На правах рукописи

Зимин Александр Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ ДЛЯ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ДУГОВЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2004

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Курнаев В.А.

доктор технических наук,
профессор Трусов Б.Г.

доктор технических наук,
профессор Храбров В.А.

Зимин А.М. Д1668347
Разработка методов исследования теплофизики взаимодействия плазмы с твердым телом для термоэ...
2004 0-00

Ведущая организаци учреждение
-исследовательский
каники и

Защита сост часов на заседании
диссертационного ом государственном
техническом униве ресу: 105005, Москва,
Лефортовская наб. шиностроение" МГТУ

Д1668347

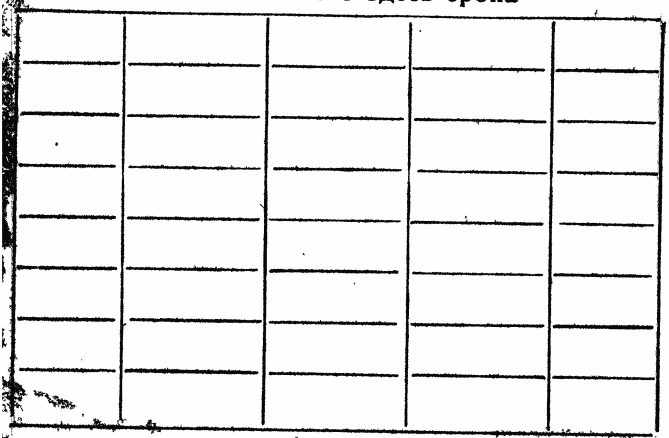
ке МГТУ им.

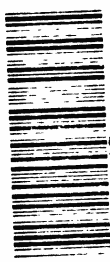
енные печатью
2-ая Бауманская
иссертационного

2004 года.

опосов Е.Б.

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока





ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема взаимодействия плазмы с твердым телом возникла сразу же после открытия дугового разряда (В.В. Петров, 1803 г.). По мере расширения круга применений плазменных устройств эта проблема не потеряла своей актуальности. Ее решение может быть направлено для одних устройств на максимально быстрое разрушение конструкции (при резке, сварке, плавлении и др.), а для других, напротив, на обеспечение максимального ресурса плазменных энергетических установок и минимальное изменение их характеристик в течение как можно большего отрезка времени работы (в подавляющем большинстве всех остальных применений).

Данная работа посвящена второму классу плазменных систем. Постоянно повышающийся уровень энергетических параметров ставит перед создателями новой техники все более сложные задачи, решение которых ранее вообще не представлялось возможным, а обеспечение требуемого ресурса остается среди них одной из важнейших. При непосредственном контакте конструкционного материала, температура плавления самого тугоплавкого из которых не превышает 3650 К, с плазмой, имеющей температуру от десятка тысяч до сотен миллионов градусов, произойдет его быстрое разрушение, которое приведет к потере работоспособности системы. Ресурс всего устройства в большой степени определяется работоспособностью контактирующих с плазмой узлов (в физике и технике термоядерных систем эти элементы называются компонентами, обращенными к плазме) и прежде всего, электродов, необходимых в большинстве случаев для самого существования плазмы. Поэтому при взаимодействии плазмы с твердым телом тепловое и корпускулярное воздействие разряда на элементы конструкции необходимо исключить или существенно уменьшить.

Физика процессов на границе раздела плазма - стенка не исчерпывается чисто тепловым воздействием более высокотемпературной субстанции на твердое тело. Сложность проблемы в электродных системах обусловлена необходимостью обеспечения непрерывности тока при переходе его через границу проводящей стенки с плазмой. Для этого должны быть организованы, во-первых, эмиссия заряженных частиц с одной из поверхностей, которая для термоэмиссионной системы позволяет отвести в плазму значительный тепловой поток, во-вторых, нейтрализация их на другой поверхности, а в-третьих, генерация плазмы непосредственно вблизи стенки. От того, как протекают эти нелинейные процессы, существенно зависят плотность тока, падение потенциала, параметры приэлектродной плазмы и т.п. Поскольку явления в плазме, в пристеночной области и на поверхности взаимосвязаны, только их совместное рассмотрение позволит тщательно проанализировать причины недостаточной работоспособности

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

элементов конструкции плазменных устройств и наметить пути повышения ресурса.

Приведенные рассуждения относятся также и к нейтральным стенкам, оказывающим существенное влияние на ряд важнейших параметров плазмы и всего устройства в целом. В качестве характерных примеров можно привести взаимодействия плазмы с межэлектродными вставками или стенками канала плазмотрона, с кварцевой колбой в источнике высокоинтенсивного света. Особенное значение имеет проблема взаимодействия плазмы с твердым телом в высокотемпературных термоядерных системах, где поступление продуктов эрозии в горячую плазму даже в очень небольшом количестве приведет к существенному сбросу энергии излучением, падению температуры на порядок и погасанию реакции синтеза. Поэтому организация процессов вблизи стенки имеет крайне важное значение для принципиальной работоспособности термоядерного реактора.

Отсутствие универсальных методов расчетно-теоретического и экспериментального исследования пристеночных процессов в широком диапазоне параметров, тщательно апробированных на надежных экспериментальных данных, существенно тормозит прогресс в развитии и совершенствовании важнейших эксплуатационных характеристик плазменных энергетических установок.

Объект исследования. В настоящей диссертации анализ физических процессов и разработка методов расчетно-теоретического и экспериментального исследования теплофизики взаимодействия плазмы со стенкой проводятся применительно к двум наиболее критичным с точки зрения ресурса конструктивным узлам энергетических установок, контактирующим с плазмой: термоэмиссионным дуговым катодам и компонентам, обращенным к плазме высокотемпературных термоядерных реакторов.

Основными целями диссертационной работы являются:

1. Разработка физико-математических моделей различных уровней для описания нелинейных катодных процессов, протекающих в приэлектродной области, на поверхности и в теле термоэмиссионного дугового катода.
2. Создание замкнутых методов расчета процессов на термокатодах для основных технических приложений (плазмотроны, источники высокоинтенсивного света, плазменные плавильные печи) и разработка на их базе методов многопараметрической оптимизации электродных узлов.
3. Создание моделирующего стенда на базе магнетронной распылительной системы, разработка метода исследования и экспериментальное изучение комплекса процессов взаимодействия ионов изотопов водорода (протий, дейтерий) с наиболее перспективным и мало

изученным материалом экрана первой стенки термоядерного реактора – бериллием, из которого изготавливалась катод-мишень магнетрона.

4. Разработка расчетно-теоретической модели динамики распыленного материала при взаимодействии ионов изотопов водорода с бериллием на моделирующем стенде и сравнение с экспериментом.

5. Разработка и реализация методики удаленной диагностики процессов в плазме.

В диссертации для достижения этих целей **решены следующие задачи**:
- разработан метод расчета прикатодной области дуги с термокатодом с учетом неравновесности, связанной с рекомбинацией ионов на поверхности электрода, и явлением рециклинга;
- созданы и реализованы в виде программ замкнутые методы расчета взаимосвязанных процессов на термоэмиссионных катодах в различных приближениях;
- разработан метод расчета и оптимизации геометрии активированных катодов, основанный на длительном поддержании на их поверхности низкой работы выхода;
- с помощью созданных методов проведены расчет и оптимизация геометрии электродов ряда классов плазменных устройств (плазмотроны, источники высокоинтенсивного света, плазменные плавильные печи) в широком диапазоне параметров (ток – от десятков ампер до килоампер, давление инертного газа – от килопаскалей до мегапаскалей, режим горения – стационарный или импульсный с высокой частотой повторения);
- созданы методика моделирования взаимодействия плазмы изотопов водорода с бериллиевыми элементами конструкции термоядерного реактора и экспериментальный стенд на основе магнетронной распылительной системы для ее реализации;
- проведено детальное исследование процессов взаимодействия ионов водорода и дейтерия с бериллием в условиях интенсивного переосаждения и изучена динамика поведения важнейших эксплуатационных характеристик;
- разработана расчетно-теоретическая модель динамики продуктов эрозии стенки при взаимодействии ионов изотопов водорода с бериллием на моделирующем стенде и проведено сравнение с экспериментом.

Научная новизна проведенных исследований заключается в следующем:
- впервые создан замкнутый метод расчета термоэмиссионных катодных узлов реальных плазменных устройств в широком диапазоне рабочих параметров;
- впервые разработан метод инженерного расчета и оптимизации ресурса активированного катода и предложен критерий оптимизации;
- созданная моделирующая установка позволила впервые реализовать режим ускоренных испытаний и провести исследования работоспособности

материала первой стенки реактора из основного кандидатного материала - бериллия, соответствующие году его работы на номинальном режиме;
- впервые проведено исследование взаимодействия ионов изотопов водорода с бериллием в условиях интенсивного переосаждения распыленных атомов;
- впервые разработана методика обработки результатов эксперимента, позволяющая в условиях интенсивного переосаждения продуктов эрозии определять коэффициент распыления при суммарном изменении массы образца, близком к нулю;
- для условий, близких к имеющим место в термоядерном реакторе, впервые разработан метод расчета переосаждения продуктов эрозии первой стенки с использованием функции виртуального источника;
- впервые разработана и реализована методика удаленной диагностики процессов в плазме, позволяющая исследователю проведение активного эксперимента с использованием сетевых средств.

