

**XXII КОНФЕРЕНЦИЯ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2019 г.**

**Сборник научных трудов**

**Москва  
2019**

Министерство науки и высшего образования РФ  
Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

---

**МАТЕРИАЛЫ  
XXII КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2019 г.

Москва  
2019

**ББК 22.333**  
**УДК 533.9 (06)**  
**В 40**

Материалы XXII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 23-24 января 2019 г.  
М.: НИЯУ МИФИ, 2019 г., 140 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 22-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза. Сборник сформирован по мере поступления докладов, которые опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

*Редакционная коллегия:*

*В.А. Курнаев,  
Ю.М. Гаспарян,  
М.И. Шутикова*

**ISBN 978-5-7262-2542-5**

© Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», 2019

Программа XXII конференции  
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Среда, 23 января

начало в 09.50

Аудитория **Актовый зал**

**Председатели – профессор КУРНАЕВ В.А., профессор ЧЕРНОВ В.М.**

9.00– 9.50	Регистрация участников
9.50– 10.00	Открытие
10.00– 10.25	Б.В. КУТЕЕВ <i>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ</i> <b>Источники термоядерных нейтронов для развития материалов и гибридных технологий</b>
10.25– 10.50	В.М. ЧЕРНОВ <sup>1,2</sup> , М.В. ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА <sup>1,2</sup> , М.М. ПОТАПЕНКО <sup>1</sup> , А.Н. ТЮМЕНЦЕВ <sup>3,4</sup> , А.И. БЛОХИН <sup>1,5</sup> <sup>1</sup> АО «Высокотехнологический НИИ неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва <sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия <sup>3</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия <sup>4</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия <sup>5</sup> Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия <b>Малоактивируемые конструкционные материалы для ядерных реакторов деления и синтеза – вызовы и возможности</b>
10.50– 11.20	А.С. КУКУШКИН <i>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ</i> <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> <b>Физические процессы в пристеночной плазме токамака и их моделирование</b>
11.20– 11.40	Кофе-брейк
11.40– 12.05	S. BREZINSEK <i>Forschungszentrum Juelich</i> <b>Status of European Roadmap in PSI</b>
12.05– 12.30	В.М. САФРОНОВ <i>Частное учреждение Государственной корпорации атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва</i> <b>Повреждения обращенных к плазме материалов ИТЭР: что исследовано и что необходимо изучить</b>

12.30– 12.55	В.Ю. СЕРГЕЕВ, В.Г. СКОКОВ <i>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого</i> <b>Жидкометаллические и пылевые технологии для контроля взаимодействия плазмы с первой стенкой токамака</b>	
12.55– 13.45	Обед	
13.45– 14.05	Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, О.И. БУЖИНСКИЙ, А.А. АЙРАПЕТОВ, А.В. ГРУНИН, А.М. ЗАХАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, С.С. ДОВГАНЮК <i>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"</i> <b>Возобновляемое защитное покрытие карбида бора для контактирующих с плазмой материалов термоядерных установок</b>	
14.05– 14.25	О.В. ОГОРОДНИКОВА, Н.С. КЛИМОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, А.Г. ПОСКАКАЛОВ, А.В. КАЗИЕВ, М.М. ХАРЬКОВ, Н.В. ВОЛКОВ <i>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"</i> <b>Накопление дейтерия и гелия в вольфраме и сталях: от лабораторных данных к токамаку</b>	
14.25– 14.45	А.И. РЯЗАНОВ <i>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ</i> <b>Экспериментальные и теоретические исследования влияния облучения быстрых частиц на радиационную стойкость материалов для будущих термоядерных реакторов</b>	
Конференционное фото		
15.00– 18.00	Заседание НТС (конференц-зал 3 этажа)	Стендовая секция <b>до 18.30</b>

#### Стендовые доклады

1. А.Б. ЛЯШЕНКО, Ю. ПОЛВИ, Э. САФИ, Ф. ДЖУРАБЕКОВА, К. НОРДЛУНД  
**Численное моделирование распыления вольфрама азотом**
2. Ю.В. МАРТЫНЕНКО, В.П. БУДАЕВ  
**Плазменная технология создания наноструктурированной поверхности типа «пух» из рутения для покрытия электродов кардиостимуляторов**
3. В.П. БУДАЕВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ, А.В. ВЕРТКОВ,  
Г. ВАН ООСТ, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ, А.В. КАРПОВ,  
А.В. ЛАЗУКИН, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, Д.Н. ГЕРАСИМОВ, М.К. ГУБКИН,  
Е.А. ШЕСТАКОВ, Д.С. ГВОЗДЕВСКАЯ, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ, К.А. РОГОЗИН,  
А.С. РЫЖОВ  
**Испытание жидкометаллической капиллярно-пористой системы с оловом при стационарной плазменной нагрузке в ПЛИМ**

4. В.П. БУДАЕВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, А.В. КАРПОВ, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ, А.П. СЛИВА, А.В. ЛАЗУКИН, Г. ВАН ООСТ, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, Д.Н. ГЕРАСИМОВ, М.К. ГУБКИН, И.В. ВОИНКОВА, Е.А. ШЕСТАКОВ, Д.С. ГВОЗДЕВСКАЯ, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ, К.А. РОГОЗИН  
**Испытание вольфрама стационарными плазменными и пучковыми нагрузками**
5. З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ, В.П. БУДАЕВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ.  
**Расчеты критических токов, приводящих к взрывной эмиссии и формированию дуги на шероховатой поверхности вольфрама в термоядерных установках**
6. С.В. МИРНОВ, А.Т. КОМОВ, А.Н. ВАРАВА, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ, А.В. ДЕДОВ, А.В. ЗАХАРЕНКОВ, А.В. ВЕРТКОВ, Ю.В. СМОРЧКОВА  
**Охлаждение высоконагруженных элементов конструкций термоядерного реактора диспергированным потоком**
7. А.В. ДЕДОВ, С.В. МИРНОВ, В.П. БУДАЕВ, А.Т. КОМОВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, А.Н. ВАРАВА, А.В. ЗАХАРЕНКОВ, П.Г. ФРИК, Е.В. СВИРИДОВ, Д.Н. ГЕРАСИМОВ, А.В. ВЕРТКОВ, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ, А.П. СЛИВА  
**Статус работ в НИУ «МЭИ» по плазменным, пучковым и тепловым испытаниям компонентов стенки термоядерного реактора**
8. А.Я. ЛЕЙВИ, А.П. ЯЛОВЕЦ  
**Математическое моделирование динамических явлений наблюдаемых в веществе при воздействии компрессионных плазменных потоков**
9. Н.Н. ЧЕРЕНДА, В.И. ШИМАНСКИЙ, В.В. УГЛОВ, В.М. АСТАШИНСКИЙ, А.М. КУЗЬМИЦКИЙ  
**Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя циркония, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков**
10. М.А. ЛАРЧЕНКО, И.М. ПОЗНЯК  
**Исследование продуктов эрозии при облучении вольфрама интенсивными потоками плазмы**

Председатели – профессор Беграмбеков Л.Б., профессор Писарев А.А.

