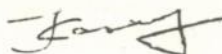


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



КАЗАКОВ ОЛЕГ ЕВГЕНЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЛАЗМЫ КСПУ И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

01.04.08 - физика и химия плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков-1994

000.9  
Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

Научные руководители: доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Терешин Владимир Иванович,  
кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Чеботарев Владимир Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
профессор  
Падалка Валентин Глебович,  
(Харьковский авиационный институт,  
г. Харьков),  
кандидат физико-математических наук,  
профессор  
Муратов Владимир Иванович,  
(Харьковский государственный  
университет, г. Харьков).

Ведущая организация: Институт физики АН Украины (г. Киев)

Защита состоится "6" мая 1994 г. в 17<sup>00</sup> ча  
заседании специализированного совета Д 053.06.01 Харьковского  
государственного университета (ЗІОІО8, г. Харьков, пр. Курчатова  
31, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной  
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан " " 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор физ.-мат. наук

Азаренков Н.А.

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00802240 (G)

4В 20.870

Актуальность темы. Генерация мощных потоков плазмы со средней направленной энергией ионов от сотен эВ до десятков кэВ, с плотностью  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при полном энергосодержании в потоках плазмы 0,1–10 МДж является актуальной задачей с точки зрения их возможного использования в различных областях науки и техники. В частности, потоки плазмы указанных параметров могут быть использованы (и уже частично используются) для решения задач инжекции плазмы в термоядерные установки, взаимодействия плазмы с поверхностью, имитации процессов на первой стенке термоядерного реактора, создания мощных источников накачки в лазерной технике, моделирования астрофизических явлений и т.д.

Среди существующих схем ускорителей плазмы наиболее реальными с точки зрения достижения предельных указанных параметров являются квазистационарные плазменные ускорители (КСПУ), предложенные А.И.Морозовым. К настоящему времени выполнено большое число экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованиям динамики плазмы в ускорительных каналах сильноточных КСПУ различных модификаций, оптимизации работы всех активных элементов КСПУ и их влияния на характеристики течения и параметры, генерируемых потоков плазмы. В результате проведенных исследований подтверждена квазистационарная природа ускорения в полноблочном КСПУ, продемонстрирована принципиальная возможность управления приэлектродными скачками потенциала, показана возможность реализации эффективного магнитного экранирования трансформеров от бомбардировки их поверхности быстрыми ионами. На сегодняшний день в Харьковском физико-техническом институте создан и работает крупнейший полноблочный двухступенчатый квазистационарный плазменный ускоритель КСПУ X-50 с активными трансформерами Z-типа, полная энергетика которого превышает 3 МДж при максимальном рабочем напряжении 20 кВ. Найдены оптимальные режимы работы КСПУ X-50, в которых получены потоки плазмы с рекордными для данных систем параметрами — плотность потока энергии в плазме  $1 \text{ кДж/см}^2$  (на расстоянии  $\sim 0,5 \text{ м}$  от среза ускорителя), полное энергосодержание в потоке до 270 кДж при к.п.д. основной ускорительной системы 0,6–0,7 (средняя направленная энергия ионов при этом достигает 850 эВ, а средняя плотность плазмы вблизи ускорителя  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Такие высокие параметры генерируемых плазменных потоков позволяют моделировать на КСПУ процессы воздействия высокоэнергетичных потоков плазмы на первую

3

стенку реактора-токамака ИТЭР в условиях тепловой фазы срыва тока плазмы, а также воздействовать на поверхности различных конструкционных материалов с целью улучшения их физико-механических характеристик. В связи с этим, актуальными становятся исследования интегральных энергетических характеристик плазмы КСПУ и её воздействия на различные материалы.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение интегральных энергетических характеристик плазмы КСПУ, изучение примесного состава генерируемых плазменных потоков, а также исследования возможности использования мощных потоков плазмы для решения ряда задач УТС и технологии.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований интегральных энергетических характеристик плазмы КСПУ, в ходе которых изучено влияние начальных условий работы ускорителя на величину и профиль плотности потока энергии генерируемых плазменных потоков.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния приповерхностного слоя, возникающего при налетании мощных потоков плазмы на плоские образцы, на эффективность передачи энергии и количество примесных ионов, достигающих поверхности собирающих зондов.

3. Результаты экспериментальных исследований примесного состава генерируемых плазменных потоков, проведенные с помощью метода собирающих зондов.