Научная и практическая значимость работы заключаются в следующем:
- разработанные в диссертации физико-математические модели катодных процессов имеют самостоятельное научное значение и важны для дальнейшего развития представлений о физике дугового разряда в ряде плазменных систем;
- созданные методы расчета и оптимизации электродных узлов, реализованные в пакетах прикладных программ, могут быть широко использованы при проектировании ряда классов плазменных систем;
- результаты расчетов катодных процессов по замкнутым моделям могут быть использованы для корректной формулировки граничных условий при исследовании области контракции дуги вблизи электрода;
- результаты исследования поведения бериллиевых элементов конструкции термоядерного реактора при интенсивной бомбардировке ионами изотопов водорода могут быть использованы при проектировании конструкций компонентов реактора, обращенных к плазме, а также оценке их ресурса и влияния на параметры плазмы;
- проведенные исследования подтвердили преимущества бериллия как основного материала для первой стенки реактора–токамака и позволили выявить влияние на его характеристики других кандидатных материалов;
- созданная для поддержки удаленного эксперимента интерактивная диалоговая система ИНДУС позволяет сделать уникальные плазменные стенды центрами коллективного пользования и принимать участие в экспериментах удаленным специалистам, в первую очередь, по диагностике плазмы.

Разработанные в результате проведения ряда НИР методы расчета и оптимизации геометрии термокатодов, пакеты программ, рекомендации по конструированию электродных узлов различных плазменных систем и результаты исследований взаимодействия плазмы изотопов водорода с

бериллиевыми элементами конструкции нашли применение в научно-исследовательских организациях и в проекте международного термоядерного реактора ИТЭР. В диссертации приведены акты об использовании результатов работы в ОАО НИИ «Зенит», Институте теплофизики СО РАН, Институте ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт», а также в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на V - X Всесоюзных конференциях по генераторам низкотемпературной плазмы (1972 – 1986 гг., Новосибирск, Алма-Ата, Фрунзе, Каунас), IV – VII Всесоюзных конференциях по плазменным ускорителям и ионным инжекторам (1978 – 1989 гг., Москва, Днепропетровск, Харьков), VI, VIII, IX и XII Конференциях по физике низкотемпературной плазмы (1983 г., Ленинград, 1991 и 1994 г., Минск, 2001 г., Петрозаводск), XI и XV Международной конференции по явлениям в ионизованным газам (1973 г., Прага, и 1981 г., Минск), XIV, XVII и XIX Международных симпозиумах по разрядам и электрической изоляции в вакууме (1990 г., Санта-Фе, США, 1996 г., Беркли, США и 2000 г, Сиань, КНР), XI, XIII - XV Всероссийских и Международных конференциях по взаимодействию ионов с поверхностью (1993 – 2001 г., Звенигород), II – V Международных симпозиумах по бериллиевой технологии для управляемого термоядерного синтеза (1995 г, Джексон-Лэйк-Лодж, США, 1997 г., Мито, Япония, 1999 г., Карлсруэ, ФРГ, 2001 г., Москва), опубликованы в тезисах и трудах этих конференций, симпозиумов, 34 статьях в научных журналах и сборниках и 2-х монографиях. Список основных публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата. Всего по теме диссертации имеется 80 научных публикаций.

Доклады по диссертационной работе были сделаны на научных семинарах в МГТУ им. Н.Э. Баумана, РНЦ "Курчатовский институт", ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОИВТ РАН, МГАИ, Московском государственном институте радиотехники, электроники и автоматики.

На защиту выносятся:

1. Разработанные физико-математические модели различных уровней для комплекса катодных процессов, протекающих в приэлектродной области, на поверхности и в теле термоэмиссионного дугового катода.

2. Созданные замкнутые методы расчета процессов на термокатодах для основных технических приложений (плазмотроны, источники высокоинтенсивного света, плазменные плавильные печи) и разработанные на их базе методы оптимизации геометрии электродных узлов.

3. Разработанный метод исследования и экспериментальные результаты изучения комплекса процессов взаимодействия ионов изотопов водорода (протий, дейтерий) с наиболее перспективным материалом экрана первой стенки – бериллием, из которого изготавливалась катод-мишень магнетрона.

4. Разработанная расчетно-теоретическая модель динамики распыленного материала при взаимодействии ионов изотопов водорода с бериллием на моделирующем стенде.

5. Разработанная методика удаленной диагностики процессов в плазме.

Личное участие автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в руководстве исследованиями или равноправном участии в постановке задач, методов их решения, алгоритмов и программ, непосредственном выполнении численных (физических) экспериментов и интерпретации результатов. В итоге автор внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 411 страницах, включает 117 рисунков, 18 таблиц и библиографический список из 262 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертации сформулирована тема диссертации, обоснована ее актуальность и поставлены конечные цели и задачи исследований. Представлено краткое содержание диссертации, а также перечислены основные положения, которые выносятся на защиту.

Первая глава посвящена постановке замкнутых нелинейных задач для решения проблемы ресурса твердых тел, контактирующих с плазмой. Дана общая характеристика процессов взаимодействия плазмы с твердым телом, показана взаимосвязь процессов в плазме, пристеночной области и на поверхности твердого тела. Рассмотрена связь факторов разрушения или деградации и элементарных процессов взаимодействия плазмы с твердым телом. Показано, что тесная взаимосвязь факторов с элементарными процессами взаимодействия требует постановки замкнутых нелинейных задач.

Применительно к термоэмиссионным дуговым системам рассмотрены основы физики приэлектродных процессов, протекающих в различных пространственных зонах: в прикатодной области, на поверхности и в теле электрода, а также в приэлектродном участке дуги Представлен анализ состояния расчетно-теоретических исследований процессов на термоэмиссионных катодах (физико-математические модели процессов в твердом теле, модели процессов на поверхности катода, физико-математические модели процессов в прикатодной области, замкнутые методы расчета). Основные исследования в этом направлении выполнены в ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе, ИТ СО РАН им. С.С. Кутателадзе, МГАИ (ТУ), МЭИ (ТУ), МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также зарубежными учеными (W. Bade, J.Yos, W. Neumann, H. Hügel, G. Krülle, T. Lee, A. Greenwood, W. Breingan). Отмечается, что несмотря на весьма сильное влияние

взаимодействия плазма - стенка на ключевые характеристики плазменных устройств, в настоящее время не существует универсальных методов моделирования, расчета параметров и принципов проектирования различных узлов, пространственно ограничивающих разряд, что связано с большими сложностями в исследовании различных сторон взаимодействия. Среди них необходимо отметить: весьма широкие диапазоны условий, в которых реализуется взаимодействие, что приводит к реализации различных механизмов тех или иных процессов (например, электронной эмиссии); малую протяженность пристеночного слоя, из-за чего отсутствуют надежные экспериментальные данные по распределению важнейших параметров в слое; очень сложное математическое описание ряда процессов, т.к. вблизи стенки имеет место существенное отклонение от равновесия; отсутствие методов экспериментального определения ряда важнейших характеристик слоя, что значительно затрудняет корректное сравнение теории с экспериментом. Показано, что имеющиеся методы расчета катодных процессов (W. Bade и J.Yos, W. Neumann, Б.Я. Мойжес и В.А. Немчинский, И.П. Назаренко и И.Г. Паневин), несмотря на более детальное описание отдельных составляющих, являются балансовыми и не позволяют корректно рассчитать электродные узлы реальных плазменных устройств. Для этого необходимы замкнутые методы расчета, основанные на системах дифференциальных уравнений, которые учитывают особенности конструкций генераторов плазмы.

Рассмотрены проблемы и современное состояние исследований процессов взаимодействия плазмы термоядерного реактора ИТЭР с бериллиевыми компонентами, обращенными к плазме. Основные результаты в этом направлении получены в РНЦ "Курчатовский институт" (в научных коллективах под руководством М.И. Гусевой и Ю.В. Мартыненко), ТРИНИТИ, ИФХ РАН, а также зарубежными учеными G. Federici, Y. Hirooka, G. Longhurst, R. Causey. Показана общность элементарных процессов, вызывающих деградацию системы, как для низко-, так и для высокотемпературных плазменных устройств, которая обусловлена взаимодействием плазмы с твердым телом. Сформулированы вытекающие из приведенного анализа постановки нелинейных задач исследований как в плане создания методов расчета и оптимизации параметров процессов взаимодействия, так и применительно к проблемам их экспериментального исследования.

Первая часть диссертации, включающая **главы со второй по четвертую**, посвящена анализу взаимодействия низкотемпературной плазмы с токонесущей стенкой - термоэмиссионным катодом и разработке методов расчета и оптимизации геометрии катодных узлов плазменных устройств. Основные результаты опубликованы в работах [1-20]/

Во второй главе приведены разработанные математические модели составляющих катодных процессов: в твердом теле, в прикатодной области и

на поверхности катода, являющейся границей раздела. Представлен набор моделей теплового состояния термоэмиссионных катодных узлов различных конструкций и различного уровня. Модели учитывают практически все факторы, определяющие температурный режим катода. Все модели реализованы в виде программ и могут быть скомпонованы с пакетами программ для расчета других классов катодных процессов. Для термокатода получены: а) аналитическое решение двумерного уравнения теплопроводности с учетом джоулева тепловыделения в виде ряда Фурье-Бесселя, б) численная модель для расчета теплового состояния электрода нестационарного разряда с реализацией термоэмиссионного режима работы катода; в) численная модель составного (k = 1, 2) катодного узла реального плазменного устройства в двумерной постановке (рис. 1), включающая в себя уравнение неразрывности тока и уравнение теплопроводности для термэмиссионной вставки и держателя:

$$\nabla\left(\lambda_k \nabla T_k\right) + \rho j_k^2 = 0,$$

$$\nabla \vec{j}_k = 0,$$

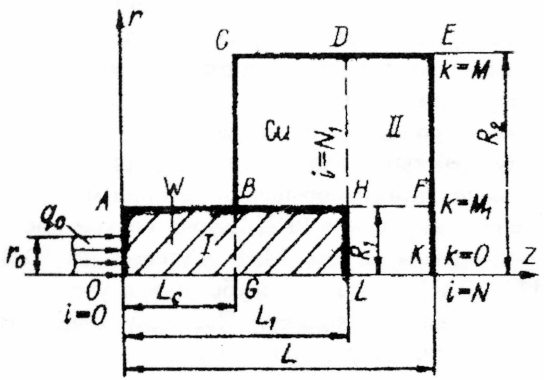


Рис. 1. Расчетная модель составного катодного узла:
I – вольфрамовая вставка, *II* – медный держатель

При конечно-разностной реализации последней модели выявлен и проанализирован критерий подобия температурных полей термокатодов $\theta = \frac{\lambda \sigma_0 T_x}{j^2 l^2}$, характеризующий соотношение эффективностей поверхностного и объемного источников тепловыделения и использованный затем в качестве одного из критериев оптимизации.

