

УДК 533.924, 621.039.6

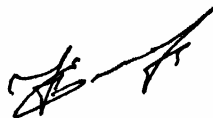
На правах рукописи

Елистратов Николай Геннадьевич.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПЛАЗМЫ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ СТЕНКИ
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2004

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Зимин А.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Лесневский Л.Н.

кандидат технических наук
Давыдов Д.А.

Ведущая организация: Московский энергетический институт (ТУ)

Защита состоится "13" октября 2004 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.08 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, кор. "Энергомашиностроение".

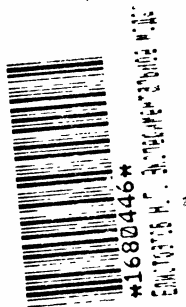
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.08.

Автореферат разослан 27 августа 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



КОПОСОВ Е. Б.



проект 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процессы взаимодействия плазмы с элементами конструкции будут оказывать значительное влияние на физические и эксплуатационные характеристики термоядерного реактора (ТЯР). Так, распыление компонентов, обращенных к плазме (КОП), а также десорбция и резмиссия летучих соединений и изотопов водорода могут существенно повлиять на энергетический и топливный балансы. При взаимодействии с плазмой в поверхностных слоях КОП и в продуктах осаждения будет накапливаться радиоактивный тритий, от количества и формы связи которого будет зависеть радиационная безопасность реактора и особенности мероприятий по детритизации стенок (извлечению и утилизации трития). Кроме того, на безопасность эксплуатации ТЯР может сильно повлиять характер продуктов эрозии (пленка с высокой адгезией или легко мобилизуемая пыль) и их способность вступать в химические реакции с водой и воздухом при аварийной разгерметизации камеры реактора.

Для проектирования КОП и планирования регламентных мероприятий по замене элементов конструкции, детритизации и подготовке стенки к работе необходимы данные по составу и свойствам поверхностных слоев компонентов, контактирующих с плазмой, а также по составу и свойствам продуктов эрозии, в первую очередь, по содержанию в них изотопов водорода. Из-за сложности и многофакторности взаимодействия плазмы с КОП, а также из-за дороговизны испытаний на полномасштабных установках для получения этих данных целесообразно проведение моделирующих экспериментов с использованием специальных устройств.

В крупных современных исследовательских токамаках (*JET*, *TFTR*, *JT-60*) обращенные к плазме компоненты изготовлены из углеродных материалов. В международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР в качестве кандидатного материала облицовки первой стенки планируется использовать бериллий из-за его малого заряда ядра, низкой растворимости водорода, а также стойкости к нейтронному воздействию. Элементы дивертора, испытывающие высокие тепловые нагрузки, предполагается изготавливать из вольфрама и углерод-углеродных композитов. В отличие от углеродных материалов для бериллия и вольфрама опубликованные экспериментальные данные по взаимодействию с плазмой изотопов водорода ограничены. В большинстве своем они получены в экспериментах с пучками ионов высоких энергий (несколько кэВ), доля которых среди частиц, поступающих на стенку реактора, мала. В связи с этим необходимо проведение моделирующих экспериментов в условиях, близких к ожидаемым на стенке ТЯР.

Таким образом, экспериментальное моделирование взаимодействия водородной плазмы с бериллиевыми и вольфрамовыми компонентами в



условиях, близких к ожидаемым на первой стенке и вблизи дивертора термоядерного реактора, является актуальным и имеет большое практическое значение.

Цель работы - экспериментальное моделирование взаимодействия стационарной водородной плазмы с бериллием и вольфрамом в условиях, близких к ожидаемым на первой стенке и вблизи горловины дивертора реактора ИТЭР на номинальном режиме работы.

Для реализации поставленной цели в качестве моделирующего устройства используется магнетронная распылительная система (МРС, магнетрон).

В соответствии с поставленной целью в работе **решались следующие задачи**:

- создание экспериментальных стендов с учетом особенностей работы с токсичным бериллием; обоснование и выбор конструкций моделирующих МРС;

- исследование энергетических характеристик магнетронного разряда в среде изотопов водорода; определение энергетического спектра ионов, поступающих на катод-мишень магнетрона;

- математическое моделирование динамики распыленных атомов в среде дейтерия (протия), расчет их потоков на мишень и подложки; нахождение требуемого диапазона давлений плазмообразующего газа для организации эффективного переосаждения атомов бериллия;

- определение коэффициента распыления бериллия, изучение микроструктуры поверхности бериллиевых и вольфрамовых мишеней, а также характера продуктов эрозии бериллия при взаимодействии с водородной плазмой;

- реализация режима эффективного переосаждения распыленных атомов, исследование свойств и состава переосажденных пленок и поверхностных слоев бериллиевых и вольфрамовых мишеней в зонах интенсивного ионного воздействия, определение содержания изотопов водорода;

- получение смешанных вольфрам-углеродных пленок, исследование их состава и содержания в них соосажденного дейтерия.