10.00– 10.25	<p>А.А. ПИСАРЕВ, Н.М. МИХАЙЛИЦЫНА  <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i>  <b>Накопление трития в диверторе ИТЭР</b>          А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, И.И. АРХИПОВ<sup>2</sup>, Я.А. БАБИЧ<sup>1</sup>,          М.М. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, С.А. ГРАШИН<sup>3</sup>,          В.Е. ДРОБИНИН<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, М.Г. ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>,          О.А. КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, Т.М. СТЕПАНОВА<sup>1</sup>,          В.А. ФЕСЕНКО<sup>1</sup>  <sup>1</sup><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i>  <sup>2</sup><i>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН</i>  <sup>3</sup><i>Научно исследовательский центр «Курчатовский институт»</i>  <b>Анализ вольфрамовых пластин лимитера токамака Т-10 после длительной кампании</b></p>
10.25– 10.45	<p>В.А. ВЕРШКОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>2</sup>, А.В. ВЕРТКОВ<sup>2</sup>,          М.Ю. ЖАРКОВ<sup>2</sup> и группа Т-10  <sup>1</sup><i>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ</i>  <sup>2</sup><i>АО «Красная Звезда», Москва, РФ</i>  <b>Эксперименты с литевой пористой капиллярной структурой в токамаке Т-10 с вольфрамовыми диафрагмами</b></p>
10.45– 11.05	<p>М.Ю. ЖАРКОВ<sup>1</sup>, А.В. ВЕРТКОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>1,2</sup>,          В.А. ВЕРШКОВ<sup>3</sup>, Г.Е. НОТКИН<sup>3</sup>, С.В. МИРНОВ<sup>3</sup>  <sup>1</sup><i>АО «Красная звезда», Москва, РФ</i>  <sup>2</sup><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</i>  <sup>3</sup><i>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ</i>  <sup>4</sup><i>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва</i>  <b>Разработка литевых внутрикамерных элементов для токамака Т-15МД</b></p>

11.05– 11.25	<p>А.С. АРАКЧЕЕВ<sup>1,2,3</sup>, А.В. БУРДАКОВ<sup>1,2,3</sup>, И.В. КАНДАУРОВ<sup>1,2</sup>, В.В. КУРКУЧЕКОВ<sup>1</sup>, В.А. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, Л.И. ШЕХТМАН<sup>1</sup>, М.Р. ШАРАФУТДИНОВ<sup>4</sup>, Б.П. ТОЛОЧКО<sup>1,4</sup>, Ю.А. ТРУНЕВ<sup>1</sup>, А.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1,2</sup>, Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ<sup>1,2</sup></p> <p><sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН <sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет” <sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет” <sup>4</sup>Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН</p> <p><b>Статус исследований воздействия импульсных тепловых нагрузок на вольфрам в ИЯФ СО РАН</b></p>
11.25– 11.45	Кофе-брейк
11.45– 12.05	<p>В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ» <sup>2</sup>НИЦ Курчатовский институт, Москва</p> <p><b>О плазменно-тепловой нагрузке в диверторе термоядерного реактора-токамака</b></p>
12.05– 12.20	<p>С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Я.А. ВАСИНА, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.А. ПИСАРЕВ</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</p> <p><b>Экспериментальное и теоретическое исследование процесса совместного осаждения изотопов водорода с металлами</b></p>
12.20– 12.40	<p>V.KH. ALIMOV<sup>1,2,3</sup>, M. YAJIMA<sup>1</sup>, S. MASUZAKI<sup>1</sup>, M. TOKITANI<sup>1</sup>, LHD EXPERIMENT GROUP<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu, Japan <sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва <sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</p> <p><b>Mixed-material layers deposited onto silicon probes during the year 2012 LHD plasma campaign</b></p>

12.40– 13.00	<p>А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1,3</sup>, Н.А. БАБИНОВ<sup>1,3</sup>, А.Н. БАЖЕНОВ<sup>1</sup>, И.М. БУКРЕЕВ<sup>1</sup>, Л.А. ВАРШАВЧИК<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1</sup>, Н.С. ЖИЛЬЦОВ<sup>1</sup>, П.А. ЗАТЫЛКИН<sup>1</sup>, А.Н. КОВАЛЬ<sup>1</sup>, Г.С. КУРСКИЕВ<sup>1</sup>, С.В. МАСЮКЕВИЧ<sup>1</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>, А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, В.А. СЕНИЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Д.С. САМСОНОВ<sup>1</sup>, В.А. СОЛОВЕЙ<sup>1</sup>, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ<sup>1</sup>, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1</sup>, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>2</sup>, В.Л. БУХОВЕЦ<sup>2</sup>, А.В. МАРКИН<sup>2</sup>, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ<sup>2</sup>, Ал.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Ан.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, П.В. ЧЕРНАКОВ<sup>3</sup>, П.А. ШИГИН<sup>4</sup></p> <p><sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  <sup>2</sup>ИФХЭХ им. Фрумкина, Москва  <sup>3</sup>ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург  <sup>4</sup>Международная Организация ИТЭР, Кадараш, Франция</p> <p><b>Плазменная чистка диагностических зеркал с системой водяного охлаждения, выполненной на основе четвертьволнового фильтра</b></p>
13.00– 13.15	<p>А.Г. ПОСКАКАЛОВ<sup>1,2</sup>, Н.С. КЛИМОВ<sup>1,2</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, О.В. ОГОРОДНИКОВА<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, М.С. ЗИБРОВ<sup>1,3</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  <sup>2</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва  <sup>3</sup>Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany</p> <p><b>Накопление дейтерия в вольфраме при мощных импульсных плазменных нагрузках</b></p>
13.15– 13.30	<p>С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Я.А. ВАСИНА, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.А. ПИСАРЕВ</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</p> <p><b>Исследование содержания изотопов водорода в соосажденных с литием слоях в зависимости от температуры подложки во время осаждения</b></p>
13.30– 14.30	Обед
14.30– 14.45	<p>С.А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, З.Р. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, С.Л. КАНАШЕНКО<sup>2</sup>, Ю.Д. ИВАНОВ<sup>2</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  <sup>2</sup>Институт биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича</p> <p><b>Захват гелия в вольфраме при ионном внедрении при повышенных температурах и его влияние на морфологию поверхности и накопление водорода</b></p>

14.45– 15.00	<p>А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>1</sup>, В.Л. БУХОВЕЦ<sup>1</sup>, А.В. МАРКИН<sup>1</sup>, В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Р.Х. ЗАПАВУТДИНОВ<sup>1</sup>, А.П. ЗАХАРОВ<sup>1</sup>, В.Л. ВОЙТИЦКИЙ<sup>1</sup>, А.М. ДМИТРИЕВ<sup>2</sup>, А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>2</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>2</sup></p> <p><sup>1</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва <sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург</p> <p><b>Изменение морфологии и светопропускания кварцевых окон в чистящем ВЧ разряде в смеси D<sub>2</sub>/N<sub>2</sub></b></p>
15.00– 15.15	<p>Н.А. БАБИНОВ<sup>1,2</sup>, Л.А. ВАРШАВЧИК<sup>1</sup>, П.А. ЗАТЫЛКИН<sup>1</sup>, А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1,2</sup>, А.Н. БАЖЕНОВ<sup>1</sup>, И.М. БУКРЕЕВ<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1</sup>, А.Н. КОВАЛЬ<sup>1</sup>, Г.С. КУРСКИЕВ<sup>1</sup>, А.Е. ЛИТВИНОВ<sup>1</sup>, С.В. МАСЮКЕВИЧ<sup>1</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>, А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, Д.С. САМСОНОВ<sup>1</sup>, В.А. СОЛОВЕИ<sup>1</sup>, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ<sup>1</sup>, И.А. ХОДУНОВ<sup>1</sup>, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1</sup>, Ал.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Ан.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, П.В. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Н.С. ЖИЛЬЦОВ<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург <sup>2</sup>ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург</p> <p><b>Моделирование транспорта и пересадения распыленных частиц в чистящем ВЧЕ-разряде ИТЭР</b></p>
15.15– 15.30	<p>Я.А. ВАСИНА<sup>1,2</sup>, А.Н. ЩЕРБАК<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1,2</sup>, С.В. МИРНОВ<sup>1,2</sup></p> <p><sup>1</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва <sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</p> <p><b>Определение радиального распределения параметров пристеночной плазмы токамака Т-11М с помощью зонда Маха</b></p>
15.30– 15.45	<p>С.А. КРАТ, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.П. ХАРИНА</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</p> <p><b>Определение коэффициента серости лития для инфракрасной диагностики токамака Т-11М</b></p>
15.45– 16.00	<p>М.М. ЦВЕНТУХ</p> <p>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва</p> <p><b>Dynamics of high-density vacuum-arc cathode-spot plasma in a magnetic field</b></p>
16.00– 16.20	<p>Кофе-брейк</p>
16.20– 16.55	<p>Д.М. БАЧУРИНА, А.Н. СУЧКОВ, О.Н. СЕВРЮКОВ, М.А. ПЕНЯЗЬ, Б.А. КАЛИН</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</p> <p><b>Разработка сплавов-припоев для высоко-температурной пайки малоактивируемой стали с вольфрамом дивертора и первой стенки термоядерного реактора ДЕМО</b></p>