Особое внимание уделено решению методом конечных разностей уравнения диффузии активирующей присадки в металле термокатода

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial n}{\partial z}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(D\frac{\partial n}{\partial r}\right),$$

где учитывалась зависимость коэффициента диффузии не только от температуры $D = D[T(r,z)]$, но и от структуры металла. В результате определено распределение концентрации активатора n и связанной с ней одной из важнейших характеристик термокатода - работы выхода электронов $e\varphi_w$ - по поверхности контакта электрода геометрии, показанной на рис. 1, с дугой. Подробно проанализировано влияние на динамику присадки тепловых режимов работы катода (рис. 2), приводящих к реализации на границе контакта с дугой высоких и низких значений $e\varphi_w$.

Для прикатодной области в работе сформулирован и реализован в виде пакетов программ комплекс численных моделей (с использованием системы МГД-уравнений с учетом неравновесности из-за деионизации на поверхности катода и рециклинга, в балансовом и диффузионном приближениях). Их иерархия приведена на рис. 3.

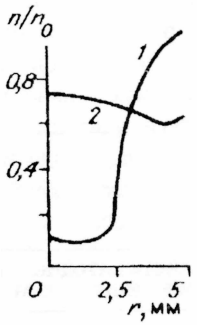


Рис. 2. Распределение концентрации присадки по радиусу рабочего торца вставки катода через 5 мин. после включения разряда для различных тепловых режимов (1 – при резком изменении температуры вблизи рабочего торца, 2 – при $\partial T/\partial z \to 0$ на рабочей поверхности и большой прогретой зоне)

Для приэлектродного участка дуги разработана численная модель, которая включала в себя: уравнение энергии - двумерный аналог уравнения Эленбааса - Геллера, закон непрерывности тока и закон полного тока.

Модели опубликованы в работах [2,3,5,8,11,14,17-20].

Третья глава посвящена разработке замкнутых методов расчета катодных процессов в различных приближениях на основе аналитических и численных моделей. Работа являлась продолжением исследований, проводившихся ранее Н.П. Козловым и В.И. Хвесюком. Иерархия созданных методов расчета представлена на рис. 4.

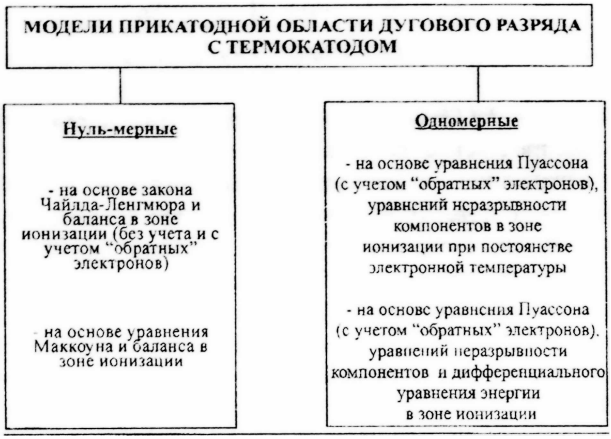


Рис. 3. Иерархия моделей прикатодной области разряда с термокатодом

Методы расчета катодных процессов не содержат неопределенных или "подгоночных" параметров, а базируются только на задаваемых надежно контролируемых в эксперименте и являющихся внешними по отношению к приэлектродным процессам условиях, в качестве которых для стационарных разрядов использовались: ток дуги; давление и свойства плазмообразующего газа; геометрия, свойства материала катода и условия его охлаждения. Из расчетов получаются величины, характеризующие все три пространственные области протекания катодных процессов.

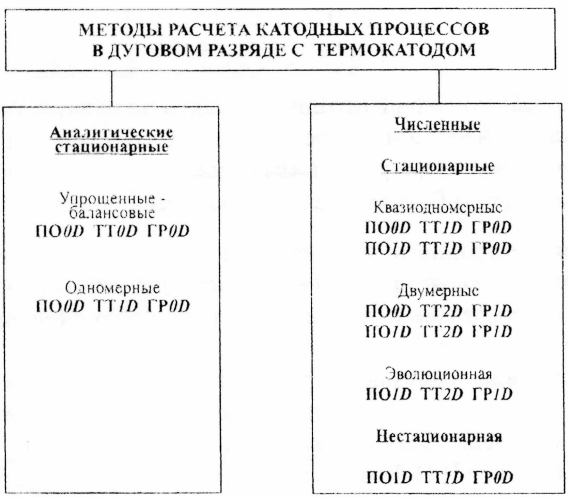


Рис. 4. Иерархия методов расчета КП: ***0D*** – балансовая, ***1D*** – одномерная, ***2D*** – двумерная модели, ПО – прикатодная область, ТТ – твердое тело, ГР – поверхность контакта

Изложены основанные на системах дифференциальных уравнений численные методы расчета процессов на термокатодах различных классов плазменных устройств, которые учитывают особенности реализуемых в них параметров и используемых конструкций:

- метод расчета катодных процессов в генераторах низкотемпературной плазмы – плазмотронах (**ПО*1D* ТТ*2D* ГР*1D***), включающий уравнения для прикатодной области:

$$M_k n_k u_k \frac{\mathrm{d}\vec{u}_k}{\mathrm{d}x} = e_k n_k \vec{E} - \mathrm{grad} p_k - \sum_{l \neq k} M_{kl} n_k \nu_{kl} (\vec{u}_k - \vec{u}_l),$$

$$\frac{\mathrm{d}\Phi_i}{\mathrm{d}x} = -\beta n_e n_a + \alpha n_e^3,$$

$$\frac{\mathrm{d}\Phi_i}{\mathrm{d}x} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_e}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}\Phi_a}{\mathrm{d}x},$$

$$n_i u_i + n_e u_e = j / e = \mathrm{const},$$

$$p = n_a k T_a + n_e k T_e + n_i k T_i,$$

$$j_e^{\text{эм}} U_\text{к} = j_i \left(\chi_i + \alpha_1 \chi_*\right) + j_e^{\text{обр}} \left(U_\text{к} + \frac{2kT_e}{e}\right) + 3{,}2 j \frac{kT_e}{e},$$

$$j_e^{\text{обр}} = \frac{1}{4} \alpha_e e n_e v_e \exp\left(-\frac{eU_\text{к}}{kT_e}\right),$$

твердого тела:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{j_\text{к}^2}{\lambda\sigma\left[T(r,z)\right]} = 0,$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\sigma(T)\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma(T)\frac{\partial U}{\partial z}\right) = 0,$$

$$j_\text{к}(r,z) = \sigma\left[T(r,z)\right]\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2},$$

поверхности катода, контактирующей с разрядом:

$$q_0 + j_e^{\text{эм}}\left(\varphi_{\text{эф}} + \frac{2kT_\text{к}}{e}\right) = j_i\left(U_\text{к} + \chi_i - \varphi_{\text{эф}} + \frac{2kT_\text{к}}{e}\right) + q_\text{л} + j_e^{\text{обр}}\left(\varphi_{\text{эф}} + \frac{2kT_e}{e}\right),$$

$$j_e^{\text{эм}} = AT_\text{к}^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_{\text{эф}}}{kT_\text{к}}\right),$$

$$\varphi_{\text{эф}} = \varphi_w - \sqrt{eE_\text{к}},$$

$$I_e = sI = \int_F \left(j_e^{\text{эм}} - j_e^{\text{обр}}\right)\mathrm{d}F,$$

$$n_a u_a = n_i u_i;$$

- методы расчета катодных процессов в стационарных и частотных источниках высокоинтенсивного света (**ПО*1D* ТТ1*D* ГР*0D***), где основные отличия от предыдущего метода расчета заключались в следующем: для прикатодной области использовалось диффузионное приближение, а для определения теплового состояния электродного узла в стационарном разряде использовалась "квазиодномерная" модель, а в импульсно-периодическом – нестационарная численная модель;

- методы расчета активированных термокатодов (**ПО*1D* ТТ1*D* ГР*0D*** и **ПО*1D* ТТ*2D* ГР*1D***), где к первому методу расчета добавлялось уравнение диффузии присадки, а значение эффективной работы связывалось через степень покрытия θ с найденным распределением концентрации активатора

$$e\varphi_{\text{эф}}(t) = kT(t)\ln\left\{\theta(t)\exp\left[-\frac{e\varphi_{\text{а}}}{kT(t)}\right]+\left[1-\theta(t)\right]\exp\left[-\frac{e\varphi_{\text{м}}}{kT(t)}\right]\right\},$$

что позволило исследовать динамику характеристик разряда, вызванную изменением свойств электрода;

- метод расчета катодных процессов (**ПО*1D* ТТ*2D* ГР*1D***) совместно с приэлектродным участком дуги, для чего к первому методу добавлялась система уравнений

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left\{r\lambda\left[T(r,z)\right]\frac{\partial T(r,z)}{\partial r}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\lambda\left[T(r,z)\right]\frac{\partial T(r,z)}{\partial z}\right\}+\sigma\left[T(r,z)\right]E^2(r,z)-u\left[T(r,z)\right]=0;$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left\{r\sigma\left[T(r,z)\right]\frac{\partial U(r,z)}{\partial r}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\sigma\left[T(r,z)\right]\frac{\partial U(r,z)}{\partial z}\right\}=0;$$

$$I = 2\pi\int_0^R r\frac{\partial U}{\partial z}(r,z)\sigma\left[T(r,z)\right]\mathrm{d}r\,.$$

Изложение методов замкнутого расчета сопровождается обсуждением алгоритмов для их реализации на ЭВМ, основанных на проведении итераций, а также анализом погрешностей. Замкнутые методы расчета и приложения методов к конкретным плазменным устройствам изложены в работах [2,3,5,10,11,14,15,17-20].

