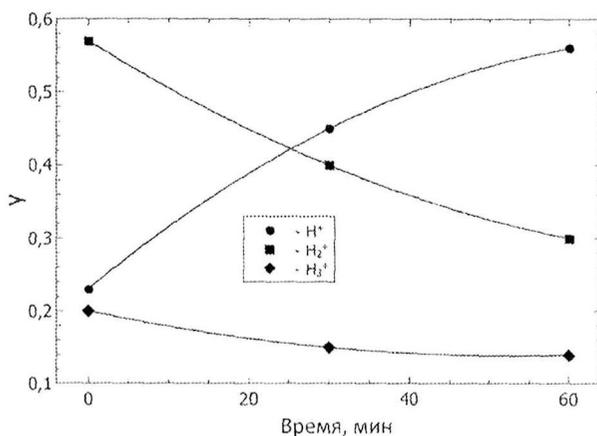


Рисунок 12 - Динамика относительных потоков ионных компонент водородной плазмы ППР от времени после включения ТИПВ

Наблюдаемый эффект перераспределения ионных фракций в сторону наработки атомарных компонентов связан с несколькими факторами. Появление химически активных радикалов ОН при диссоциации паров воды способствует изменению кинетики химических процессов в плазменном шнуре, а появление оксидных пленок на поверхности вакуумной камеры – к увеличению концентрации атомарного водорода за счет уменьшения коэффициента рекомбинации атомов водорода на поверхности вакуумной камеры. Описанный эффект может быть использован в маломощных ионных источниках для оптимизации режима работы без форсирования вкладываемой мощности.

В заключении представлены выводы и основные результаты диссертационной работы.

Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Показана принципиальная возможность регистрации появления микротечей воды системы охлаждения первой стенки ITER предусмотренными средствами оптической диагностики в диапазонах 306-310 нм (полоса OH^+) и диапазоне максимальной чувствительности системы Vis/IR (600-700 нм - линии H_α и D_α), а также экспериментально оценена чувствительность

2. Показано значительное влияние покрытия из боруглеродной пленки, применяемой при кондиционировании стенки ТЯУ, на время регистрации появления паров воды

3. Построена численная модель расчета мгновенной ВАХ электрода, помещенного в сильнонеравновесную плазму, с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности

4. Разработана методика диагностики уровня кислородосодержащих примесей по возникновению колебаний в цепи разряда и экспериментально определена ее чувствительность

5. Разработана и протестирована конструкция встраиваемого магнитного масс-анализатора для установки ПР-2, имеющая возможность измерения состава ионного потока из плазмы как в области положительных, так и отрицательных ионных компонентов

6. Для встраиваемых магнитных масс-анализаторов, использующих собственное магнитное поле плазменной установки, на основе элементарной модели движения заряженных частиц в электромагнитных полях разработана методика качественного пересчета экспериментальных масс-спектров в относительные ионные потоки

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 14 международных и всероссийских научных конференциях и семинарах:

Международные конференции (8 докладов):

1. Plasma Surface Interactions XXII, Рим, Италия, 2016
2. 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Новосибирск, Россия, 2016
3. Лазерные, плазменные исследования и технологии, НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 2017
4. Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, Россия, 2012, 2014, 2015
5. Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2015), Москва, Россия, 2015

Всероссийские конференции (8 докладов):

1. Физика низкотемпературной плазмы (ФНТП-2014), Казань, Россия, 2014
2. Диагностика высокотемпературной плазмы, Звенигород, Россия, 2011
3. Взаимодействие плазмы с поверхностью, НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 2013-2015
4. Современные средства диагностики плазмы, НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 2014, 2016

Публикации, содержащие результаты диссертации:

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ из них в журналах индексируемых в Scopus - 13, Web of Science - 9, РИНЦ - 13, в том числе первым автором - 4. Основные публикации по теме диссертации:

1. Kurnaev, V., Afonin, O., Antipenkov, A., Koborov, N., Mukhammedzyanov, T., Ochkin, V., Pearce, R., Pleshkov, E., Podolyako, F., **Sorokin, I.**, Urusov, V., Vizgalov, I., Voronov, G., Vukolov, K., Worth, L. Spectroscopic localization of water leaks in ITER // Fusion Engineering and Design. 2013. № 6–8 (88). С. 1414–1417.