16.55– 17.10	М.И. ШУТИКОВА, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, А.А. ПИСАРЕВ <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</i> <b>Ab-initio исследование свойств ловушек водорода в массиве вольфрама</b>
17.10– 17.25	В.А. ИВАНОВ <sup>1,2</sup> , А.С. САХАРОВ <sup>1</sup> , М.Е. КОНЫЖЕВ <sup>1</sup> , А.А. ДОРОФЕЮК <sup>1</sup> , Т.И. КАМОЛОВА <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</i> <sup>2</sup> <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</i> <b>Микроплазменные разряды, возбуждаемые на поверхности конструкционных металлов в потоке плазмы: эксперимент, теория, приложения</b>
17.25– 17.40	Б.А. КАЛИН, М.С. СТАЛЬЦОВ, И.И. ЧЕРНОВ <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</i> <b>Особенности формирования газовой пористости по глубине образцов ванадиевых сплавов малоактивируемых композиций при ионной имплантации гелия и водорода</b>
17.40– 17.55	Н.Н. АНДРИАНОВА <sup>1</sup> , В.А. АНИКИН <sup>1</sup> , А.М. БОРИСОВ <sup>1</sup> , Е.С. МАШКОВА <sup>2</sup> , М.А. ОВЧИННИКОВ <sup>1,2</sup> <sup>1</sup> <i>МАИ (Национальный исследовательский университет)</i> <sup>2</sup> <i>НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова</i> <b>Особенности эрозии поверхности углеродного волокна потоком ионов гелия плазменного ускорителя с анодным слоем</b>
17.55– 18.30	Подведение итогов
18.00– 20.00	Welcome together

V.KH. ALIMOV<sup>1,2,3</sup>, M. YAJIMA<sup>1</sup>, S. MASUZAKI<sup>1</sup>, M. TOKITANI<sup>1</sup>, LHD  
EXPERIMENT GROUP<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

<sup>2</sup>A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy  
of Sciences, Moscow 119071, Russia

<sup>3</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow 123182, Russia

## MIXED-MATERIAL LAYERS DEPOSITED ONTO SILICON PROBES DURING THE YEAR 2012 LHD PLASMA CAMPAIGN

Processes occurring on the plasma-facing walls in the Large Helical Device (LHD) and in-vessel material migration were investigated using a technique of material deposition probes. Ten Si plates were located on the outer side of the first-wall surface in each  $36^{\circ}$  toroidal section (Nos. 1–10) (Fig. 1). Long neon (Ne) and hydrogen (H) glow discharge cleanings (GDC's) and then boronization using glow discharge with a mixture of helium (90%) and diborane (10%) gas were carried out at the beginning of the year 2012 plasma campaign. The plasma-facing components were exposed to high-power pulsed H plasma discharges and were also periodically subjected to He-GDC's and Ti gettering. Mixed-material layers deposited on the probes during the year 2012 plasma campaign represented usually layers of carbon, which is the divertor tile material, containing hydrogen, helium, and metals from which the plasma-facing elements were made.

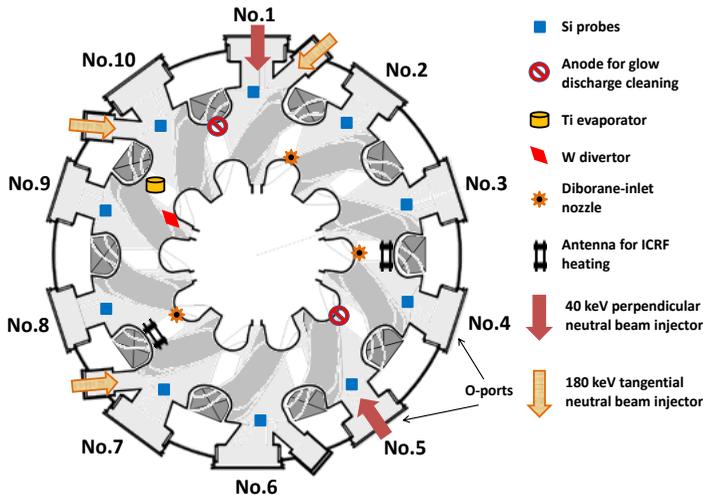


Figure 1. Toroidal location of the Si plates (probes) in the LHD.

Metallic impurities and hydrogen content in deposited layers were examined by Rutherford backscattering spectrometry (RBS) and elastic recoil detection analysis (ERDA), respectively. The cross-sectional observations of the deposited mixed-material layers were performed with the help of a scanning electron microscope.

The mixed-material layer deposited on the probe Si-1 consists of boronized zone, zone of metallic impurities and carbon zone, whereas the mixed-material layer deposited on the probe Si-10 consists only of zone of metallic impurities and carbon zone (Fig. 2). The formation of thick boronized layer only on the probe Si-1 (Fig. 2) was most likely caused by the proximity of the probe to the glow discharge anode located between the sections No. 10 and No. 1 and diborane inlet nozzle located between the sections No. 1 and No. 2 (Fig. 1).

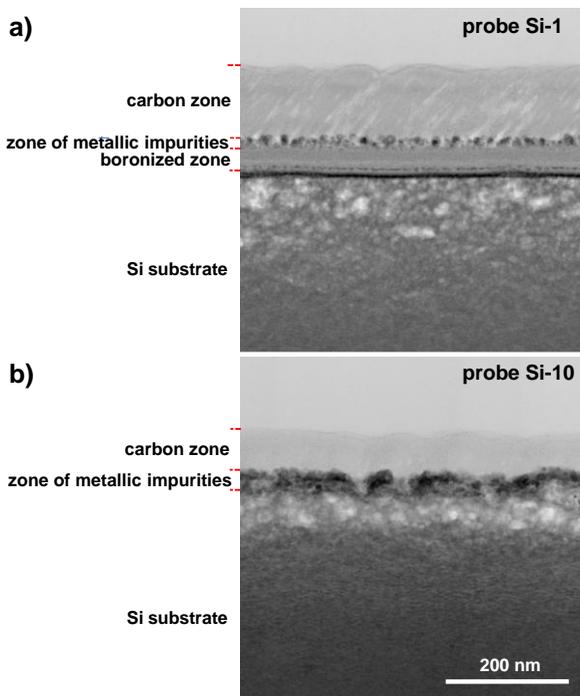


Figure 2. Cross-sectional TEM images of the mixed-material layers deposited on the probes Si-1 (a) and Si-10 (b). The scale bar given in panel (b) is valid for both images.

The highest amount of deposited carbon, boron and oxygen atoms is observed on the probe Si-1 (Fig. 3 a). Note that due to the boronization, the mixed-material layer deposited on the probe Si-1 consist of relatively thick boronized sublayer (Fig. 2). It can be assumed that in the layers deposited on other probes the thickness of the boronized sublayer is much less than the thickness of the boronized sublayer on the probe Si-1.

The H to (C + B + O) atomic ratio in mixed-material layers deposited on the Si probes varies from 0.30 to 0.48, depending on the probe location (Fig. 3 b). Apparently, such a difference in the H to (C + B + O) atomic ratios is due to different rates of deposition of carbon and boron and trapping of hydrogen, depending on the probe location.

In mixed-material layers deposited on the Si substrates, except the probes Si-3 and Si-7, the total concentration of metallic components of the SUS 316L steel, namely, Cr, Fe, Ni, and Mo, is higher near the Si substrate and decreases towards the surface of the layer. The fraction of these metallic components in these mixed-material layers, averaged over the layer thickness, varies from about 0.02 to about 0.07, depending on the Si probe location (Fig. 5, right column).

