На правах рукописи

Крат Степан Андреевич

ЭРОЗИЯ И ОСАЖДЕНИЕ ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УГЛЕРОДНЫХ И ИТЭР-ПОДОБНЫХ СТЕНКАХ ТОКАМАКА JET

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

17 МАЙ 2017

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор

006656389

Москва – 2017

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

Научный руководитель:	Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Физика плазмы» НИЯУ МИФИ **Писарев Александр Александрович**
Официальные оппоненты:	**Афанасьев Виктор Петрович** доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры Общей физики и ядерного синтеза Национального исследовательского университета "МЭИ" **Будаев Вячеслав Петрович** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Национального Исследовательского Института «Курчатовский Институт»
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «26» июня 2017 г. в 15 часов. 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 8(495)788-56-99 доб. 95-26.

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

Автореферат разослан «5» мая 2017.

Учёный секретарь
диссертационного совета Р.С. Стариков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Управляемый термоядерный синтез (УТС) – это одно из перспективных направлений развития энергетики будущего. На текущий момент, наиболее реальным путем осуществления энергетически выгодного УТС является создание термоядерного реактора на основе токамака со стационарным удержанием плазмы в магнитном поле.

В настоящее время в рамках международной кооперации осуществляется проект создания международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), который нацелен на достижение положительного энергобаланса, когда выход энергии из плазмы за счёт термоядерной реакции превышает вкладываемую в плазму энергию,

Вопрос выбора материала реактора, обращенного к плазме, критичен для его работоспособности в силу влияния эффектов взаимодействия плазмы с поверхностью, таких как распыление поверхности плазмой, загрязнение плазмы распыленными частицами, переосаждение распылённого материала и накопление водорода в приповерхностных слоях. Выбор материала влияет на радиационную обстановку, время жизни и экономические показатели реактора

В ИТЭР в качестве материалов первой стенки будут использоваться бериллий в основной камере и вольфрам в диверторе, куда приходят большие плазменные потоки и тепловые нагрузки. Решение отказаться от использования углерода, который ранее планировался в качестве материала стенки реактора ИТЭР, связано, в частности, с недопустимо большой скоростью накопления изотопов водорода, включая радиоактивный тритий, в соосаждённых углеводородных слоях.

Создание ИТЭР является сложной и дорогостоящей задачей, поэтому все инженерные и физические решения для ИТЭР проверяются на исследовательских токамаках. Одним из них является европейский токамак JET, расположенный в Англии. Все инженерные решения для ИТЭР проходят предварительную апробацию на JET. В том числе, на JET проводились исследования с различными материалами, предлагаемыми для ИТЭР. В 2001-2009 годах JET работал со стенкой из углеродных материалов (JET-C) (это были так называемые углеродные кампании), а с 2011-года JET работал в условиях ИТЭР-подобной стенки из бериллия и вольфрама (JET-ILW).

Анализ эрозии материалов, транспорта эродированных частиц, их переосаждения и накопления изотопов водорода в них являются важной и актуальной задачей. Исследования этих процессов являлись частью международной программы JET, выполнявшейся в последние годы. Представленные в диссертации результаты получены в рамках реализации этой программы.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы было

- Исследование характеристик и отличительных особенностей распыления углерода и бериллия с первой стенки токамака JET,
- Количественные измерения эрозии и осаждения, а также накопления изотопов водорода в диверторе токамака JET для ИТЭР-подобной конфигурации, анализ различий в механизмах транспорта частиц в диверторе токамака JET с углеродной и ИТЭР-подобной стенками

- Исследование осаждения распыленного материала и накопления водорода в теневых областях дивертора в углеродной и ИТЭР-подобной конфигурациях

Для достижения этих целей, были решены следующие задачи:

1. Измерены сечения взаимодействия протонов с бериллием: рассеяния $^{9}Be(p^{+},p^{+})^{9}Be$, а также ядерных реакций $^{9}Be(p^{+},d_{0})^{8}Be$ и $^{9}Be(p,\alpha_{0})^{6}Li$ в диапазоне энергий от 0.4 МэВ до 4.15 МэВ для лабораторного угла анализа 165° для использования при количественном анализе содержания бериллия методом обратного рассеяния Резерфорда
2. Определены распределения суммарной эрозии углеродных, вольфрамовых и бериллиевых образцов с углублённых областей внутренней стенки токамака JET в кампаниях с углеродной и ИТЭР-подобной стенками и описаны характерные особенности процесса эрозии углерода и бериллия в сравнении друг с другом.
3. Установлены энергетические спектры дейтерия, распыляющего внутреннюю стенку JET в JET-C кампаниях 2001-2004 и 2005-2009. На основе полученных спектров определен диапазон энергий частиц дейтерия, наиболее существенно распыляющих внутреннюю стенку, выявлены механизмы, определяющие процесс распыления.
4. Измерено полоидальное распределение эрозии и переосаждения в JET-ILW диверторе, которое сопоставлено с данными для JET-C; выявлены различия в механизмах транспорта частиц в диверторе.
5. Изучены и сравнены особенности осаждения в теневых областях диверторов JET-C и JET-ILW

Методология и методы исследования

Эксперименты, описанные в этой работе, были проведены путём анализа поверхностей образцов (тайлов, вырезок из тайлов и специально изготовленных образцов коллекторов), которые использовались в токамаке JET во время кампаний с двумя конфигурациями первой стенки.