Достоверность результатов. Достоверность аналитических и численных результатов подтверждается сопоставлением с данными, полученными статистическими методами моделирования, а также с полученными в работе экспериментальными результатами. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением современных методик измерения и сравнением с данными других авторов. Приведены погрешности измерений.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, заключается в следующем:

- разработаны методики моделирования взаимодействия водородной плазмы

с материалами КОП ТЯР в магнетронных распылительных системах, в том числе в режиме эффективного переосаждения распыленных атомов на мишень; исследованы потоки ионов и распыленных атомов, реализуемые в моделирующих устройствах;

- впервые исследованы энергетические спектры ионов изотопов водорода, поступающих на катод-мишень магнетрона, в широком диапазоне давлений и индукций магнитного поля;

- разработана математическая модель динамики распыленных атомов в среде изотопов водорода, позволяющая рассчитывать концентрации и потоки осаждающихся частиц;

- определено содержание изотопов водорода в поверхностных слоях бериллиевых и вольфрамовых элементах мишеней в результате интенсивной бомбардировки ионами дейтерия (водорода) с энергией (150...300) эВ при высоких флюенсах; исследованы микроструктура поверхностей мишеней и характер продуктов эрозии бериллия;

- определено содержание изотопов водорода в пленках, полученных при осаждении (переосаждении) бериллия и вольфрама, для температур, близких к ожидаемым на стенке реактора ИТЭР.

Практическая значимость результатов работы:

- полученные результаты исследования взаимодействия плазмы изотопов водорода с бериллиевыми и вольфрамовыми компонентами могут быть использованы при проектировании элементов конструкции термоядерного реактора, анализе их ресурса и влияния на параметры плазмы, а также для прогнозирования накопления изотопов водорода в объеме реактора. Результаты проведенных исследований изложены в отчетах российской проектной группы ИТЭР, представленных в Центральную команду ИТЭР (Гархинг, Германия);

- разработанные методики моделирования в магнетронной распылительной системе могут быть использованы в исследованиях взаимодействия водородной плазмы с другими материалами;

- предложенная математическая модель динамики распыленных атомов может быть использована при оценке потоков осаждающихся частиц в технологии тонких пленок.

Личное участие автора. Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его равноправном участии: автором лично проведены исследования энергетических характеристик магнетронного разряда, экспериментально определен энергетический спектр ионов, предложена и программно реализована математическая модель динамики распыленных частиц; автор принимал равноправное участие в создании стендов, в проведении моделирующих экспериментов с бериллием и вольфрамом и в анализе полученных результатов.

На защиту выносятся:

- методики и режимы моделирования взаимодействия водородной плазмы с материалами КОП термоядерного реактора с использованием магнетронной распылительной системы;
- результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик разряда в моделирующих МРС в среде изотопов водорода;
- математическая модель динамики распыленных атомов в среде изотопов водорода;
- результаты исследований микроструктуры бериллиевых и вольфрамовых элементов мишеней и содержания в них изотопов водорода после воздействия ионами дейтерия (протия) с высокими флюенсами;
- результаты исследований содержания изотопов водорода в пленках, полученных при осаждении (пересаживании) распыленного бериллия и вольфрама в условиях взаимодействия с водородной плазмой.

Апробация работы и публикации.

Результаты работы представлялись на совещаниях российской проектной группы ИТЭР по проблемам безопасности термоядерных реакторов; на семинарах в Институте высоких температур РАН и в МИРЭА; на межотраслевых семинарах “Взаимодействие плазмы с поверхностью”, проводимых в МИФИ; на XI, XIII - XVI Международных конференциях “Взаимодействие плазмы с поверхностью” в Звенигороде; на 2-ом – 6-ом Международных симпозиумах по бериллиевой технологии в термоядерном синтезе.

Результаты диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из которых 21 в материалах Всероссийских и Международных конференций и симпозиумов, 11 статей в журналах и сборниках.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 194 стр. текста, 6 таблиц и 65 рисунков. Список литературы включает 129 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассмотрены процессы взаимодействия водородной плазмы с КОП и их влияние на работоспособность термоядерного реактора. Обосновывается необходимость экспериментального моделирования взаимодействия плазмы с материалами стенки и ставится задача исследования.

Основными факторами воздействия стационарной плазмы на первую стенку реактора-токамака на номинальном режиме работы являются: потоки нейтралов перезарядки и ионов с энергиями, не превышающими нескольких

сотен эВ (для ИТЭР - $(10^{15}...10^{16}) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$); потоки быстрых нейтронов с энергией $> 0,1 \text{ МэВ}$ (для ИТЭР $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и излучение (для ИТЭР $< 10 \text{ Вт/см}^2$). Результатами воздействия являются эрозия КОП, изменение состава поверхностных слоев, накопление в них изотопов водорода, в том числе и радиоактивного трития. В главе рассмотрены основные механизмы эрозии элементов конструкции и накопления трития в объеме реактора при взаимодействии с плазмой. Предположительно, основная масса трития в ИТЭР будет аккумулироваться в продуктах осаждения в теневых областях дивертора, как это имело место на токамаке *JET*, а также в щелях между элементами blankets и защитной облицовки первой стенки. Поэтому получение и исследование переосажденных слоев является важнейшей задачей моделирования взаимодействия плазмы с КОП ТЯР.

Большинство опубликованных данных по накоплениям изотопов водорода в бериллии и вольфраме получено в экспериментах с пучками ионов высоких энергий (от единиц до десятков кэВ). Для бериллия было обнаружено насыщение содержания водорода в поверхностных слоях при флюенсах $\gg 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Интегральные поверхностные концентрации дейтерия (трития) в бериллии и вольфраме при низких энергиях бомбардирующих ионов (100 эВ) были получены в плазменных экспериментах на стенде *TPE* (Сандиа, США). Практически не изучено накопление изотопов водорода в бериллиевых элементах, контактирующих с плазмой в условиях поступления на поверхность частиц вольфрама и углеводородов, а также в вольфраме при поступлении на его поверхность атомов бериллия.