4. Результаты исследований возможности использования мощных потоков плазмы для упрочнения и изменения структурно-фазового состава поверхности различных конструкционных материалов, изменения коррозионных характеристик нержавеющей стали X18H10T, а также влияния плазменной обработки на коэффициенты эрозии карбида бора и вольфрама.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Изучены интегральные энергетические характеристики плазмы КСПУ. Показано влияние начальных условий работы ускорителя на величину плотности потока энергии генерируемых плазменных потоков.

2. Изучено влияние геометрии КСПУ на радиальные распределения плотности потока энергии генерируемых плазменных потоков.

3. Показано, что приповерхностный слой, образующийся при налетании мощных потоков плазмы на плоские образцы-калориметры, существенно снижает тепловые нагрузки на образцы, так что измеренные

величины энергии оказываются заниженными по отношению к реальному энергосодержанию в плазме.

4. Показано, что экранирующие свойства приповерхностного слоя плазмы определяются параметрами налетающих потоков плазмы, поперечными размерами мишени и практически не зависят от материала мишени.

5. Изучен примесный состав генерируемых плазменных потоков. Показано, что основной примесной компонентой являются ионы меди, количество которых составляет  $\leq 0,2\%$  общего потока протонов. Общее количество остальных примесных ионов на порядок меньше.

6. Исследована роль примесных ионов в распылении осадка. Показано, что в проведенных экспериментах (при средней направленной энергии ионов  $\sim 100$  эВ) наблюдаемая эрозия осадка за счет ионов меди существенно выше, чем эрозия за счет бомбардировки ионами водорода.

7. Показано, что воздействие мощных потоков плазмы приводит к упрочнению и изменению структурно-фазового состава поверхности образцов и промышленных деталей, выполненных из сталей X18H10T, 40X, ШХ-15, ХВГ, 12ХНЗА, твердосплавных резцов из ВК-8.

8. Измерены коэффициенты эрозии карбида бора и вольфрама. Полученные значения существенно превосходят коэффициенты физического распыления карбида бора и вольфрама протонами.

#### Научная и практическая ценность работы.

В результате проведенных исследований изучено влияние начальных условий работы ускорителя на интегральные энергетические характеристики плазмы КСПУ, изучен примесный состав генерируемых плазменных потоков, исследованы возможности использования мощных потоков плазмы для решения ряда задач УТС и технологии. Полученные результаты играют существенную роль в технологических экспериментах по облучению плазменными потоками КСПУ поверхностей различных конструкционных материалов, а также в экспериментах, связанных с имитацией условий на поверхности первой стенки в реакторе-токамаке в условиях тепловой фазы срыва тока плазмы.

#### Апробация результатов и публикации.

Основные результаты, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на VI и VII Всесоюзных конференциях по плазменным ускорителям и ионным инжекторам (Днепропетровск 1986, Харьков 1989), Всесоюзных конференциях по физике плазмы и УТС в Звенигороде

(1990, 1991, 1992 гг.), V и VI Всесоюзных совещаниях по диагностике высокотемпературной плазмы (Минск 1990, Санкт-Петербург 1993), XIX-ой Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (Дрославия, Белград 1989), VII и VIII Межотраслевых школах по физике радиационных повреждений твердого тела в Алуште (1989, 1991 г) I и II Украинских конференциях по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы (Киев 1992, Харьков 1993). Основные материалы диссертации опубликованы в 11 работах. Список публикаций приведен в конце автореферата.

#### Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и рисунков, иллюстрирующих работу. Полный объем работы составляет 104 страниц, в том числе страниц машинописного текста, 23 рисунков, 2 таблиц и список литературы из 129 наименований.

Во введении представлен обзор литературы по проблеме ускорения мощных потоков плазмы и возможностям использования плазменных потоков для решения задач УТС и в технологии. При этом кратко рассмотрено влияние плазменной обработки на структурно-фазовый состав и физико-механические свойства различных материалов, отмечена роль примесных ионов в распылении поверхностей. Здесь же сформулированы цель работы, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, изложена структура диссертации.

#### В первой главе

Дано описание полноблочного двухступенчатого квазистационарного плазменного ускорителя КСПУ X-50, экспериментального стенда КСПУ П-50, импульсного плазменного ускорителя "Просвет", а также различных методов диагностики, использованных при проведении экспериментов.