Анализ проводился в основном при помощи методов анализа ионным пучком: упругого обратного рассеяния (обратное рассеяние Резерфорда ОРР), и метода ядерных реакций (ЯР). Для анализа полученных спектров ОРР и ЯР применялся компьютерный код SIMNRA [1].

Для численного моделирования экспериментальных данных, использовался метод Монте-Карло.

Научная новизна работы

Впервые выполнено сравнение эрозии и осаждения в токамаке JET с углеродной и ИТЭР-подобной стенками. В результате этого исследования, были выявлены различия в эрозии межлимитерной области внутренней стенки, транспорте частиц в дивертор, накоплении в теневых областях дивертора. Эти различия были объяснены с точки зрения разницы во взаимодействии плазмы с поверхностью бериллия и углерода. Впервые был определён энергетический спектр низкоэнергетических частиц, распыляющих внутреннюю стенку, и продемонстрирована их роль в эрозии внутренней стенки. Впервые было получено подробное количественное распределение эрозии и осаждения в ИТЭР-подобном диверторе JET, а отличия от распределения эрозии и осаждения в диверторе JET с углеродной стенкой объяснены, исходя из установленных различий в распылении углерода и бериллия низкоэнергетическими частицами. Были измерены сечения взаимодействия протонов с бериллием

в наиболее широком их когда-либо исследованных диапазонов энергии под углом, используемом в ряде современных детекторов ОРР и ЯР.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальные данные по сечениям рассеяния протонов на бериллии, ядерным реакциям $^{9}Be(p^{+},d_{0})^{8}Be$ и $^{9}Be(p,\alpha_{0})^{6}Li$ в диапазоне энергий от 400 кэВ до 4.15 МэВ под углом детектора 165°.
2. Переход JET от конфигурации JET-C к конфигурации JET-ILW привел к уменьшению суммарной скорости эрозии внутренней стенки более, чем в четыре раза, скорости накопления эродированного материала в теневых областях в 34 раза, скорости накопления D в 10-20 раз в тайлах дивертора и в 45 раз в теневых областях, при этом источники частиц, ведущие к накоплению в теневых областях, не поменялись сколь-либо существенно.
3. На внутренней стенке эрозия в обеих конфигурациях происходила равномерно в тороидальном направлении, основную роль в распылении играли частицы дейтерия с энергией до ~120 эВ, роль более тяжелых примесей в плазме была невелика, а осаждение материала, распылённого со стенок, происходило в основном во внутреннем диверторе, вблизи точек пересечения сепаратрисы с мишенью дивертора (страйк пойнтов)
4. В диверторе распределения Be и C в двух кампаниях существенно различаются, что вызвано меньшим количеством циклов эрозии и переосаждения Be из-за малости коэффициента химического распыления Be, а распределения дейтерия и углерода практически идентичны из-за химического распыления углерода, при этом особенности распределения бериллия также могут свидетельствовать как о физическом, так и о химическом распылении Be, а накопление дейтерия в вольфрамовых покрытиях, наносимых для защиты углеродных тайлов, существенно больше, чем в металлургическом вольфраме, из-за наличия пористости.

5. В теневых областях дивертора существенную роль в осаждении и накоплении дейтерия играет не только распыление с поверхности тайлов дивертора, обращенных к плазме, но и паразитные разряды на обратных сторонах тайлов, при этом отношение C/Be высоко, а концентрация D выше, чем на поверхностях тайлов дивертора из-за меньшей температуры поверхности

6. Перенос углерода в теневые области происходит на меньшие расстояния, чем перенос Be, за счёт более высокого коэффициента прилипания и меньшей роли перераспыления в транспорте в теневых областях,

7. Показана применимость кода WallDyn для предсказания глобального транспорта частиц в токамаках с ИТЭР-подобной стенкой

Теоретическая значимость и практическая ценность работы

1. Экспериментально измеренные сечения рассеяния и ядерных реакций протонов на бериллии имеют большое значение для многих исследовательских групп, проводящих исследования методами ОРР и ЯР,

2. Данные по эрозии и переосаждению в кампании JET-ILW крайней важны для оценок возможной эрозии материалов и их переосаждения в ИТЭР, а также накопления трития в ИТЭР

3. Реконструкции энергетических спектров дейтерия, распыляющего внутреннюю стенку, объясняют разницу в эрозии Be и C, и позволяют делать предсказания о скоростях эрозии других потенциальных материалов обращённых к плазме элементов внутренней стенки.