Четвертая глава посвящена анализу результатов моделирования катодных процессов. Изложены расчетные данные, полученные по замкнутым нелинейным моделям для различных плазменных устройств, материалов катода (графит, вольфрам, активированные катоды) и условий горения разряда, варьируемых в широких диапазонах (токи – от десятков ампер до килоампер, давление инертных газов – от килопаскалей до мегапаскалей). Проводится детальное сравнение данных, полученных в различных приближениях, между собой и с известными экспериментальными данными, а также представлены результаты оптимизации геометрии катодных узлов по разработанным методикам.

Подробно проанализированы результаты серии расчетов графитовых электродов (катодное падение потенциала, плотности тока и ее составляющие, тепловые потоки, поле температур, эрозия) при функционировании его в составе генератора плазмы для резки металлов с использованием моделей теплового состояния электродного узла двух уровней: а) квазиодномерного приближения; б) в двумерной постановке с учетом локального джоулева тепловыделения, нелинейности граничных условий и зависимости коэффициента теплопроводности графита от температуры. Расчетные модели отражают основные особенности конструкции: крепление катода в цанговом зажиме и обдув электрода газом.

Приведены результаты серии расчетов активированных вольфрамовых электродов различной геометрии в аргоне при пониженных давлениях при токах в сотни ампер, расчетов электродных узлов сложной составной геометрии (при использовании квазиодномерных моделей) стационарных (токи – десятки ампер, давление криптона – 2,5 МПа) и стробоскопических (при частоте повторения импульсов 50 Гц) источников света.

Наибольший интерес при расчете активированных катодов представляют временные зависимости характеристик катодных процессов, вызванные изменением свойств, и в первую очередь, работы выхода электронов с поверхности. Расчеты проводились для трех основных режимов работы активированного катода: а) быстрый выход присадки из зоны контакта с разрядом, уход ее в дугу и плавление рабочего торца электрода; б) длительное функционирование катода с высоким содержанием активатора в рабочей зоне благодаря эффективной подпитке диффузионным потоком из глубинных слоев; в) быстрый выход присадки с первоначальным накоплением в приповерхностном слое и последующее интенсивное ее выгорание по всей активной поверхности электрода. С практической точки зрения наиболее интересен второй режим. На рис. 5 приведены некоторые расчетные зависимости для типичной геометрии катодного узла: R_1 = 2,5 мм, L_1 = 30 мм, L_c = 20 мм при токе разряда 100 А.

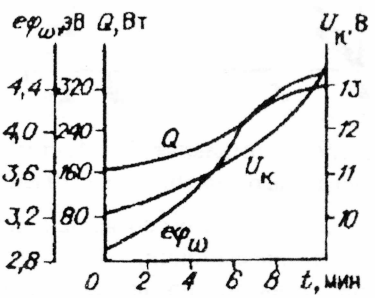


Рис. 5. Зависимости работы выхода $e\varphi_w$ в центре «горячего» торца вставки, катодного падения потенциала $U_к$ и теплового потока в катод Q от времени

Для детального сравнения динамики процессов на активированных катодах по комплексу важнейших характеристик поставлена серия специальных экспериментов [12,16], которая показала хорошее качественное и количественное соответствие расчетных и опытных данных. В процессе работы электрода фиксировались основные интегральные характеристики: эмиссионные свойства, температура, тепловой поток и эрозия. Основные эксперименты выполнены в Ar при давлениях (20...100) торр. Динамика работы выхода (рис. 6) хорошо коррелирует с временной зависимостью поля температур. Полученные методом контактной разности потенциалов значения $e\varphi_w$ для пятна, кроме того, контролировались измерениями методом полного тока. Сравнение результатов обоих методов показало хорошее совпадение: расхождение значений укладывалось в погрешность метода полного тока.

Приведено сравнение результатов, полученных по разработанным методам расчета различных уровней, сформулированы рекомендации по их использованию. Отдельный раздел посвящен сравнению с результатами расчетов по известным балансовым методам (W. Bade и J.Yos, W. Neumann, Б.Я. Мойжес и В.А. Немчинский, И.П. Назаренко и И.Г. Паневин), в том числе с их модификацией - добавлением к ним моделям двумерных моделей теплового состояния катодов. Показано, что только методы расчета, основанные на системах дифференциальных уравнений, дают адекватные опытам данные.

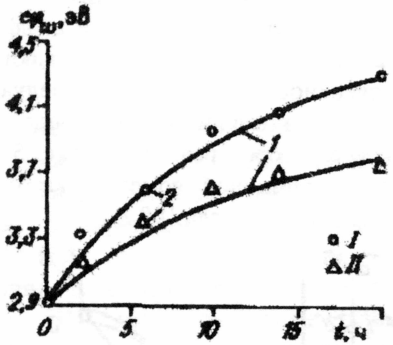


Рис. 6. Расчетная *(1)* и экспериментальная *(2)* зависимости работы выхода на «горячем торце» катода от времени (p = 20 *(I)*, 100 торр *(II)*)

Хорошее согласие с экспериментом позволило использовать замкнутые модели, разработанные в диссертации, для оптимизации геометрии электродных узлов. При сравнительно высоких давлениях окружающей среды, в которой развивается разряд, когда значительно уменьшается скорость испарения легирующей добавки, использование активированного электрода может обеспечить работу катода с высокой плотностью тока

($j \sim 10^7$ А/м^2). Основным условием оптимизации становится поддержание низкой работы выхода в течение длительного времени. Очень важно, чтобы покидающие катод атомы легирующей добавки компенсировались поступающим из глубины электрода диффузионным потоком активатора при высоком значении степени покрытия им поверхности контакта с дугой $\theta_п$. При эффективном возврате легко ионизующихся (по сравнению с плазмообразующим газом) атомов присадки результирующий поток последних с поверхности относительно невелик, и условия для реализации равновесия с большой $\theta_п$ можно создать, организовав потребный приток присадки из глубинных слоев электрода.

Полученное из уравнения диффузии присадки безразмерное соотношение $\kappa = \frac{Wl}{Dn_м}$ характеризует отношение скоростей испарения и притока присадки к поверхности из глубинных слоев катода. Здесь l - характерный размер поверхностной зоны, участвующей в подпитке рабочей поверхности катода присадкой; $n_м$ - концентрация атомов основного металла; W - скорость испарения присадки с единицы поверхности катода; D - коэффициент диффузии присадки.

Основным фактором, характеризующим этот баланс, является поле температур электрода. Из анализа решений уравнения баланса частиц, описывающего динамику концентрации активатора на рабочей поверхности катода, и двумерного уравнения диффузии присадки были сформулированы требования к реализуемому температурному полю электрода (а поле $T(r,z)$ определяется всем комплексом катодных процессов, а не только явлениями в твердом теле). Температура катода не должна превышать температуры рекристаллизации материала, так как в этом случае на порядки падает коэффициент диффузии активатора в основном металле. Распределение температуры по электроду должно быть монотонным, поскольку экстремумы $T(r,z)$ вызывают "отток" присадки от рабочей поверхности в зону максимальной температуры. Вблизи рабочей поверхности катода значение $\partial T_к/\partial z$ должно быть минимальным, чтобы большие участки электрода участвовали в подпитке присадкой его приповерхностной зоны, причем температура возможно большего объема электрода должна превышать значение так называемой температуры подвижности присадки, при которой коэффициент диффузии активатора достаточно велик и процесс диффузии вообще нужно учитывать. Эти условия оптимальности реализуются при полученном ранее, в главе 2, значении критерия $\theta \approx 0{,}5$.

На рис. 7 представлена зависимость ресурса активированного катода (времени поддержания низкой работы выхода) с вставкой из лантанированного вольфрама диаметром 5 мм и вылетом из держателя 20 мм от токовой нагрузки. Ресурс катода изменяется очень сильно и составляет

около 10 мин при I = 100 А, 85 ч при 350 А и 30 мин при 600 А. Максимальное его значение соответствует θ = 0,5.

Разработанные критерий и методика оптимизации позволили провести поиск оптимальных геометрий и токовых нагрузок для электродных узлов с активированным катодом ряда плазменных устройств [4,11,16,18,19]. Так, была оптимизирована геометрия термоэмиссионной вставки из W + 1,5 % La_2O_3 электродного узла генератора низкотемпературной плазмы ПТП-101 с номинальным током 400 А, работающего на Ar при атмосферном давлении, обеспечивающая следующую расчетную зависимость времени работы катода без оплавления от тока (отличия в эксперименте не превышали 15 %):

I, А	100	200	300	400	500	600
τ_p, ч	<1	3	35	93	6	<1

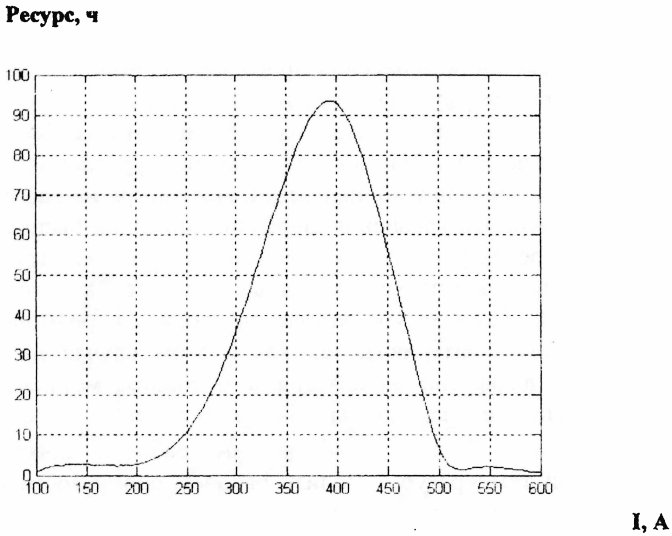


Рис. 7. Зависимость ресурса активированного катода от токовой нагрузки

На основе метода расчета активированного электрода [6,7,19] была выполнена оптимизация катода плавильного плазмотрона плазменной печи ОКБ-1556, где нестационарность обусловлена, с одной стороны, работой попеременно в двух режимах: плавления и рафинирования (ток в 1,5 - 2 раза меньше, чем при плавлении), а с другой - эволюцией свойств активированного электрода. При этом результаты оптимизации геометрии катода при работе его отдельно в режимах плавки и рафинирования и в режиме попеременного их чередования различаются значительно (таблица 1). Так, для двух токовых режимов геометрии электродов, обеспечивающие

максимальный ресурс, отличаются, а в режиме попеременного их чередования более высокую работоспособность имеет электрод, геометрия которого рассчитана на режим плавления.