Данные по составу и свойствам продуктов осаждения при эрозии бериллия ограничены. Наиболее достоверные результаты получены в экспериментах на установке *TPE*, где при температурах (373...573) К в осажденных слоях бериллия содержание дейтерия составляло $D/Be = (0,15...0,02)$. При этом условия осаждения были ближе к ожидаемым в диверторе, чем на первой стенке. Из анализа литературы следует, что недостаточно исследовано накопление изотопов водорода в продуктах осаждения бериллия при энергиях ионов и температурах, близких к ожидаемым на первой стенке. Практически отсутствуют данные по влиянию примесей вольфрама и углерода на содержание водорода в осажденном бериллии и окиси бериллия. Ограничены данные по свойствам продуктов совместного осаждения вольфрама и углерода и содержанию в них изотопов водорода, необходимые для прогнозирования накопления трития в диверторе с КОП, изготовленными из вольфрама и углеродных материалов.

В соответствии с поставленной целью, на основании анализа опубликованных результатов, а также исходя из необходимости исследования энергетических характеристик разряда и определения потоков ионов и распыленных нейтралов в моделирующих МРС, в заключительном разделе главы сформулированы задачи диссертационной работы.

В главе 2 рассмотрены стенды для моделирования взаимодействия водородной плазмы с материалами КОП ТЯР, созданные в процессе выполнения работы, и обоснован выбор моделирующих МРС.

Эксперименты проводились на двух различных стендах. Исследование энергетических характеристик моделирующих МРС и эксперименты с вольфрамом проводились на установке “МАУГЛИ”, размещенной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эксперименты с бериллием проводились на стенде “МАГРАС”, созданном на территории Института бериллия НПО “Композит”.

Оснащение экспериментальных стендов определялись, исходя из необходимости решения задач экспериментального моделирования, исследования характеристик разряда в моделирующих МРС и проведения экспериментов по технологии бериллиевых пленок. На стенде “МАГРАС” функционировали системы местной вытяжной вентиляции и фильтрации продуктов выхлопа откачных систем, необходимые при работе с токсичным мелкодисперсным бериллием. В главе представлены схемы стендов и описаны их основные системы.

Для решения поставленных задач использовались планарные МРС цилиндрической геометрии двух типов. Первый из них, - магнетрон М1 – представлял собой устройство с магнитной системой, выполненной на основе электромагнита с Ш-образным магнитопроводом (межполюсной зазор 18 мм) и двумя обмотками: формирующей и корректирующей. Диапазон регулирования радиальной составляющей индукции магнитного поля на поверхности катода B_{r0} составлял от 0,02 до 0,07 Тл. Магнитная система с двумя независимыми обмотками позволяла изменять конфигурацию магнитного поля и управлять таким образом геометрией кольца распыления мишени, что было необходимо в экспериментах по определению коэффициентов распыления бериллия и в исследованиях энергетического спектра ионов, бомбардирующих катод.

Основу второго магнетрона М2 с небольшими размерами катода-мишени ($\varnothing$ 40 мм) составляла компактная магнитная система, выполненная на постоянных магнитах из сплава КС-37 ($B_{r0} = 0,1$ Тл, межполюсной зазор 4 мм). Мишень прижималась к поверхности водоохлаждаемого корпуса, ее температура, контролируемая термопарой, регулировалась изменением тока разряда. Она могла быть набрана из секторов, выполненных, в общем случае, из разных материалов. Данный магнетрон обеспечивал высокие потоки ионов на катод (до $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$), что позволило проводить ускоренные испытания образцов. На нем проводились эксперименты в режиме переосаждения, необходимом для получения сравнительно толстых осажденных слоев.

В заключительном разделе главы дано описание использовавшейся в экспериментах автоматизированной системы измерения и регистрации основных рабочих параметров: давления газа, тока разряда, напряжения разряда и температуры мишени.

В главе 3 представлены результаты исследований вольт-амперных характеристик магнетронного разряда в среде изотопов водорода, потоков ионов на мишени моделирующих МРС и энергетического спектра ионов, бомбардирующих катод-мишень.

Экспериментально была обнаружена существенная зависимость вольт-амперных характеристик (ВАХ) магнетронных разрядов в среде изотопов водорода от материала катода-мишени. Так, для бериллия было характерно относительно невысокое разрядное напряжение U_p около 200 В с глубиной регулирования не выше 50 В посредством изменения давления плазмообразующего газа и магнитной индукции. Вольт-амперные характеристики имели линейный вид с наклоном около 20 В/А (рис.1). Схожие ВАХ были получены на катоде из алюминия, что позволило использовать его для замены бериллия при исследовании энергетических спектров ионов.

Для большинства материалов катодов (вольфрама, меди, различных немагнитных сталей, титана) в среде водорода (дейтерия) были характерны напряжения от 300 до 700 В, а ВАХ имели "классический" вид (рис. 1). На примере разряда с катодом из стали 12Х18Н10Т в главе представлено поведение таких вольт-амперных характеристик при изменении давления газа и индукции магнитного поля.