4. Выявление зон осаждения в диверторе JET важно для описания транспорта частиц из основной камеры в дивертор. Эти данные могут быть использованы, в частности, для разработки коллекторов в проектах установок с жидкометаллическими стенками

5. Данные о скорости осаждения частиц в теневых областях дивертора JET дают новую информацию о механизмах формирования осажденных слоев и накоплении трития в теневых областях ИТЭР

Личный вклад автора

Следующие работы были произведены лично автором:

1. Обработка и моделирование спектров ОРР и ЯР, анализ данных по скорости суммарной эрозии внутренней стенки в JET-C кампании 2005-2009 годов
2. Экспериментальное измерение и анализ данных по скорости суммарной эрозии внутренней стенки в JET-ILW с использованием экспериментальных образцов, подготовленных в JET
3. Реконструкция путём компьютерного моделирования энергетических спектров дейтерия, распыляющего внутреннюю стенку в JET-C кампаниях 2001-2004 и 2005-2009
4. Экспериментальные измерения с образцами, вырезанными из тайлов JET-ILW дивертора, анализ полученных данных, составление распределений эрозии и осаждения в диверторе для первой JET-ILW кампании
5. Анализ и моделирование спектров ОРР и ЯР, обработка данных и компьютерное моделирование профилей толщин осаждений в теневых областях дивертора в JET-C кампании 2005-2009 годов
6. Компьютерное моделирование профилей толщин осаждений в теневых областях дивертора в JET-C кампании 2001-2004 годов
7. Экспериментальное измерение, обработка данных и компьютерное моделирование профилей толщин осаждений в теневых областях дивертора в JET-ILW кампании 2011-2012 годов

8. Разработка образцов для измерения сечений взаимодействия протонов с бериллием. Обработка данных ОРР анализа и расчёт сечений, основанный на них.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях:

1. Plasma Surface Interaction in Fusion Devices PSI XX, Аахен, Германия 2012. Работа признана лучшей среди работ молодых участников
2. Plasma Surface Interaction in Fusion Devices PSI XXI, Каназава, Япония 2014. Работа признана лучшей среди работ молодых участников
3. Plasma Surface Interaction in Fusion Devices PSI XXII, Рим, Италия 2016.
4. Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications PFMS 15 ,Aix-en-Provence, Франция, 18-22 Май 2015
5. Международная летняя школа по физике взаимодействия плазмы с поверхностью, 2014, Москва, Россия
6. 2ая Международная летняя школа по физике взаимодействия плазмы с поверхностью, (2014, Москва, Россия

Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ. Их список приведён в конце автореферата.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (100 литературных источников). Общий объём работы составляет 120 страниц, включая 61 рисунок, 12 таблиц, 17 формул.

Содержание работы

Введение

Во введении описаны мотивация и значимость работы, формулируются цели и задачи работы.

Обзор литературы

Обзор литературы охватывает исследования, сравнивающие взаимодействие плазмы с поверхностью в углеродном и ИТЭР-подобном JET.

Экспериментальные методы

Методы экспериментов и установки, на которых они проводились описаны в главе «экспериментальные методы». Экспозиция образцов, использовавшихся в работе, проводились на токамаке JET, а измерения с их использованием проводились с использованием ионных пучков на трёх установках на ускорителе TANDEM, расположенном в институте Физики Плазмы имени Макса Планка, в городе Гархинг, Германия. Для кампаний с углеродной стенкой были использованы установки RKS и BOMBARDINO. Для анализа образцов JET-ILW использовалась установка, оснащённая перчаточным боксом, предотвращавшим контакт между исследователем и бериллийсодержащими образцами.

Для проведения количественного анализа были выполнены измерения сечений взаимодействий 9Be(p,p)9Be, 9Be(p,d)8Be, 9Be(p,α)6Li. Сечения были измерены для угла детектора 165° в диапазоне энергий от 0.4 до 4.15 МэВ при помощи специальных образцов, разработанных для этого исследования. Полученные сечения показаны на рисунке 1а, б, в. Полученные результаты покрывают более широкий диапазон энергий, чем

все предыдущие измерения. Следует заметить хорошее совпадение с предыдущими измерениями измерений, проведённых под углами, близкими к 165°. Отличия вызваны разной геометрией измерений. Количественный анализ бериллийсодержащих поверхностей, представленный в этой работе, проводился при помощи измеренных сечений.

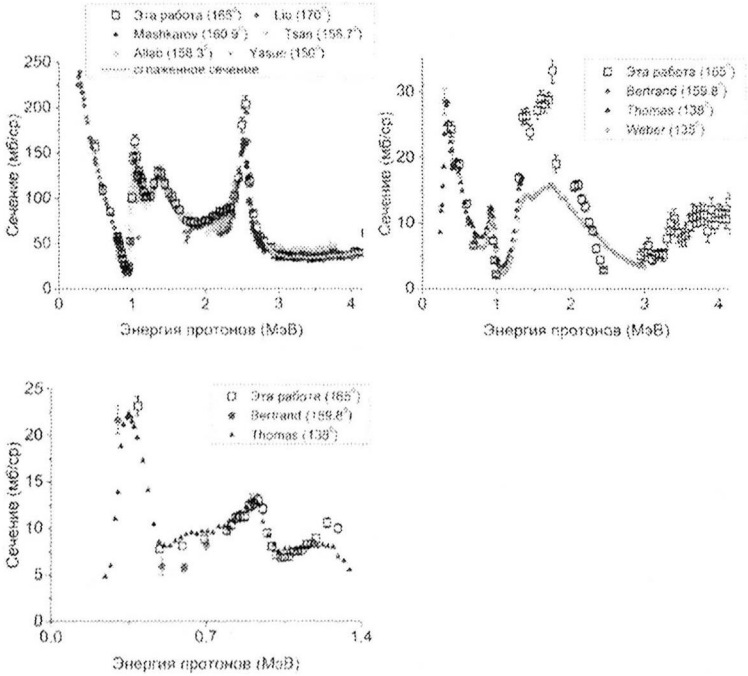

Рис. 1. Дифференциальные сечения рассеяния 9Be(p,p0)9Be (а), и ядерных реакций 9Be(p,d)8Be (б), 9Be(p,α)6Li (в) для угла рассеяния 165° в лабораторной системе отсчёта в диапазоне энергий от 400 до 4150 кэВ.