Экспериментальный стенд КСПУ П-50 включает в себя собственно ускоритель, вакуумную систему, комплекс энергетики и систему управления.

Основной ускорительный канал двухступенчатого КСПУ П-50 образован цилиндрическим стержневым анодом диаметром 50 см и профилированным стержневым катодом.

Катод имеет форму эллипсоида вращения, поверхность которого состоит из 16 дискретных ламелей, соединенных двумя несущими коаксиальными медными трубами. На внутренней токопроводящей трубе

расположены разновысокие токоприемные шпильки, повторяющие профиль катода. Катодный узел отделен от торцевого фланца с помощью цилиндрического изолятора.

На торцевом фланце симметрично относительно оси системы расположены четыре независимые входные ионизационные камеры (ВИК), образующие первую ступень ускорителя. ВИК представляет собой модификацию МПК со сплошным цилиндрическим медным анодом диаметром 8 см, длиной 40 см и профилированным медным катодом с максимальным диаметром 4 см. Импульсный напуск рабочего газа в ВИК осуществляется с помощью электродинамических клапанов.

Энергопитание всех элементов ускорителя осуществляется от емкостных накопителей. Параметры конденсаторной батареи основного разряда:  $C=5600$  мкФ,  $U_C < 10$  кВ. Для питания разряда в ВИКах используется накопитель с емкостью до 4000 мкФ и напряжением до 5 кВ.

Инжекция и исследования потоков плазмы, генерируемых КСПУ П-50, проводятся в вакуумной камере диаметром 1 м и длиной 4 м. Откачка вакуумной камеры осуществляется турбомолекулярным и электродуговым титановыми насосами.

Для успешного проведения экспериментов по плазмоповерхностному взаимодействию вакуумная камера на расстоянии 70 см и 270 см от среза ускорителя имеет специальные шлюзовые камеры (диаметр 18 см, длина 60 см) с автономной вакуумной откачкой, позволяющие производить установку и извлечение образцов без вскрытия основного объема камеры. Кроме того, через шлюзовые камеры в установку вводятся локальные калориметры, позволяющие измерять радиальные распределения плотности потока энергии генерируемых плазменных потоков.

Полноблочный квазистационарный плазменный ускоритель КСПУ X-50 состоит из трех основных узлов: анодного трансформера ( $T_A$ ), катодного трансформера ( $T_K$ ) и входного ионизационного блока (ВИБ). Анодный и катодный трансформеры разделены кольцевым изолятором.

ВИБ представляет собой систему из пяти входных ионизационных камер (ВИК), каждая из которых является плазменным ускорителем типа МПК со сплошным цилиндрическим анодом внутренним диаметром 7 см и профилированным сплошным катодом с максимальным диаметром 3,2 см.

Анодный трансформер состоит из магнитной системы и анодных

ионизационных камер (АИК).

Магнитная система анодного трансформера образуется трехрядной системой продольных токонесущих стержней с поперечными перемычками, задающими линейный спад магнитного поля по длине ускорительного канала. В данной конструкции ускорителя выбрана 10-ти угольная конфигурация, обеспечивающая при определенном соотношении токов в стержнях структуру магнитного поля с двумя рядами нулевого магнитного поля. Вдоль осевых линий с нулевым магнитным полем установлены 10 АИКов, каждый из которых представляет собой плазменный ускоритель подобный ВИКу, но с диаметром анода 5 см. Импульсный напуск рабочего газа в ВИК'и и АИК'и осуществляется с помощью электродинамических клапанов.

Катодный трансформер Z-типа выполнен из набора 20-ти изогнутых металлических трубок с внутренними токонесущими проводниками, создающими экранирующее магнитное поле. Трубки симметрично оси закреплены на коаксиальных цилиндрических трубах, обеспечивающих токоподвод к проводникам. Изгиб трубок задает профиль ускорительного канала. Длина профилированной части 60 см, максимальный диаметр 32 см.

Ускоритель КСПУ X-50 размещен в вакуумной камере, длина которой 10 м и диаметр 1,5 м.

Энергопитание всех элементов ускорителя осуществляется от разделных емкостных накопителей. Предельные параметры батареи конденсаторов, питающей разряд в основном ускорительном канале,  $U_C=25$  кВ,  $C=7200$  мкФ,  $w_C=2,2$  МДж.