Таблица 1.

Результаты оптимизации геометрии катода плазменной печи

Рабочий ток	Длина вылета L_c, см	Радиус катода R, см	Ресурс τ_p, ч
$I_{плав}$	5	1,7	120
$I_{раф}$	8	1,7	85
$I_{плав}$, $I_{раф}$	5	1,7	61

Разработанные методы оптимизации применялись и для источников высокоинтенсивного света. Найденные численными методами результаты для термоэмиссионного режима работы позволили получить зависимости характеристик катодных процессов от времени и провести оптимизацию геометрии активированного электрода. Использование разработанных методик позволило при проектировании типорядов ламп накачки ИНП3, ИНП5, ИНП7 сократить время поиска оптимальной конструкции катодных узлов в 30 раз при повышении их гарантированной долговечности на 50%, о чем свидетельствует акт об использовании результатов в ОАО НИИ «Зенит».

Результаты расчетной оптимизации катодного узла плазмотрона МП-2 (Институт теплофизики СО РАН) позволили увеличить его ресурс вдвое, что подтверждается приведенным в диссертации актом об использовании. Таким образом, разработанные методы расчета и оптимизации геометрии активированных катодов продемонстрировали большую практическую значимость, подтверждающую правильность заложенных в них принципов и уравнений. Они реализованы в ряде пакетов прикладных программ для различных плазменных систем.

Главы с пятой по седьмую посвящены методам и результатам экспериментального и расчетно-теоретического моделирования взаимодействия высокотемпературной плазмы изотопов водорода с конструктивными элементами термоядерного реактора, изготовленными из основного кандидатного материала – бериллия. Схожие с имеющими место в низкотемпературных системах пристеночные процессы, и в первую очередь, рециклинг плазмообразующего газа и продуктов эрозии материала стенки, а также существенная роль механизма диффузии позволили использовать подход к исследованию взаимосвязанных катодных процессов, изложенный в первой части диссертации, для анализа проблемы первой стенки термоядерного реактора. Работы явились продолжением и развитием исследований, проводимых в данном направлении научным коллективом под руководством М.И. Гусевой, а их результаты опубликованы в работах [21-34].

2668344

МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

В пятой главе проанализирована проблема взаимодействия высокотемпературной плазмы с конструктивными элементами реактора, сформулирован метод экспериментального исследования взаимодействия водородной плазмы с бериллиевыми элементами конструкции и приведено описание созданного экспериментального стенда.

Анализ задач, поставленных в проекте международного термоядерного реактора ИТЭР, показал, что для первой стенки реактора, имеющей общую площадь бериллиевых элементов, обращенных к плазме, около 700 $м^2$, среди важнейших неисследованных вопросов упоминаются накопление атомов изотопов водорода в толстых слоях окиси бериллия, эффекты при совместной работе бериллия с другими кандидатными материалами, влияние различных примесей на работоспособность бериллиевых экранов и растворимость водорода, изучение соосаждения и переосаждения изотопов водорода вместе с продуктами эрозии материла стенки. Имеющихся литературных данных по данным проблемам явно недостаточно, а прямые исследования в токамаках в настоящее время ограничены в силу очень высокой стоимости и небольшого числа действующих больших установок. Проблема осложняется в силу того обстоятельства, что бериллий использовался в требуемом качестве практически только на одном из токамаков – JET.

Функция распределения падающих на поверхность бериллиевых компонентов, обращенных к плазме, атомов изотопов водорода имеет максимум при энергиях в несколько сотен электрон-вольт. Максимальное значение коэффициента распыления бериллия ионами водорода приходится на тот же энергетический диапазон. Это позволяет использовать для изучения упомянутых явлений низкотемпературные плазменные системы (например, разряд с полым катодом, где ионы имеют близкую к требуемой энергию – В.В. Дунаев, В.В. Кучинский). Поэтому проведение таких исследований является крайне необходимым и актуальным на моделирующих установках в условиях, максимально приближенным к реальным, ожидаемым в международном проекте реактора ИТЭР. Основные процессы взаимодействия плазмы с твердым телом – те же, что и для рассмотренных в главах 2 – 4 катодных процессов. Электрический разряд (в данном случае – магнетронный) в моделирующей системе позволяет изучать основные процессы, ответственные за работоспособность первой стенки термоядерного реактора: эрозию и рециклинг материала, прежде всего там, где отсутствует непосредственная бомбардировка частицами плазмы (в щелях тайлов и в теневых зонах), а также исследовать динамику плазмообразующего газа вблизи стенки.

В диссертации сформулирована концепция методов моделирования ключевых процессов взаимодействия: эрозии материала первой стенки в условиях переосаждения распыленного материала и накопления в бериллии атомов изотопов водорода (протий, дейтерий) с помощью магнетронного

разряда, использование которого для этих целей среди других низкотемпературных плазменных устройств было предложено В.А. Малащенко и В.И. Хвесюком. Однако никаких исследований работоспособности кандидатных материалов для ИТЭР ими не проводилось.

В силу высокой токсичности бериллия и взрывоопасных плазмообразующих газов: протия и дейтерия, на всех этапах физических экспериментов существенной является проблема обеспечения безопасности. Созданная экспериментальная установка МАГРАС на базе магнетронной распылительной системы была размещена в специальном помещении в Институте бериллия НПО "Композит". Одной из задач работы являлось создание удаленной диагностики плазмы, когда управление измерительной аппаратурой и регистрация параметров производятся экспериментатором, не находящимся в непосредственной близости от стенда. В диссертации разработан программно-аппаратный комплекс для активной удаленной спектральной диагностики плазмы по методу относительных интенсивностей, который был применен к исследованию процессов взаимодействия водородной плазмы с распыляемыми мишенями. Организация магнетронного разряда позволяет исследовать главные процессы, ответственные за работоспособность первой стенки ТЯР: эрозию и рециклинг материала, а также изучить динамику плазмообразующего газа вблизи стенки и его накопление в бериллии.

В главе 5 приводится описание систем созданного стенда МАГРАС (рис. 8) для исследования взаимодействия плазмы с бериллиевыми мишенями.

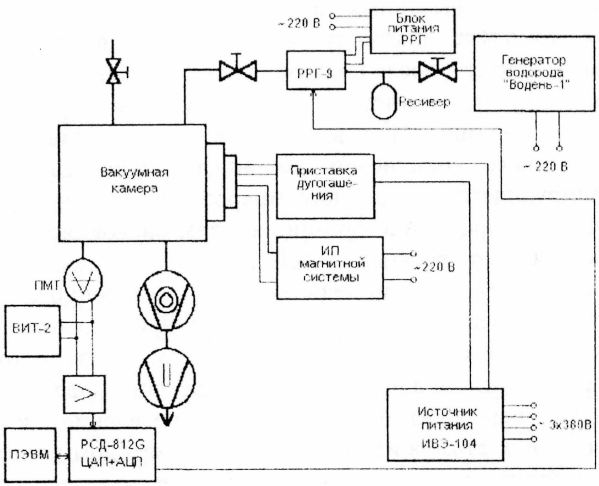


Рис. 8. Схема основных систем установки «МАГРАС»

Для стабилизации давления водорода в рабочей камере объемом около 0,1 м^3, от которого сильно зависят характеристики разряда, спроектирована, рассчитана с помощью программного комплекса "МВТУ", созданного О.С. Козловым, и отлажена система автоматического регулирования. Исследования включали отладку режимов работы магнетрона для пар "бериллий - протий", "бериллий - дейтерий" в диапазоне изменения давлений газа (6 10^{-2} ... 15) Па, при индукциях магнитного поля на поверхности мишени до 0,1 Тл и токах до 5 А. Энергии ионов составляли (200...300) эВ. Приведены снятые экспериментально магнитные и энергетические характеристики стенда МАГРАС. Проведены расчеты конфигурации магнитного поля вблизи поверхности мишени по численным моделям с использованием пакета ANSYS. Знание топологии магнитного поля очень важно для организации реализуемых в эксперименте профилей плотности тока ионов водорода на катод-мишень.

Шестая глава посвящена анализу результатов экспериментального моделирования взаимодействия ионов изотопов водорода с бериллием, которые опубликованы в [22-25,30,32-34]. Были исследованы процессы эрозии бериллия вследствие физического распыления и накопление изотопов водорода в распыляемых слоях и осажденных пленках, переосаждение продуктов эрозии бериллия при бомбардировке протонами и дейтронами, накопление водорода и дейтерия в переоосажденных слоях бериллия, изменение состава поверхностных слоев после взаимодействия ионов с бериллиевыми мишенями, влияние других кандидатных материалов на характеристики взаимодействия водородной плазмы с бериллием.