Эрозия внутренней стенки

В этой главе описаны исследования эрозии внутренней стенки токамака в углублённых областях между внутренними лимитерами и

энергетического спектра частиц дейтерия, распыляющих внутреннюю стенку.

В первом исследовании измерялась эрозия внутренней стенки токамака в углублённых областях между внутренними лимитерами. Для измерений эрозии использовались специальные образцы, которые устанавливались в отдельные тайлы внутренней стенки JET. Поверхность образцов была покрыта слоями W (в кампаниях 2001-2004, 2011-2012, 2013-2014) с тонким межслоем W (в кампании 2005-2009) или Be (в кампаниях 2005-2009, 2011-2012, 2013-2014) известной толщины. После конца экспериментальной кампании, толщины покрытий образцов измерялись заново, и эрозия рассчитывалась как разница толщин до и после кампании.

Эрозия W была практически полностью равномерной в тороидальном и полоидальном направлениях и одинаковой во всех анализированных JET-C и JET-ILW кампаниях (рисунок 2). Это значит, что примеси в плазме, которые были разными для двух конфигураций стенки, влияли несущественно на эрозию углублённых областей внутренней стенки. Скорость эрозии W была приблизительно 9×10^{11} атомов/см^{2}с$^{-1}$

Скорость эрозии Be была вдвое меньше скорости эрозии C в JET-C кампании 2005-2009. Это вызвано разницей в химической эрозии и эрозии частицами очень низких энергий (< 10 эВ), которые могут распылять углерод, но не бериллий, и говорит о существенном влиянии таких частиц. После перехода к ИТЭР-подобной стенке скорость эрозии бериллиевых образцов упала вдвое, по сравнению с образцами из кампании 2005-2009. Это объясняется ролью переосаждения в эрозии: до половины распылённого Be переосаждается в области распыления.

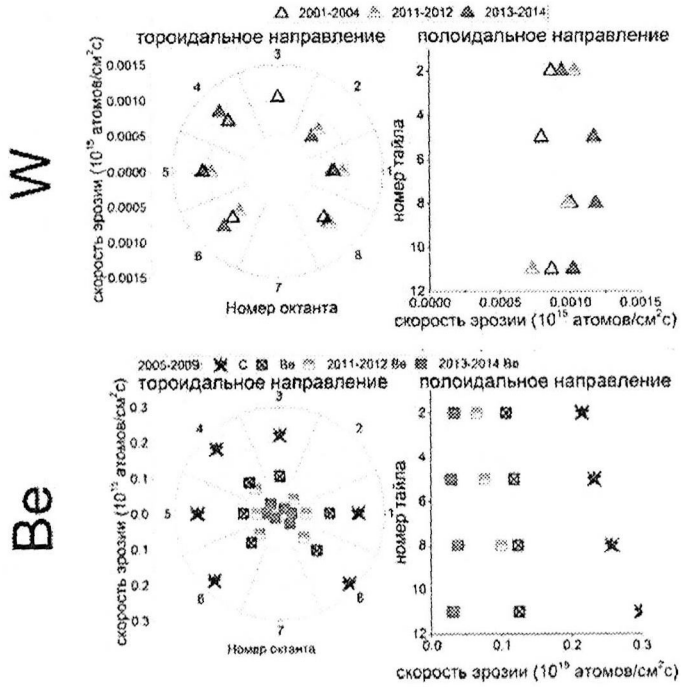

Рис. 2. Тороидальное (слева) и полоидальное (справа) распределение скоростей эрозии Be (сверху) и W (снизу) в углублённых областях внутренней стенки. Нумерация тайлов идёт сверху вниз.

Распределения скоростей эрозии были равномерны в тороидальном направлении, с небольшими особенностями, коррелирующими с областями ввода пучков нейтральных частиц. В полоидальном направлении скорость эрозии углерода росла к низу установки, а эрозия бериллия была или равномерной, или имела максимум вблизи центра внутренней стенки.

В исследованиях по эрозии C, Be, Ni и W изучался также энергетический спектр частиц дейтерия, распыляющих внутреннюю стенку. Исследование проводилось в JET-C кампаниях 2001-2004 и 2005-

2009 годов. Известно, что скорость распыления разных материалов различна и по-разному зависит от энергии D. Например, C и Be распыляются в основном частицами низких энергий, в то время как W наиболее эффективно распыляется частицами высоких энергий. Экспериментальные данные о скорости распыления 4-х материалов сравнивались с расчётами, в которых параметры энергетического спектра были подгоночными параметрами. Спектр частиц дейтерия искался в виде $I(E) \sim e^{E/k_1} + Ae^{E/k_2}$. Такая форма была выбрана на основе экспериментальных данных с токамака ASDEX Upgrade. Зависимость скорости распыления от энергии D рассчитывалась по формуле Экштайна для конфидентов распыления. Моделировалось распыление частиками с энергией от 0 до 10^5 эВ. Восстановленные спектры для двух JET-C кампании показаны на рисунке 3 в сравнении со спектрами для ASDEX-Upgrade. Спектры JET для двух кампаний очень похожи и характеризуются большим количеством частиц низких энергий и почти равномерным распределением частиц с энергией выше 300 эВ. Распыление Be, C и Ni определяется в основном частицами низких энергий. Распыление W определяется частицами с энергией выше 300 эВ. Высокоэнергетическая область восстановленного спектра имеет большую погрешность, так как основана на данных о распылении только одного элемента.