Сверху на вакуумной камере установлены на различных расстояниях от среза ускорителя 5 шлюзовых камер диаметром 25 см и длиной 100 см.

Импульсный плазменный ускоритель "Просвет" размещен в вакуумной камере длиной 120 см и диаметром 100 см.

Энергопитание ускорителя осуществляется от конденсаторной батареи емкостью 60 мкФ, максимальное рабочее напряжение 24 кВ.

Коаксиальные электроды источника разделены фигурным фторопластовым изолятором и имеют диаметр 3 и 14 см. Внутри центрального электрода размещен импульсный электромагнитный клапан, обеспечивающий напуск рабочего газа. Газ напускается через три поперечных щели в теле электрода, расположенные на расстоянии 20 см от конца электрода.

Для проведения технологических экспериментов на вакуумной камере установлено специальное шлюзовое устройство.

Основные экспериментальные результаты получены с помощью локальных интегральных калориметров различных модификаций, углесталовых собирающих зондов, а также с помощью различных диагностических методов, позволяющих оценить последствия плазменного воздействия. Надежность измерений проверялась сравнением с результатами, полученными коллегами с помощью электрических и магнитных зондов, энергоанализатора, спектроскопии и интерферометрии.

Во второй главе представлены результаты изучения основных интегральных энергетических характеристик плазмы КСПУ. Показано, что при налетании мощных плотных потоков плазмы на плоские образцы-калориметры у поверхности последних образуются плотные экранирующие переходные слои "холодной" плазмы, препятствующие полному усвоению энергии плазмы калориметром, так что измеренные величины энергии оказываются заниженными по отношению к реальному энергосодержанию в плазме. При этом величина коэффициента экранирования, определяемого как отношение плотности потока энергии налетающего плазменного потока к плотности потока энергии, регистрируемой образцом-калориметром, определяется параметрами налетающего потока плазмы, поперечными размерами образца и практически не зависит от материала мишени. При плотности потока энергии  $\sim 1$  кДж/см<sup>2</sup> коэффициент экранирования равен 7 для образцов-калориметров диаметром 5 мм и увеличивается до 10-12 для образцов с поперечными размерами  $\geq 50$  мм.

Измерения плотности потока энергии на оси системы, проведенные с помощью локального калориметра  $\varnothing 5$  мм, движущегося относительно поверхности диска из нержавеющей стали  $\varnothing 90$  мм, показали, что максимальная экранировка поверхности мишени от поступления энергии происходит на расстояниях  $l \approx 10-15$  мм. Именно на этих расстояниях плотность приповерхностного слоя достигает максимальных значений  $n_e = 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, более чем на порядок превосходя плотность свободно движущегося потока плазмы  $n_e^0 = 1,5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При этом максимальные линейные размеры приповерхностного слоя плазмы, влияющего на эффективность передачи энергии, не превышают 40 мм.

Экспериментально измеренные зависимости плотности потока энергии от величины разрядного тока, полученные в различных режимах работы КСПУ, показали, что экспериментальные точки различных серий достаточно хорошо укладываются на степенные зависимости

вида  $\rho_w \approx I_p^\gamma$ , где значение показателя  $\gamma$  ( $2 \leq \gamma \leq 5$ ) определяется в основном массовым расходом вещества. Благодаря организации эффективной анодной подачи газа при включении активного анодного трансформера в экспериментах на КСПУ X-50 удалось добиться того, что массовый расход  $I_m$  поддерживался постоянным в широком диапазоне изменения разрядных токов ( $100 < I_p < 400$  кА), при этом показатель  $\gamma$  достигал величины 3,8, что хорошо согласуется с расчетным показателем  $\gamma=4$ .

Экспериментально показано, что на радиальное распределение плотности потока энергии генерируемых плазменных потоков заметное влияние оказывает геометрия КСПУ, в частности, соотношение длин анода и катода. Наиболее равномерное по сечению плазменного потока распределение плотности потока энергии получается в случае, когда выход катода совпадает со срезом анода. Смещение катода вглубь по отношению к срезу анода приводит к поджатию плазменного потока к оси системы, при этом максимальные значения плотности потока энергии на оси системы возрастают.

В третьей главе представлены результаты исследований примесного состава генерируемых плазменных потоков. Для качественного и количественного состава примесных ионов в плазменных потоках, генерируемых КСПУ П-50, впервые использован метод собирающих зондов, широко применяемый для подобного рода исследований в тороидальных магнитных ловушках. Рассмотрены вопросы, связанные с корректностью проводимых с помощью этого метода, количественных измерений примесных частиц.