Распределения плотности ионного тока на катоды-мишени, необходимые, в частности, для оценки флюенсов ионов, были определены по результатам профилометрии и прямых измерений токов в цепях изолированных коллекторов, установленных как на периферийных участках мишеней, так и в местах крепления внешних подложек. Отношения максимальной плотности тока к средней по кольцу распыления составляли около трех. При разрядном токе 1 А ионный поток на мишень магнетрона М2 с постоянными магнитами достигал $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что дало возможность за время эксперимента (~ 1 ч) набирать дозы ионов, равные годовому флюенсу на первой стенке реактора ИТЭР. На внешних подложках и периферийных участках мишени потоки ионов составляли $\sim (10^{15} \dots 10^{16}) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Исследование энергетических спектров ионов, бомбардирующих катод магнетрона, было проведено с использованием трехэлектродного электростатического анализатора (трехэлектродного зонда) диаметром 13 мм и толщиной 4 мм, установленного в зоне распыления мишени магнетрона М1 с электромагнитом. В состав зонда входили два сеточных электрода и коллектор, расстояния между которыми составляли 0,5 мм. Функции распределения ионов по энергиям рассчитывались по измеренным тормозным характеристикам - зависимостям тока коллектора от коллекторного потенциала. Измерения были проведены с использованием системы сбора данных на базе компьютера IBM PC AT. В главе представлены методики проведения измерений и обработки результатов.

Исследовались энергетические спектры ионов в дейтериевых разрядах

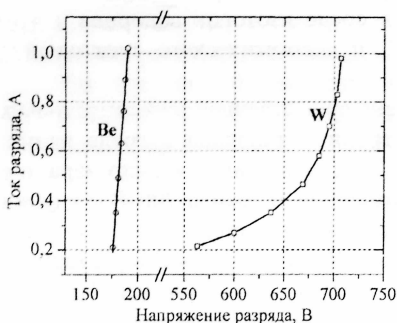


Рис. 1. ВАХ разряда в среде дейтерия при $p = 0,5$ Па

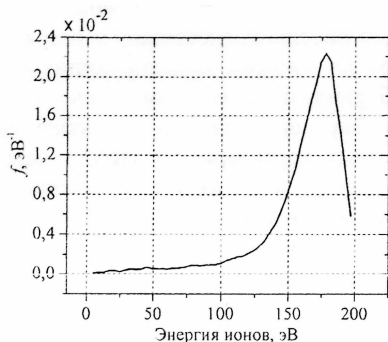


Рис. 2. Энергетический спектр ионов дейтерия при $p = 0,5$ Па, $B_{r0} = 0,02$ Тл

с алюминиевым катодом ($U_p \cong 200$ В). Измерения проводились при $B_{r0} = (0,02...0,06)$ Тл и $p = (0,5...5)$ Па при плотностях тока $(1...5) \cdot 10^{-2}$ А/см². Было обнаружено, что функции распределения имеют максимумы в области энергий $(0,7...0,9) eU_p$, а максимальные энергии ионов, поступающих на катод, составляют eU_p (рис. 2). С ростом магнитной индукции полуширины пиков функций распределения ΔE увеличивались. Так, при $B_{r0} = 0,02$ Тл $\Delta E = 36$ эВ, а при $B_{r0} = 0,06$ Тл $\Delta E = 85$ эВ ($p = 0,5$ Па). Такое поведение связано, скорее всего, с ростом ширины области ионизации в разряде при увеличении магнитной индукции. С повышением давления максимумы функций распределения сдвигались в сторону низких энергий, при этом характер зависимости ΔE от B_{r0} сохранялся. Обнаруженные особенности энергетического спектра ионов изотопов водорода учитывались при выборе условий экспериментов по определению коэффициентов распыления бериллия.

Энергетический спектр ионов при более высоких напряжениях был исследован в дейтериевом разряде с катодом из стали 12Х18Н10Т ($U_p = (400...600)$ В). Величины ΔE были близки к полученным на Al-катоде, а поведение функций распределения было схожим. Для сравнения также были проведены измерения энергетического спектра ионов в аргоновом разряде с катодом из стали 12Х18Н10Т ($U_p = (350...550)$ В). В этом случае функции распределения имели максимумы при энергиях, близких к eU_p , а ΔE составляло около 50 эВ и слабо зависело от магнитной индукции и давления газа.

Глава 4 посвящена математическому моделированию распространения распыленных атомов в условиях торможения в среде изотопов водорода.

С целью получения за время эксперимента сравнительно толстых осажденных слоев (сотни нм) для катодов из бериллия была разработана методика переосаждения выбитых атомов на участки мишени, не подверженные интенсивному ионному воздействию (зоны переосаждения). Переосаждение распыленных атомов на мишень достигалось за счет их

термализации (процесса, при котором выбитые частицы приходят в тепловое равновесие с окружающим газом) на небольших расстояниях от катода (менее 5 см) и последующей диффузии, в том числе и в сторону мишени.

Для определения условий эффективного переосаждения был проведен расчет динамики распыленных частиц, который состоял из двух этапов. На первом рассматривалось движение частиц до наступления термализации, в результате находилась плотность распределения источника термализованных атомов – так называемая функция виртуального источника (ФВИ). Искомые концентрации и потоки осаждающихся Ве-атомов рассчитывались на втором этапе - решении уравнения диффузии с найденной ФВИ в правой части.

Для нахождения ФВИ использовалась модель непрерывного торможения распыленных частиц вдоль прямолинейных траекторий. В результате проведенного методом Монте-Карло моделирования динамики ансамбля выбитых атомов в среде изотопов водорода было показано, что для расчета ФВИ в качестве критерия термализации можно использовать условие релаксации энергии: $E < E_g + \Delta E_T$, где $E_g = 3kT_g/2$, $\Delta E_T = M_s <V> \Delta V$, $\Delta V = \sqrt{\sigma^2}$, $<V> = (3kT_g / M_s)^{1/2}$, T_g – температура газа, σ^2 – среднеквадратичная дисперсия скоростей термализованных распыленных частиц с массой M_s .