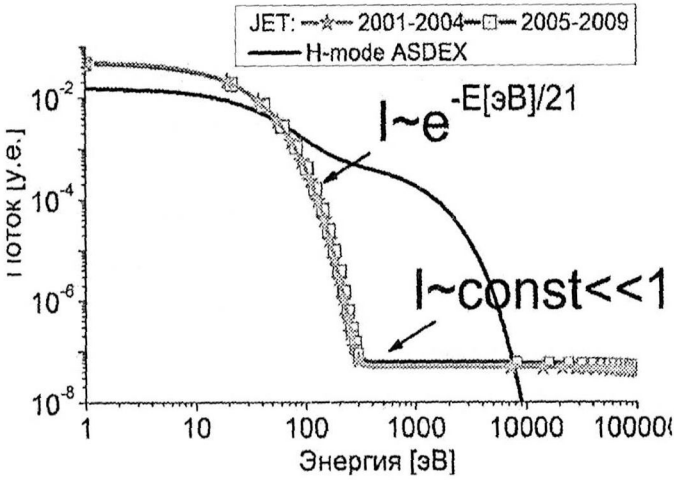

Рис. 3. Энергетические спектры частиц дейтерия, распыляющих внутреннюю стенку в JET-C кампаниях и ASDEX-Upgrade в H-моде.

Эрозия и осаждение в диверторе

Эта глава посвящена анализу транспорта материала в дивертор во время JET-ILW кампании 2011-2012. Дивертор состоял в основном из CFC тайлов, покрытых толстым (~20 мкм) защитным покрытием вольфрама. Центральный тайл был изготовлен из цельных вольфрамовых пластин. Схема дивертора представлена на рисунке 4.

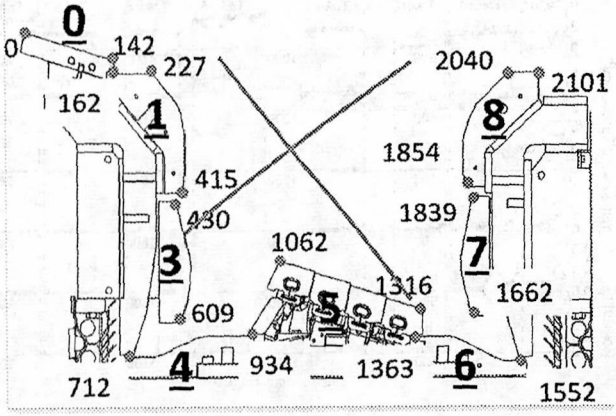

Рис.4. схема JET-ILW дивертора. Числа указывают s-координаты (система координат, проходящая по поверхности тайлов) ближайших к ним красных точек. Большие подчёркнутые числа указывают номера тайлов

Чтобы измерить эрозию поверхностей тайлов, на их поверхность были нанесены маркерные слои. На все тайлы кроме тайла 3 были нанесены W покрытия известной толщины с Mo межслоем, отделяющим их от W защитного покрытия тайлов. На поверхность тайла 3 для изучения переосаждения W был нанесён только слой Mo. После завершения кампании тайлы были извлечены из JET, и из них были вырезаны цилиндрические образцы для последующего анализа. При помощи ОРР были измерены конечные толщины W покрытий и Mo межслоёв. При помощи метода ядерных реакций были измерены распределения количеств Be, C и D в приповерхностных слоях тайлов после кампании. В результате измерений были получены распределения эрозии и осаждения в диверторе JET для первой JET-ILW кампании (рис. 5).