Показано, что основной примесной компонентой плазменных потоков КСПУ П-50 являются ионы меди, которые поступают в разряд в результате частичной эрозии системы электродов ускорителя, изготовленных из бескислородной меди. За один разрядный импульс на поверхность собирающего зонда осаждается  $\sim 2 \cdot 10^{15}$  ат. Cu/cm<sup>2</sup>. Общее число ионов меди, с учетом особенностей взаимодействия налетающих потоков плазмы с поверхностью твердых тел (возникновение мощных приповерхностных слоев "холодной" плазмы) составляет  $\leq 0,2\%$  общего потока протонов, полное количество остальных примесных ионов на порядок меньше.

Изучена роль примесных ионов в распылении осадка на поверхности собирающих зондов. Показано, что в проведенных экспериментах (при средней направленной энергии ионов  $\sim 100$  эВ) наблюдаемая эрозия

осадка за счет ионов меди значительно выше, чем эрозия за счет бомбардировки ионами водорода. Водородные ионы выступают в роли основного расплывающего фактора в экспериментах на полноблочном двухступенчатом квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ X-50, на котором получены плазменные потоки со средней направленной энергией ионов  $\leq 0,8$  кэВ, и на котором за счет эффективной магнитной экранировки анодного и катодного трансформеров существенно, по сравнению с КСПУ П-50, ограничен поток примесей в ускорительный канал, о чем свидетельствуют данные спектроскопических измерений.

Четвертая глава посвящена изучению возможностей использования мощных потоков плазмы для решения ряда задач УТС и технологии. Проведенные исследования показали, что в результате воздействия мощных потоков азотной плазмы основной фазой на поверхности облученных образцов из сталей 12ХНЗА, 40Х, ХВГ вместо  $\alpha$ -Fe фазы становится высокотемпературная  $\gamma$ -Fe, возрастает за счет возникновения твердых растворов внедрения период кристаллической решетки  $\gamma$ -Fe. Полное количество внедренного азота в экспериментах с образцами из нержавеющей стали Х18Н10Т составляет ~5% от полной дозы облучения.

В результате плазменной обработки на поверхности образцов из сталей 40Х, ШХ-15, ХВГ, 12ХНЗА образуется аморфный слой толщиной до 30 мкм с микротвердостью в 3-5 раз выше, чем у исходных, необлученных образцов. Наблюдаемое увеличение микротвердости образцов является результатом термической закалки и процесса азотирования поверхности. На увеличение микротвердости влияют также те структурно-фазовые изменения, которые произошли на поверхности в результате плазменного воздействия.

Воздействие импульсных потоков азотной плазмы оказывает существенное влияние на коррозионные характеристики нержавеющей стали Х18Н10Т. В результате воздействия малых доз облучения ( $\Phi = (3-6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) коррозионные характеристики стали в водяной паре закритических параметров вначале ухудшаются, а затем с увеличением дозы облучения коррозионная стойкость начинает расти.

Изучены коэффициенты эрозии карбида бора и вольфрама; проведено сравнение полученных значений с коэффициентами физического распыления этих материалов протонами. Показано, что с ростом энергии налетающих частиц коэффициент эрозии карбида бора возрастает и при энергии  $E=2$  кэВ достигает величины  $S=15$  атом/ион.

Полученное значение существенно превышает коэффициент физического распыления карбида бора ионами водорода и обусловлено радиационно-стимулированной сублимацией карбида бора.

Для вольфрамовых образцов измеренный коэффициент эрозии также превышает коэффициент физического распыления вольфрама протонами и при энергии налетающих частиц  $E=0,3$  кэВ находится на уровне  $S=6 \cdot 10^{-2}$  атом/ион. Рентгеноструктурный анализ поверхности облученных образцов показал, что в результате плазменного воздействия на поверхности возникают растягивающие напряжения 1-го рода, сопровождающиеся пластической деформацией материала, что приводит к уменьшению периода кристаллической решетки вольфрама. В результате возникновения остаточных напряжений на поверхности облученных образцов появляются трещины, которые и приводят к значительному увеличению эрозии вольфрама за счет отслаивания крупных слоев материала.

В заключении перечислены основные результаты работы.