В приближении упругих твердых шаров были получены соотношения для средних энергий и для угловых параметров движения выбитых атомов до и после очередного столкновения с частицей газа. На основе их был выведен дифференциальный закон торможения, связывающий потерю энергии распыленной частицы с проекцией s пройденного пути на направление вылета:

$$\frac{ds}{d\tilde{E}} = 2\lambda_0 \frac{1-\alpha}{\alpha^2 - 2\alpha} \frac{\sqrt{\tilde{E}}}{(\tilde{E}-1)\sqrt{\tilde{E}+\mu}} \left(\frac{\tilde{E}-1}{\tilde{E}_0-1} \right)^\xi,$$

$$\text{где } \tilde{E} = \frac{E}{E_g}, \quad \tilde{E}_0 = \frac{\varepsilon}{E_g}, \quad \lambda_0 = \frac{1}{n_g \sigma_{tr}}, \quad \alpha = \frac{2M_s M_g}{(M_s + M_g)^2}, \quad \xi = \frac{(\beta^2 - 1)(1 - \alpha)}{\beta(\alpha^2 - 2\alpha)},$$

$\mu = M_s/M_g$, $\beta = \cos \Psi_1$. Здесь n_g – концентрация частиц газа с массой M_g , ε – начальная энергия распыленного атома, Ψ_1 – средний угол рассеяния распыленного атома при первом столкновении с частицей газа. Длины термализации R рассчитывались численным интегрированием данного соотношения в пределах от ε/E_g до $1 + \Delta E_T/E_g$.

ФВИ рассчитывалась численным интегрированием соотношения, выведенного из условия баланса частиц, выбитых из малого элемента мишени магнетрона, и термализовавшихся в окрестностях точки (r, z, φ) (ось Oz совпадает с осью магнетрона, $z = 0$ соответствует поверхности мишени):

$$\rho(r, z, \varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi_0 \int_{r_1}^{r_2} r_0 dr_0 \frac{Y j(r_0)}{R^2 dR/d\varepsilon (\varepsilon + U)^3} \frac{2U\varepsilon}{\pi} \cos \vartheta.$$

Здесь $\varphi_1, \varphi_2, r_1, r_2$ – азимутальные углы и радиусы, ограничивающие зону распыления сектора мишени; Y – коэффициент распыления; $j(r_0)$ – плотность ионного тока на мишень в точке r_0 ; $\varepsilon(R)$ – энергия вылета, соответствующая длине термализации R , равной расстоянию от точки старта до точки (r, z, φ) ; U – энергия сублимации распыляемого вещества; ϑ – угол между вертикалью в точке старта распыленного атома $(r_0, z = 0, \varphi_0)$ и радиусом-вектором из точки старта в точку (r, z, φ) .

Решение уравнения диффузии $D\Delta n = -\rho(r, z, \varphi)$ с граничными условиями: $n(z = 0) = 0, n(z = z_{\max}) = 0, n(r = r_{\max}) = 0$ ($r_{\max}, z_{\max} \gg R$), проводилось с использованием функций Грина для стационарного источника. Диффузионные потоки распыленных частиц рассчитывались по закону Фика.

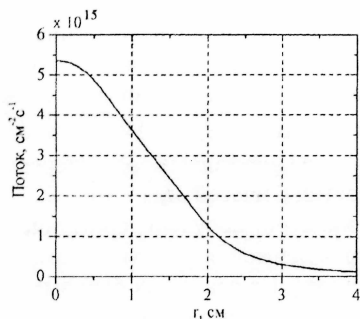


Рис. 3. Поток пересаживаемых Ве-атомов на мишень магнетрона при $p = 10$ Па

мишени ($0,3 \text{ см} < r < 1,1 \text{ см}$), что связано с малыми длинами термализации (менее 1 см). Исходя из этого, для организации пересадки бериллия на периферию мишени был выбран диапазон рабочих давлений от 5 до 10 Па.

В заключительном разделе главы получено соотношение для расчета потоков нетермализованных распыленных частиц в приближении их распространения вдоль прямолинейных траекторий. Оно использовалось для оценок потоков на подложки атомов вольфрама, имеющих на порядок большие, по сравнению с бериллием, длины термализации и существенно меньшие коэффициенты возврата на мишень.

В главе 5 представлены результаты исследований взаимодействия плазмы изотопов водорода с мишенями из бериллия и вольфрама. Приводится их сравнение с данными других авторов.

В работе были использованы следующие методы измерений и диагностики поверхности: коэффициент распыления определялся по изменению массы образцов; глубина эрозии мишени и толщины осажденных слоев находились с помощью контактной профилометрии; топография поверхности изучалась с использованием сканирующей электронной микроскопии; распределение продуктов эрозии по размерам исследовалось

методом просвечивающей электронной микроскопии частиц, осевших на стекловолоконный фильтр; элементный состав поверхностных слоев определялся методом резерфордского обратного рассеяния ядер гелия с энергией 1,5 МэВ, для вольфрам-углеродных слоев – электронным микроанализом; содержание изотопов водорода находилось методом ядер отдачи при энергии ядер гелия 1,8 МэВ, для вольфрам-углеродных слоев – методом термодесорбционной спектроскопии; фазовый состав поверхностных слоев мишеней определялся дифракцией отраженных быстрых электронов и рентгеновской дифракционной спектроскопией; анализ химических связей в вольфрам-углеродных пленках проводился методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Диагностическая поддержка работы осуществлялась ИЯС РНЦ “Курчатовский Институт” (лаборатория д.ф.-м.н. М.И. Гусевой), ИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова (группа к.ф.-м.н. В.С. Куликаускаса), ИФХ РАН (лаборатория д.ф.-м.н. А.П. Захарова).