The probes Si-3 and Si-7 were located near antennas for ion cyclotron range of frequency heating made from the SUS 316L steel (Fig. 1). It can be assumed that during the plasma campaign these antennas served as additional sources of eroded metallic particles, and these particles were deposited on the closely spaced Si probes increasing the deposition rate of the SUS 316L steel components. Therefore, as seen in Fig. 3, panel (c), the Cr+Fe+Ni+Mo content in the probes Si-3 and Si-7 is higher than that for other probes.

The appearance of Ti atoms in the mixed-material deposited layers was due to the processes of Ti gettering used to reduce the oxygen content in the vacuum chamber. Titanium sublimation device having four Ti balls was activated at the bottom port between toroidal sections No. 9 and No. 10, as shown in Fig. 1, to form titanium thin film on the first wall. The maximum content of Ti is observed in the mixed-material layer deposited on the probe Si-10 (Fig. 3d), and this is due to the fact that only the probe Si-10 looks directly at the Ti evaporator.

This mixed-material layer deposited on the probe Si-2 demonstrates the maximum W content (Fig. 3e). The reason for this local accumulation of tungsten has not yet been clarified. Undoubtedly, additional modeling of high-Z atoms migration in LHD plasma and RBS studies of mixed-material layers deposited on Si probes in previous and subsequent plasma campaigns are needed.

During the H plasma discharges, accelerated H ions penetrated through the mixed-material layers and accumulated in the sub-surface layers of the Si substrates. The H content in the Si substrate demonstrates also maximum value for the probes Si-1 and S-5 (Fig. 3f).

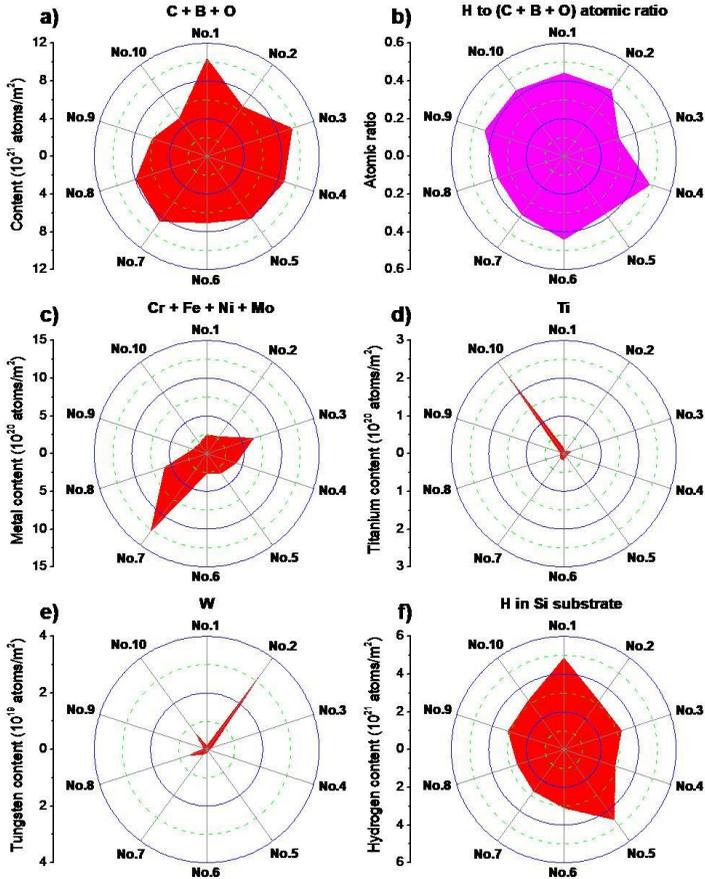


Figure 3. Radar charts, panels from (a) to (e), showing content of carbon, boron and oxygen, hydrogen, and metals in mixed-material layers deposited on the Si probes for each toroidal section: (a) the total amount of C, B and O atoms; (b) the H to (C + B + O) atomic ratio; (c) the total amount of Cr, Fe, Ni, and Mo atoms; (d) amount of Ti atoms; (e) amount of W atoms. Panel (f) shows the H content in the Si substrates.

Н.Н. АНДРИАНОВА<sup>1</sup>, В.А. АНИКИН<sup>1</sup>, А.М. БОРИСОВ<sup>1</sup>,  
Е.С. МАШКОВА<sup>2</sup>, М.А. ОВЧИННИКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МАИ (Национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

## **ОСОБЕННОСТИ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПОТОКОМ ИОНОВ ГЕЛИЯ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ**

Известно, что процесс эрозии материалов при физическом распылении ионами инертных газов приводит к значительным морфологическим изменениям поверхности, обусловленными как явлением нестабильности поверхности при распылении, так и структурными радиационными нарушениями [1]. На процесс эрозии углерод-углеродных композитов может существенно влиять анизотропия углеродного волокна, армирующего композит [2, 3]. В настоящей работе изучали процесс эрозии высокомодульного углеродного волокна «Кулон» на основе ПАН-волокна при высоких флюенсах облучения полиэнергетическим пучком ионов гелия со средней энергией ионов не более 3 кэВ, генерируемым плазменным ускорителем с анодным слоем. Напряжение разряда в ионном источнике составляло 3.5 – 4.5 кВ, ток разряда – 0.2 А при давлении с напуском гелия  $2 \cdot 10^{-1}$  Па. За 2 часа облучения мишень нагревалась до температур 100 – 150 °С. Исследования морфологии поверхности проводили с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Типичные РЭМ-изображения поверхности углеродного волокна до и после ионного облучения приведены на рис.1. Видно, что исходно гладкая поверхность волокна (рис. 1а) после ионного облучения становится гофрированной, рис. 1б. Аналогичное гофрирование поверхности углеродных волокон на основе ПАН происходит при облучении ионами аргона, неона и азота с энергиями порядка единиц десятков кэВ [3]. Предполагается, что во всех отмеченных случаях формирование субмикронных призматических элементов на поверхности обусловлено одним и тем же ионно-индуцированным процессом. Установленные в работе [3] корреляции ионно-индуцированного гофрирования с размерными изменениями углеродного волокна при нейтронном облучении позволили предположить, что ответственными за гофрирование являются обусловленные радиационной генерацией пар Френкеля фундаментальные анизотропные процессы сжатия кристаллитов графита в базисной плоскости и расширения в направлении,

перпендикулярном к плоскости базиса [4]. Целостность материала при этом обеспечивается радиационно-индуцированной пластичностью графита.

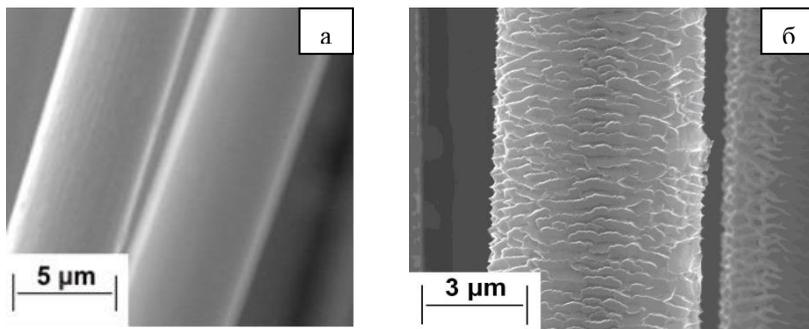


Рис.1. РЭМ-изображения углеродного волокна до (а) и после ионного облучения (б)

При ионном облучении воздействию подвергается тонкий наноразмерный поверхностный слой. В текстурированной оболочке волокна на основе ПАН это приводит к сжатию слоя в направлении оси волокна, его расширению в перпендикулярном оси направлении и к большим механическим напряжениям между облучаемым слоем и остальной частью волокна. Если при нейтронном облучении радиационное формоизменение происходит для всего образца графитового материала, то при ионном облучении макроразмеры волокна измениться не могут, и аккомодация напряжений в оболочке путем пластической деформации вызывает ее гофрирование. Для пластической деформации графита характерным является двойникование с формированием морфологических элементов призматической формы.