1. В результате проведенных исследований показано, что при налетании мощных потоков плазмы на плоские преграды у поверхности последних образуются плотные приповерхностные слои плазмы, существенным образом влияющие на эффективность передачи энергии и количество примесных частиц, достигающих поверхности собирающих зондов.

2. Величина коэффициента экранирования, определяемого как отношение плотности потока энергии налетающего плазменного потока к плотности потока энергии, регистрируемой образцом-калориметром, определяется параметрами налетающего потока плазмы, поперечными размерами образца и практически не зависит от материала мишени. При плотности потока энергии на оси системы  $\sim 1$  кДж/см<sup>2</sup> коэффициент экранирования равен 7 для образцов диаметром 5 мм и увеличивается до 10-12 для образцов с поперечными размерами  $\geq 50$  мм. При этом максимальные линейные размеры приповерхностного слоя плазмы, влияющего на эффективность передачи энергии, не превышают 40 мм.

3. Экспериментально измеренные зависимости плотности потока энергии от величины разрядного тока, полученные в различных режимах работы КСИУ, показали, что экспериментальные точки различных серий достаточно хорошо укладываются на степенные зависимости вида  $\rho_w \approx I_p^\gamma$ , где значение показателя степени  $\gamma$  ( $2 \leq \gamma \leq 5$ ) определяется в основном массовым расходом вещества. Когда массовый расход

газа поддерживался постоянным в широком диапазоне изменения разрядных токов  $100 < I_p < 400$  кА, показатель  $\gamma$  достигал величины 3,8, что хорошо согласуется с расчетным значением  $\gamma=4$ .

4. На радиальное распределение плотности потока энергии генерируемых плазменных потоков заметное влияние оказывает геометрия КСПУ, в частности, соотношение длин анода и катода. Наиболее равномерное по сечению плазменного потока распределение плотности потока энергии получается в случае, когда выход катода совпадает со срезом анода. Смещение катода вглубь по отношению к срезу анода приводит к поджатию плазменного потока к оси системы, при этом максимальные значения плотности потока энергии на оси системы возрастают.

5. Впервые для качественного и количественного анализа примесного состава плазменных потоков, генерируемых квазистационарным плазменным ускорителем, использован метод собирающих зондов. Изучены вопросы, связанные с корректностью проводимых с помощью этого метода, количественных измерений примесных частиц. Показано, что основной примесной компонентой плазменных потоков КСПУ П-50 являются ионы меди, поступающие в разряд в результате частичной эрозии системы электродов ускорителя, изготовленных из бескислородной меди. За один разрядный импульс на поверхность собирающих зондов осаждается  $\sim 2 \cdot 10^{15}$  ат. Cu/cm<sup>2</sup>. Общее количество ионов меди составляет  $\leq 0,2\%$  общего потока протонов, полное же количество остальных примесных ионов на порядок меньше.

6. В проведенных исследованиях (при средней направленной энергии ионов  $\sim 100$  эВ) наблюдаемая эрозия осадка за счет ионов примесей значительно выше, чем эрозия за счет бомбардировки ионами водорода. Водородные ионы выступают в роли основного распыляющего фактора в экспериментах на полноблочном двухступенчатом квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ X-50, на котором за счет эффективной магнитной экранировки анодного и катодного трансформеров существенно, по сравнению с КСПУ П-50, ограничен поток примесей в ускорительный канал, и где получены плазменные потоки со средней энергией ионов  $\leq 0,8$  кэВ.

7. Показано, что в результате плазменного воздействия на поверхности образцов из сталей 40Х, ШХ-15, ХВГ, 12ХНЗА образуется аморфный слой толщиной до 30 мкм с микротвердостью в 3-5 раз выше, чем у исходных, необлученных образцов. Основной фазой на по-

верхности облученных образцов из сталей 12ХНЗА, 40Х, ХВГ вместо  $\alpha$ -Fe фазы становится  $\gamma$ -Fe, возрастает за счет возникновения твердых растворов внедрения период кристаллической решетки  $\gamma$ -Fe ( $a=3,6256 \text{ \AA}$ ). Полное количество внедренного азота в экспериментах с образцами из нержавеющей стали Х18Н10Т составляет  $\sim 5\%$  от полной дозы.