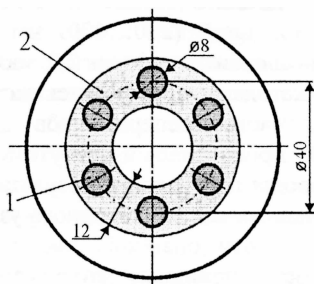


Рис. 4. Составная бериллиевая мишень:
1 - образец, 2 - кольцо распыления

Напряжение разряда составляло 200 В, средний поток ионов $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, температура образцов 700 К, средний флюенс $\sim 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Коэффициент распыления для всех образцов был приблизительно одинаковым и составил около 0,02, что соответствует данным других авторов. Продукты эрозии, собранные на подложках из монокристаллического кремния и стекловолоконном фильтре, в основном представляли собой пленки, образованные при осаждении распыленных атомов бериллия, и отдельные макрочастицы, распределенные по размеру поровну в двух группах - (0,03...1,0) мкм и (1...6) мкм, - предположительно, осколки блистеров. В результате ионной бомбардировки на границах зерен на поверхностях образцов образовались поры диаметром до 1 мкм, а также разломы и лопнувшие пузыри. Подобный рельеф сформировался, скорее всего, в результате блистеринга. Пленки, осажденные на кремниевых подложках с температурой не выше 373 К, состояли из бериллия, кислорода и соосажденного водорода в соотношениях $\text{O/Be} = 0,8$, $\text{H/Be} = (0,18...0,20)$.

Коэффициент распыления бериллия потоками ионов водорода определялся в экспериментах на магнетроне М1 с электромагнитом. Мишени состояли из 6 образцов, расположенных в области распыления и прижатых к охлаждаемой поверхности бериллиевой крышкой (рис. 4). Образцы представляли собой полированные таблетки диаметром 8 мм и толщиной 2 мм, выполненные из бериллия марок ТГП-56, ТГШТ, S-200F и листового проката из горячепрессованного бериллия.

Остальные результаты, представленные в главе, были получены в экспериментах на магнетроне М2 с постоянными магнитами в режиме эффективного переосаждения. Катоды-мишени набирались из полированных секторов радиусом 20 мм и толщиной 2 мм, изготовленных из бериллия ТП-56 и вольфрама ВА.

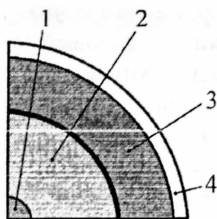


Рис. 5. Мишень после проведения эксперимента: 1 - центральная зона переосаждения; 2 - зона распыления; 3 - периферийная зона переосаждения; 4 - закрытая зона

После проведения экспериментов на мишенях наблюдались четыре зоны (рис. 5): центральная 1 и периферийная 3 зоны переосаждения, зона распыления 2 и закрытая зона 4. В зоне 2 мишень подвергалась интенсивной ионной бомбардировке со стороны плазмы. На ее поверхности формировался микрорельеф, характерный для больших ионных флюенсов ($10^{21} \dots 10^{22}$) см^{-2} . В зонах 1 и 3 образовывались слои продуктов осаждения толщиной (200...400) нм (в отдельных исследованиях - до 2,5 мкм).

Эксперименты с однородными бериллиевыми катодами проводились как в среде водорода, так и в среде дейтерия. Часть экспериментов для моделирования условий вблизи дивертора ИТЭР проводилась в присутствии углеводородов в рабочей атмосфере. Углеводороды поступали в результате эрозии углеводородсодержащих элементов, размещенных вблизи катодного узла магнетрона.

Исследования микроструктуры поверхности показали, что в зоне распыления мишени формировался характерный для блистеринга микрорельеф, в отсутствие углеводородов образовывались конусы. В периферийной зоне переосаждения формировалась однородная аморфная пленка без признаков шелушения.

Согласно результатам элементного анализа поверхностных слоев мишеней кислород в областях распыления был распределен в слое глубиной не более 50 нм, а его содержание не превышало 15 ат. %. При наличии углеводородов углерод в зоне распыления был сосредоточен на глубине не более 30 нм. В переосажденных слоях отношение атомов кислорода к бериллию составляло от 0,65 до 1,0. При поступлении углеводородов углерод не связывался по всей толщине переосажденного слоя, а содержался только в поверхностном слое толщиной (20...30) нм с концентрацией до 35 ат. %.

Внедренные изотопы водорода в зонах распыления мишеней были распределены в слое глубиной до 100 нм. В периферийной области переосаждения они аккумулировались по всей толщине осажденного слоя. В таблице 1 представлено полученное в ряде экспериментов содержание дейтерия (водорода) в поверхностных слоях мишеней (бериллиевые мишени

с наименованием “МБУ” соответствуют экспериментам в присутствии углеводородов). Там же приведены напряжение разряда U_p , средний поток ионов в зоне распыления $\langle \Phi_i \rangle$ и температура мишени.

Таблица 1.