#### Список литературы

- [1] Carter G., J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V.34. pp. R1-R22.
- [2] Begrambekov L., Brosset C., Bucalossi J., et al., J. Nucl. Mater. 2007. V. 363-365. P. 1148-1152.
- [3] Андрианова Н.Н., Аникин В.А. Борисов А.М., Машкова Е.С., Казаков В.А., Овчинников М.А., Савушкина С.В., Изв. РАН. Сер. физич. 2018. Т. 82. С. 140–145.
- [4] Burchell T.D., MRS Bulletin. 1997. V. 22(4). P. 29-35.

А.С. АРАКЧЕЕВ<sup>1,2,3</sup>, А.В. БУРДАКОВ<sup>1,2,3</sup>, И.В. КАНДАУРОВ<sup>1,2</sup>,  
В.В. КУРКУЧЕКОВ<sup>1</sup>, В.А. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, Л.И. ШЕХТМАН<sup>1</sup>,  
М.Р. ШАРАФУТДИНОВ<sup>4</sup>, Б.П. ТОЛОЧКО<sup>1,4</sup>, Ю.А. ТРУНЕВ<sup>1</sup>,  
А.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1,2</sup>, Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский государственный технический университет”

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук

## **СТАТУС ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЛЬФРАМ В ИЯФ СО РАН**

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске был разработан испытательный комплекс ВЕТА (Beam of Electrons for material Test Applications) [1] на основе интенсивного импульсного электронного пучка. Комплекс предназначен для экспериментального моделирования воздействия на материалы интенсивных переходных тепловых нагрузок с длительностью и плотностью мощности, аналогичными этим параметрам, ожидаемым в диверторе ИТЭР. Важным отличием комплекса от многих других установок, также предназначенных для экспериментального моделирования воздействия импульсных тепловых нагрузок на материалы, является возможность исследование модификации материала во время воздействия тепловой нагрузки и непосредственно сразу после неё. Электронный пучок позволяет широко варьировать тепловую нагрузку от величины в несколько раз ниже порога плавления вольфрама, до величины, в шесть раз превышающей ее. Нагреваемая площадь порядка  $1 \text{ см}^2$ , что значительно превышает характерные размеры деструктивных процессов, таких как ячейки сети трещин, горячие области и неоднородности расплава. Использование электронного пучка для моделирования теплового воздействия на поверхность материала позволяет применить разнообразную оптическую диагностику для наблюдений *in situ* динамики процессов поверхностной эрозии при интенсивных термических ударах.

Недавно на установке ВЕТА были получены первые результаты с использованием быстрой визуализации нагретой поверхности образца вольфрама в его собственном тепловом излучении и при освещении светом непрерывного лазера [2, 3]. Неравномерное распределение температуры по всей поверхности, которая нагревается равномерно, наблюдалось во время нагрева и последующего охлаждения. Сеть трещин была видна из-за их более интенсивного теплового излучения. Визуализация с лазерной подсветкой показала начало процесса плавления, которое происходило вблизи пересечений трещин и их краев [2, 3]. Движение слоя расплава под тепловой нагрузкой выше порога плавления наблюдалось в течение одного импульса нагрева с использованием четырех независимых ПЗС-камер. Четыре кадра были записаны с экспозицией 10 мкс и частотой кадров 50 кГц с разрешением 1,4 мегапикселей [1]. Динамика и распределение микрочастиц, выбрасываемых из слоя расплава, изучались с помощью многоканальной регистрацией света непрерывного лазера, дифрагированного на этих микрочастицах, а также их быстрой визуализацией с помощью ПЗС камер. Дифракция использовалась для изучения временного изменения интенсивности потока микрочастиц и характерного размера микрочастиц, выбрасываемых из расплава, в зависимости от интенсивности импульсного нагрева. Используя эту методику, был обнаружен порог интенсивности нагрева вблизи  $HFF = 170 \text{ МДж м}^{-2} \text{ с}^{-0,5}$ , начиная с которого начинает быстро расти количество вольфрама, испускаемого из расплава в виде микрочастиц размером 5-10 мкм [4, 5].

Были разработаны два новых оптических метода для наблюдения *in situ* процесса эрозии вольфрама: непрерывная регистрация рассеяния лазерного излучения от нагретой поверхности и трехмерное отслеживание микрочастиц с помощью быстрых ПЗС камер при трех разных углах обзора. Первые эксперименты с этими диагностиками выявили неожиданно большие задержки растрескивания поверхности под воздействием теплового удара и очень короткую длительность процесса растрескивания, происходящего почти одновременно на всей площади нагрева. Это явление характерно для вольфрама с параллельной и перпендикулярной ориентацией зерен и требует дальнейшего изучения как экспериментального, так и теоретического. Пространственная и временная локализация выброса микрочастиц с поверхности расплава вольфрама допускает интерпретацию с помощью ранее разработанной теоретической модели кипения перегретой жидкости. Сама

диагностическая техника полезна для исследования механизмов разбрызгивания расплава в различных экспериментальных условиях [6].

Кроме оптических диагностик для динамического измерения воздействия импульсного нагрева на материалы сейчас разрабатывается диагностика на основе рассеяния синхротронного излучения на станции “Плазма” [7]. Такая диагностика имеет три принципиальные особенности: измерения с временным разрешением, измерения внутри материала и измерения с пространственным разрешением. Для реализации этой диагностики используется схема дифракции Лауэ на вольфрамовом монокристалле толщиной до 500мкм. Тепловая нагрузка симулируется YAG лазером с энергозапасом до 50 Дж и длительностью около 140мкс. При тепловой нагрузке деформируется кристаллическая плоскость, на которой происходит дифракция. Из-за этого меняется положение и форма дифракционного пика. Форма и положение дифракционного пика измеряется детектором DIMEX [8]. Детектор снимает 30 кадров длительностью 10мкс. По измерению формы пика планируется восстановить динамику распределения деформаций в материале при импульсной тепловой нагрузке. На данный момент продемонстрировано измерение динамики формы дифракционного пика.

#### **Список литературы**

- [1] Vyacheslavov L.N. et al. 2016 AIP Conf. Proc., 1771, 060004.
- [2] Vasilyev A.A. et al. 2016 AIP Conf.Proc., 1771, 060013.
- [3] Vasilyev A.A. et al. 2016 Nucl.Matter Energy 12 553.
- [4] Kasatov A.A. et al. 2016 AIP Conf. Proc., 1771, 060007.
- [5] Vyacheslavov L.N. et al. 2017 Nucl. Matter and Energy, 12, 494.
- [6] Vyacheslavov L.N. et al. 2018 Phys. Scr., 93, 035602.
- [7] Arakcheev A.S. et al. 2016 Physics Procedia, 84, 184.
- [8] V.M. Aulchenko et al. 2008 JINST, 3, P05005.

Н.А. БАБИНОВ<sup>1,2</sup>, Л.А. ВАРШАВЧИК<sup>1</sup>, П.А. ЗАТЫЛКИН<sup>1</sup>,  
А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1,2</sup>, А.Н. БАЖЕНОВ<sup>1</sup>, И.М. БУКРЕЕВ<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1</sup>,  
А.Н. КОВАЛЬ<sup>1</sup>, Г.С. КУРСКИЕВ<sup>1</sup>, А.Е. ЛИТВИНОВ<sup>1</sup>,  
С.В. МАСЮКЕВИЧ<sup>1</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>, А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>,  
Д.С. САМСОНОВ<sup>1</sup>, В.А. СОЛОВЕЙ<sup>1</sup>, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ<sup>1</sup>,  
И.А. ХОДУНОВ<sup>1</sup>, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1</sup>, АЛ.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>,  
АН.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, П.В. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Н.С. ЖИЛЬЦОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА И ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЧИСТЯЩЕМ ВЧЕ-РАЗРЯДЕ ИТЭР**

Термоядерные установки следующего поколения, такие как ИТЭР, будут иметь длительности импульсов и параметры плазмы, значительно превышающие таковые у современных токамаков [1]. Для сбора экспериментальных данных и выполнения основной научной программы на ИТЭР будет применяться большое количество диагностик, в том числе более 20 оптических. В отличие от диагностик на существующих токамаках, оптические диагностики ИТЭР будут иметь внутривакуумные оптические элементы, которые должны сохранять оптические характеристики в течение длительного времени эксплуатации. Одним из основных факторов, ведущих к деградации оптических элементов, является осаждение продуктов эрозии первой стенки, что влияет на работоспособность всей диагностической системы. Для обеспечения длительного срока службы оптических диагностик необходимы меры по защите оптических элементов - пассивной (оптимизация диагностических каналов с целью уменьшения осаждения) и активной (периодическая чистка).