Для анализа распыленных и переосажденных слоев материалов использовался комплекс диагностик, включающий в себя: определение изменения массы мишени после проведения эксперимента весовым методом с точностью 10^{-4} г; изучение микроструктуры материалов после бомбардировки ионами H^+ и D^+ и топографии поверхности монокристаллического кремниевого сборника с напыленным осадком с помощью сканирующего электронного микроскопа; определение плотности и размера частиц продуктов эрозии в стекловолокнистом фильтре с диаметром волокон от десятых долей микрона до десятков микрон с помощью оптического и просвечивающего электронного микроскопа; профилометрию мишеней для определения глубины эрозии и толщины переосажденного слоя с помощью профилометра; рентгеноструктурный и электронографический анализ для определения фазового состава распыленных и переосажденных слоев; определение содержания в поверхностных слоях атомов изотопов водорода методом регистрации ядер отдачи; определение компонентного состава материала различных зон мишени и осадков продуктов эрозии методом обратного резерфордовского рассеяния. Точность последних методов не хуже (8...10) %. Диагностическая поддержка работы осуществлялась ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"

(лаборатория д.ф.-м.н. М.И. Гусевой) и ИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова (группа к.ф.-м.н. В.С. Куликаускаса).

Для исследования коэффициента распыления бериллия ионами водорода, а также распыленных и осажденных слоев использовались мишени в виде таблеток, прижатых к бериллиевому катоду магнетрона с электромагнитами (рис. 9). Четыре «таблетки» были выполнены из бериллия различных марок, одна (с термопарой) предназначалась для измерения температуры.

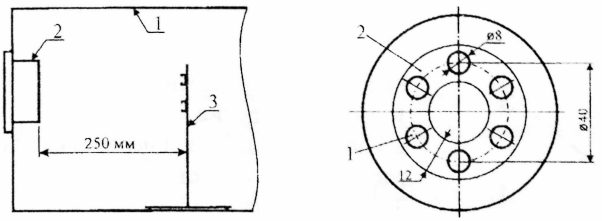


Рис. 9. Размещение мишеней-таблеток на катоде магнетрона: 1 – вакуумная камера, 2 – магнетрон, 3 – столик со сборниками продуктов эрозии

Энергия ионов водорода во время испытаний была равна 200 эВ, доза частиц, усредненная по кольцу распыления, - $(1...3).10^{25}$ $м^{-2}$, температура таблеток составляла (300...700) К. Динамическое давление водорода в камере фиксировалось на уровне 4.10^{-3} Торр, при котором, с одной стороны, наблюдались надежное зажигание и устойчивое горение разряда, а с другой, - длина свободного пробега распыленных атомов бериллия превышала расстояние до подложки, где они осаждались на подложки из монокристаллов кремния для последующего исследования состава и микроструктуры. Измеренный коэффициент распыления составил около 0,02 для энергии ионов водорода 200 эВ, что согласуется с данными других авторов. Проведенный анализ профилей распределения атомов водорода в напыленных осадках показывает, что в слое протяженностью около 100 нм водород распределен равномерно (для указанных выше условий его концентрация составляет ~ $1,4.10^{22}$ $см^{-3}$), а в дальнейшем с увеличением глубины в профиле концентрации наблюдается резкий спад. Интегральная поверхностная концентрация водорода в напыленной пленке составляет $2,4.10^{17}$ $см^{-2}$, а соотношение H/BeO - около 0,2, что в несколько раз выше, чем в слое мишени, подвергавшемся ионной бомбардировке.

Для моделирования процесса переосаждения распыленных атомов бериллия, который будет иметь место в условиях реактора ИТЭР и будет приводить к образованию толстых слоев окиси бериллия (которая существенно больше аккумулирует водород), реализован режим эффективного возврата продуктов эрозии на поверхность бериллиевой мишени из ТГП-56 при ее бомбардировке интенсивными потоками ионов дейтерия. В этих экспериментах использовался магнетрон МРС-ПМ с постоянными магнитами, а давление дейтерия в камере составляло 0,07...0,1

Торр. Катод магнетрона представлял собой совокупность центральных секторов, на котором после экспериментов наблюдались четкие зоны, соответствующие распылению и переосаждению бериллия (рис. 10).

При этом общая масса мишени с точностью до 10^{-4} г оставалась неизменной, что свидетельствовало об эффективном переосаждении распыленных атомов. Таким образом, в одном эксперименте можно было смоделировать и распыление, и переосаждение бериллия. Для определения коэффициента распыления была разработана специальная методика, основанная на интегрировании профиля эрозии мишени.

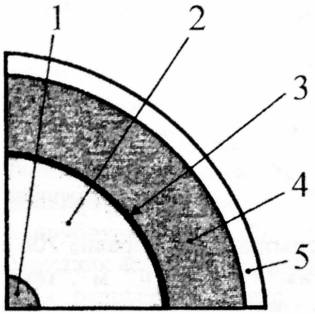


Рис. 10. Секторная мишень:
1 – зона осаждения,
2 – зона распыления и переосаждения распыленных атомов,
3 –темная зона,
4 - зона переосаждения,
5- зона, закрытая экраном

Проводились серии экспериментов по бомбардировке бериллиевых мишеней, в основном из материала ТГП-56, с температурами от 300 до 570 К потоками ионов водорода и дейтерия с энергией 200 эВ и дозами до 10^{26} м$^{-2}$. Некоторые результаты приведены в таблице 2. Поверхностная концентрация дейтерия в бериллии в зоне переосаждения составляет ~ 2.10^{21} м$^{-2}$, отношение D/BeO ≈ 0,1 и определяется относительно большим содержанием кислорода в этом слое. Доза бомбардирующих однородную мишень МПМ-1 из бериллия ионов дейтерия с энергией 200 эВ составляла 2,2 10^{25} м$^{-2}$, температура мишени - 420 К.

Таблица 2.

Характеристики бериллиевых слоев мишеней МПМ-2 и МПМ-3 после облучения ионами дейтерия

№ мишени	T, К	Доза, м$^{-2}$	d, нм	O/Be	C_D, м$^{-2}$	D/BeO	O/Be	C_D, м$^{-2}$	D/Be
			Переосажденный слой				Распыленный слой		
МПМ-2	350	8.10^{24}	80	1,0	$8,5{\cdot}10^{20}$	0,16	0,10	$3,0{\cdot}10^{20}$	0,07
МПМ-3	420	2.10^{25}	170	1,0	$1,83{\cdot}10^{21}$	0,16	0,15	$1,6{\cdot}10^{20}$	0,04

В отличие от перепыленных участков, в зоне распыления, где имеет место очистка поверхности интенсивным пучком бомбардирующих ионов, концентрация кислорода составляет около 3 ат. %, причем кислород содержится лишь в узком приповерхностном слое толщиной несколько десятков нм. Профили распределения атомов дейтерия в зоне распыления

имеют типичную для имплантации больших доз ионов столикообразную форму. Концентрация дейтерия здесь существенно меньше, чем в перепыленных слоях, и составляет 2,5 – 4 ат. %. В зоне распыления бериллия наблюдаются блистерообразование и образование отдельных конусов, которое обусловлено различными скоростями распыления бериллия и его окиси.

Таким образом, было показано, что основное накопление изотопов водорода происходит в слоях окиси бериллия, а газ захватывается переосаждающимися атомами бериллия. Тем не менее отношение атомов водорода к материалу компонента обращенного к плазме, оказалось в несколько раз меньше, чем для другого кандидатного материала для первой стенки – углерод-углеродного композита. Это еще раз подтвердило преимущества бериллия как основного кандидатного материала для экранов первой стенки.

Поскольку в реакторе ИТЭР для других компонентов, обращенных к плазме (в частности, некоторых элементов дивертора), будут использоваться вольфрам и углерод-углеродные композиты, исследовалось их взаимное переосаждение с бериллием. Для этого в одной серии экспериментов вблизи катода-мишени размещались углеродосодержащие материалы. В другой серии опытов сектора изготавливались из вольфрама и бериллия в различных соотношениях (рис. 11) и изучалось азимутальное распределение состава распыленных и переосажденных слоев.

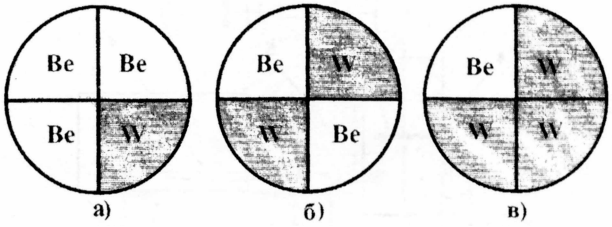


Рис. 11. Составные секторные мишени с различным соотношением площадей бериллия и вольфрама

Средняя доза облучения ионами дейтерия составляла 4.10^{25} $м^{-2}$, а температура распыляемых образцов в экспериментах фиксировалась на уровне 400 ± 20 К. Энергия пучка ионов была заключена в диапазоне (200...300) эВ. В перепыленных слоях дейтерий распределен практически равномерно. Поверхностная концентрация дейтерия в бериллии в зонах перепыления ~2.10^{21} $м^{-2}$, отношение D/BeO ≈ 0,12, определяется бо́льшим содержанием кислорода в перепыленных слоях бериллия по сравнению с исходным материалом и чуть больше, чем для однородной бериллиевой мишени. Толщины соосажденных слоев на Be и W лежат в пределах

(250…350) нм и возрастают с увеличением дозы облучения и относительной поверхности бериллия в составной мишени. Это свидетельствует о том, что при наличии Be и W в одном вакуумном объеме определяющую роль в накоплении дейтерия в перепыленных слоях играет бериллий.

Влияние другого кандидатного материала – углерода на накопление дейтерия в распыленных и перепыленных слоях оказалось несколько большим – так отношение D/BeO в зоне перепыления достигало 0,16. Таким образом, присутствие добавок других материалов в продуктах переосаждения приводит к увеличению содержания дейтерия в перепыленных слоях, что может быть существенно для коэффициента использования рабочего тела – изотопов водорода, а также приводить к повышению активности стенок, ограничивающих разряд в токамаке, из-за накопления радиоактивного трития.

В главе 5 приведены также результаты исследования дугообразования на бериллии, которые опубликованы в работах [28,31. Этот процесс тесно связан с содержанием первой части работы. Дуговая эрозия может быть весьма существенной при оценке работоспособности первой стенки. Для диагностики поведения пятен использовалась сверхскоростная регистрирующая система IMACON-468 с разрешением на уровне десятков наносекунд. Схема эксперимента приведена на рис. 12. Показано, что существует два типа пятен: быстрые (рис. 13) и медленные.