Содержание изотопов водорода в поверхностных слоях Ве-мишеней

Мишень	Газ	U_p , В	$\langle \Phi_i \rangle$, см ⁻² с ⁻¹	Т, К	Зона распыления		D (H) / Ве в зоне пересадки
					Средний флюенс, см ⁻²	Содержание D (H), см ⁻²	
МБ-1	D ₂	205	$1,5 \cdot 10^{18}$	423	$2,8 \cdot 10^{21}$	$3,5 \cdot 10^{16}$	0,13
МБ-2	H ₂	200	$3,0 \cdot 10^{18}$	573	$1,0 \cdot 10^{22}$	$2,4 \cdot 10^{16}$	0,05
МБУ-1	D ₂	196	$9,4 \cdot 10^{17}$	353	$1,7 \cdot 10^{21}$	$3,6 \cdot 10^{16}$	0,16
МБУ-2	D ₂	202	$1,4 \cdot 10^{18}$	410	$3,4 \cdot 10^{21}$	$1,6 \cdot 10^{16}$	0,16

С ростом температуры мишени содержание изотопов водорода как в зоне распыления, так и в пересажженных слоях уменьшалось, что согласуется с данными других авторов. В присутствии углеводородов в рабочей атмосфере содержание дейтерия в зоне распыления уменьшалось, а в пересажженных пленках незначительно возрастало.

Для моделирования взаимодействия плазмы с КОП вблизи горловины дивертора проводились эксперименты на дейтерии с составными Ве-W-мишенями (рис.6) в условиях взаимного пересадки бериллия и вольфрама. Исследованы вольт-амперные характеристики разрядов с такими катодами. Показано, что пересадка приводит к изменению разрядного напряжения, что связано с изменением элементного состава поверхностных слоев секторов мишени и, вследствие этого, коэффициента вторичной ионно-электронной эмиссии.

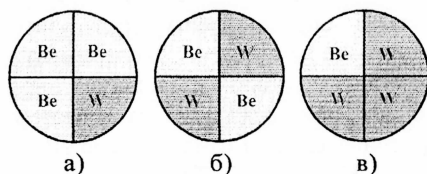


Рис. 6. Составные Ве-W-мишени:
а) МБВ-1; б) МБВ-2; в) МБВ-3

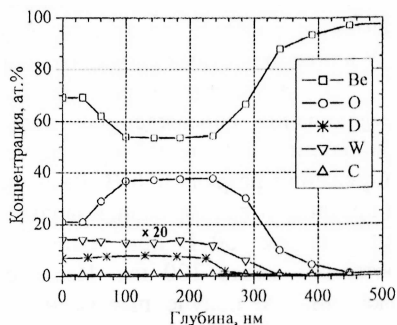


Рис. 7. Элементный состав в зоне пересадки Ве-сектора мишени МБВ-3

При исследовании микроструктуры поверхности зон распыления мишеней было обнаружено, что на бериллии формируется характерный для

блистеринга микрорельеф без образования конусов, а на вольфраме - рельеф селективного травления зерен. В зонах распыления бериллиевых секторов содержание кислорода не превышало 5%, а поверхностная концентрация вольфрама составляла $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Слои продуктов осаждения на всех секторах мишени образовывались преимущественно благодаря переосаждению бериллия, отношение O/Be в них составляло (0,65...0,8). На рис. 7 представлен элементный состав в зоне переосаждения Be-сектора мишени МБВ-3. Содержание вольфрама в перепыленном слое составляет около 0,7 ат.%, что с учетом разницы в коэффициентах возврата Be- и W-атомов свидетельствует о значительном распылении вольфрама. Содержание изотопов водорода в поверхностных слоях мишеней и условия экспериментов приведены в таблице 2. Средний поток ионов составлял $(0,8...1,2) 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Таблица 2.

Содержание изотопов водорода в поверхностных слоях Be-W-мишеней

Мишень	U_p , В	T , К	Зона распыления			D/Be в зоне пересаднения Be-сектора
			Средний флюенс, см ⁻²	Содержание D, см ⁻²		
				Be-сектор	W-сектор	
МБВ-1	203	380	3,2 10 ²¹	3,1 10 ¹⁶	1,9 10 ¹⁶	0,13
МБВ-2	223	400	3,8 10 ²¹	2,4 10 ¹⁶	1,0 10 ¹⁶	0,14
МБВ-3	330	420	4,7 10 ²¹	1,8 10 ¹⁶	0,4 10 ¹⁶	0,15

Содержание изотопов водорода в зоне переосаждения незначительно увеличивалось с ростом доли площади вольфрама в составе мишени. Обнаруженная зависимость содержания внедренного дейтерия в зонах распыления мишеней от отношения площадей бериллиевых и вольфрамовых элементов в катод связана, скорее всего, с разным соотношением атомов Be и W в поверхностных слоях, что влияет на особенности рассеяния дейтерия.

