

На правах рукописи

ШОШИН Андрей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ПОТОКА
ЭЛЕКТРОННО-ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ
С МИШЕНЯМИ НА МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3**

01.04.08 – физика плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БУРДАКОВ – доктор физико-математических наук,
Александр Владимирович Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АРХИПОВ – кандидат физико-математических наук,
Николай Иванович ГНЦ РФ «Троицкий Институт
инновационных и термоядерных
исследований», г. Троицк.

ДАВЫДЕНКО – доктор физико-математических наук,
Владимир Иванович Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ – Учреждение Российской академии наук
ОРГАНИЗАЦИЯ Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения РАН, г. Томск.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2011 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из наиболее критических вопросов реализации проекта термоядерного реактора является выбор конструкции и материалов плазмодриемников, находящихся под воздействием высоких радиационных и тепловых нагрузок. Наиболее остро эта проблема встала на примере строящегося ИТЭРа. В настоящее время установлено, что приемные пластины дивертора ИТЭРа и первая стенка, кроме стационарного потока горячей плазмы, будет подвергаться периодическому импульсному воздействию при срывах и неустойчивостях плазменной границы (ЭЛМы). Первые оценки показали, что импульсная нагрузка в ИТЭРе при срыве составит до 100 МДж/м^2 за 1 мс, при этом при срыве формируется поток убегающих электронов, имеющих большую энергию (до сотен МэВ). Хотя такие нагрузки не доступны современным плазменным установкам, достаточно быстро стало понятно, что эрозия при таких нагрузках превышает разумные пределы [[1]]. Поэтому разрабатываются сценарии работы ИТЭРа без срывов, а также с быстрыми диагностиками, позволяющими предсказать развитие срыва и погасить плазменный разряд до полномасштабного срыва.

Тем не менее остаются колебания плазменной границы, из которых самые большие (ЭЛМ типа I) сопровождаются нагрузкой на дивертор $1 - 3 \text{ МДж/м}^2$ за $0.1 - 0.5 \text{ мс}$, и будут происходить многократно (более 10^3 раз) за выстрел. При таких параметрах ожидается значительная эрозия материалов и существенное влияние продуктов эрозии на параметры горячей плазмы и работу реактора в целом. По аналогии со срывами для ЭЛМов разрабатывают методы уменьшения их пиковой нагрузки разными методами: с помощью инъекции газа и магнитными возмущениями границы плазмы.

В ИТЭРе дивертор будет покрыт вольфрамом и углеродными композитами. На существующих токамаках параметры ЭЛМов ИТЭРа недостижимы, тем не менее на токамаках ведутся исследования эрозии и переосаждения материалов. Для моделирования воздействия ЭЛМов на материалы используются такие установки как плазменные ускорители КСПУ Х-50 (ХФТИ, Харьков, Украина, [[2]]) и КСПУ-Т (ТРИНИТИ, Троицк), плазменная пушка МК-200 (ТРИНИТИ), установка с электронным пучком JUDITH (FZJ, Юлих, Германия), многопробочная ловушка ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН [[3]]), а также некоторые другие установки (NAGDIS-II, PSI-2, PISCES-B, ЛЕНТА, PILOT-PSI, MAGNUM-PSI).

ИТЭР не единственный перспективный термоядерный реактор, например, в ИЯФ СО РАН разрабатывается проект многопробочного реактора с нагревом плазмы релятивистскими пучками электронов. В этом проекте также встает вопрос стойкости материалов к потокам плазмы с большим количеством высокоэнергетических частиц. Плазменные ускорители и пушки не способны промоделировать воздействие такого

плазменного потока на материалы (также как и убегающие электроны при срыве в ИТЭРе).

Уникальной особенностью установки ГОЛ-3 является возможность проведения экспериментов по моделированию воздействия плазменных потоков большой мощности на материалы при высоком значении электронной температуры в плазменном потоке. Полученная электронная температура плазмы (2 – 5 кэВ) в ближайшей перспективе недостижима на других линейных машинах. Максимальная плотность потока энергии, достигаемая на мишени, недоступна в данное время другим плазменным установкам любого типа. Большая длина (более 15 метров) комплекса ГОЛ-3 делает его уникальным местом для исследования разлета поверхностной плазмы и миграции эродировавшего материала на большие расстояния в термоядерной плазме.

Цель диссертации

Целью диссертации является исследование взаимодействия мощного потока плазмы с мишенями на установке ГОЛ-3: определение параметров падающего плазменного потока и образующейся поверхностной плазмы, определение величины ударной волны в мишени, изучение механизмов и величины эрозии вольфрама и углеродных (в том числе композитных и содержащих литий) материалов при различных плазменных нагрузках, а также параметров переосажденного материала мишени.

Проведение исследования позволит выбрать оптимальный материал для стенки термоядерного реактора, определить максимально допустимый уровень импульсных нагрузок, исследовать параметры поверхностной плазмы и её влияние на основную плазму реактора, предсказать скорость и пути миграции примесей на большие расстояния.

Научная новизна

Впервые проведены эксперименты по исследованию стойкости к облучению мощным плазменным потоком, содержащим высокоэнергетичные электроны, различных углеродных материалов, таких как стеклоуглерод, Сибунит, пироуглерод, а также композитов углеродов с литием. Впервые исследовано распространение плотного облака мишени плазмы на большие расстояния в термоядерной ловушке. Впервые использован метод измерения высокого давления по сдвигу линии флуоресценции рубина для измерения импульсного давления.

Вклад автора

Большая часть описанных в диссертации экспериментальных результатов получена непосредственно автором. Им были разработаны и созданы различные держатели мишеней, часть диагностического комплекса ГОЛ-3, проведены необходимые калибровки оптических и спектральных диагностик, проведены расчеты нагрева мишеней и из сравнения с экспериментальными данными определена плотность поглощенной в

мишенях энергии. Им были проведены измерения некоторых параметров поверхностной плазмы, проведены испытания стойкости различных материалов к облучению плазменным потоком, исследованы поверхности различных мишеней после облучения, исследована зависимость эрозии материалов от плотности потока энергии на мишени, изучены параметры эродировавших с поверхности мишеней частиц.

Научная и практическая значимость диссертационной работы

Разработанные в рамках данной работы физические модели эрозии различных материалов и методы уменьшения эрозии будут применяться на различных плазменных установках и проектируемых термоядерных реакторах, в частности токамака ИТЭР, проектов многопробочного реактора и газодинамического источника нейтронов в ИЯФ СО РАН. Также возможно их применение в физике и технике ускорителей при проектировании эргодонапряженных узлов конверсии частиц.

Положения, выносимые на защиту

- Проведены измерения плотности потока поглощенной энергии по излучению поверхности мишеней (с проведением расчетов энерговыделения в материалах и их последующего нагрева и разрушения).
- Разработан комплекс диагностик для определения параметров образующейся поверхностной плазмы и исследования скорости ее разлета в продольном и поперечном направлениях. Изучены параметры мишенной плазмы на разных расстояниях от мишени.
- По спектрам молекулярных радикалов проведены измерения скорости химической эрозии графитовых мишеней при их облучении потоком плазмы с плотностью энергии 2 МДж/м^2 . Химическая эрозия отвечает за 0.5% от полного числа атомов, поступивших в плазму.
- Создан прибор для измерения высоких импульсных давлений по сдвигу линии флуоресценции рубина. Измерено давление внутри мишени (1.5 кБар) при воздействии на нее импульсного сильноточного электронного пучка.
- Исследована эрозия и модификация поверхностного слоя вольфрама и углеродных материалов в зависимости от плотности потока энергии на мишень, спектра пучка, проведены сравнения с КСПУ X-50. Для вольфрама при средних нагрузках обнаружено формирование сети трещин размерами порядка 1000 мкм, кратеров $\text{Ø}200$ мкм, ячеек длиной 10 мкм и гранул 0.3 мкм.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы неоднократно докладывались на семинарах и конкурсах молодых ученых в ИЯФ СО РАН, на всероссийских и международных конференциях: Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС 2001-2010, Диагностика высокотемпературной плазмы 2003-

2009, Фазовые превращения при высоких давлениях 2002, Забабахинские научные чтения 2007, International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows 2004, 2008, Open Magnetic Systems for Plasma Confinement 2002-2010, European Plasma Science Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics 2002, 2006, были опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах: Приборы и Техника Эксперимента, Transactions of Fusion Science and Technology, Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Текст диссертации содержит 145 страниц, 93 рисунков и 2 таблицы. Список литературы состоит из 103 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведен краткий обзор задач и работ в мире по изучению стойкости материалов плазмоприемников. Описаны механизмы микро- и макроэрозии материалов под воздействием плазмы. Рассматривается актуальность рассматриваемых в диссертации вопросов, сформулированы основные цели работы, приводится краткое содержание диссертации, и перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны многопробочная ловушка ГОЛ-3 в ИЯФ СО РАН [[3]], параметры плазменного потока в расширителе ГОЛ-3, схема и параметры экспериментов по облучению мишеней.

Установка ГОЛ-3 предназначена для исследований по нагреву и удержанию плотной плазмы в открытой ловушке. Установка состоит из трех частей: генератора релятивистского электронного пучка У-2, основного соленоида длиной 12 метров и выходного узла (Рис. 1). Конструкция расширителя ГОЛ-3 такова, что магнитное поле уменьшается в 30 – 200 раз при удалении от выходной пробки установки. В связи с тем, что плотность потока плазмы на выходе установки пропорциональна величине магнитного поля, плотность потока энергии меняется на различных расстояниях от выходной магнитной пробки. Наличие большого количества диагностических портов и изменяемая плотность потока энергии сделало выходной узел наиболее удобным местом для проведения экспериментов по исследованию взаимодействия плазмы и материалов. Величина потока энергии на исследуемые материалы варьировалась в разных экспериментах от 30 до 0.03 МДж/м². Мишени устанавливались под различными углами к падающему потоку плазмы в специальных держателях. Описаны особенности требований к держателям и схемы разработанных и изготовленных держателей (Рис. 2). Также описаны специальные серии экспериментов – с тонким электронным пучком, а также с напуском буферного газа перед исследуемыми мишенями.

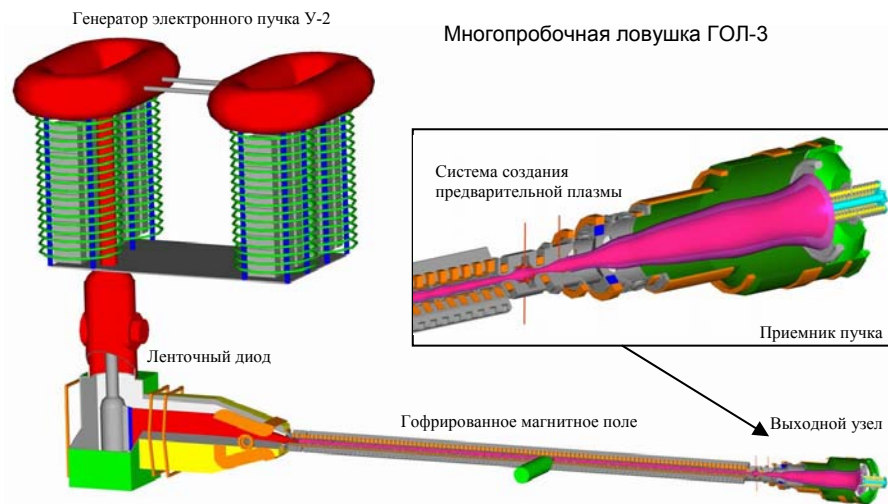


Рис. 1. Масштабная 3D-модель многопробочной ловушки ГОЛ-3 (2009 год). Основной соленоид имеет длину 12 метров.

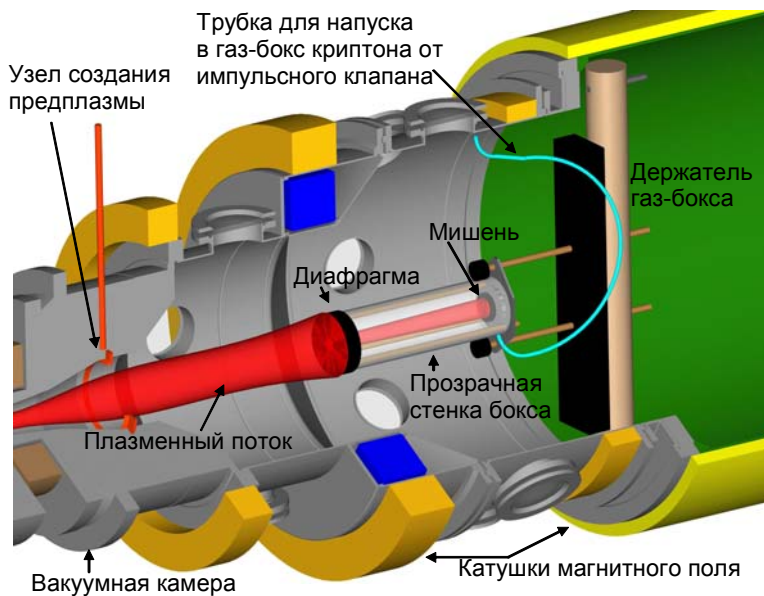


Рис. 2. Схема экспериментов с газ-боксом в выходном узле ГОЛ-3. Плазменный поток вытекает из основного соленоида слева.

Для модернизации выходного расширителя установки ГОЛ-3 была разработана новая выходная секция для облучения материалов с возможностью регулирования в ней величины магнитного поля в пределах 1 – 5 Тл и, соответственно, плотности потока энергии на мишени до 30 МДж/м².

Во **второй главе** представлены разработанные в ИЯФ СО РАН программы расчета нагрева и разрушения мишеней – EMSH и DISWALL.

Полная энергия, выделяющаяся в мишени, измерялась по тепловому излучению ее поверхности. Для определения потока поглощенной энергии используется прокалиброванная ПЗС камера с набором нейтральных светофильтров. Описана калибровка системы по эталонной лампе СИ8-200. Описаны результаты экспериментов по измерению плотности потока поглощенной энергии по излучению поверхности мишеней (Рис. 3). Измеренная температура сравнивалась с результатами расчета энерговыделения и нагрева мишеней, в итоге получали значение плотности потока поглощенной в мишени энергии.

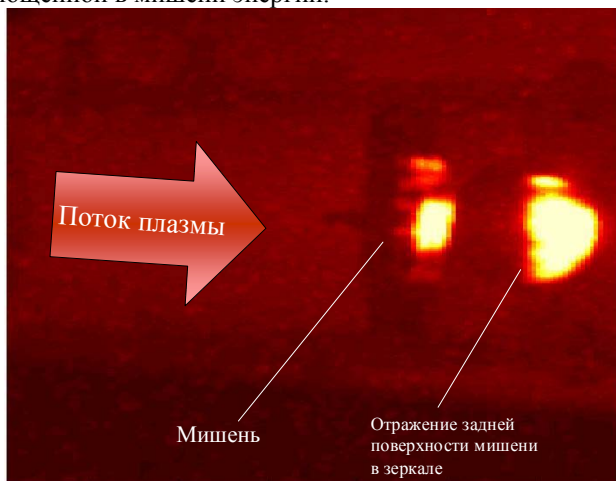


Рис. 3. Фотография мишени через светофильтры при ее облучении мощным потоком плазмы. Мишень разогревается до температуры 2900 °К.

В **третьей главе** описан диагностический комплекс для исследования поверхностной плазмы (Рис. 4), включающий в себя набор спектральных диагностик, спектральноселективную фотографическую систему, а также рентгеновскую гамма-обскуру. Представлены результаты измерений с использованием спектральных систем, по которым измерены параметры поверхностной плазмы, в том числе плотность и температура. Для исследования скорости расширения и скорости диффузии примесной плазмы были проведены специальные эксперименты с инжекцией крупинки в плазму в центральном соленоиде ГОЛ-3. С помощью различных оптических

диагностик были определены плотность $n \sim (2 \div 10) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, скорость продольного расширения $1 - 2 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ и коэффициент поперечной диффузии примесной плазмы $0.5 \text{ м}^2/\text{с}$. Обнаружено, что плотность расширяющегося облака примесной плазмы мало изменяется с расстоянием от мишени.

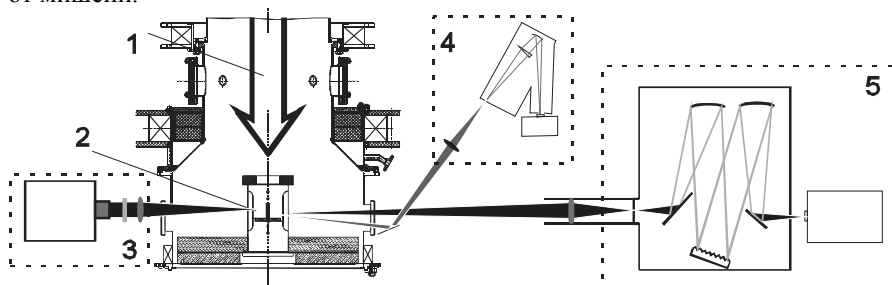


Рис. 4. Схема расположения диагностик поверхностной плазмы; 1 – поток плазмы, 2 – мишень, 3 – фотографическая система для измерения пространственного распределения интенсивности спектральных линий, 4 – обзорный спектрометр, 5 – спектрометр высокого разрешения.

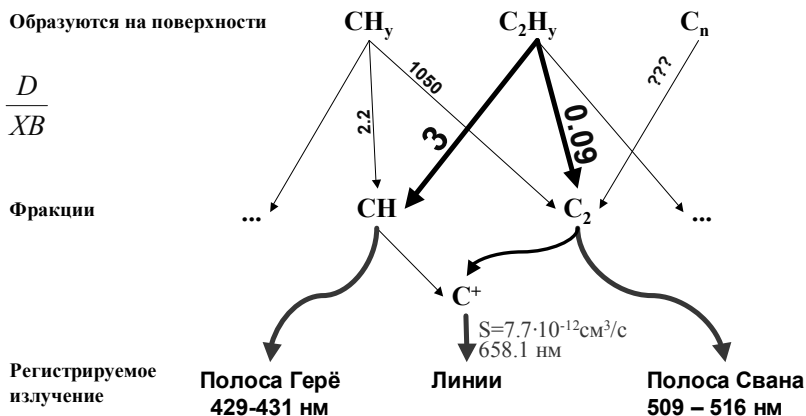


Рис. 5. Схема диссоциации легких углеводородов.

Для исследования вклада химической эрозии в разрушение поверхностного слоя графита были проведены измерения распределения и абсолютной интенсивности излучения полос молекул C_2 и CH . Молекулы C_2 и CH появляются в результате диссоциации образующихся на поверхности твердого тела молекул углеводородов метановой и этановой групп. Сами углеводороды не имеют оптических переходов в видимой области и не могут быть непосредственно обнаружены методами оптической спектроскопии. На основании проведенных экспериментов и расчетов параметров цепочки диссоциации углеводородов и их излучательных способностей (Рис. 5) была

определена скорость химической эрозии на поверхности графита $2 \cdot 10^{18}$ атомов/(см²с) при плотности потока энергии 2.0 МДж/м². Полный поток углерода с поверхности облучаемого графита также определялся с помощью спектральных методов – $3.2 \cdot 10^{20}$ атомов/(см²с). Таким образом было показано, что химическая эрозия при данных условиях отвечает только за 0.5% эродировавшего углерода.

В **четвертой главе** представлены эксперименты по измерению величины волны высокого давления, образующиеся в твердом теле при облучении мощным потоком плазмы. Первые эксперименты по измерению величины волн высокого давления были проведены с использованием химических веществ (CdS и (NH₄)₂SiF₆), которые имеют фазовый переход при высоком давлении. Методами дифрактометрии были обнаружены не описанные в литературе переходы между фазами даже без приложения высокого давления, а только после зажатия в разработанном держателе.

Затем была разработана ячейка высокого давления внутри которой был зажат рубин. Под воздействием давления происходит сдвиг линий флуоресценции рубина R1 (694.23 нм) и R2 (692.8 нм) в красную область, $\Delta\lambda$ [нм] = 0.0365·P [кБар]. Ячейка была протестирована и было показано, что метод работает для измерения импульсного давления. Эксперименты показали, что дополнительная накачка флуоресценции рубинового кристалла тормозным излучением от электронного пучка позволяет использовать ячейку без лампы накачки. Измеренное в экспериментах давление внутри ячейки достигает 1.1 кБар при длительности импульса 8 мкс.

В **пятой главе** представлены исследования материалов после воздействия плазменного потока. При моделировании поведения плазмопремников под действием больших нагрузок эквивалентных срывам в токамаках необходимо учитывать не только величину плотности энергии, но и энергетическую функцию распределения падающего корпускулярного потока на мишень. Однако, на существующих установках распределение либо является тепловым с температурой порядка сотен электрон вольт, либо имеющее ярко выраженную большую энергию 100 – 1000 кэВ. В режиме тонкого пучка на ГОЛ-3 были проведены эксперименты по облучению вольфрамовых мишеней с разным спектром электронов в падающем плазменном потоке. Разный спектр электронов определялся разной эффективностью релаксации электронного пучка в плазме ГОЛ-3 [[3]].

Также были проведены совместные эксперименты по облучению вольфрама и графита с одинаковой плотностью потока энергии на двух разных установках – ГОЛ-3 и КСПУ X-50 [[2]]. После облучения на обеих машинах произошли структурные изменения поверхности мишеней, при этом, их качество и величина получились практически одинаковыми (Рис. 6). Это означает, что, несмотря на качественные отличия энергетических функций распределения падающих потоков, важнейшую роль при таком

воздействии играет величина приходящей на плазмоприемник плотности энергии.

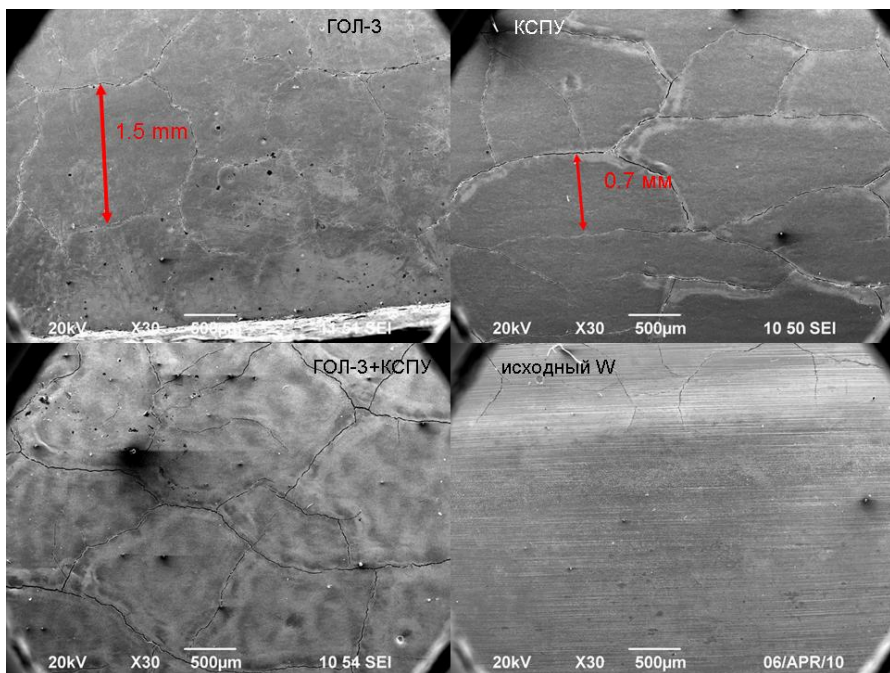


Рис. 6. Облученные на ГОЛ-3 и КСПУ X-50 с нагрузкой 10 МДж/м^2 и необлученная поверхности вольфрама. Снимки РЭМ в одном масштабе.

Также была исследована зависимость эрозии поверхности вольфрама от плотности потока энергии в плазменном потоке и многократного облучения.

При малой плотности потока энергии (менее 5 выстрелов по 0.5 МДж/м^2): переплавления поверхности не происходит, меняется шероховатость. При увеличении нагрузки: переплавление поверхности, кратеры диаметром $50 - 300 \text{ мкм}$, сеть трещин 0.3 микрон в виде гранул. При средней плотности потока энергии (5 выстрелов по 2.1 МДж/м^2): переплавление слоя, эрозия: сеть трещин размерами $1000, 10, 0.3 \text{ микрон}$, образуются кратеры диаметром $300 - 50 \text{ микрон}$, глубиной 20 микрон .

При больше средней плотности потока энергии (9 выстрелов по 4 МДж/м^2): вместо сети трещин 1000 мкм образуются волнообразная поверхность, сеть ячеек 10 мкм остается, сеть ячеек 0.3 микрон исчезает. Перепад высот на поверхности – сотни микрон (Рис. 7). При большой плотности потока (12 МДж/м^2): эрозия свыше 150 мкм за выстрел.

Методом КР спектроскопии было проведено исследование модификации поверхности углеродных материалов после облучения, а также

влияния на модификацию напуска перед мишенями буферного газа. Показано, что качество исходного графита влияет на последующую его модификацию. После облучения размеры кристаллитов графита увеличиваются по сравнению с исходными, т.е. происходит графитизация поверхности углеродных мишеней. Напуск буферного газа приводит к большему размеру кристаллов sp^2 фазы нежели без газового облака.

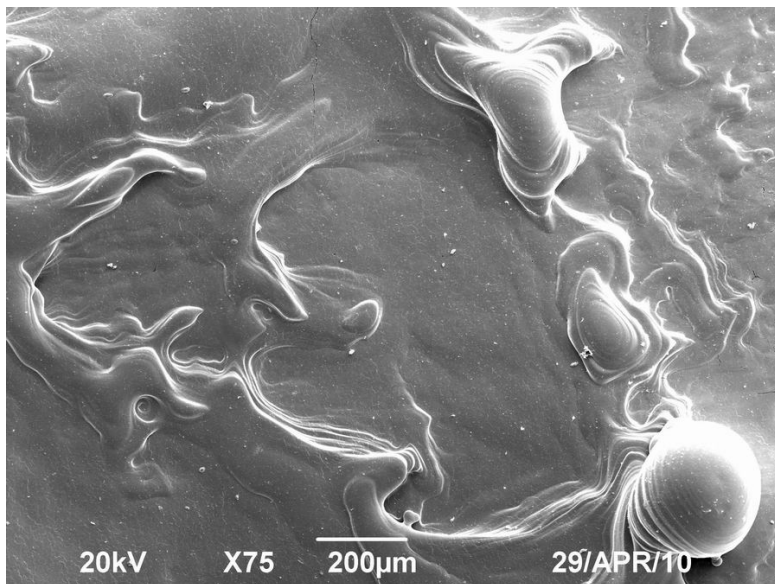


Рис. 7. РЭМ снимок поверхности W после 9 выстрелов по 4 МДж/м².

Также проведены исследования стойкости содержащих литий углеродных мишеней. Разработаны и протестированы под потоком плазмы мишени из углерод-литиевого композитов и покрытого литием графита. Измеренная температура поверхностной плазмы составила около 1 эВ. Определен поток атомарного лития с поверхности – 10^{20} атомов/(см²·с).

Существенной проблемой создания термоядерного реактора является образование пыли, ее миграция и захват трития. В связи с этим актуальным является определение путей и скорости миграции углерода в установках с горячей плазмой. Для исследования размеров частиц пыли и путей и скорости миграции примесей в камере установки ГОЛ-3 были установлены приемники эродировавшего материала на разном расстоянии от мишеней, от 3 см до 12 метров. Анализ пылесборников показал, что с графитовой мишени летят частицы размером от 30 до 0.02 мкм, размер эродировавших частиц вольфрама варьируется от 100 до 0.05 мкм. Для исследования величины эрозии и толщины осажденных на приемниках пленок был использован метод 3D реконструкции поверхности с помощью стереоизображений с РЭМ.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты

На многопробочной ловушке ГОЛ-3 проведены комплексные исследования взаимодействия мощных потоков электронно-горячей плазмы с материалами термоядерных реакторов. Разработаны и использованы адекватные задаче экспериментальные методики (держатели мишеней, методы диагностики поверхностной плазмы, методы исследования материалов после облучения). Разработана новая станция по облучению материалов на установке ГОЛ-3.

Проведены расчеты энерговыделения в материалах и их последующего нагрева и разрушения.

Проведены измерения плотности потока поглощенной энергии по излучению поверхности мишеней.

Разработан комплекс диагностик для определения параметров плазменного потока, попадающего на поверхность исследуемых мишеней, характеристик образующейся поверхностной плазмы и исследования скорости ее разлета в продольном и поперечном направлениях.

В экспериментах по инжекции твердотельных мишеней в горячую плазму определена величина диффузии примесей поперек магнитного поля. Измерения дают оценку на скорость поперечной диффузии поверхностной плазмы $0.5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Изучены параметры мишенной плазмы на разных расстояниях от точки инжекции; скорость расширения плазмы на расстоянии 0.8–4.5 м составляет $(1\div 2) \cdot 10^6 \text{ см/с}$ (скорость для углерода с 10–50 эВ); плазма с $n_{\text{C}} \sim (2\div 10) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ распространяется на расстояние $\sim 5 \text{ м}$ в гофрированном поле с небольшой потерей частиц; атомы углерода в облаке имеют в основном зарядность $+1\div 2$;

Проведены измерения скорости химической эрозии графитовых мишеней при их облучении потоком плазмы с плотностью энергии 2 МДж/м^2 . В исследуемом режиме химическая эрозия дает около 0.5% от полного числа атомов, поступивших в плазму, при этом полная глубина эрозии (1 мкм за выстрел) определяется макроскопическим разрушением поверхностного слоя с образованием пыли.

Проведены эксперименты по исследованию волн высокого давления в твердом теле при импульсном облучении потоком плазмы.

Создан прибор для измерения высоких импульсных давлений. Проведены исследования сдвига линии флюоресценции рубина R1 при ударном воздействии на рубин. Измерено давление внутри мишени при воздействии на нее импульсного высокоэнергетического электронного пучка. Давление достигает величины 1.1 кБар.

Исследована эрозия вольфрама в зависимости от плотности потока энергии на мишень, спектра пучка, проведены сравнения с КСПУ X-50. При

средних нагрузках обнаружено формирование сети трещин размерами порядка 1000 мкм, кратеров Ø 200 мкм, ячеек 10 мкм и гранул 0.3 мкм.

Исследована модификация поверхности углеродных материалов под воздействием мощного потока плазмы. Показано, что качество исходного графита влияет на последующую его модификацию. После облучения размеры кристаллитов графита увеличиваются по сравнению с исходными, т.е. происходит графитизация поверхности углеродных мишеней.

Проведены эксперименты по напуску буферного газа (криптона) перед облучаемой мишенью (вольфрам, графиты). Излучение плазмы при прохождении буферного газа исследовалось набором болометров. Напуск газа увеличивает поперечный поток энергии вблизи входа плазмы в газ-бокс. Показано, что модификация поверхности графитов приводит к большему размеру кристаллитов графита нежели без газового облака.

Разработаны и протестированы под потоком плазмы мишени из углерод-литиевого композитов и покрытого литием графита. Температура поверхностной плазмы составила около 1 эВ. Определен поток атомарного лития с поверхности -10^{20} атомов/(см²·с).

Проведены исследования пылесборников, установленных на разных расстояниях от мишеней, которые показали, что осаждаются частицы с характерными размерами от 100 до 0.02 мкм.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. *А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, ... А.А. Шошин и др.* Воздействие мощного плазменного потока на вольфрамсодержащие конструкционные материалы. // Тезисы докладов XXVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, М, 2001, С.241.
2. *Р.Ю. Акентьев, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, ... А.А. Шошин и др.* Инжекция крупинки в электронно-горячую плазму на установке ГОЛ-3-II // Там же. С.69.
3. *A.V.Arzhannikov, E.V.Boldyreva, V.V.Boldyrev, A.A.Shoshin, et al.* Application of high-power microsecond REB for inducing solid-state transformations under special pulse-pressure conditions. // Digest of Technical Papers Pulsed Power Plasma Science 2001, Las Vegas, USA, P.1328-1331.
4. *А.В. Аржанников, В.В. Болдырев, Е.В. Болдырева, ... А.А. Шошин, и др.* Превращения твердых веществ под действием краткоимпульсного давления, формируемого в мишени при облучении пучком релятивистских электронов. // Российская конференция "Фазовые превращения при высоких давлениях" ФВД-2002, Черноголовка.
5. *Акентьев Р.Ю., Аржанников А.В., Астрелин В.Т., ... Шошин А.А. и др.* Исследование горячей плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3 при помощи спектроскопии высокого разрешения. // Тезисы докладов XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2002, С.71.
6. *R.Yu. Akent'ev, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, ... A.A. Shoshin et al.* Study of

- GOL-3 multiple mirror trap by high resolution spectroscopy. // 29th Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreux, Switzerland, 2002.
7. *V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, ... A.A. Shoshin et al*, Plasma Spectroscopy at the GOL-3 Facility. // Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.43, No 1T, 2003, P.253-255.
 8. *Р.Ю. Акентьев, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, ... А.А. Шошин и др.* Спектроскопический комплекс для исследования плазмы на установке ГОЛ-3. // Приборы и техника эксперимента, № 2, 2004, С.98-104.
 9. *A.V. Arzhannikov, V.V. Boldyrev, A.V. Burdakov, ... A.A. Shoshin, et al*, Investigation of Pressure Pulse Formation in Target Exposed by Stream of Relativistic Electrons and Hot Plasma. // Proceedings of 7th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia, 2004, P.203-205.
 10. *А.В. Аржанников, В.В. Болдырев, А.В. Бурдаков, ... А.А. Шошин и др.* Измерение импульсных высоких давлений по сдвигу линий флуоресценции рубина. // ПТЭ, 2006, №2, С.157-161.
 11. *V.V.Postupaev, V.T.Astrelin, A.V.Burdakov, ... A.A.Shoshin, et al*. Pellet Injection Experiments at GOL-3 Multimirror Trap for Plasma Fueling and Plasma-Surface Interaction Research. // 33th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Roma, 2006, P4.101.
 12. *A.V.Burdakov, V.T.Astrelin, I.A.Ivanov, ... A.A.Shoshin, et al*, Use of pellet injection technology at GOL-3 for plasma fueling and plasma-surface interaction research. // Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.51, No.2T, 2007, P.355-357.
 13. *А.В. Бурдаков, Э.Р. Зубаиров, И.А. Иванов, ... А.А. Шошин и др.* Исследование взаимодействия мощного плазменного потока с твердым телом на установке ГОЛ-3. // Тезисы докладов XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 2007, С.76.
 14. *С.В. Полосаткин, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, ... А.А. Шошин и др.* Исследование взаимодействия мощного плазменного потока с твердым телом на установке ГОЛ-3. // XII Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы", г.Троицк, 2007, С.116-117.
 15. *В.В. Поступаев, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, ... А.А. Шошин и др.* Диагностический комплекс многопробочной ловушки ГОЛ-3. // Там же. С.168.
 16. *С.В. Полосаткин, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, ... А.А. Шошин и др.* Спектроскопические исследования на установке ГОЛ-3 взаимодействия мощного плазменного потока с твердым телом. // Приборы и техника эксперимента, 2008, №2, С.100-107.
 17. *I.E. Garkusha, A.V. Burdakov, V.V. Chebotarev, ... A.A. Shoshin, et al*. Plasma-surface interaction during ITER transient events: simulation with QSPA Kh-50 and GOL-3 facilities. // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2008, №6, P.58-60.

18. *A.A. Shoshin, A.V. Burdakov, B.F. Bayanov, et al.* Study of Interaction of High Power Plasma Stream with Lithium-Carbon Composites. // Proceedings of 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Tomsk, 2008, P.200-203.
19. *I.A. Ivanov, A.V. Burdakov, K.N. Kuklin, ... A.A. Shoshin, et al.* Structure Modification of Surface of Fine-Grained Graphite and Glassy Carbon under High-Power Action by Hydrogen Plasma. // Там же. P.197-199.
20. *А.А. Шошин, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, и др.* Исследование модификации поверхности твердых тел под воздействием мощного потока плазмы на установках ГОЛ-3 и КСПУ Х-50. // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2009, С. 93.
21. *В.В. Поступаев, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, ... А.А. Шошин и др.* Статус и развитие диагностического комплекса многопробочной ловушки ГОЛ-3. // Тезисы докладов XIII Всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы", Звенигород, 2009, С.131-132.
22. *A.A. Shoshin, A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, et al.* Structure Modification of Different Graphite and Glassy Carbon Surfaces under High Power Action by Hydrogen Plasma. // Abstracts of 8th Intern. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, Russia, 2010, P.90.
23. *A.A. Shoshin, A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, et al.* Plasma-Surface Interaction during ITER Type I ELMs: Comparison of Simulation with QSPA Kh-50 and the GOL-3 Facilities. // Там же. P.25.
24. *A.A. Shoshin, A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, et al.*, Structure Modification of Different Graphite and Glassy Carbon Surfaces under High Power Action by Hydrogen Plasma. // Transactions of Fusion Science and Technology, принято к печати.
25. *A.A. Shoshin, A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, et al.* Plasma-Surface Interaction during ITER Type I ELMs: Comparison of Simulation with QSPA Kh-50 and the GOL-3 Facilities. // Transactions of Fusion Science and Technology, принято к печати.

Список литературы

- [1] *V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, P.Z. Chebotaev et al.* Hot electron target interaction experiments at the GOL-3 facility. // Nuclear Fusion, 1997, V. 37, N.11, P.1541-1558.
- [2] *V.I. Tereshin, A.N. Bandura, O. V. Byrka et al.* Application of powerful quasi-steady-state plasma accelerators for simulation of ITER transient heat loads on divertor surfaces. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2007, 49, p.A231-A239.
- [3] *A. Burdakov, A. Arzhannikov, V. Astrelin, ... A. Shoshin, et al.* Status and Prospects of GOL-3 Multiple Mirror Trap. // Transaction of Fusion Science and Technology, 2009, Vol.55, No.2T, p. 63-70.

ШОШИН Андрей Алексеевич

**Исследование взаимодействия мощного потока
электронно-горячей плазмы
с мишенями на многопробочной ловушке ГОЛ-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 31.02. 2011 г.

Подписано в печать 1.02. 2011 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 1

Обработано на ПК и отпечатано

на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11