2. Voronov, G. S., Berezhetskii, M. S., Bondar', Yu. F., Vafin, I. Yu., Vasil'kov, D. G., Voronova, E. V., Grebenshchikov, S. E., Grishina, I. A., Larionova, N. F., Letunov, A. A., Logvinenko, V. P., Meshcheryakov, A. I., Pleshkov, E. I., Khol'nov, Yu. V., Fedyanin, O. I., Tsygankov, V. A., Shchepetov, S. V., Kurnaev, V. A., Vizgalov, I. V., Urusov, V. A., **Sorokin, I. A.**, Podolyako, F. S., Antipenkov, A., Pearce, R., Worth, L. Testing

of the method for water microleakage detection from OH hydroxyl spectral lines at the L-2M stellarator // *Plasma Physics Reports*. 2013. № 4 (39). C. 277–288.

3. Kolodko, D.V., Mamedov, N.V., Vizgalov, I. V., Sinelnikov, D. N., Sorokin, I.A. Water vapor influence on the proton component of the hydrogen Penning discharge // 2014 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO). 2014. C. 1.

4. Popov V., Gutorov K., **Sorokin I.** Investigation of magnetic field topology in auto-oscillating discharge // *Phys. Procedia*. 2015. № 71. C. 127–132.

5. **Sorokin, I.**, Vizgalov, I., Gutorov, K., Podolyako, F. Concerning feasibility of water microleakage diagnostics by auto-oscillating discharge // *Phys. Procedia*. 2015. № 71. C. 116–120.

6. **Sorokin, I.**, Vizgalov, I., Bidlevich, O. In-situ mass-spectrometry of magnetized plasmas // *Phys. Procedia*. 2015. № 71. C. 428–432.

7. Gutorov, K.M., Vizgalov, I.V., **Sorokin, I.A.**, Podolyako, F.S. Current-voltage characteristic of the contact of a plasma with an electrode with a thin dielectric film on the surface // *JETP Lett*. 2015. № 100 (11). C. 708–711.

8. **Sorokin, I.A.**, Vizgalov, I.V., Gutorov, K.M., Podolyako, F.S. Effect of water vapor on the ionic composition of the hydrogen beam-plasma discharge // *Bull. Lebedev Phys. Inst*. 2015. № 42 (12). C. 350–355.

9. Gutorov, K.M., Vizgalov, I.V., **Sorokin, I.A.**, Podolyako, F.S. Study of the interaction of plasma with fusion reactor materials in linear simulators with beam-plasma discharge // *J. Surf. Investig*. 2016. № 10 (3). C. 612–616.

10. Vizgalov I.V., **Sorokin I.A.**, Kurnaev V.A. Monitoring of the relationship between Ha and Da emission as a detection method for water microleaks into ITER // *J. Phys. Conf. Ser*. 2016. № 747 (1). C. 2–7.

11. Kolodko D., **Sorokin I.**, Vizgalov I. Longitudinal electron energy distribution measurements in PR-2 mirror machine // *AIP Conference Proceedings*. 2016. № 1771. C. 040008.

12. **Sorokin I.**, Vizgalov I., Kolodko D. Stationary diagnostics of magnetized plasmas // *AIP Conference Proceedings*. 2016. № 1771. C. 050010.

13. Kolodko, D.V., Mamedov, N.V., Vizgalov, I.V., Sinelnikov, D.N., **Sorokin, I.A.** Increase atom/molecular ratio of the hydrogen discharge // *J. Phys. Conf. Ser*. 2016. № 768 (1). C. 1–5.

Используемая литература

1. Summers H.P. (1979) Science Research Council, Appleton Laboratory Report AL-R-5.
2. Roth J. (1986) Physics of Plasma Wall Interactions, pp. 351-388. Plenum Press, London/New York.
3. M. Davi и др. 2008 Rev. Sci. Instrum. 79 10F509G.S.
4. К. М. Gutorov, I. V. Vizgalov, E. A. Markina, and V. A. Kurnaev // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. № 74 С. 188
5. Vizgalov I.V. и др. // Instr. and Exp. Tech. 1999. № 5 (42)
6. Waldmann O., Fussmann G. // 34th EPS Conference on Plasma Physics. 2007. № 31F. С. 5.108
7. А.А. Ексаева и др. // PSI-2, PSI-2016, Rome, Italy

Подписано в печать 24.04.2017. Формат 60x84 1/16

Печ.л. 1,75. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии НИЯУ МИФИ.

115409, Москва, Каширское ш., 31