В настоящее время чистка оптических элементов в плазме ВЧЕ-разряда рассматривается как наиболее перспективный вариант [2, 3]. В процессе чистки перед оптическим элементом зажигается газовый разряд, в плазме которого генерируются ионы, которые затем ускоряются в приэлектродном слое и бомбардируют поверхность, распыляя ее. Перенос и дальнейшее осаждение распыленных частиц имеет существенное значение для процесса чистки, влияя на ее эффективность и равномерность. Особенно большое значение они приобретают в условиях, когда под действием ионной бомбардировки распыляется не только поверхность оптического элемента, но и окружающие конструкции.

Для разработки эффективной системы чистки необходимо учитывать процессы транспорта и осаждения распыленного вещества в сложной трехмерной геометрии диагностических каналов. Численное моделирование этих процессов позволит решить эту задачу, упростив процесс разработки системы чистки.

Моделирование транспорта распыленных атомов в разреженном газе имеет ряд особенностей. Распыленные атомы распределены по энергии в диапазоне нескольких эВ [4]. В процессе столкновений с атомами газа они снижают свою энергию до тепловой ( $\sim 0.025$  эВ). В этом диапазоне энергий сечения упругих столкновений нейтральных частиц имеют сильную энергетическую зависимость, которую необходимо учитывать.

Экспериментальное определение сечений упругих столкновений в интересующем диапазоне энергий крайне затруднен и требуемые для расчета данные в литературе отсутствуют. В связи с этим, был рассчитан полный набор необходимых данных рассеяния, включая полные и дифференциальные сечения столкновения, а также скоростные коэффициенты в широком диапазоне энергий для транспорта атомов бериллия и золота в атмосферах инертных газов. Расчеты проводились в классическом приближении, для описания взаимодействия частиц использовался потенциал Леннарда-Джонса, хорошо подходящий для описания взаимодействия инертных газов [5].

Расчет транспорта распыленных частиц проводился с учетом сильного изменения скорости, при котором происходит изменение режима их движения. Обычно для описания движения нейтральных частиц в газе используют два приближения значительно упрощающих расчет: приближение холодного газа, когда скорость покидающих поверхность частиц существенно больше тепловой скорости частиц [6] или приближение постоянной частоты столкновений, которое верно после термализации частиц, когда их скорость становится тепловой. Однако, корректное описание процесса перехода от высоких к тепловым скоростям приводит к необходимости прямого учета тепловых скоростей частиц газа при столкновениях.

Код KITE [7], разработанный для моделирования транспорта распыленного вещества в разреженном газе и слабоионизованной плазме, учитывает сложные энергетические зависимости дифференциальных сечений рассеяния и тепловую скорость частиц газа.

Экспериментальная валидация численного кода была проведена по моделированию осаждения атомов золота, распыленных с поверхности нагруженного электрода ВЧЕ-разряда в атмосфере неона при двух

давлениях, 1 и 10 Па. Осажденные атомы собирались на коллекторах из монокристаллического кремния. Толщина осадений анализировалась с помощью оптической эллипсометрии, а часть образцов была исследована также с помощью метода обратного резерфордского рассеяния.

Полученные экспериментальные профили рассеяния хорошо совпадают с результатами моделирования в коде КИТе. Небольшие отклонения на коллекторах, расположенных вблизи плоскости нагруженного электрода, связаны, скорее всего, с неоднородностью профиля травления, которое на данном этапе моделирования не учитывалась.

В численном эксперименте моделирование транспорта бериллия было проведено в цилиндрической геометрии в атмосфере гелия при давлениях от 1 до 10 Па, охватывающих диапазон рабочего давления в чистящем ВЧ-разряде разрабатываемого для чистки оптики в ИТЭР. Моделирование показало существенное влияние переосаждения на однородность и скорость чистки для оптического элемента даже небольшого размера (диаметр 8 см). При увеличении площади поверхности и усложнении геометрии влияние процессов транспорта и осаждения распыленных частиц будет увеличиваться.

Дальнейшее направление развития исследований связано с переходом к трехмерному расчету первого оптического элемента и окружающих контрукций, который позволит исследовать процессы транспорта распыленных частиц, а также оптимизировать контрукцию с целью минимизации негативного влияния переосаждения распыляемых частиц на очищаемую поверхность.

### **Список литературы**

- [1] ITER-JCT and Home Teams (presented by G Janeschitz) 1995 Plasma Phys. Control. Fusion 37 A19
- [2] F. Leipold et al., Cleaning of first mirrors in ITER by means of radio frequency discharges // Review of Scientific Instruments, 2016, DOI: 10.1063/1.4962055
- [3] A M Dmitriev et al 2017 Phys. Scr. 2017 014072
- [4] Thompson MW. Philos Mag 1968;18:38
- [5] G. M. Turner et al 1989 J. Appl. Phys. 65, 3671
- [6] Z. Donko Plasma Sources Sci. Technol. 20 (2011) 024001 (15pp)
- [7] L. Varshavchik et al, Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas, *submitted for publication in Plasma Physics and Controlled Fusion*

Д.М. БАЧУРИНА, А.Н. СУЧКОВ, О.Н. СЕВРЮКОВ,  
М.А. ПЕНЯЗЬ, Б.А. КАЛИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**РАЗРАБОТКА СПЛАВОВ-ПРИПОЕВ ДЛЯ ВЫСОКО-  
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ СТАЛИ  
С ВОЛЬФРАМОМ ДИВЕРТОРА И ПЕРВОЙ СТЕНКИ  
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЕМО**

Разрабатываемые конструкции первой стенки и дивертора термоядерного реактора ДЕМО требуют создания неразъемного соединения между малоактивируемой сталью и вольфрамом. Данная задача является сложной вследствие значительных различий их коэффициентов термического расширения, что приводит к формированию больших остаточных напряжений, как во время эксплуатации, так и во время технологического процесса. На сегодняшний день, предлагаемые твердофазные технологии (диффузионная сварка, СПС и др.) не дают возможности получать крупногабаритные образцы и образцы сложной геометрии. Что касается технологии пайки, предлагаемые припои либо не удовлетворяют температурным критериям, либо состоят из химических элементов, неудовлетворяющих требованию малоактивируемости.

В данной работе для соединения стали ЭК-181 с вольфрамом предлагается использовать высокотемпературную пайку припоями, состоящими из малоактивируемых элементов. Данные припои получены по технологии сверхбыстрой закалки из расплава. Для дополнительного снижения остаточных напряжений предложено использование компенсирующих проставок. Изучено структурно-фазового состояния паяных соединений, проведена оценка их прочности и стойкости к термоциклическим нагрузкам.

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, О.И. БУЖИНСКИЙ, А.А. АЙРАПЕТОВ,  
А.В. ГРУНИН, А.М. ЗАХАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ,  
А.С. КАПЛЕВСКИЙ, С.С. ДОВГАНЮК

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ВОЗОБНОВЛЯЕМОЕ ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ КАРБИДА БОРА ДЛЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК**

История термоядерных исследований в последние десятилетия связана с использованием, в основном, углеграфитовых и вольфрамовых (бериллий-вольфрамовых) контактирующих с плазмой элементов. Переход к последним был обусловлен, главным образом, тем, что имеющиеся экспериментальные результаты указывали на высокие коэффициенты распыления углеграфитовых материалов, удержание в них больших количеств изотопов водорода, соответственно, свидетельствовали о большом рециклинге водорода, о попадании в плазму больших количеств углерода и возможности формирования в дальнейшем графитовой пыли с высокой концентрацией трития и т.п. Последующие эксперименты в термоядерных установках (в частности, на JT-60) и в лабораторных стендах показали, что интенсивности перечисленных выше процессов при выполнении определённых инженерных решений и в условиях интенсивного плазменного облучения оказываются намного меньшей критических. Вместе с тем, следует отметить, что невозможность восполнения приемлемыми технологическими процедурами эрозии углеграфитовых материалов под действием плазменного воздействия, по-видимому, явится препятствием для их использования в термоядерных установках с длинными импульсами.