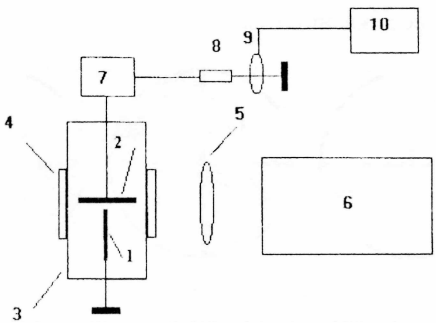


Рис. 12. Схема эксперимента по исследованию динамики пятен:
1 – бериллиевый катод, *2* –медный анод, *3* – вакуумная камера,
4 – оптические окна, *5* – увеличивающая оптика, *6* – сверхскоростная система IMACON-468, *7* – линия формирования импульсов, *8* – балластный резистор, *9* – пояс Роговского, 10 – осциллограф Le Croy

Первые имеют скорость перемещения до 500 м/с, характеризуются плотностью тока ~ 5.10^7 А/м^2 и реализуются на окиси бериллия. Вторые – напротив, горят на чистом бериллии имеют скорость на 2 порядка ниже и плотность тока ~ 6.10^9 А/м^2. Показано, что сначала пятна развиваются на окиси бериллия, и лишь по мере очистки поверхности от окисла появляются

медленные пятна. Средний ток на пятно составляет около 10 А. Оценено катодное падение потенциала на бериллии – около 30 В.

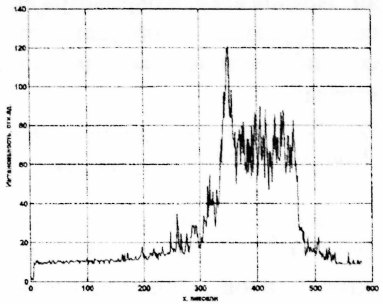


Рис. 13. Пространственное распределение яркости свечения плазмы быстрого катодного пятна (1 пиксель соответствует 3,3 мкм)

В седьмой главе приведены результаты расчетно-теоретического моделирования взаимодействия ионов изотопов водорода с бериллием. Создана модель [26,32] для расчета диффузионного возврата распыленных атомов бериллия (рис. 14), основанная на их рассеянии на легком газе при движении вдоль прямолинейных траекторий.

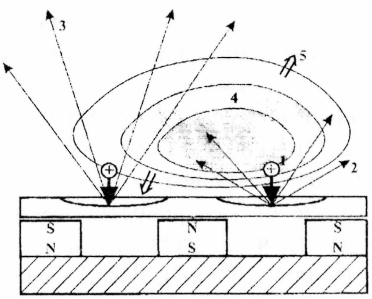


Рис. 14. Схема процессов в магнетронной распылительной системе:
1 –ионы дейтерия, 2, 3 – распыленные атомы мишени, 4 – область рассеяния распыленных атомов мишени,
5 –диффузионные потоки распыленных частиц

Уравнение, описывающее потери энергии вдоль пути s вылета распыленного атома с поверхности мишени, записывалось в виде:

$$\frac{d\varepsilon}{ds} = -\alpha\varepsilon^{1-2m},$$

где m - параметр экранирования при взаимодействии двух атомов, α - константа, характеризующая пространственный масштаб изменения энергии и зависящая от концентрации газа n_g, соотношения масс атомов сталкивающихся частиц, зарядов ядер, и параметра m.

Для нахождения функции виртуального источника атомов, участвующих в процессе диффузии на поверхность мишени, использовалось выражение в виде интеграла:

$$\rho(r,z) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r1}^{r2} dr_0 \frac{Yj(r_0)\alpha\psi[\varepsilon(R)]\cos\vartheta(r_0,\varphi,r,z)r_0}{\pi R^2 \varepsilon^{(2m-1)}},$$

где $R = R(r_0,r,z,\varphi)$ - расстояние от точки старта частицы до точки термализации, $\varepsilon(R)=[2m\alpha R+E_t^{2m}]^{1/2m}$, ϑ - угол между вертикалью в точке старта r_0 и радиус - вектором, проведенным из точки (r_0, z=0, φ) в точку(r, z, φ=0), r_1 и r_2 - значения радиусов, ограничивающих кольцо распыления. Приведенный интеграл вычислялся численно. Область интегрирования по углу разбивалась на 300, а по радиусу - на 30 интервалов.

После этого численно решалось уравнение диффузии термализованных атомов бериллия с правой частью в виде функции виртуального источника:

$$D\left(\frac{\partial^2 n}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial n}{\partial r}+\frac{\partial^2 n}{\partial r^2}\right) = -\rho(r,z),$$

где коэффициент бинарной диффузии распыленных атомов в окружающей среде рассчитывался по формуле Ланжевена. Проведенные расчеты позволили получить распределение концентрации распыленных атомов и их обратного потока на поверхность мишени.

На рис. 15 показана зависимость потока переосаждающихся частиц на поверхность от радиуса. Отметим, что абсолютное значение концентрации бериллия у поверхности достаточно велико, достигает в максимуме 3.10^{17} м$^{-3}$ на расстоянии около 3 см от поверхности, но все же заметно меньше концентрации водорода (для эксперимента, с которым проводилось сравнение, оно имеет порядок 10^{21} м$^{-3}$). Рис. 15 свидетельствует, что поток возвращающихся атомов бериллия имеет максимум на оси системы, где разряд отсутствует, и убывает к периферии мишени примерно вдвое.

Полученные расчетные зависимости в совокупности с данными эксперимента позволили оценить коэффициент распыления бериллия ионами водорода по скоростям двух конкурирующих процессов: распыления и осаждения. Предложенная математическая модель показала хорошее качественное совпадение с данными эксперимента и может служить основой для расчета процессов переосаждения распыленных частиц.

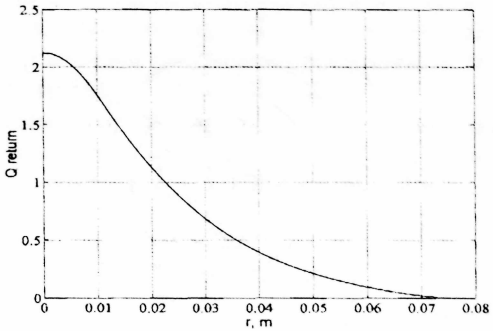


Рис. 15. Зависимость потока переосаждающихся частиц на поверхность (в относительных единицах) от радиуса

Для составной секторной мишени, использованной в экспериментах, была создана модель расчета переосаждения бериллия и вольфрама. Для азимутально-неоднородного катода-мишени стационарное пространственное распределение концентрации термализованных распыленных атомов различных сортов определялось с помощью решения трехмерного уравнения диффузии с виртуальным источником, но при интегрировании только в пределах секторов из одного материала. Решение этой задачи было найдено аналитически с использованием функции Грина $G(r, z, r', z', \varphi-\varphi')$:

$$n(r,z,\varphi) = \int_0^{r_{max}} r'\mathrm{d}r' \int_0^{z_{max}} \mathrm{d}z' \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\varphi' G(r,z,r',z',\varphi-\varphi')\rho(r',z',\varphi').$$

Функция Грина для данного случая имеет вид:

$$G(r,z,r',z',\varphi-\varphi') = \frac{1}{\pi D z_{\max}} \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m\pi z}{z_{\max}}\right) \sin\left(\frac{m\pi z'}{z_{\max}}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_n \frac{I_n(m\pi r / z_{\max})}{I_n(m\pi r_{\max} / z_{\max})} \times$$

$$\times F_n\left(\frac{m\pi r_{\max}}{z_{\max}}; \frac{m\pi r'}{z_{\max}}\right) \cos(n(\varphi-\varphi')),$$

где $F_n(x,y)=I_n(x)K_n(y)$ - $K_n(x)\ I_n(y)$; $I_n(x)$ и $K_n(x)$ – функции Бесселя мнимого аргумента n-ого порядка, $\zeta_n=1$ при $n=0$, $\zeta_n=2$ при $n=1, 2, 3,\ldots$

Приведенные данные (рис. 16) иллюстрируют результаты расчетов при учете функции виртуального источника распыленных атомов только от одного бериллиевого сектора составной секторной мишени Be + W.

Решенные задачи переосаждения распыленного бериллия и взаимного переосаждения вольфрама и бериллия соответствуют моделям **ПО*2D* ТТ*2D* ГР*1D*** и **ПО*3D* ТТ*2D* ГР*1D***.

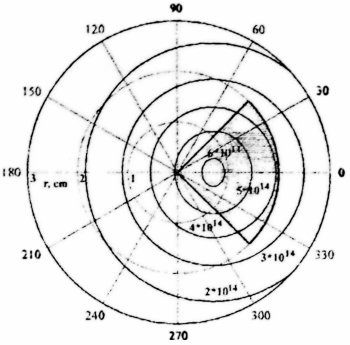


Рис. 16. Изолинии обратного потока осаждающихся атомов бериллия ($см^{-2} с^{-1}$) при распылении только бериллиевого сектора составной мишени

Для интерпретации температурных измерений и оценки точности определения состава распыленных слоев разработана численная модель теплового состояния составной мишени магнетрона. Двумерное уравнение теплопроводности решалось методом конечных разностей.

В **заключении** по диссертации представлены выводы по работе.