8. Изучены коэффициенты эрозии карбида бора и вольфрама. Показано, что с ростом энергии налетающих частиц коэффициент эрозии карбида бора возрастает и при энергии  $E=2 \text{ кэВ}$  достигает величины  $S=15$  атом/ион. Полученное значение существенно превышает коэффициент физического распыления ионами водорода и обусловлено радиационно стимулированной сублимацией карбида бора.

Для вольфрамовых образцов коэффициент эрозии также превышает коэффициент физического распыления вольфрама протонами и при энергии налетающих частиц  $E=0,3 \text{ кэВ}$  находится на уровне  $S=6 \cdot 10^{-2}$  атом/ион. В результате плазменного воздействия возникают растягивающие напряжения 1 рода, сопровождающиеся пластической деформацией материала, что приводит к уменьшению периода кристаллической решетки вольфрама. В результате возникновения остаточных напряжений на поверхности облученных образцов появляются трещины, которые и приводят к значительному увеличению эрозии вольфрама за счет отслаивания крупных слоев материала.

#### Перечень работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Волошко А.Ю., Гаркуша И.Е., Казаков О.Е. и др. Исследование двухступенчатого квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) со стержневыми электродами.// Физика плазмы. 1990. Т.16. В.2. С.158-167.
2. Терешин В.И., Чеботарев В.В., Трубочанинов С.А. и др. Разработка и исследование методов диагностики плазмы квазистационарных плазменных ускорителей.// Отчет ХФТИ №У18061. 1987. С.1-91.
3. Волошко А.Ю., Казаков О.Е., Колот В.Я. и др. Анализ примесного компонента потоков плазмы, генерируемых КСПУ П-50.// VII Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Тезисы докладов. Харьков. 1989. С.15-16.
4. Волков Я.Ф., Волошко А.Ю., Гаркуша И.Е. и др. Методы диаг-

- ностики мощных потоков плазмы, генерируемых квазистационарным плазменным ускорителем.// Тезисы докладов V-го Всесоюзного совещания по диагностике высокотемпературной плазмы. Минск. 1990. С.238-239.
5. Волков Я.Ф., Волошко А.Ю., Гаркуша И.Е. и др. Методы диагностики мощных потоков плазмы, генерируемых квазистационарным плазменным ускорителем (КСПУ).// Физика плазмы. 1992. Т.18. В.4. С.459-463.
  6. Волков Я.Ф., Гаркуша И.Е., Казаков О.Е. и др. Методы исследования приповерхностных плазменных слоев, образованных при воздействии мощных потоков плазмы на материальную преграду в условиях близких к тепловой фазе срыва тока в токамаке ИТЭР.// VI Совещание по диагностике высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов. Санкт-Петербург. 1993. С.57-58. Физика плазмы. 1994. Т.20. С.77-81.
  7. Garkusha I.E., Kazakov O.E., Mitina N.I. et al. Special features of the interactions of high-power quasistationary plasma streams with a barrier.// Proc. of the II German-Russian conference on electric propulsion engines and their technical applications. Russia. Moscow. 1993. P.15.
  8. Терешин В.И., Чеботарев В.В., Волошко А.Ю. и др. Разработка и исследование квазистационарных плазменных ускорителей с активными трансформерами.// Отчет ХФТИ №26411-2052. Харьков 1987. С.1-136.
  9. Терешин В.И., Морозов А.И., Чеботарев В.В. и др. Исследование двухступенчатых пассивных моделей КСПУ П-30 и П-50.// Отчет ХФТИ №26411-2013. Харьков. 1987. С.1-77.
  10. Терешин В.И., Волошко А.Ю., Возный В.И. и др. Исследование мощных квазистационарных коаксиальных плазменных ускорителей со стержневыми электродами.// Ионные инжекторы и плазменные ускорители. Под ред. А.И.Морозова и Н.Н.Семашко. М.: Энергоатомиздат. 1989. С.106-123.
  11. Войценья В.С., Волошко А.Ю., Дереповский Н.Т. и др. Влияние облучения импульсными потоками азотной плазмы на физико-механические свойства нержавеющей стали X18N10T.// ВАНТ. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1991. Вып.1(55). С.101-104.

Подписано в печать 22.02.94. Формат 60x84/16. Офсетн.печать.  
Усл.п.л. 1.0. Уч.-изд.л. 1.0. Тираж 90. Заказ 75.

Харьков-108, ротапринт ННЦ ХФТИ.





462512

AB2980

**AB 29.878**