Непригодность вольфрамовых (бериллий-вольфрамовых) контактирующих с плазмой элементов для термоядерных установок будущих поколений также признаётся всё большим числом исследователей. Такое заключение базируется, как на проблемах с получением высоких параметров плазмы в токамаках с металлической облицовкой, так и на результатах анализа целой серии процессов, имитируемых взаимодействием плазмы с вольфрамом, бериллием и их композициями и связанных, чаще всего с наличием поверхностных оксидных слоёв на обоих металлах. В этом ряду можно назвать отсутствие насыщения при захвате изотопов водорода в обоих металлах, и, в частности, их удержание вплоть до температур  $\approx 1400$  К в

перенапылённых W-Be слоях, «супер пластичность вольфрама» и соответствующее понижение температуры плавления приповерхностных слоёв при интенсивном плазменном облучении, обуславливающее, по-видимому, распыление вольфрама ионами с энергией меньше пороговой, интенсивную эрозию при дугообразовании и появление капельной фракции при интенсивном плазменном облучении. Наконец, практическая невозможность, как адекватного восстановления *in situ* распылённых частей тайлов, так и удаление металлической пыли делает крайне затруднительным использование в термоядерных установках с длинным импульсом контактирующих с плазмой элементов, выполненных из вольфрама, бериллия, так же, как и из других металлов и из углеграфитовых материалов.

Предотвратить непосредственное воздействие плазмы на облицовочные материалы плазменной камеры возможно при использовании *in situ* возобновляемых защитных покрытий. Осаждение защитных борсодержащих пленок на контактирующие с плазмой элементы термоядерных установок (боронизация), выполненные из графитов, углеродных композитов и т.п., применялось в течение целого ряда лет, а в последние годы боронизация с успехом используется для преодоления проблем установок, использующих металлические тайлы первой стенки и дивертора. Боронизация выполняется, как правило, в плазме тлеющего разряда гелия. При этом на поверхности формируется аморфное покрытие, состоящее из фрагментов водородо-боро-углеродных молекул, быстро разрушающееся под действием плазмы во время рабочих импульсов установки.

О.И. Бужинским с соавторами в ряде работ было предложено использовать в качестве защитного покрытия слои кристаллического карбида бора ( $B_4C$ ), которые могут осаждаться на контактирующие с плазмой поверхности и возобновляться в процессе рабочих разрядов, а продукты разложения покрытия могут быть удалены по разработанной технологии при зажигании тлеющего разряда.

Свойства кристаллического карбида бора как контактирующего с плазмой материала значительно отличают его от графитов и других углеродных материалов, используемых в термоядерных исследованиях.

Процессы химического распыления, ионно-стимулированной десорбции и радиационно-ускоренной сублимации на поверхности кристаллического карбида бора, практически, не проявляются. В результате скорость его эрозии при облучении ионами водорода намного ниже, чем у графита при тех же условиях облучения, и мало изменяется до температуры 1400 °С.

Захват изотопов водорода в карбид бора в несколько раз меньше, чем в мелкозернистые плотные графиты и CFC.

Водород захватывается, практически, только в зоне торможения ионов. Захват водорода насыщается, т.е. водород, практически, не распространяется в глубину. Тритий, внедрённый в покрытие  $B_4C$ , может быть удалён при последующем облучении низкоэнергетичными ионами водорода.

В экспериментах на токамаке T-10M покрытие  $B_4C$  на вольфраме сохраняло адгезию к подложке даже после своего плавления ( $\approx 2500$  °C) и предотвращало воздействие плазмы на вольфрам вплоть до его плавления.

Формирование покрытия карбида бора на контактирующих с плазмой поверхностях проводилось в установке PISCES-B, в токамаке T11M, в стеллараторе J-2M. В качестве рабочего вещества в экспериментах использовался нетоксичный, невзрывоопасный и сравнительно дешёвый карборан ( $C_2B_{10}H_{12}$ ). Пары карборана напускались в установки, и покрытие формировалось во время рабочих импульсов установок из атомов бора и углерода, оседающих на поверхность. Скорость напыления достигала 30 нм/с, что примерно в тысячу раз превышает скорость боронизации в тлеющем разряде.

Продукты эрозии покрытия  $B_4C$  могут газифицироваться и удаляться из установки тлеющим разрядом.

Перечисленные выше и другие свойства покрытий карбида бора, а также возможность формирования покрытий в процессе рабочих разрядов установок и удаление из установок продуктов их эрозии, позволяет сделать заключение о целесообразности проведения работ по разработке методики их использования в термоядерных установках.

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>3</sup>,  
А.В. ВЕРТКОВ<sup>3</sup>, Г. ВАН ООСТ<sup>1,4,5</sup>, Ю.В. МАРТЫНЕНКО<sup>2</sup>,  
М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>2</sup>, А.В. ЛАЗУКИН<sup>1</sup>,  
А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Д.Н. ГЕРАСИМОВ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>,  
Е.А. ШЕСТАКОВ<sup>2</sup>, Д.С. ГВОЗДЕВСКАЯ<sup>1</sup>, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ<sup>1</sup>,  
К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>, А.С. РЫЖОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

<sup>2</sup>НИИЦ Курчатовский институт, Москва

<sup>3</sup>АО «Красная звезда», Москва

<sup>4</sup>Университет Гент, Гент

<sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

## **ИСПЫТАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ С ОЛОВОМ ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКЕ В ПЛМ**

Использование капиллярно-пористых систем (КПС) с жидкими металлами рассматривается для решения проблем, связанных с применением традиционных твёрдых материалов при разработке обращённых к плазме внутрикамерных компонентов (ВК) термоядерного источника нейтронов (ТИН) и реактора типа ДЕМО [1—3]. Основными преимуществами КПС по сравнению с твёрдыми материалами являются их устойчивость к деградации свойств и способность к самовосстановлению поверхности ВК на основе капиллярных сил в условиях нормального разряда термоядерного реактора, ЭЛМов и срывов. В качестве возможных легкоплавких металлов для применения в токамаках [1—3] рассматриваются литий Li, олово Sn, галлий Ga. Верхний предел рабочей температуры ВК для всех рассматриваемых легкоплавких металлов лежит в интервале 550—600 °С. Для ВК с Li преимуществом является ограничение по допустимому потоку атомов в плазму, для Sn — коррозионная стойкость конструкционных материалов. Верхний предел тепловых нагрузок для КПС с жидкими металлами Li и Sn в стационарном режиме работы близок к 18—20 МВт/м<sup>2</sup>. Из анализа физических свойств [1] следует, что существенным преимуществом Sn является низкое давление насыщенных паров над поверхностью расплава (высокая температура кипения) по сравнению с Li. Для Sn температурный предел применения, определяемый предельно допустимым потоком испаренных атомов в плазму, составляет выше 600°С, что и является основной мотивацией для рассмотрения в качестве материала, обращённого к плазме токамака.

В плазменной установке ПЛМ [4] были проведены плазменные испытания капиллярно-пористой системы (КПС) с оловом Sn. Образец КПС размером  $15 \times 15 \times 1$  мм изготовлен в АО «Красная Звезда» и представляет собой пористый мат из молибденовой сетки, пропитанный жидким оловом (рис. 1а). Эта КПС изготовлена по образцу литиевых КПС, используемых в экспериментах в токамаках Т-10, Т-11М в качестве элемента первой стенки для обеспечения улучшенных характеристик первой стенки под действием плазменной нагрузки. Оловянная КПС в стационарной плазме испытывалась впервые. Эта КПС была закреплена в конструкции из нержавеющей стали (в виде цилиндрической ванны диаметром 20 мм высотой 2 мм) марки 12Х18Н10Т для фиксации, рис. 1а. К этой ванне был приварен тестовый модуль в виде пластины, на которую был установлен референтный штабик олова размера  $3 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>.