В **приложении** представлены документы, подтверждающие использование результатов диссертации в науке и промышленности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен обобщенный анализ основных механизмов разрушения и деградации конструктивных элементов, обращенных к плазме, и их связи с элементарными процессами, происходящими при взаимодействии низко- и высокотемпературной плазмы с твердым телом. Проанализирована взаимосвязь сложных теплофизических процессов, протекающих в различных пространственно расположенных зонах взаимодействия: в пристеночной области плазмы, в твердом теле, на его поверхности, - и определяющих в большинстве систем их ресурс. Сформулированы замкнутые методы численного моделирования процессов взаимодействия, имеющие свой целью конструирование и оптимизацию токонесущих и нейтральных твердых тел, контактирующих с плазмой, - всестороннее описание составляющих процессов, их аккуратная сшивка на границе раздела и детальный анализ связей.
2. Разработан комплекс физико-математических моделей различных уровней и различной размерности для отдельных составляющих катодных процессов в электрических разрядах, протекающих в

приэлектродной области, на поверхности и в теле термоэмиссионного дугового катода, обеспечивающего максимальный ресурс плазменной системы. Набор моделей программно реализован в созданных пакетах прикладных программ.

3. На основе системы частных моделей для отдельных процессов создана совокупность замкнутых методов расчета процессов на термокатодах в различных приближениях для основных классов технических приложений. Проведено детальное сравнение результатов, полученных при использовании различных приближений.
4. На базе комплекса программ сформулированы и реализованы методы оптимизации геометрии электродных узлов плазменных систем с термокатодами. Проведены расчет и оптимизация электродов некоторых классов плазменных устройств в широком диапазоне параметров, которые показали хорошее согласие с экспериментом. Создан метод расчета динамики процессов на активированных катодах, связанный с изменением их свойств. Он позволяет проводить многопараметрическую оптимизацию, в результате чего обеспечивается длительное поддержание низкой работы выхода на активной поверхности, ее температуры и максимальный ресурс катодного узла.
5. Разработана концепция моделирования взаимодействия плазмы изотопов водорода с элементами конструкции термоядерного реактора из наиболее перспективного и мало изученного материалом экрана первой стенки реактора-токамака – бериллия. Это позволило на созданном стенде МАГРАС изучить в комплексе важнейшие характеристики взаимодействия ионов изотопов водорода с бериллием: накопление изотопов водорода, изменение структуры и состава поверхностных слоев при воздействии потоков частиц из плазмы, влияние на характеристики процесса перепыления продуктов эрозии материала, провести ускоренные испытания образцов материалов.
6. Разработана и реализована методика удаленной диагностики процессов в плазме. Для этого создана интерактивная диалоговая система ИНДУС, обеспечивающая удаленному пользователю проведение активного эксперимента через сеть. Спектральным методом проведена оценка параметров плазмы магнетронного разряда в моделирующей установке.
7. Анализ результатов проведенных экспериментов позволил разработать расчетно-теоретическую модель, описывающую эволюцию распыленного материала при взаимодействии ионов изотопов водорода с бериллием на моделирующем стенде, и выполнить сравнение с экспериментом. Показаны их хорошее соответствие и возможность применения методики для оценки работоспособности элементов конструкции, обращенных к плазме.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Зимин А.М., Козлов Н.П, Хвесюк В.И. О взаимосвязи катодных процессов электрических дуг // ЖТФ. - 1973. - Т.43, №6. - С. 1248-1254.
2. Зимин А.М. Исследование работы термоэмиссионного катода сильноточной электрической дуги // Исследования по гидродинамике и теплообмену. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1976. – С. 223-229.
3. Зимин А.М., Козлов Н.П., Хвесюк В.И. Теоретические исследования термоэмиссионных катодов // Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1977. – С. 7-40.
4. Зимин А.М., Козлов Н.П., Хвесюк В.И. О критерии подобия температурных полей катодов // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1979. - №3, вып.1. –С. 9-11.
5. Зимин А.М., Козлов Н.П., Хвесюк В.И. К расчету термоэмисионного катода // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1979. - №8, вып.2. – С. 17-24.
6. О работе катода мощного плавильного плазмотрона / А.М. Зимин, М.М. Крутянский, В.С. Малиновский и др. // Исследования в области промышленного электронагрева. – М.: Энергия, 1979. – С. 134-136. (Тр. ВНИИЭТО, вып.9).
7. Динамика эрозии активированного катода / А.М. Зимин, Н.П. Козлов, И.А. Полякова, В.И. Хвесюк // Физика и химия обработки материалов. – 1980. - № 4. – С. 16-21.
8. Зимин А.М. О различных приближениях при описании процессов в прикатодной области // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1980. - №13, вып.3. – С. 35-37.
9. Двумерный расчет электрической дуги / А.М. Зимин, Н.П. Козлов, В.И. Хвесюк, Б.Д. Цыдыпов // Генераторы низкотемператур. плазмы: Тез. докл. 8-й Всес. конф. –Новосибирск, 1980. – Ч.1. - С. 48-52.
10. Khvesiuk V.I., Kozlov N.P., Zimin A.M. To the theory of cathode processes of high pressure impulse discharge // Phenomena in Ionized gases: Proc. 15th Intern. Conf. – Minsk, 1981. – P. 505-506.
11. Об оптимизации термокатода дугового разряда / А.М. Зимин, Н.П. Козлов, В.И. Хвесюк, А.А. Щербаков // ТВТ. – 1982. – Т.20, №3. – С. 442-446.
12. Зимин А.М., Хвесюк В.И., Цыдыпов Б.Д. Экспериментальное исследование динамики процессов на активированных катодах // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1982. - №8, вып.2. – С. 49-53.
13. Расчет теплового состояния катодного узла / А.М. Зимин, Н.П. Козлов, В.И. Хвесюк, Б.Д. Цыдыпов // Источники и ускорители плазмы. – 1983. – Вып.7. – С. 73-85.

14. Дюжев Г.А., Зимин А.М., Хвесюк В.И. Термоэмиссионные катоды // Плазменные ускорители и ионные инжекторы / Под ред. Н.П. Козлова и А.И. Морозова. – М.: Наука, 1984. – С. 200-217.

15. Зимин А.М. К расчету термоэмиссионного катода в импульсном режиме // Генераторы низкотемпер. плазмы: Тез. докл. 10-й Всес. конф. – Минск, 1986. – Ч.1. – С. 77-78.

16. Зимин А.М., Хвесюк В.И., Цыдыпов Б.Д. О динамике процессов на активированных катодах // ТВТ. – 1986. – Т.24, №1. – С. 30-36.

17. Зимин А.М., Хвесюк В.И. Численное моделирование катодных процессов в дуговых разрядах // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1987. - №11, вып.3. – С. 52-59.

18. Теория и расчет приэлектродных процессов / И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк, А.М. Зимин и др. - Новосибирск: Наука, 1992. - 197 с. (Низкотемпературная плазма. Т.10).

19. Математическое моделирование катодных процессов / А.М. Зимин, И.П. Назаренко, И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк. - Новосибирск: Наука, 1993. - 194 с. (Низкотемпературная плазма. Т.11).

20. Zimin A.M. The mathematical modelling of cathode phenomena // Electrical Contacts. Theory and Applications: Proc. Intern. Symposium. – Almaty, 1993. - P. 73-82.

21. Зимин А.М., Елистратов Н.Г. О моделировании взаимодействия ионных пучков с поверхностью с помощью магнетронов // Взаимодействие ионов с поверхностью: Матер. XI Междунар. конференции. – М., 1993. – Т.3. -С. 152-154.

22. Study of Beryllium Redeposition under Bombardment by High Intensity Low-Energy Hydrogen Ion Beams / V.M. Gureev, M.I. Guseva, A.M. Zimin et al. // Beryllium Technology for Fusion: Proc. 3rd IEA Intern. Workshop. –Mito-city (Japan), 1998. – P. 74-83.

23. Studies of tritium desorbtion from beryllium and characterization of erosion products under plasma - beryllium interaction / D.V. Andreev, A.Yu. Biryukov, A.M. Zimin et al. // Fusion Engineering and Design. - 1998. - V. 39-40. - P. 465-475.

24. MAGRAS - facility for modelling of plasma facing beryllium sputtering and re-deposition / A.M. Zimin, N.G. Elistratov, B.N. Kolbasov et al. // Plasma Devices and Operations. - 1999. - V.8, No.1. - P. 15-38.

25. Исследование взаимодействия низкоэнергетичных ионов дейтерия с бериллием в условиях перепыления / Н.Н. Васильев, В.М. Гуреев, А.М. Зимин и др. // Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. - 1999. - Вып.2. - С. 41-47.

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

27. Программно-аппаратный комплекс для удаленной спектральной диагностики через сеть Интернет / А.М. Зимин, В.А. Аверченко, С.Ю. Лабзов и др. // Физика низкотемпературной плазмы: Материалы Всерос. науч. конф. - Петрозаводск, 2001. - Т.2. - С. 13-17.

28. Зимин А.М., Иванов В.А., Юттнер Б. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде // Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. - 2001. - Вып.2. - С. 50-57.

29. Elistratov N.G., Zimin A.M. Magnetron discharge with azimuthally nonuniform W-Be cathode // IEEE Transaction on Plasma Science. - 2002. - V.30, No.1. - P. 397-400.

30. Modeling of joint operation of plasma facing Beryllium and Tungsten / Yu.A. Axjonov, L.S. Danelyan, A.M. Zimin et al. // Перспективные материалы. – 2002. - Спец. Выпуск. – С.70-74. (Сб. трудов V рабочей группы Международного Энергетического Агентства по бериллию).

31. Ivanov V.A., Jüttner B., Zimin A.M. Development of Cathode Spots on the Surface of a Beryllium // Plasma Devices and Operations. – 2002. -V.10, No.2. – P. 109-116.

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

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

34. Accumulation of deuterium in sputtered and re-deposited layers of Be and W under their simultaneous irradiation by deuterons / L.S. Danelyan, N.G. Elistratov, A.M. Zimin et al. // Fusion Engineering and Design. – 2003. – V.66-68. – P. 431-435.

Подписано в печать 20.04.2004 г. Формат 60x90, 1/16.
Объем 2,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 135

Отпечатано в ООО "Фирма Блок"
107140, г. Москва, ул. Русаковская, д.1. т. 264-30-73
www.blok01centre.narod.ru
Изготовление брошюр, авторефератов, переплет диссертаций.