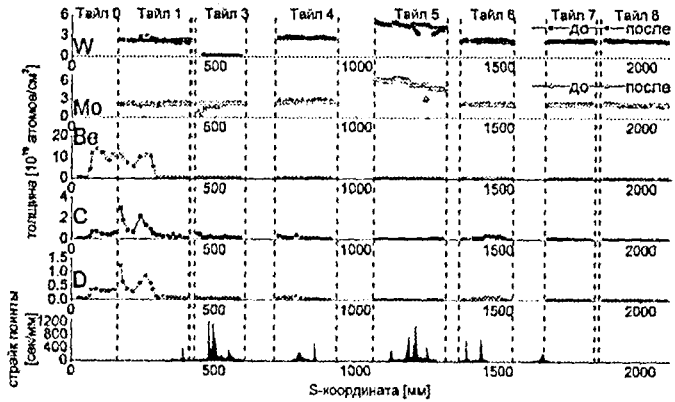

Рис. 5. распределение эрозии и осаждения в диверторе JET для JET-ILW

По сравнению с данными JET-C скорость осаждения материала в дивертор JET-ILW уменьшилась в 4-9 раз, а накопление D замедлилось в 10-20 раз. Меньшая скорость осаждения вызвана меньшим количеством примесей в плазме, которое было вызвано меньшей скоростью эрозии стенки, как показано в предыдущей главе посвящённой эрозии внутренней стенки. Существенное падение накопления D было вызвано меньшим содержанием D в соосаждённых слоях (приблизительно 10 атомных %) и более лёгким обезгаживанием металлических соосаждённых слоёв по сравнению с углеводородами, осаждавшимися в JET-C. На поверхностях тайлов 0 и 1 были обнаружены 94% от всего Be, обнаруженного на поверхностях тайлов дивертора, 71% D, 66% C, куда они прилетали из скрэп-слоя. Это сильно отличается от результатов JET-C, для которого максимум осаждения наблюдался на тайлах 4 и 6, где материал осаждался в результате многоступенчатого переноса по схеме эрозия-переосаждение-реэрозия. В JET-ILW распределения D и C практически идентичны, а распределение Be имеет некоторые особенности, которых нет в распределениях D и C. Это говорит о том, что для C химическое распыление является решающим фактором, а для Be его роль меньше. Так

как Be не распыляется частицами очень низких энергий, а его химическое распыление слабее C, он менее подвержен ступенчатому процессу переноса и меньшее его количество переносится вглубь дивертора. В отличие от JET-C, в котором весь внутренний дивертор являлся областью преимущественного осаждения из-за большого количества C в плазме, компенсирующего эрозию углеродных поверхностей тайлов, в JET-ILW нижняя часть тайла 1 и верхняя часть тайла 3 были зонами преимущественного распыления, так как содержание W в плазме было крайне мало и неспособно компенсировать распыление с этих тайлов.

Наблюдавшиеся распределения осаждённых материалов находятся в хорошем согласии с моделированием при помощи кода Walldyn, и могут служить его верификацией.

Накопление дейтерия в защитных W покрытиях тайлов было сравнено с накоплением в металлургическом W. Распределения дейтерия по глубине были измерены в нескольких точках тайла 5, как в областях, покрытых маркерами, так и в областях без покрытий. В маркерах содержание D было высоко (порядка 0.3%) вплоть до больших глубин с равномерным распределением по глубине. В металлургическом W содержание D экспоненциально спадало с глубиной. Разница распределений вызвана разной микроструктурой W покрытий и металлургического W. Эти наблюдения показывают, что, если накопление водорода является важным фактором, нельзя экстраполировать данные для осаждённого W на металлургический W.

Осаждение в удалённых областях

В этой главе представлено сравнительное исследование накопления переосаждённых материалов для JET-C и JET-ILW в удалённых областях, не имевших непосредственного контакта с плазмой.

Осаждение материала в удалённых областях дивертора изучалось при помощи специальных «образцов полостей» – коллекторов, установленных вблизи опор внутреннего и внешнего диверторов и под тайлом 5 дивертора, вне прямой видимости плазмы. Они состояли из двух тонких кремниевых пластин, расположенных параллельно друг другу и формирующих полость. В одной из пластин имелась тонкая входная щель, через которую частицы из дивертора могли влетать в коллектор. Внутри полости, при контакте с одной из её стенок, влетевшие частицы могли прилипнуть к ней, отразиться от неё или превратиться в стабильную летучую молекулу, такую как CH_4 и вылететь из полости. В результате в полости образовывался неоднородный по толщине слой осаждённых частиц. Путём анализа распределения этого слоя по толщине и его атомного состава, была получена информация о свойствах частиц, накапливающихся в удалённых областях. Одним из этих свойств является «коэффициент прилипания» s, равный средней вероятности частиц прилипнуть к поверхности при соударении с ней, характеризующий как далеко от плазмы будут накапливаться слои осаждённых частиц.

Распределения профилей по толщине и их элементный состав анализировались при помощи методов ОРР и ЯР. Для моделирования осаждения в полости использовался метод Монте-Карло. При моделировании считалось, что вероятность трансформации влетающей частицы в стабильную летучую молекулу равна нулю. Коэффициент прилипания s считался постоянным, не зависящим от энергии частицы, количества соударений с поверхностью уже испытанных частицей и угла

падения. Так как давление в области расположения коллекторов не превышало 0.1 Па, столкновениями частиц с газом пренебрегалось. Угловое распределение отражённых от поверхности частиц считалось косинусоидальным. Отдельно были получены профили, созданные частицами с коэффициентами прилипания от 0.01 до 1 с шагом 0.01. Чтобы узнать направление, в котором частицы влетают в полость, весь диапазон возможных направлений был разделён на 20 узких угловых секторов. Были получены профили толщин, создаваемых частицами, влетающими в полость в случайном направлении в пределах каждого из секторов. В результате была получена база данных профилей P_s^d для двадцати профилей (d=1...20) для каждого s от 0.01 до 1. Итоговый профиль был линейной комбинацией двух профилей с разным s, но с одинаковым распределением влетающих частиц по направлению $P = \sum_{i=1}^{20} a_i\left(b_1 P_{s_1}^i + b_2 P_{s_2}^i\right)$, где a_i, b_1, b_2 – неотрицательные подгоночные коэффициенты. Комбинация двух разных коэффициентов прилипания использовалась для того, чтобы описать формирование профиля частиц за счёт осаждения двух различных по природе видов частиц в полости, например, углеводородов и бериллийсодержащих молекул, которые наблюдались в JET-ILW. Помимо подгонки модельного профиля под экспериментальный, коэффициент прилипания оценивался ещё одним способом. Отношение общего количества частиц на верхней пластине (пластина со входной щелью) полости к общему количеству частиц на нижней пластине характеризует коэффициент прилипания независимо от распределения частиц, влетающих в полость, по направлениям. Сравнение этого соотношения, наблюдавшегося экспериментально, и полученного путём численного моделирования, позволяло произвести оценку коэффициента прилипания.