В заключительном разделе главы представлены результаты исследования соосажденных вольфрам-углеродных слоев. Эксперименты проводились в среде дейтерия на магнетроне М2 с катодом из вольфрама при напряжении разряда 650 В. Распыленный вольфрам осаждался на подложки из кремния и вольфрамовой фольги под отрицательным относительно анода напряжением -50 В при температурах 300 К и 600 К. Толщины пленок составили около 100 нм. Исследования элементного и фазового состава показали, что полученные пленки были аморфными и содержали углерод, соединения которого присутствовали в рабочей атмосфере, а также кислород: при $T=300 \text{ К}$ – $C/W \approx 0,5$; $O/W \approx 0,16$, а при $T=600 \text{ К}$ – $C/W \approx 1,0$; $O/W \approx 0,1$. Карбидов WC, W_2C фотоэлектронной спектроскопией выявлено не было. Относительное содержание дейтерия в пленке, осажденной при 300 К,

составляло $D/W \cong 0,3$, а при температуре 600 К, близкой к ожидаемой на элементах дивертора, $D/W < 0,01$. Отсюда следует, что накопление трития в подобных слоях в условиях термоядерного реактора будет незначительно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны специализированные магнетронные распылительные системы (МРС) и методики экспериментального моделирования взаимодействия плазмы изотопов водорода с материалами стенки термоядерного реактора в условиях, близких к ожидаемым в Международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР на номинальном режиме. Определены энергетические характеристики магнетронного разряда в среде изотопов водорода, впервые измерен спектр энергий ионов, бомбардирующих катод-мишень, при различных давлениях газа и индукциях магнитного поля. Показано, что МРС эффективна для проведения ускоренных испытаний и изучения свойств продуктов осаждения.

2. Разработана модель термализации и диффузии распыленных атомов мишени в среде изотопов водорода, позволяющая рассчитать потоки осаждающихся частиц в моделирующих системах. Найдены условия реализации режима эффективного переосаждения атомов бериллия на катод.

3. Проведено экспериментальное моделирование взаимодействия плазмы с бериллием и вольфрамом. Определено содержание изотопов водорода в поверхностных слоях зон распыления мишеней, выявлены закономерности его зависимости от температуры и состава. Проведен анализ элементного и фазового состава поверхностных слоев, изучена микроструктура поверхностей мишеней. Измерен коэффициент распыления бериллия при бомбардировке потоком низкоэнергетичных ионов водорода.

4. Получены и исследованы слои, образующиеся при переосаждении атомов бериллия. Показано, что осажденные пленки имеют аморфную структуру и повышенное содержание кислорода, найдено отношение атомов соосажденного дейтерия (водорода) и бериллия при температурах, близких к ожидаемой на первой стенке реактора. Изучен элементный и фазовый состав вольфрам-углеродных пленок, показано, что содержание соосажденного дейтерия существенно зависит от температуры.

5. Полученные результаты вошли в итоговые отчеты российской национальной дирекции проекта ИТЭР и нашли отражение в материалах технического проекта реактора.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих изданиях:

1. Studies of tritium desorption from beryllium and characterization of erosion products under plasma-beryllium interaction / D.V. Andreev,

A.Yu. Biryukov, N.G. Elistratov et al. // *Fusion Engineering and Design*. – 1998. – Vol. 39 - 40. – P. 465 - 475.

2. MAGRAS – facility for modeling of plasma facing beryllium sputtering and re-deposition / A.M. Zimin, N. G. Elistratov, B.N. Kolbasov et al. // *Plasma Devices and Operations*. - 1999. - Vol. 8. – P. 15 - 38.

3. Елистратов Н. Г., Зимин А. М. Математическое моделирование процесса пересадки распыленных атомов // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. - 1999. – Вып. 1. – С. 8 - 16.

4. Накопление водорода в перепыленных слоях бериллия / М.И. Гусева, В.М. Гуреев, Н.Г. Елистратов и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. - 1999. – Вып. 1. – С. 60 - 63.

5. Studies of re-deposited layers produced at interaction of H and D ions with beryllium / L.S. Danelyan, N.G. Elistratov, V.M. Gureev et al. // *Beryllium Technology for Fusion: Proc. of the 4-th IEA Int. Workshop*. – Karlsruhe, 1999. – P. 308 - 315.

6. Исследование взаимодействия низкоэнергетичных ионов дейтерия с бериллием в условиях перепыления / Н.Н. Васильев, М.И. Гусева, Н.Г. Елистратов и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. - 1999. – Вып. 2. – С. 41 - 47.

7. Elistratov N.G., Zimin A.M. Magnetron discharge with azimuthally nonuniform W-Be cathode // *IEEE Trans. on plasma science*. – 2002. – Vol. 30, No 1. – P. 397 - 400.

8. Захват дейтерия в смешанных W-C пленках, осажденных при магнетронном распылении вольфрама / Н.Г. Елистратов, А.В. Маркин, А.Е. Городецкий и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. - 2002. – Вып. 3 - 4. – С. 64 - 68.

9. Зимин А.М., Гусева М.И., Елистратов Н.Г. Моделирование взаимодействия ионов изотопов водорода с бериллиевыми элементами конструкции // *Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение*. – 2003. - №1. – С. 3 - 21.

10. Исследование распыленных и перепыленных слоев Be и W при одновременном облучении ионами дейтерия / Ю.А. Аксенов, Н.Н. Васильев, Н.Г. Елистратов и др. // *Поверхность*. – 2003. - № 5. – С. 59 - 63.

11. N. G. Elistratov, A.M. Zimin. Energy spectrum of ions entering onto cathode of low-pressure discharge in crossed E-H fields // *Physics of low temperature plasma: Abstracts 3d Intern. Conf.* – Kiev, 2003. – No. 7.5.11.

12. Елистратов Н.Г. Численное моделирование термализации распыленных атомов в легких газах // *Взаимодействие ионов с поверхностью: Материалы XVI-й международной конференции*. – Звенигород, 2003. – Т. 2. – С. 354 - 357.

Д 1680446

Елистратов Н.Г.

Экспериментальное
моделирование
взаимодействия плазмы
изотопов водорода с матер...
2004 0-00

Д 1680446

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано к печати 20.08.2004. Зак. 139. Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана