

На правах рукописи

ПОЗНЯК ИГОРЬ МИХАЙЛОВИЧ

ЭРОЗИЯ И ПРОДУКТЫ ЭРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

22 ЮН 2017

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор

*Позн*



Троицк, Москва 2017

Работа выполнена в АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Научный руководитель:

Сафронов Валерий Михайлович – доктор физико-математических наук, частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» (Российское агентство ИТЭР), начальник сектора

Официальные оппоненты:

Борисов Анатолий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ), профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов»

Спицын Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», начальник лаборатории взаимодействия газов и плазмы с материалами

Ведущая организация:

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «27» декабря 2017 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31, тел. 8(495)788-56-99 доб. 95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте: <http://ods.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направить по адресу: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31, диссертационные советы НИЯУ МИФИ (тел. +7(495)324-84-98).

Автореферат разослан «9» ноября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.130.05, д.ф.-м.н.



Р.С. Стариков

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одной из приоритетных задач современной физики является создание источников энергии на основе управляемого термоядерного синтеза (УТС). Международный проект ИТЭР – важный шаг на пути к решению этой проблемы [1]. Успешная реализация проекта в значительной степени зависит от правильного выбора обращенных к плазме материалов вакуумной камеры токамака. Для этого нужны экспериментальные данные о поведении материалов под действием интенсивных плазменных потоков. Получить такие данные на существующих токамаках не представляется возможным, поскольку они не обеспечивают плазменно-тепловые нагрузки, ожидаемые при эксплуатации ИТЭР [2, 3]. Поэтому для испытаний материалов в лабораторных условиях применяют электронные и ионные пучки, лазеры, магнитные плазменные ловушки, линейные плазменные установки, импульсные и квазистационарные плазменные ускорители.

Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью определить механизмы эрозии материалов под действием интенсивных потоков плазмы, выяснить вклад этих механизмов в общую эрозию и исследовать свойства образующихся продуктов эрозии. Полученные данные используются для разработки и проверки расчетно-теоретических моделей, описывающих поведение защитных покрытий под действием интенсивных плазменных потоков в условиях ИТЭР.

### Цель работы

Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы получить новые экспериментальные данные об эрозии и продуктах эрозии материалов в условиях, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР.

В рамках указанной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Исследовать характеристики потоков плазмы на экспериментальных установках КСПУ-Т и МК-200UG в зависимости от режимов работы установки в широком диапазоне рабочих параметров. Выбрать режимы, обеспечивающие испытания материалов в условиях, максимально приближенных к условиям ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР.

2. Провести облучение металлических мишеней интенсивными потоками водородной плазмы при тепловых нагрузках, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР. Определить основные механизмы эрозии металлов и их вклад в общую эрозию образцов.

3. Разработать диагностику для регистрации продуктов макроскопической эрозии материалов (капли, осколки вещества). Исследовать продукты макроскопической эрозии при облучении материалов потоками водородной плазмы.

4. Создать средства измерения радиационных потерь из примешенного плазменного слоя, и исследовать характеристики излучения плазмы у поверхности вольфрамовых образцов.

5. Получить экспериментальные данные о формировании, динамике и свойствах вольфрамовых примесей, поступающих в плазму с поверхности вольфрамовых

образцов, при их облучении потоками плазмы в условиях, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР.

### На защиту выносятся

1. Результаты исследований плазменных потоков на установках КСПУ-Т и МК-200UG в широком диапазоне рабочих параметров. Вывод о том, что выбранные режимы работы установок обеспечивают проведение испытаний теплозащитных материалов в условиях, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР.

2. Результаты испытаний металлических мишеней (вольфрам, ниобий, сталь, медь и алюминий) интенсивными потоками водородной плазмы при тепловых нагрузках  $Q = 0,2 - 4,2$  МДж/м<sup>2</sup> и длительности плазменного воздействия 0,5 мс, свидетельствующие о том, что:

- уменьшение толщины мишеней происходит за счет испарения материала и выброса металлических капель, а также из-за течения расплавленного слоя по поверхности образца;
- выброс капель начинается при тепловых нагрузках выше порога плавления металла;
- перемещение расплавленного слоя по поверхности мишени происходит в радиальном направлении от оси к периферии плазменного потока;
- из-за перемещения расплава образуется кратер эрозии, а материал, вынесенный из центра кратера, накапливается на его краях;
- при фиксированной тепловой нагрузке глубина кратера растет пропорционально числу плазменных воздействий;
- увеличение тепловой нагрузки ведет к одновременному росту, как глубины кратера, так и его радиуса;
- давление плазмы не способно обеспечить наблюдаемое в эксперименте перемещение расплава;
- эрозия, обусловленная перемещением расплава, на порядок превосходит эрозию, связанную с потерями массы образцов (испарение и выброс капель), и является основным механизмом разрушения металлических мишеней покрытий в исследованном диапазоне тепловых плазменных нагрузок.

3. Создание диагностики с использованием лазерной подсветки для регистрации продуктов макроскопической эрозии материалов и результаты исследований, полученные при помощи данной диагностики. Вывод о том, что:

- отсутствие частиц графита в зоне регистрации на расстоянии 10 мм от облучаемой поверхности обусловлено тем, что под действием поступающего на поверхность теплового потока продукты хрупкого разрушения (частицы размером до 15 мкм) полностью испаряются вблизи мишени и до зоны регистрации не долетают;
- количество мелких и холодных металлических капель, вылетающих с поверхности металла, которые не могли быть зафиксированы применяемыми ранее средствами диагностики, незначительно. Таким образом, опасения по поводу накопления в камере ИТЭР большого количества металлической пыли безосновательны.

4. Создание средств диагностики (болометр и камера-обскура с AXUV-фотодиодами) для измерения радиационных потерь плазмы. Результаты измерений, полученные при облучении вольфрамовых мишеней потоками водородной плазмы при

тепловых нагрузках  $0,2 - 1,3 \text{ МДж/м}^2$ , длительности плазменного импульса  $50 \text{ мкс}$  и энергии ионов  $2 - 3 \text{ кэВ}$ , свидетельствующие о том, что:

- радиационные потери плазмы локализованы вблизи поверхности мишени, толщина излучающего слоя менее  $10 \text{ см}$ ;
- максимум радиационных потерь  $10 - 15 \text{ Дж/см}^3$  регистрируется в непосредственной близости от облучаемой поверхности;
- в излучение мишени плазмы преобразуется более половины энергии плазменного потока.

5. Результаты исследования формирования и динамики примесей, образующихся при облучении плазмой вольфрамовых мишеней, а именно:

- при длительности плазменного воздействия  $50 \text{ мкс}$  интенсивное испарение вольфрама происходит при тепловой нагрузке  $Q \geq 0,5 \text{ МДж/м}^2$ ;
- примеси распространяются преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля от поверхности мишени навстречу плазменному потоку;
- скорость фронта свечения примесей составляет  $25 - 35 \text{ км/с}$ ;
- спектр излучения примесей лежит в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена;
- основным источником излучения являются ионы вольфрама со степенями ионизации  $+7$  и выше.

### **Научная повизна работы**

– Впервые проведены исследования механизмов эрозии металлических мишеней под действием интенсивных потоков водородной плазмы в условиях, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР. Определен вклад разных механизмов в общую эрозию образцов.

– Впервые при фоторегистрации продуктов макроскопической эрозии материалов использована лазерная подсветка. Получены данные, позволяющие сделать вывод о том, что под действием теплового потока, поступающего на поверхность мишени, происходит быстрое испарение продуктов эрозии графита. Установлено, что значительного количества мелкой и холодной металлической пыли не образуется.

– Показано, что в условиях, приближенных к ELM-ам и ослабленным срывам в ИТЭР, радиационные потери мишени плазмы играют существенную роль в общем балансе энергии. Установлено, что излучение примесей сосредоточено в ВУФ и МР областях спектра, толщина излучающего слоя менее  $10 \text{ см}$ .

– Получены данные о тепловых нагрузках, при которых начинается поступление вольфрамовых примесей в водородную плазму, определена скорость их распространения вдоль силовых линий магнитного поля, установлен ионный состав и измерена абсолютная величина радиационных потерь примешенной плазмы.

### **Практическая значимость работы**

1. Экспериментальные данные о механизмах эрозии металлов и вкладе разных механизмов в общую эрозию образцов важны для оценки срока службы облицовочных покрытий вакуумной камеры перспективных термоядерных установок, в том числе – токамака ИТЭР.

2. Результаты исследования продуктов макроскопической эрозии материалов (капли, частицы вещества) позволяют делать предсказания относительно образования и накопления пыли в вакуумной камере термоядерных установок.

3. Результаты диссертационной работы могут использоваться для проверки расчетных кодов, описывающих поведение материалов под действием интенсивных потоков плазмы. В частности, экспериментальные данные о формировании, динамике и свойствах примесей вольфрама, также данные об эрозии металлических мишеней за счет перемещения расплава, использовались для проверки TOKES [4] и MEMOS [5], описывающих взаимодействие горячей плазмы с защитными покрытиями вакуумной камеры ИТЭР.

4. Помимо задач, связанных с проектом ИТЭР, характеристики излучения плазмы у поверхности вольфрамовых мишеней могут оказаться полезными при создании мощных источников коротковолнового излучения на базе плазменных ускорителей, а данные о механизмах эрозии металлов – при разработке основ плазменных технологий, в которых интенсивные потоки плазмы будут применяться для упрочнения поверхности конструкционных материалов.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научно-исследовательских институтах, ведущих исследования по программе УТС Курчатовский институт, НИЯУ МИФИ, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН), а также лабораториях, разрабатывающих и использующих мощные источники плазмы для решения научных и прикладных задач.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов подтверждается применением поверенного оборудования, воспроизводимостью результатов и использованием перекрестных средств диагностики при проведении экспериментов. Результаты работы согласуются с имеющимися в литературе теоретическими и экспериментальными данными, полученными в близких условиях [6-8].

### **Личный вклад автора**

Представленные в диссертации экспериментальные данные были получены при непосредственном участии автора. Его вклад заключался в постановке задач, разработке методик, создании и отладке диагностик, проведении экспериментов и численных расчетов, обработке и анализе полученных данных. Автором сформулированы и обоснованы выводы диссертации.

### **Апробация работы**

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: 11-th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Novosibirsk 2016); International Summer School on the Physics of Plasma-Surface Interactions, MEPhI (Moscow 2014, 2016); International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta 2012); Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород 2010, 2012, 2013, 2015, 2016); VIII конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», МИФИ (Москва 2012); Международная конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», МИФИ (Москва 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016);

Научная конференция МФТИ (Москва 2012, 2013, 2014); Научная сессия МИФИ (Москва 2009); Конкурс научных работ памяти академика А.П. Александрова, ГНЦ РФ ТРИНИТИ (Москва, Троицк 2008, 2009).

По материалам диссертации опубликовано 33 научные работы, 11 из которых – в виде статей в российских и зарубежных научных журналах, включенных в Перечень ВАК и/или индексируемых в базе данных Scopus.

### Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 185 наименований. Диссертация изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 89 рисунков и 8 таблиц.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность и выбор темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены выносимые на защиту положения, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлена информация об апробации результатов, публикациях и структуре диссертации, приведено ее краткое содержание.

**В первой главе** представлен обзор литературы по теме исследования.

**В п. 1.1** рассматриваются условия эксплуатации защитных покрытий вакуумной камеры ИТЭР. **В п. 1.2** описаны основные типы установок, применяемых для исследований поведения материалов под действием интенсивных плазменных потоков. **П. 1.3** посвящен механизмам эрозии защитных покрытий. **В п. 1.4** проведен анализ свойств графита, бериллия и вольфрама при использовании их в качестве облицовочных покрытий вакуумной камеры токамаков. **В п. 1.5** описаны расчетно-теоретические модели взаимодействия плазмы с материалами.

**Во второй главе** описаны исследовательские плазменные установки МК-200UG и КСПУ-Т, на которых проводилось облучение мишеней.

**В п. 2.1** рассмотрена установка МК-200UG. Она состоит из импульсного плазменного ускорителя, плазмопровода длиной 9,5 м и мишенной камеры с набором диагностик (рис. 1). Ускоритель питается от конденсаторного накопителя, в котором запасается до 230 кДж энергии. В качестве плазмообразующего газа используется водород.

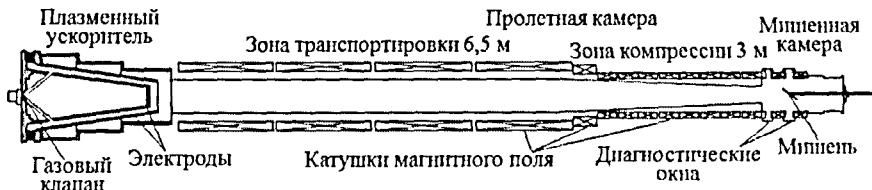


Рисунок 1 – Схема плазменной установки МК-200UG

Исследуемые образцы располагаются в цилиндрической мишенной камере длиной 50 см и диаметром 30 см. Камера заполнена продольным магнитным полем  $B = 0,5 - 1,6$  Тл. Тепловую нагрузку  $Q$  на мишень можно изменять как за счет изменения рабочего напряжения ускорителя, так и за счет величины магнитного

поля В в мишенной камере: чем выше В, тем выше концентрация частиц п в плазменном потоке.

В п. 2.2 описана установка КСПУ-Т, основной элемент которой – квазистационарный плазменный ускоритель (рис. 2а). Он запитывается от конденсаторного накопителя с энергосодержанием до 600 кДж. Мишени располагаются на расстоянии 60 см от электродов ускорителя (рис. 2б). В качестве плазмобразующего газа используется водород. Тепловая нагрузка Q на образец меняется за счет изменения напряжения зарядки U конденсаторного накопителя, длительность плазменного воздействия остается постоянной и составляет 500 мкс.

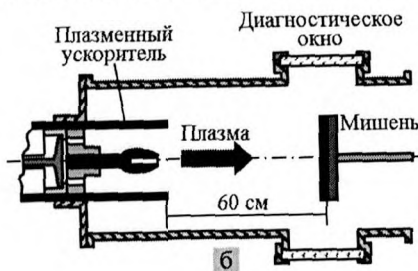
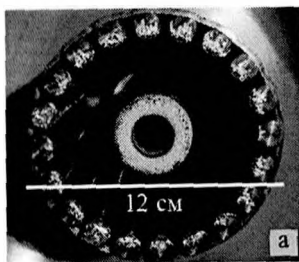


Рисунок 2 – Электроды плазменного ускорителя КСПУ-Т (а) и схема облучения мишеней (б)

В п. 2.3 приведены параметры плазменных потоков МК-200UG и КСПУ-Т, измеренные в месте расположения образцов (табл. 1). Символом \* в таблице отмечены параметры, близкие к ожидаемым во время ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР.

Таблица 1 – Параметры плазменных потоков на установках МК-200UG и КСПУ-Т

Параметр	МК-200UG	КСПУ-Т
Тепловая нагрузка Q, МДж/м <sup>2</sup>	0,05 – 1,5	0,2 – 5 *
Поток энергии W, ГВт/м <sup>2</sup>	1 – 30 *	0,5 – 10 *
$F_{HF} = Wt^{0,5}$ , МДж/м <sup>2</sup> с <sup>0,5</sup>	10 – 200 *	10 – 200 *
Длительность потока t <sub>пл</sub> , мкс	40 – 50	500 *
Энергия ионов E <sub>и</sub> , кэВ	2 – 3 *	0,01 – 0,5
Плотность плазмы n, м <sup>-3</sup>	$(0,1 - 2) \times 10^{20} *$	$(1 - 10) \times 10^{22}$
Давление плазмы P, $\times 10^5$ Па	0,02 – 0,5 *	1 – 10
Магнитное поле B, Тл	0,5 – 1,6 *	0
Диаметр потока D <sub>пл</sub> , см	6 – 10 *	6 – 7 *

В третьей главе рассмотрен комплекс диагностических средств для контроля за режимами работы плазменных ускорителей, измерения параметров плазменных потоков, исследования механизмов и продуктов эрозии материалов.

В п. 3.1 – п. 3.5 описаны стандартные диагностики, включающие в себя: пояса Роговского, делители напряжения, пристеночные магнитные зонды, датчики давления, калориметры (для измерения полной энергии плазменного потока и распределения поглощенной энергии по поверхности мишени).

В п. 3.6 описаны спектральные методы исследования примешенной плазмы. Для измерений в видимом диапазоне использовался промышленный спектрограф



ДФС-452. Основное внимание было сосредоточено на спектральном интервале  $\Delta\lambda = 400 - 550$  нм, содержащем линии нейтральных атомов  $W^0$  и однократно ионизованных  $W^+$  ионов вольфрама.

В вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) и мягком рентгеновском (МР) диапазонах измерения выполнены с помощью спектрометра (рис. 3) на основе пропускающей дифракционной решетки (3x10 мм), содержащей 5000 золотых нитей на миллиметр. Регистрация спектров осуществлялась в интервале длин волн  $\Delta\lambda = 1 - 40$  нм, поле зрения охватывало область перед мишенью протяженностью 70 мм.

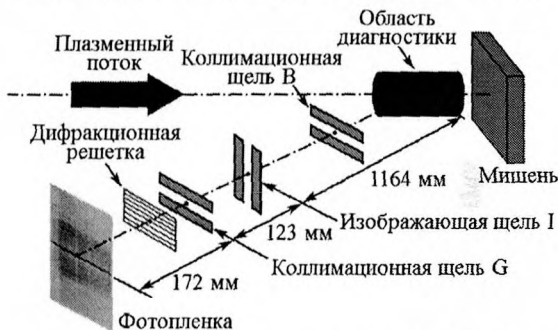


Рисунок 3 – Схема спектрометра на основе пропускающей дифракционной решетки

В п. 3.7 рассмотрен болометр для измерения радиационных потерь примешенной плазмы (рис. 4а). Чувствительным элементом прибора является тонкая платиновая фольга, разогретая до  $T \approx 1250$  К постоянным электрическим током. Яркость свечения фольги пропорциональна  $T^4$ , поэтому незначительное увеличение ее температуры при воздействии излучения из плазмы ведет к заметному изменению яркости свечения и надежно регистрируется с помощью фотодиода.

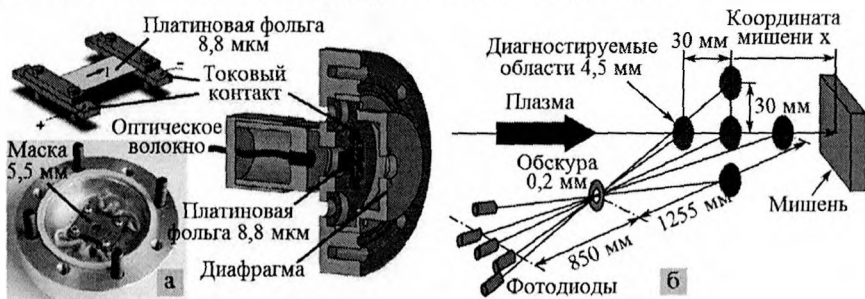


Рисунок 4 – Схема болометра (а) и камеры-обскуры (б)

Основные характеристики болометра: время выхода на квазистационарный режим работы ( $\approx 1$  с), временное разрешение ( $\approx 1,5$  мкс), площадь разогретого участка фольги были рассчитаны с помощью численной модели, построенной в Comsol Multiphysics [9]. Достоверность модели подтверждается совпадением расчетных данных с результатами измерений и численных оценок.

В п. 3.8 приведено описание камеры-обскуры для исследования динамики распространения вольфрамовых примесей вдоль силовых линий магнитного поля

(рис. 4б). Излучение примесей регистрируется с помощью абсолютно калиброванных АХУУ-фотодиодов, чувствительных в диапазоне:  $\Delta\lambda = 0,02 - 1100$  нм. Для измерений в более узком спектральном интервале применялся фильтр из алюминиевой фольги толщиной 0,65 мкм.

В п. 3.9 описаны методы диагностики для исследования эрозии материалов. Форма и глубина кратера эрозии измерялись при помощи механического профилометра. Структура поврежденной поверхности (трещины, волны и пузырьки) исследовалась с помощью оптического и электронного микроскопов. Потери массы, обусловленные испарением и выбросом частиц/капель, определяли путем взвешивания мишеней до и после плазменного воздействия. Регистрация капель, вылетающих с поверхности мишени, осуществлялась с помощью фотокамеры с быстрым затвором [2 раздел IV].

В четвертой главе представлены результаты исследования механизмов эрозии металлов при воздействии интенсивных потоков водородной плазмы.

В п. 4.1 описаны условия экспериментов на установке КСПУ-Т, где мишени из вольфрама, стали, ниобия, меди и алюминия облучались плазмой при тепловых нагрузках, соответствующих условиям ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР:  $Q = 0,2 - 4,2$  МДж/м<sup>2</sup>, длительность воздействия  $t_{pl} = 500$  мкс ( $F_{HF} = 10 - 190$  МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0,5</sup>).

В п. 4.2 проведен анализ свойств металлов и разрушений на их поверхности. Пороговые тепловые нагрузки  $Q_{эксп}$ , при которых в эксперименте наблюдалось плавление металлов, представлены в таблице 2. Там же приведены теплофизические характеристики металлов и рассчитанные по ним значения  $F_{HF}$  и  $Q_{расч}$ . Видно, что имеется удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента.

Таблица 2 – Характеристики металлов и пороговые значения тепловых нагрузок, обеспечивающих плавление их поверхности

	$T_{melt}$ , К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , Дж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$F_{HF}$ , расч. МДж/м <sup>2</sup> с <sup>0,5</sup>	$Q_{расч}$ МДж/м <sup>2</sup>	$Q_{эксп}$ МДж/м <sup>2</sup>
Al	933	2630	1080	230	14,6	0,33	0,3
St	1760	7800	475	44	16,6	0,37	0,4
Nb	2741	8280	330	68	29,6	0,66	0,7
Cu	1357	8700	440	375	35,8	0,80	0,7
W	3695	18720	175	110	57,3	1,28	1,1

Увеличение плазменно-тепловой нагрузки ведет к формированию сложной структуры на оплавленной поверхности (рис. 5). По характеру этой структуры исследуемые металлы можно разделить на две группы. В первую группу входят вольфрам, сталь и ниобий, во вторую – медь и алюминий.

Для металлов первой группы характерно отчетливое течение расплава: после плазменного воздействия их поверхность покрыта струями, волнами и каплями (рис. 5а,б). Для металлов второй группы следы движения расплава визуально незаметны. После облучения плазмой поверхность покрывается «пенной», состоящей из полых пузырьков и сплошных шариков/перемычек застывшего металла (рис. 5в,г). При увеличении тепловой нагрузки появляются открытые полости, образующиеся на месте лопнувших пузырей.

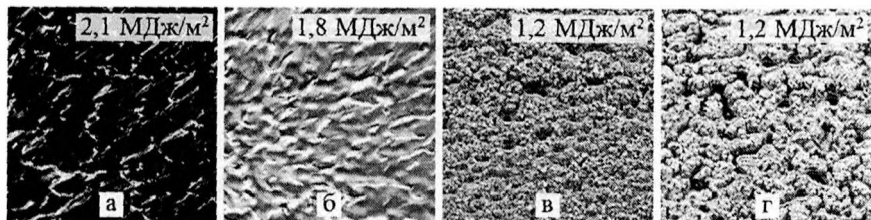


Рисунок 5 – Поверхность металлических мишеней (15x15 мм) после воздействия плазмы: ниобий (а), сталь (б), медь (в), алюминий (г)

Для металлов первой группы характерно отчетливое течение расплава: после плазменного воздействия их поверхность покрыта струями, волнами и каплями (рис. 5а,б). Для металлов второй группы следы движения расплава визуально незаметны. После облучения плазмой поверхность покрывается «пенной», состоящей из полых пузырьков и сплошных шариков/перемычек застывшего металла (рис. 5в,г). При увеличении тепловой нагрузки появляются открытые полости, образующиеся на месте лопнувших пузырей.

В п. 4.3 описана численная модель прогрева материалов тепловым импульсом, построенная в Comsol Multiphysics. Показано, что для условий экспериментов на КСПУ-Т прогрев мишеней можно описывать в рамках одномерной задачи теплопереноса. Поглощение/выделение энергии в процессе фазовых переходов учитывается с помощью введения скачков в функцию удельной теплоемкости. Для каждого значения  $Q$  из диапазона  $0,1 - 4 \text{ МДж/м}^2$  с шагом  $0,1 \text{ МДж/м}^2$  (длительность воздействия 500 мкс) было получено распределение температуры  $T(z,t)$  вглубь мишени  $z$  в произвольный момент времени  $t$ .

В п. 4.4 проанализированы результаты численных расчетов. Полученные в ходе моделирования пороги плавления совпали с оценками и экспериментальными данными из табл.2. О корректности численной модели также свидетельствует совпадение экспериментальных и расчетных данных о размерах области плавления на поверхности мишеней.

На рис. 6 представлены результаты расчета максимальной глубины  $H_{\text{melt}}$  и времени существования расплава  $t_{\text{melt}}$  в зависимости от тепловой нагрузки  $Q$ . Видно, что с увеличением  $Q$  обе величины сначала возрастают, однако после того как начинается интенсивное испарение, глубина и время существования расплава начинают уменьшаться.

Следы интенсивного кипения (рис. 5в,г) наблюдаются на поверхности меди и алюминия, для которых глубина и время существования расплава достигают наибольших значений. Можно предположить, что на остальных металлах расплав успевает застыть быстрее, чем развивается процесс кипения. Поэтому после воздействия плазмы их поверхность имеет вид, показанный на рис. 5а,б.

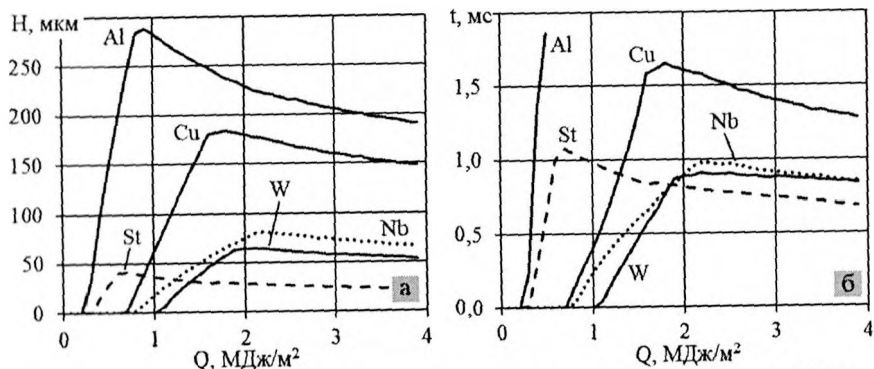


Рисунок 6 – Максимальная глубина (а) и время существования расплава (б) на поверхности металлических мишеней

В п. 4.5 приведены экспериментальные данные об эрозии, вызванной испарением и выбросом капель, приводящим к потерям массы образцов – рис. 7. Данные, полученные на КСПУ-Т, согласуются с данными полученными на электронных пучках JUDITH (Германия) и JEBIS (Япония) [8].

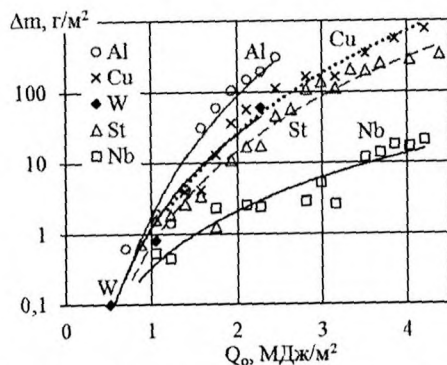


Рисунок 7 – Удельные (за импульс) потери массы мишеней на КСПУ-Т

Выброс капель начинается при тепловых нагрузках, лежащих выше порога плавления металлов. Для алюминия, меди и стали переход от одиночных частиц к интенсивному выбросу наблюдается в диапазоне  $Q = 0,9 - 1,4$  МДж/м<sup>2</sup>. Для ниобия порог образования капель существенно выше:  $Q \geq 2,1$  МДж/м<sup>2</sup>, а переход к интенсивному выбросу частиц происходит при  $Q \geq 2,6$  МДж/м<sup>2</sup>. В случае вольфрама стабильный выброс капель регистрируется при  $Q \geq 1,9$  МДж/м<sup>2</sup> [2 раздел IV].

Воздействие плазмы ведет к деградации поверхности мишеней, что влечет снижение порога и увеличение интенсивности выброса частиц. На гладкой медной мишени при  $Q < 0,9$  МДж/м<sup>2</sup> инъекции капель не происходит (рис. 8а), однако после воздействия плазмы ( $Q = 1,6$  МДж/м<sup>2</sup>) и образования неровностей инъекция наблюдается при  $Q = 0,7$  МДж/м<sup>2</sup> (рис. 8б).

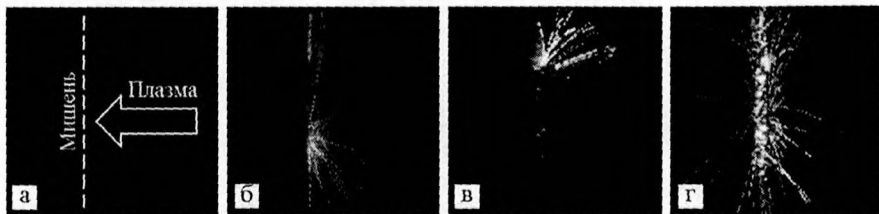


Рисунок 8 – Инжекция капель с поверхности: гладкой (а) и облученной плазмой (б) медной мишени при  $Q = 0,7$  МДж/м<sup>2</sup>; ниобиевой мишени в 1-м (в) и 10-м (г) облучениях при  $Q = 3$  МДж/м<sup>2</sup>

При облучении ниобиевого образца ( $Q = 3$  МДж/м<sup>2</sup>) в первом пуске регистрируются капли, вылетающие только с искусственного уступа высотой 1 мм, созданного в верхней части мишени (рис. 8в). В ходе дальнейших облучений происходит развитие волновой структуры на поверхности (рис. 5а). Несмотря на то, что условия эксперимента не изменяются, выброс капель становится более интенсивным и изотропным (рис. 8г).

В п. 4.6 рассматривается эрозия, связанная с уменьшением толщины защитных покрытий из-за перемещения расплава, а также – проводится анализ вклада разных механизмов в общую эрозию образцов.

На рис. 9а показан профиль поверхности стальной мишени после 5, 15 и 25 воздействий плазмы при  $Q = 1,9$  МДж/м<sup>2</sup>. Видно, что металл растекается от оси к периферии плазменного потока и на поверхности образуется кратер эрозии. Материал, вынесенный из кратера, накапливается на его краях. Максимальный вынос материала происходит не на оси плазменного потока, а на некотором расстоянии от нее. Увеличение числа плазменных воздействий ( $Q = \text{const}$ ) ведет к увеличению глубины кратера, его радиус при этом не меняется – рис. 9а. Увеличение тепловой нагрузки (при одинаковом числе облучений) приводит к росту как глубины, так и радиуса кратера эрозии – рис. 9б.

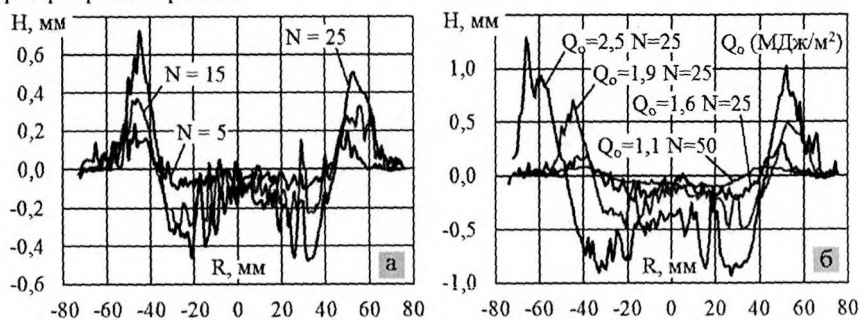


Рисунок 9 – Кратер эрозии на поверхности стальных мишеней в зависимости от: числа плазменных воздействий (а) и тепловой нагрузки (б)

Эрозия, обусловленная перемещением расплава, на порядок превышает эрозию, связанную с потерями массы образцов – рис. 10. Аналогичный результат был получен на электронных пучках JUDITH и JEBIS [8]. Таким образом, в исследованном

диапазоне тепловых нагрузок течение расплава является основным механизмом эрозии, определяющим ресурс металлических защитных покрытий.

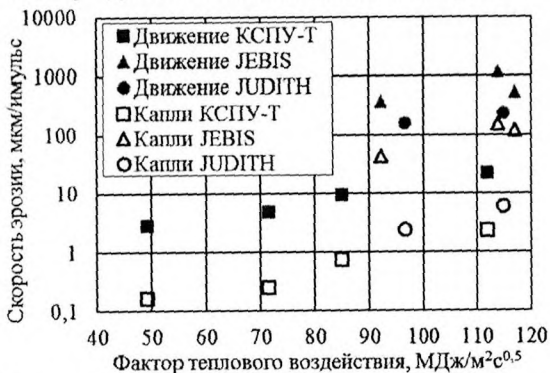


Рисунок 10 – Уменьшение толщины стальных мишеней в результате перемещения расплава и инъекции капель на установках КСПУ-Т, JUDITH и JEBIS

В п. 4.7 приведено заключение к четвертой главе.

В пятой главе описаны исследования продуктов макроскопической эрозии материалов в виде «пыли» – капель и мелких кусочков вещества, вылетающих с поверхности мишеней. Для этого была разработана диагностика, основанная на фоторегистрации частиц с использованием лазерной подсветки.

В п. 5.1 приведена схема диагностики (рис. 11). Под действием интенсивного потока плазмы вблизи мишени образуется облако продуктов эрозии. Луч лазера проходит сквозь облако и рассеянное частицами излучение регистрируется с помощью фотокамеры. Чтобы ослабить фоновое свечение плазмы перед объективом камеры устанавливается набор светофильтров. В отличие от применявшейся ранее диагностики [2 раздел IV], предложенная схема позволяет регистрировать не только раскаленные металлические капли, но и относительно холодные и мелкие частицы.

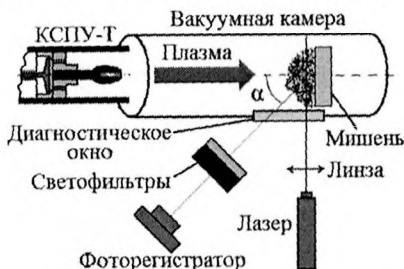


Рисунок 11 – Фоторегистрация частиц с лазерной подсветкой

В случае, когда количество продуктов эрозии невелико, в области распространения лазерного луча будут наблюдаться отдельные «вспышки». Пересчитав число «вспышек» и зная масштаб на снимке, можно оценить концентрацию частиц в исследуемом объеме. При более высокой концентрации частиц вдоль направления распространения лазерного луча z следует ожидать

появление сплошной засветки. Если при прохождении пылевого облака ослабление луча незначительно, то распределение интенсивности рассеянного света  $J(z)$  будет повторять неоднородности распределения частиц в диагностируемом объеме. Если затухание зондирующего излучения велико, то по спаду интенсивности  $J(z)$  можно определить распределение удельной (в  $1 \text{ см}^3$ ) поверхности частиц  $S_{\text{уд}}(z)$ . Для этого необходимо решить уравнение:

$$\frac{d}{dz} \left( \ln \frac{J(z)}{J_0} \right) = -S(z) + \frac{1}{S(z)} \cdot \frac{d}{dz} (S(z)), \quad (1)$$

где  $J_0$  – интенсивность рассеянного света на входе в облако продуктов эрозии,  $S(z)$  – суммарное сечение взаимодействия лазерного излучения с частицами в  $1 \text{ см}^3$  среды. С точностью до коэффициента, зависящего от формы частиц,  $S(z)$  совпадает с  $S_{\text{уд}}(z)$ . Величина в левой части уравнения (1) измеряется непосредственно в эксперименте.

Оценки показывают, что для распределения вольфрамовых частиц по размерам, полученного на установке КСПУ-Т [10], основной вклад в регистрируемый сигнал будут давать «крупные» частицы. При использовании в качестве осветителя рубинового лазера рассеянием излучения на мелких частицах можно пренебречь.

В п. 5.2 приведено описание элементов диагностической схемы и представлены результаты экспериментов, в которых проверялась работоспособность диагностики. Для имитации однородного распределения частиц создавалась взвесь медного порошка МП-1 в вакуумном масле ВМ-3. Порошок состоит из сферических частиц, средний диаметр которых  $d_{\text{ср}} = 50 \text{ мкм}$ . Вакуумное масло обладает большой вязкостью и препятствует быстрому оседанию меди на дно сосуда. Зная массу порошка  $M$ , можно рассчитать удельное сечение  $S$  взаимодействия лазерного излучения с частицами:

$$S = n \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3M}{2\rho V d_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $V = 60 \text{ см}^3$  – объем масла,  $\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$  – плотность меди.

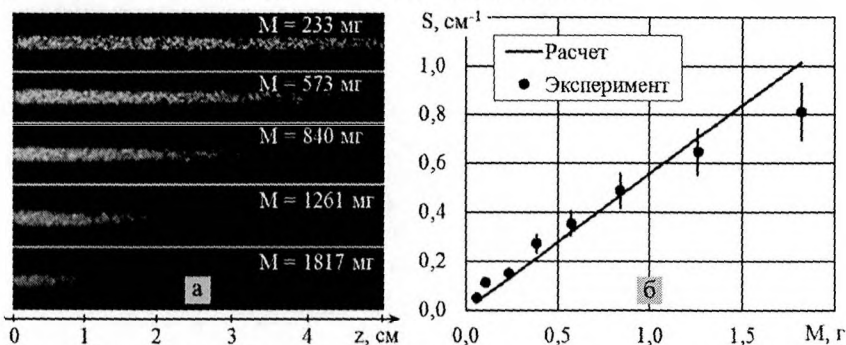


Рисунок 12 – Распространение лазерного луча в среде с однородным распределением частиц (а), результат обработки снимков (б)

Распространение лазерного луча в среде для различных значений  $M$  показано на рис. 12а. Установлено, что интенсивность рассеянного частицами излучения  $J(z)$  спадает по экспоненциальному закону (закон Бугера-Ламберта), множитель перед

координатой в экспоненте равен  $S$ . Отдельные точки на рис. 12б соответствуют данным из эксперимента, прямая линия – расчет по формуле (2). Видно, что при  $M < 1,5$  г данные совпадают с точностью  $\approx 15\%$ , при больших  $M$  экспериментальные данные оказываются ниже расчетных значений.

Для моделирования неоднородного распределения частиц медный порошок засыпался в вертикально установленную пробирку с вакуумным маслом. Лазерный луч заводился в среду сверху и регистрировалось его рассеяние в последовательные моменты времени  $t$ . Полученные снимки были обработаны в MATLAB и для каждого значения  $t$  было восстановлено распределение  $S(z)$  вдоль пробирки. Скорость установившегося движения сферических частиц в вязкой жидкости, вычисленная из баланса сил тяжести, Архимеда и вязкого трения совпала со скоростью, полученной при численном решении (1), что подтверждает работоспособность схемы.

В п. 5.3 представлены результаты исследования продуктов макроскопической эрозии, образующихся при облучении стали и графита потоками водородной плазмы. Угол падения плазмы на стальной образец составлял  $\alpha = 45^\circ$ , тепловая нагрузка равнялась  $2,5 \text{ МДж/м}^2$ . Лазерный луч проходил в 30-ти мм от поверхности мишени. Регистрация капель осуществлялась в различные моменты времени  $t$  по отношению к окончанию плазменного разряда.

С увеличением задержки  $t$  фоновое свечение плазмы пропадает (рис. 13). Вдоль линии наблюдения видны лишь отдельные вспышки рассеянного каплями лазерного излучения. Сплошной засветки, указывающей на наличие плотного облака мелкой металлической пыли, не обнаружено. Скорость стальных капель составляет  $V \approx 10 \text{ м/с}$  (рис. 13в). Более быстрые частицы присутствуют, но их заметно меньше (рис. 13б,  $V \approx 30 \text{ м/с}$ ); капли со скоростями  $300 \text{ м/с}$  вообще не наблюдаются (рис. 13а).



Рисунок 13 – Продукты эрозии стальной мишени, зарегистрированные в различные моменты времени после разряда: 0,1 мс (а), 1,0 мс (б), 2,6 мс (в)

В экспериментах с графитовой мишенью диагностика была настроена на регистрацию частиц, летящих со скоростями от  $1,5 \text{ м/с}$  до  $100 \text{ м/с}$ . При тепловых нагрузках  $Q_0 = 3,7 \text{ МДж/м}^2$  и  $Q_0 = 4,2 \text{ МДж/м}^2$  на расстоянии  $10 \text{ мм}$  от образца продукты эрозии материала обнаружить не удалось. Наиболее вероятное объяснение полученного результата состоит в том, что графит разрушается в виде мелких частиц, которые быстро испаряются, не достигая зоны регистрации.

Оценки показывают, что до лазерного луча могут долететь частицы, диаметр которых  $d \geq 15 \text{ мкм}$ , а более мелкая «пыль» полностью испаряется под действием теплового потока, поступающего на поверхность мишени. В более ранних экспериментах на установке МК-200UG было показано, что подавляющее число графитовых частиц ( $> 95\%$ ) имеет размер менее  $5 \text{ мкм}$  [11]. Соответственно, в описываемых экспериментах продукты хрупкого разрушения графита испаряются еще до того, как окажутся в зоне регистрации.



Результаты, полученные с использованием лазерной подсветки, в целом совпадают с результатами, полученными ранее при фоторегистрации продуктов макроскопической эрозии материалов в свете собственного излучения. В частности, скорость вольфрамовых капель, измеренная в работе [2 раздел IV], составляет около 5 м/с, что по порядку величины совпадает со скоростью стальных капель, измеренной в данной работе. Количество продуктов эрозии, регистрируемых обоими методами, примерно одинаково – обе диагностики работают в режиме счета отдельных частиц. Как в экспериментах со стальной, так и с графитовой мишенями не выявлено значительного количества мелких и холодных частиц, которые могли бы представлять существенную опасность для ИТЭР.

В п. 5.4 приведено заключение к пятой главе.

**Шестая глава** посвящена исследованиям примесей вольфрама, образующихся при воздействии интенсивного потока водородной плазмы на вольфрамовые мишени в условиях, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР.

В п. 6.1 описана схема экспериментов на установке МК-200UG. Тепловые нагрузки  $Q$  лежали в диапазоне  $0,2 - 1,3$  МДж/м<sup>2</sup>, что при длительности воздействия  $t_{pl} = 50$  мкс соответствовало изменению  $F_{HF}$  от 30 до 180 МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0,5</sup>. Поверхность мишеней ориентировалась перпендикулярно потоку плазмы, распространяющемуся вдоль силовых линий магнитного поля.

Эксперименты проводились с тремя вольфрамовыми мишенями. Первая из них имела форму цилиндра диаметром 20 мм и высотой 10 мм и свободно обтекалась плазменным потоком. Вторая мишень – плоская вольфрамовая пластина с размерами 145x80 мм полностью перекрывала поток, предотвращая обтекание плазмой. Третья мишень состояла из 18-и плиток вольфрама размером 20x20x8 мм. Размеры мишени (120x60 мм) таковы, что в одном направлении она перекрывала плазменный поток, в другом – обтекалась плазмой. Все образцы были снабжены термопарами для измерения разности температуры  $\Delta T$  до и после плазменного воздействия, что позволяло рассчитать плотность поглощенной материалом энергии:  $Q_{abs} = \rho ch\Delta T$ , где  $\rho$  – плотность,  $c$  – теплоемкость,  $h$  – толщина мишени.

В п. 6.2 рассмотрены тепловые нагрузки, при которых происходит интенсивное испарение вольфрама и формируется экранирующий слой мишени плазмы. Схема эксперимента показана на рис. 14а.

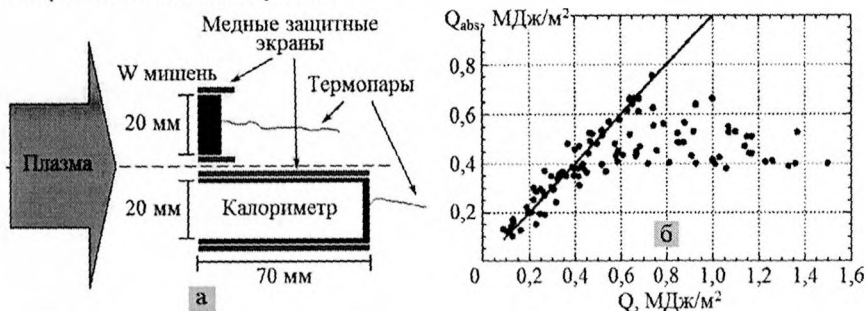


Рисунок 14 – Схема (а) и результат (б) эксперимента по измерению поглощенной мишенью энергии в зависимости от энергии в плазменном потоке

Медный калориметр и круглая вольфрамовая мишень такого же диаметра размещались симметрично относительно оси плазменного потока и подвергались воздействию одинаковых тепловых нагрузок. Облучения плазмой проводились при постепенном увеличении плотности энергии в потоке  $Q$ . Измерялась зависимость плотности поглощенной мишенью энергии  $Q_{\text{abs}}$  от величины  $Q$ . Результат измерений представлены на рис. 14б.

Видно, что при небольших значениях плазменной нагрузки, плотность поглощенной энергии примерно совпадает с плотностью энергии в налетающем потоке:  $Q_{\text{abs}} \approx Q$  при  $Q \leq 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. В этом случае поступающая на поверхность энергия практически полностью отводится вглубь материала, расходуясь на нагревание мишени. Разница между падающей  $Q$  и поглощенной  $Q_{\text{abs}}$  энергиями начинает проявляться при  $Q > 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки ведет к тому, что поглощенная энергия выходит практически на стационарное значение  $Q_{\text{abs}} \approx 0,5$  МДж/м<sup>2</sup> и перестает меняться.

Полученные результаты указывают на то, что при  $Q > 0,4$  МДж/м<sup>2</sup> начинается интенсивное испарение вольфрама, и испаренный материал эффективно защищает мишень от прямого воздействия налетающего плазменного потока (эффект «паровой экранировки»). Измеренное на МК-200UG «стационарное» значение  $Q_{\text{abs}} \approx 0,5$  МДж/м<sup>2</sup> совпадает с результатами расчетов, выполненными группами теоретиков из НИЯУ МИФИ и ИЯФ им. Будкера для условий описываемых экспериментов [12, 13].

В п. 6.3 проанализирован спектральный состав излучения приповерхностного плазменного слоя и представлены результаты измерений радиационных потерь из примешенной плазмы на разных расстояниях до мишени.

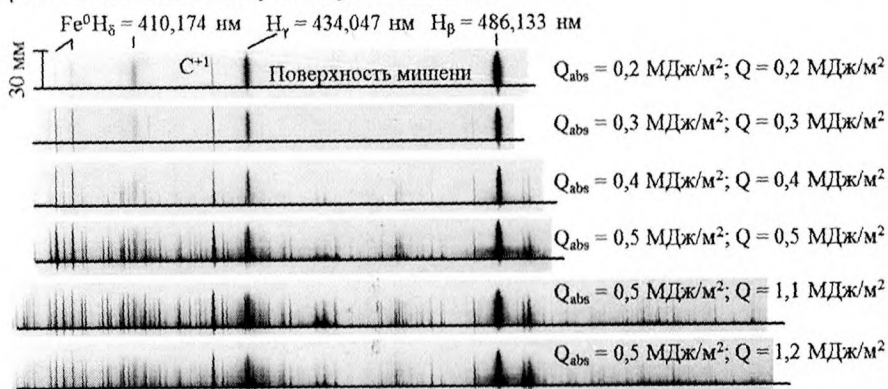


Рисунок 15 – Обзорные спектры примешенной плазмы в видимом диапазоне

На рис. 15 показаны спектры видимого диапазона ( $\lambda = 400 - 550$  нм) в порядке увеличения плотности энергии в плазменном потоке  $Q$  (сверху вниз). Горизонтальное направление на рисунке соответствует спектральной, вертикальное – пространственной координатам. Поверхность мишени отмечена сплошной черной линией. О начале испарения материала свидетельствует появление большого количества спектральных линий вблизи поверхности при  $Q = 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. Интенсивное испарение наблюдается при  $Q \geq 0,5$  МДж/м<sup>2</sup>.

На рис. 16 представлен участок спектра при интенсивном испарении вольфрама ( $Q = 1,1 \text{ МДж/м}^2$ ) на расстоянии  $x = 10 \text{ мм}$  до мишени. Видны спектральные линии водорода  $H_\beta$ , конструкционных материалов камеры и крепежа мишени:  $Fe^0$ ,  $Cr^0$ ,  $V^0$ ,  $Zn^0$ ,  $Sn^0$ . Зарегистрированы линии, принадлежащие атомам  $W^0$  и однократно ионизованным  $W^{+1}$  ионам вольфрама.

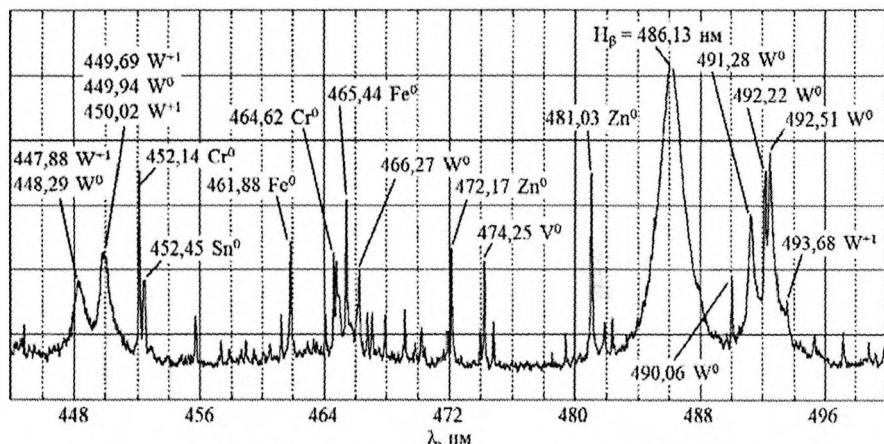


Рисунок 16 – Участок спектра примешенной плазмы

На рис. 17а показана интенсивность излучения в диапазоне  $\Delta\lambda = 490 - 494 \text{ нм}$  (содержащем линии  $W^0$  и  $W^{+1}$ ) в зависимости от расстояния  $x$  до мишени. Видно, что вольфрамовая плазма сосредоточена в основном вблизи поверхности образца, эффективная толщина излучающего слоя не превышает  $20 \text{ мм}$ .

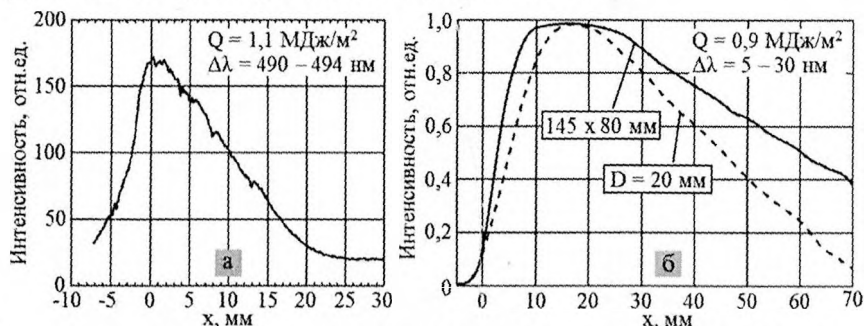


Рисунок 17 – Интенсивность радиационных потерь вольфрамовой плазмы на разных расстояниях до мишени: в видимом (а) и ВУФ (б) диапазонах

Типичная спектрограмма вольфрамовой плазмы в ВУФ диапазоне представлена на рис. 18. Она симметрична относительно нулевого порядка дифракции (черная вертикальная полоса) и по спектральной координате охватывает диапазон от 0 до  $40 \text{ нм}$ . В поле зрения спектрографа попадает область протяженностью  $70 \text{ мм}$  (рис. 17б). За счет перемещения мишеней спектральные измерения выполнены при

$x > 70$  мм. Установлено, что излучение вольфрама регистрируется вплоть до  $x = 200$  мм от поверхности образцов.

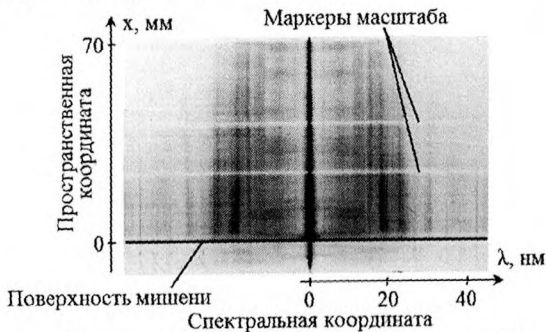


Рисунок 18 – Спектрограмма вольфрамовой плазмы в ВУФ диапазоне

На рисунке рис. 19 показаны спектры вольфрамовой плазмы при разных тепловых нагрузках  $Q$  ( $x = 10$  мм). Увеличение  $Q$  с 0,35 до 0,5 МДж/м<sup>2</sup> ведет к резкому возрастанию интенсивности излучения и существенному изменению формы спектра (рис. 19а,б). Дальнейшее увеличение  $Q$  дает лишь незначительный рост интенсивности спектра, его характерный вид при этом не меняется (рис. 19б,в). Это означает, что порог испарения вольфрама достигается при  $Q \approx 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>.

При моделировании условий ELM-ов максимум яркости излучения приходится на диапазон длин волн  $\Delta\lambda_{\text{max}} = 15 - 20$  нм. В аналогичных экспериментах, соответствующих условиям срывов в ИТЭР,  $\Delta\lambda_{\text{max}} = 8 - 9$  нм [14]. Это связано с тем, что при моделировании срывов тепловая нагрузка на мишень примерно в 30 раз выше, поэтому вольфрамовая плазма нагревается до более высоких температур и спектр ее свечения смещается в коротковолновую область.

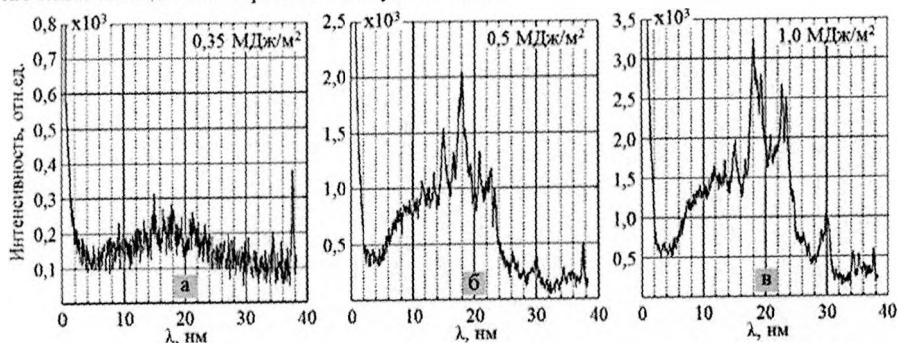


Рисунок 19 – Спектры вольфрамовой плазмы при разных  $Q$  ( $x = 10$  мм)

Полученные на МК-200UG спектры сопоставлялись с результатами численных расчетов, выполненных в Институте Технологий Карлсруэ (KIT, Германия) с помощью кода TOKES. Код TOKES разработан для моделирования процессов, протекающих в высокотемпературной плазме ИТЭР, взаимодействия плазмы с защитными покрытиями дивертора, переноса энергии из плазмы на защитные покрытия с их последующим испарением и поступлением примесей в горячую

термоядерную плазму. Показано (рис. 20), что экспериментальные спектры лучше всего описываются суперпозицией спектральных линий двух групп ионов:  $W^{+7} - W^{+8}$  и  $W^{+13} - W^{+16}$  [8 раздел IV].

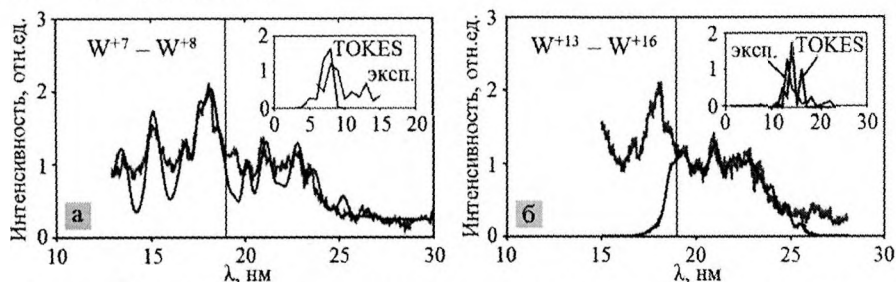


Рисунок 20 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных о спектрах излучения вольфрамовой плазмы

На рис. 176 показана интенсивность излучения вольфрамовой плазмы в диапазоне  $\Delta\lambda = 5 - 30$  нм в зависимости от расстояния  $x$  до мишени. Видно, что толщина плазменного слоя, излучающего в ВУФ диапазоне, оказывается больше, чем в видимом диапазоне длин волн, и составляет не менее 70 мкм.

Энергию излучения примесей  $E(x)$  измеряли одновременно с помощью AXUV-фотодиодов и болометра (рис. 21а). Оба метода дали совпадающие результаты. Видно, что радиационные потери примесей максимальны вблизи мишени. У поверхности они достигают  $10 - 15$  Дж/см<sup>3</sup>, что составляет значительную часть энергосодержания плазмы. При удалении от образца  $E(x)$  быстро падает – примерно на порядок величины при  $x = 6 - 7$  см. Тем не менее, излучение примесей удается уверенно регистрировать вплоть до  $x = 13$  см.

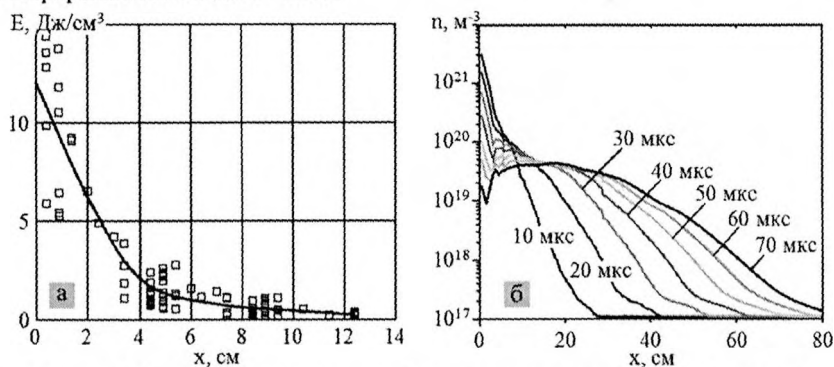


Рисунок 21 – Радиационные потери (а, эксперимент) и плотность (б, расчет) вольфрамовой плазмы на оси плазменного потока

Плотность вольфрамовой плазмы  $n(x)$  в различные моменты времени рассчитывалась с помощью кода TOKES – рис. 21б [8 раздел IV]. Заметна схожесть в поведении кривых  $E(x)$  и  $n(x)$  вблизи мишени. Согласно расчетам, за 70 мкс примеси успевают распространиться не менее чем на 70 см, однако их плотность на таком расстоянии составляет  $n \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  (рис. 21б). Предел чувствительности диагностик

соответствует  $n \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  (при  $x = 13 \text{ см}$ ), поэтому для обнаружения вольфрамовых примесей при  $x > 13 \text{ см}$  требуются более чувствительные методы.

В п. 6.4 приведены данные о динамике примешенной плазмы. Скорость движения фронта свечения примесей  $V$ , измеренная времяпролетной методикой с помощью АХУУ-фотодиодов, составляет  $V \approx 25 - 35 \text{ км/с}$  и слабо зависит от тепловой нагрузки в диапазоне  $Q = 0,4 - 0,9 \text{ МДж/м}^2$  (рис. 22а).

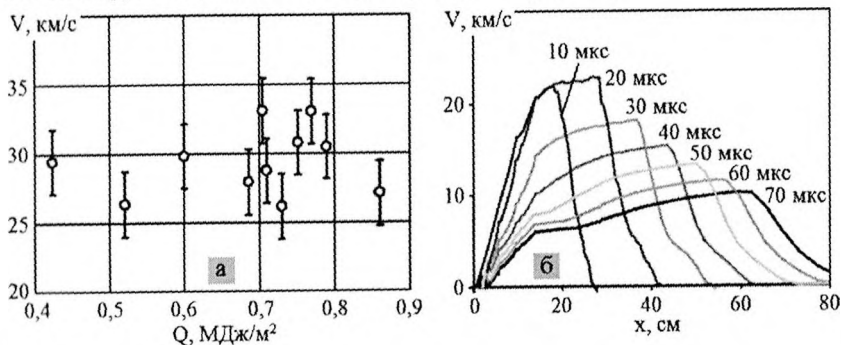


Рисунок 22 – Экспериментальные (а) и расчетные (б) данные о скорости движения примесей вдоль силовых линий магнитного поля

Скорость расширения вольфрамовой плазмы навстречу налетающему плазменному потоку была вычислена с помощью кода TOKES – рис. 22б [8 раздел IV]. Максимальное значение  $V_{\text{max}} = 20 - 25 \text{ км/с}$  достигается на расстоянии  $x \approx 30 \text{ см}$  от мишени с 15-й по 25-ю микросекунду от начала плазменного воздействия. Вблизи поверхности величина  $V = 10 - 15 \text{ км/с}$ . Имеющихся экспериментальных данных недостаточно, чтобы утверждать, что измеренная фотодиодами скорость соответствует скорости распространения примесей вольфрама. Однако, совпадение экспериментальных и расчетных значений дает основание для такого предположения.

П. 6.5 содержит заключение к шестой главе.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Результаты измерений параметров плазменных потоков свидетельствуют о том, что в выбранных режимах работы установок МК-200UG и КСПУ-Т:

- Поток энергии  $W$ , фактор теплового воздействия  $F_{\text{HF}} = W(t_{\text{pl}})^{0,5}$ , энергия ионов  $E_i$ , плотность  $n$  и давление  $P$  плазмы, магнитное поле  $B$  на МК-200UG близки к тем, что ожидаются во время ELM-ов и ослабленных срывов тока в ИТЭР. Установка подходит для исследования свойств примешенной плазмы, возникающей вблизи защитных пластин дивертора и первой стенки токамака.
- При идентичных с МК-200UG факторах теплового воздействия  $F_{\text{HF}}$ , длительность плазменного воздействия  $t_{\text{pl}}$  на КСПУ-Т сопоставима с длительностью переходных процессов в ИТЭР. Это делает установку подходящей для исследования механизмов эрозии материалов и проведения ресурсных испытаний защитных покрытий.

2. Экспериментальные данные об эрозии вольфрама, ниобия, стали, меди и алюминия при облучении их потоками водородной плазмы в диапазоне тепловых нагрузок  $Q = 0,2 - 4,2$  МДж/м<sup>2</sup> и длительности воздействия 0,5 мс свидетельствуют о том, что:

- а) Среди исследованных материалов алюминий и сталь плавятся при наиболее низких тепловых нагрузках: 0,3 МДж/м<sup>2</sup> и 0,4 МДж/м<sup>2</sup> соответственно. Наиболее тугоплавким оказывается вольфрам: 1,1 МДж/м<sup>2</sup>. Медь и ниобий занимают промежуточное положение: 0,7 МДж/м<sup>2</sup>.
- б) Воздействие интенсивного потока водородной плазмы ведет к образованию сложного рельефа на поверхности мишеней. Для вольфрама, ниобия и стали характерно интенсивное течение расплава. После воздействия плазмы их поверхность покрыта волнами, струями и каплями. Для меди и алюминия следы течения расплава незаметны, их поверхность покрыта «пенной», состоящей из полых пузырьков и сплошных шариков/перемычек застывшего металла.
- в) В результате перемещения расплавленного слоя на поверхности металлических мишеней образуется кратер эрозии. При фиксированной тепловой нагрузке глубина кратера растет пропорционально числу плазменных воздействий. Увеличение тепловой нагрузки ведет к росту как глубины кратера, так и его радиуса. Форма и размер кратера свидетельствуют о том, что перемещение расплава происходит под действием силы, на порядок превышающей силу, обусловленную градиентом давления в плазменном потоке.
- г) При одинаковых тепловых нагрузках наибольшие потери массы, обусловленные выбросом капель и испарением материала, зарегистрированы для алюминия:  $\Delta m \approx 250$  г/м<sup>2</sup>; наименьшие – для ниобия:  $\Delta m \approx 3$  г/м<sup>2</sup>. Вольфрам, сталь и медь занимают промежуточное положение:  $\Delta m \approx 70$  г/м<sup>2</sup>. Указанные значения  $\Delta m$  приведены для  $Q = 2,4$  МДж/м<sup>2</sup>.
- д) Эрозия, обусловленная перемещением расплава, на порядок превосходит эрозию, связанную с потерями массы образцов, и является основным механизмом разрушения металлических защитных покрытий в исследованном диапазоне тепловых нагрузок.

3. Создана диагностика с использованием лазерной подсветки для исследования продуктов макроскопической эрозии материалов (капель, частиц). Полученные с ее помощью результаты указывают на то, что:

- а) При облучении плазмой стальной мишени вдоль линии наблюдения видны лишь отдельные вспышки рассеянного лазерного излучения. Сплошная засветка, указывающая на наличие плотного облака мелкой и холодной металлической пыли, не обнаружена.
- б) При тепловой нагрузке  $Q = 2,5$  МДж/м<sup>2</sup> и длительности воздействия 0,5 мс скорость вылетающих со стальной мишени капель составляет  $V \approx 10$  м/с. Более быстрые частицы присутствуют, но их заметно меньше; капли со скоростями 300 м/с вообще не наблюдаются.
- в) При облучении плазмой графитовой мишени продукты хрупкого разрушения материала не зарегистрированы. Результат эксперимента объясняется быстрым испарением графитовых частиц вблизи мишени под действием поступающего на поверхность потока тепла.

4. Данные о свойствах примесей вольфрама, образующихся при облучении вольфрамовых мишеней потоками водородной плазмы в условиях, характерных для ELM-ов и ослабленных срывов в ИТЭР, свидетельствуют о том, что:

- а) При длительности воздействия 50 мкс интенсивное испарение вольфрама происходит при тепловых нагрузках  $Q \geq 0,5$  МДж/м<sup>2</sup>.
- б) Вольфрамовые примеси распространяются вдоль силовых линий магнитного поля, навстречу водородному плазменному потоку. В диапазоне тепловых нагрузок  $Q = 0,4 - 0,9$  МДж/м<sup>2</sup> скорость фронта свечения примесей практически не меняется и составляет  $V \approx 25 - 35$  км/с.
- в) В видимом диапазоне длин волн зарегистрированы спектральные линии атомов  $W^0$  и однократно ионизованных ионов  $W^{+1}$  вольфрама. Толщина излучающего плазменного слоя не превышает  $h = 2$  см.
- г) В ВУФ диапазоне преимущественно излучают ионы вольфрама со степенями ионизации +7 и выше. Максимум яркости излучения приходится на диапазон длин волн  $\Delta\lambda = 15 - 20$  нм. Толщина излучающего слоя составляет  $h \approx 10$  см.
- д) Радиационные потери мишенной плазмы играют существенную роль в общем балансе энергии. Излучение примесей сосредоточено в ВУФ и МР областях спектра. Плотность радиационных потерь максимальна вблизи мишени  $E_{\text{max}} = 10 - 15$  Дж/см<sup>3</sup> и быстро убывает с увеличением расстояния до нее:  $E \leq 1$  Дж/см<sup>3</sup> при  $x = 6 - 7$  см. Тем не менее, свечение примесей удастся регистрировать на расстояниях до 20 см от образцов.

#### IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. V.M. Safronov, N.I. Arkhipov, N.S. Klimov, D.V. Kovalenko, I.S. Landman, A.A. Moskacheva, S.E. Pestchanyi, V.L. Podkovyrov, **I.M. Poznyak**, D.A. Toporkov, A.M. Zhitlukhin. Investigation of erosion mechanisms and erosion products in divertor armour materials under conditions relevant to ELMs and mitigated disruptions in ITER // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2008. № 6. P. 52-54. (Scopus)
2. Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, А.М. Житлухин, В.М. Сафронов, Д.В. Коваленко, А.А. Москачёва, **И.М. Позняк**. Разбрызгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 2. С. 52-61. (ВАК)
3. Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, А.М. Житлухин, Н.И. Архипов, В.М. Сафронов, В.А. Барсук, **И.М. Позняк**, A. Loarte, M. Merola, J. Linke. Воздействие интенсивных импульсных потоков плазмы на защитные материалы внутрикамерных компонентов термоядерного реактора // Ядерная физика и инженеринг. 2010. Т. 1. № 3. С. 210-219. (ВАК)
4. V.M. Safronov, N.I. Arkhipov, N.S. Klimov, I.S. Landman, D.S. Petrov, V.L. Podkovyrov, **I.M. Poznyak**, D.A. Toporkov, A.M. Zhitlukhin. Erosion mechanism and erosion products in tungsten targets exposed to plasma heat loads relevant to ELMs and mitigated disruptions in ITER // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2010. № 6. P. 51-53. (Scopus)
5. N.S. Klimov, V.A. Kumaev, A.M. Zhitlukhin, D.V. Kovalenko, **I.M. Poznyak**, A.A. Moskacheva, D.B. Abramenko. Materials erosion and eroded material deposition under intense plasma action // Fusion Science and Technology. 2011. V. 60. № 1T. P. 34-39. (Scopus)



6. **И.М. Позняк**, Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, В.М. Сафронов, А.М. Житлухин, Д.В. Коваленко. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2012. № 4. С. 23-33. (БАК)

7. **I.M. Poznyak**, N.I. Arkhipov, S.V. Karelov, V.M. Safronov, D.A. Toporkov. Experimental study of tungsten impurity formation and dynamics at plasma gun facility MK-200 under condition relevant to transient events in ITER // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2012. № 6. V. 82. P.52-54. (Scopus)

8. S. Pestchanyi, N. Arkhipov, I. Landman, **I. Poznyak**, V. Safronov, D. Toporkov. Simulation of tungsten plasma transport along magnetic field under ELM-like heat loads // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. S459-S462. (Scopus)

9. **И.М. Позняк**, Н.И. Архипов, С.В. Карелов, В.М. Сафронов, Д.А. Топорков. Свойства примесей вольфрама, образующихся в плазме при облучении вольфрамовых мишеней мощными плазменными потоками // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. № 1. С. 70-79. (БАК)

10. **И.М. Позняк**, В.М. Сафронов, В.Ю. Цыбенко. Движение расплавленного металлического слоя в условиях, характерных для быстрых плазменных процессов в ИТЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. № 1. С. 15-21. (БАК)

11. **I.M. Poznyak**, D.A. Toporkov, S.V. Karelov, V.M. Safronov, N.I. Arkhipov. Properties of tungsten vapor plasma formed at conditions relevant to transient events in ITER at plasma gun facility MK-200UG // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1771. № 1, P.060006(1-4), doi: 10.1063/1.4964214. (Scopus)

## В. СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт международного экспериментального термоядерного реактора ITER. (Электронный ресурс). URL: <http://www.iter.org/> (дата обращения: 27.01.2017).

2. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. S48-S56.

3. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al. Physics basis and design of the ITER plasma-facing components // Journal of Nuclear Materials. 2011. V. 415. P. S957-S964.

4. Landman I., Janeschitz G. Numerical simulations of plasma wall interactions for ITER // Journal of Nuclear Materials. 2007. V. 363-365. P. 1061-1065.

5. Bazylev B., Janeschitz G., Landman I. et al. Experimental validation of 3D simulations of tungsten melt erosion under ITER-like transient loads // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390-391. P. 810-813.

6. Сафронов В.М. Комплексные исследования физических процессов при взаимодействии мощных потоков плазмы с материалами термоядерных установок. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук // ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Москва, Троицк. 2012. 245 С.

7. Климов Н.С. Макроскопическая эрозия материалов при их облучении интенсивными потоками плазмы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук // ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Москва, Троицк. 2011. 209 С.

8. Yoshie Koza. Performance of metallic and carbon-based materials under the influence of intense transient energy deposition. Dissertation (ISSN 0944-2952) // Forschungszentrum Jülich GmbH. Aachen, Germany. 2004. 153 P.

9. Сайт Comsol Multiphysics. (Электронный ресурс). URL: <https://www.comsol.ru> (дата обращения: 1.04.2017).

10. Belan V.G., Levashov V.F., Maynashev V.S., et al. Particles and droplets generation in QSPA experiments on plasma loading of CFC materials and metals // Report at ITER Dust Coordination Meeting, TRINITI, February 2-3, 1999.

11. Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А. и др. Эрозия углеродистых материалов при облучении интенсивными потоками плазмы // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2009. Т. 32. № 4. С. 3-13.

12. Pshenov A.A., Eksaeva A.A., Krashennnikov S.I. et al. Vapor Shielding of Solid Targets Exposed to High Heat Flux // Physics Procedia. 2015. V. 71. P. 14-19.

13. Skovorodin D.I., Pshenov A.A., Arakcheev A.S. et al. Vapor shielding models and the energy absorbed by divertor targets during transient events // Physics of Plasmas. 2016. V. 23. № 2. P. 022501(1-8).

14. Arkhipov N., Bakhtin V., Kurkin S. et al. VUV radiation during plasma/surface interaction under plasma stream power density of 20–40 MW/cm<sup>2</sup> // Problems of Atomic Science and Technology; Series "Plasma Physics". 2000. № 6. P. 97-99.



07

Подписано в печать 02.11.2017 г.  
Формат 60х84/16. Печ. л.1,5.  
Тираж 150 экз. Заказ 12145.

Издательство «Тровант»  
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии издательства «Тровант».  
142191, г. Москва, г. Троицк, м-н «В», д. 52.  
Тел. (495) 775-43-35, 8 (495) 851-09-67  
E-mail: [trovant@trtk.ru](mailto:trovant@trtk.ru), <http://www.trovant.ru/>