Восстановленные источники частиц для JET-C кампаний (1999-2001 и 2005-2009) показывают, что в основном частицы прилетали в полость из области вблизи страйк-поинтов (рис. 6 для полостей внутреннего дивертора). Это подтверждает известную модель, описывающую осаждение в удалённые области как двухступенчатый процесс. На первом шаге, углеводородные слои осаждаются на горизонтальный внутренний тайл 4 во время разрядов со страйк-поинтом, расположенным на вертикальном тайле 3. На втором шаге эти углеводородные слои распыляются во время ЭЛМов, порождая углеводородные радикалы и кластеры углерода, которые прилипают к поверхностям в удалённых областях.

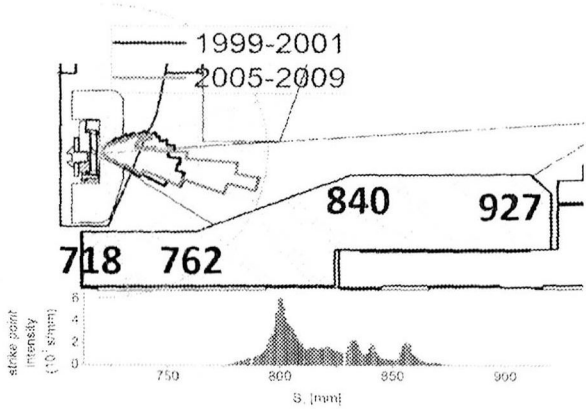

Рис. 6. Восстановленные конфигурации источников частиц, влетающих в коллектор-полость внутреннего дивертора в JET-C кампаниях

Для JET-ILW источники частиц были в целом сходны (рис. 7 для полости внутреннего дивертора). Большинство частиц приходило их областей вблизи страйк-поинтов. Однако для частиц C, наблюдался дополнительный источник частиц на обратной стороне тайла 3. Предполагается, что в этой области паразитные разряды могут приводить

к распылению углерода с его последующим переосаждением. Возможно, что этот эффект наблюдался и в JET-C кампаниях, но был невидим из-за гораздо большего осаждения в целом.

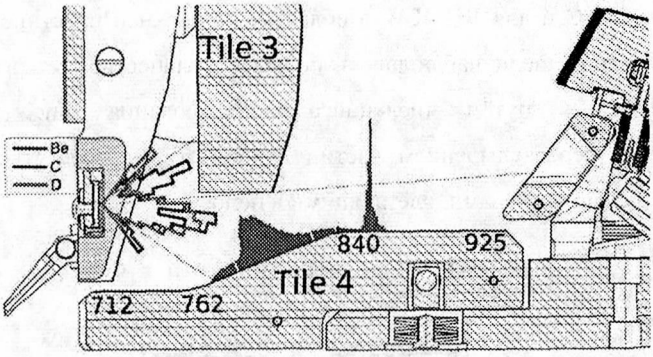

Рис 7. Восстановленные конфигурации источников частиц, влетающих в коллектор-полость внутреннего дивертора в JET-ILW кампании.

Также был проанализирован состав плёнок. В JET-C кампаниях плёнки состояли в основном из D и C, с D/C приблизительно 1. Материал, осевший после JET-ILW кампании, состоял из D, Be и C. Be был основным компонентом. Доля D D/(Be+C) была приблизительно 0.3, что сравнимо с количеством для углеводородных плёнок, полученных в JET-C кампаниях. Содержание D было выше, чем на поверхностях тайлов дивертора, что объясняется более низкой температурой поверхности в теневых областях. Отношение C/Be колебалось от 0.2 до 0.5 в зависимости от области расположения коллектора. Большое содержание C в осаждённых слоях объясняется различием в распылении и транспорте Be и C. C распыляется частицами очень низких энергий и подвержен сильному химическому распылению, которое приводит к ступенчатому транспорту по схеме распыление-переосаждение-перераспыление. Be, с другой стороны, менее подвержен перераспылению.

Скорость накопления осаждённого материала была ниже в JET-ILW, чем в JET-C. Be накапливался в 34 раза медленнее, чем C в JET-C. D накапливался в 45 раз медленнее, чем во время JET-C.

И для JET-C и для JET-ILW в областях на верхней пластине полости вблизи входной щели наблюдалось большее количество материала, чем предсказывалось путём численного моделирования (рис. 8). Это объясняется перераспылением частиц из области непосредственно под входной щелью частицами, влетающими в полость.

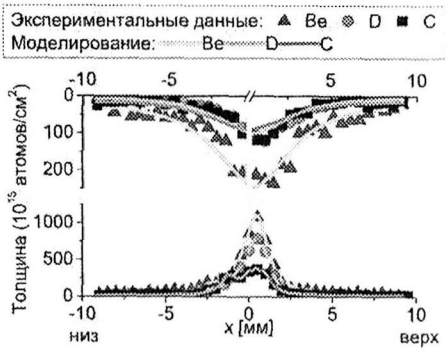

Рис. 8. Экспериментально измеренные (точки) и численно смоделированные (линии) профили толщин осаждённого материала в коллекторе-полости внутреннего дивертора JET-ILW

Для JET-C кампаний (1999-2001 и 2005-2009) наблюдался высокий коэффициент прилипания (S>0.7). Он слегка отличался между кампаниями (~0.9 для кампании 1999-2001 и ~0.75 для кампании 2005-2009 года), но был одинаков во всех коллекторах в одной и той же кампании. Численная модель, использующая только частицы с одним коэффициентом прилипания, адекватно описывала полученные данные.

Для JET-ILW коэффициент прилипания был приблизительно 0.3. В коллекторе внутреннего дивертора присутствовали частицы с высоким

(s>0.7) коэффициентом прилипания, составляющие приблизительно 10% всех частиц в коллекторе.

Согласно расчётам программного комплекса TRIM, отражение атомов Be от Be поверхности пренебрежимо мало при энергиях меньше 6 кэВ, а максимальный коэффициент отражения Be от Si приходится на энергию 90 эВ и равняется 0.15. Этого недостаточно для того, чтобы объяснить наблюдавшийся низкий коэффициент прилипания.

Коэффициент самораспыления Be может достигать 0.3-0.5 в зависимости от угла падения. Коэффициент распыления Be дейтерием может достигать приблизительно 0.1. Но, если бы перераспыление было основным фактором, приводящим к транспорту большого количества частиц на верхнюю пластину коллектора, можно было бы ожидать двух основных различий между численно моделированными и экспериментально полученными распределениями толщин. Во-первых, можно было бы ожидать большого количества частиц на верхней пластине полости вблизи входной щели, а во-вторых можно было бы ожидать очень малого количества частиц на нижней пластине вдали от входной щели. Такие различия должны были бы наблюдаться так как, в отличие от транспорта с малым коэффициентом прилипания, перераспылённые частицы прилетали бы на верхнюю пластину и оставались там. Существенное количество Be, по меньшей мере 10% всего Be в коллекторах, находилось на нижних пластинах коллекторов вне зоны прямой видимости входных щелей. Это значит, что перераспыление само по себе не может объяснить наблюдавшийся низкий коэффициент прилипания. Точный механизм, объясняющий низкий коэффициент прилипания частиц ещё не понятен, но, возможно, связан с химическим взаимодействием между Be и D.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах, включённых в Перечень ВАК РФ и индексируемых в базе данных SCOPUS:

1. Brezinsek S., Widdowson A., Mayer M., Philipps V., Baron-Wiechec P., Coenen J.W., Heinola K., Huber A., Likonen J., Petersson P., Rubel M., Stamp M.F., Borodin D., Coad J.P., Carrasco A.G., Kirschner A., **Krat S.**, Krieger K., Lipschultz B., Linsmeier Ch., Matthews G.F., Schmid K.. Beryllium migration in JET ITER-like wall plasmas // Nuclear Fusion. 2015. № 6 (55). С. 063021.

2. Heinola K., Widdowson A., Likonen J., Alves E., Baron-Wiechec A., Barradas N., Brezinsek S., Catarino N., Coad P., Koivuranta S., **Krat S.**, Matthews G.F., Mayer M., Petersson P.. Long-term fuel retention in JET ITER-like wall // Physica Scripta. 2016. № T167 (T167). С. 014075.

3. **Krat S.**, Coad J.P., Gasparyan Yu., Hakola A., Likonen J., Mayer M., Pisarev A., Widdowson A.. Erosion and deposition on JET divertor and limiter tiles during the experimental campaigns 2005–2009 // Journal of Nuclear Materials. 2013. (438). С. S742–S745.

4. **Krat S.**, Gasparyan Yu., Pisarev A., Bykov,I., Mayer M., de Saint Aubin G., Balden M., Lungu C.P., Widdowson A.. Erosion at the inner wall of JET during the discharge campaign 2011–2012 in comparison with previous campaigns // Journal of Nuclear Materials. 2015. (456). С. 106–110.

5. **Krat S.**, Gasparyan Yu., Pisarev A., Mayer M., von Toussaint U., Coad P., Widdowson A.. Hydrocarbon film deposition inside cavity samples in remote areas of the JET divertor during the 1999–2001 and 2005–2009 campaigns // Journal of Nuclear Materials. 2015. (463). С. 822–826.

6. **Krat S.**, Mayer M., Porosnicu C. The 9Be(p,p0)9Be, 9Be(p,d0)8Be, and 9Be(p,α0)6Li cross-sections for analytical purposes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. (358). C. 72–81.

7. Mayer M., **Krat S.**, Coad J.P., Hakola A., Likonen J., Lindig S., Widdowson A.. Erosion at the inner wall of JET during the discharge campaigns 2001–2009 // Journal of Nuclear Materials. 2013. № SUPPL (438). C. S780–S783.

8. Mayer M., **Krat S.**, Van Renterghem W., Baron-Wiechec A., Brezinsek S., Bykov I., Coad P., Gasparyan Yu., Heinola K., Likonen J., Pisarev A., Ruset C., de Saint-Aubin G., Widdowson A.. Erosion and deposition in the JET divertor during the first ILW campaign // Physica Scripta. 2016. № T167 (T167). C. 014051.

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