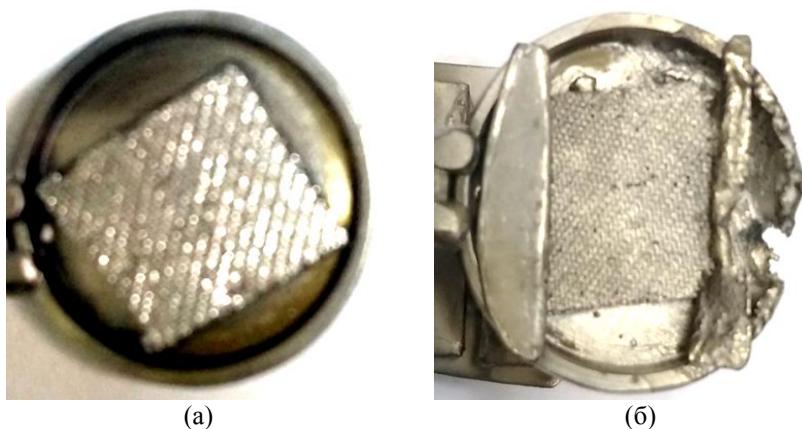


Рис.1. Капиллярно-пористая система с оловом Sn и молибденовой сеткой в ванне из нержавеющей стали: (а) до испытаний, (б) после плазменного облучения в ПЛМ.

Такой модуль погружался в плазму установки и в течение 3 часов испытывался в гелиевом разряде с параметрами плазмы: плотность около  $1 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, температура электронов 2-5 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ. В течение экспозиции оптические наблюдения и регистрации нагрева модуля пирометрами зарегистрировали его нагрев до температуры 950-1000°С (рис. 2а), визуально наблюдалось плавление референтного штабика олова на модуле. Плазменная нагрузка оценивалась на уровне 1 МВт/м<sup>2</sup>. Проведены измерения оптических

спектров, которые зарегистрировали в плазме линию однократно ионизованного олова (рис. 2б,в,г).

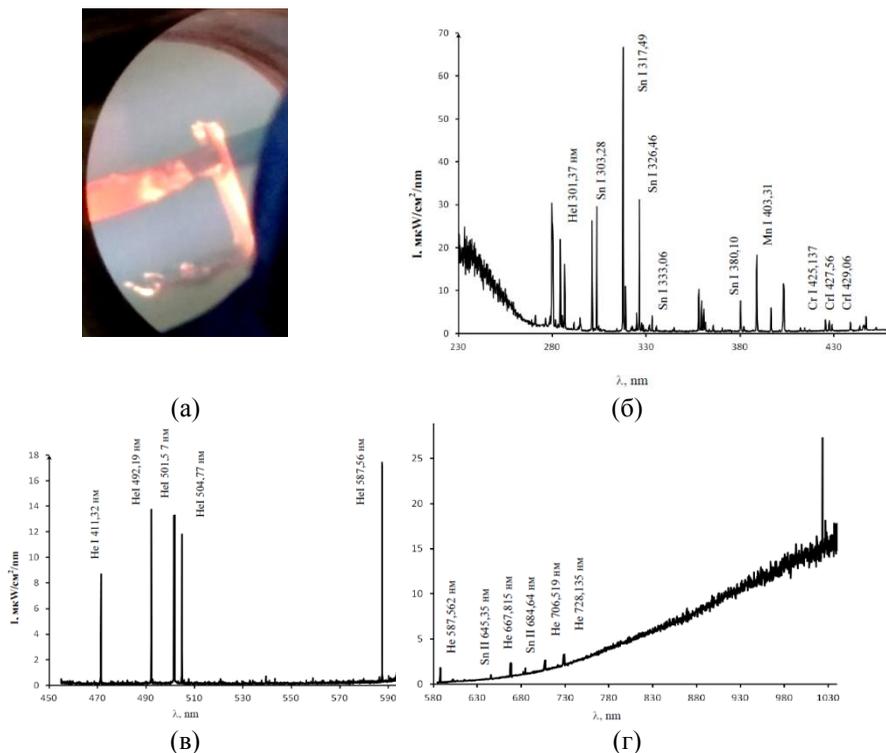


Рис. 2. (а) вид КПС с оловом в плазме ПЛМ, (б) - (г) оптические спектры.

После экспозиции модуль инспектировался. Обнаружены значительные зоны (несколько квадратных миллиметров) оплавления нержавеющей стенки ванны, рис. 1б. Вместе с тем, форма оловянной КПС не изменилась, не обнаружено истечение и заметных потерь олова из КПС. Это может свидетельствовать об удовлетворительной стойкости оловянной КПС при повышенных плазменных нагрузках.

Этот проведенный эксперимент может быть основанием для дальнейшего проведения широкомасштабных исследований стойкости оловянных жидкометаллических внутрикамерных компонентов при высоких плазменных нагрузках и оценки перспективы использования в термоядерных установках и плазменных двигателях.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-19-01469.

**Список литературы**

- [1] И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, В.В. Семенов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 1, с. 7–15.
- [2] S.V. Mirnov et al. J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 224—228.
- [3] S.V. Mirnov, et al. Fus. Eng. and Des., 2012, vol. 87, p. 1747—1754.
- [4] В.П. Будаев и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23-30.
- [5] В.П. Будаев. Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

<sup>2</sup>НИИЦ Курчатовский институт, Москва

## О ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ В ДИВЕРТОРЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА-ТОКАМАКА

Рассмотрена проблема предельной плазменно-тепловой нагрузки на диверторные пластины в токамаке-реакторе. На основании обзора имеющихся экспериментальных данных, полученных в токамаках, отмечается, что подавляющая часть теплового потока из плазмы на стенку поглощается поверхностью в узком радиальном слое шириной несколько миллиметров в зоне контакта сепаратрисы с диверторными пластинами. В дополнение к предложенной ранее С.В. Мирновым [1] оценке  $P_H/S$  предельной плазменно-тепловой нагрузки на стенки в токамаках, в настоящей работе предлагается рассмотреть дополнительные эффекты, ожидаемые в стационарном режиме токамака-реактора – формирование неоднородной микроструктуры и пористости поверхности, взаимодействующей с мощными потоками плазмы.

В течение длительной эксплуатации обращенных к плазме элементов дивертора и первой стенки в стационарном режиме токамака-реактора их материальные поверхности в условиях высоких плазменно-тепловых нагрузок будут подвержены значительной эрозии с изменением макро- и микроструктуры [2]. В реакторе наибольшая эрозия и изменение рельефа поверхности ожидаются в зоне узкого контакта сепаратрисы с диверторными пластинами [3,4]. Тепловой поток из плазмы на стенку критически зависит от геометрии поверхности, в том числе, от наличия острых вершин на рельефе, степени шероховатости и неоднородности рельефа, что существенно увеличивает вторичную электронную эмиссию и изменяет условия неамбиполярной диффузии. Следует ожидать значительное увеличение теплопередачи за счет дугообразования на шероховатой и пористой металлической поверхности (см. [5]).

Учитывая предложенный критерий [1] предельного значения плотности теплового потока  $P_H/S = 0,2 \text{ МВт/м}^2$ , (где  $P_H$  - мощность нагрева плазмы или, в стационаре, мощность ее полных тепловых потерь, а  $S$  - площадь первой стенки, обращенной к плазме), для токамака-реактора **следует рассмотреть преимущественно вклад в такой эффект от условий в зоне контакта сепаратрисы с материальной поверхностью в диверторе**. Для стационарного режима токамака-реактора следует рассмотреть баланс между (1) суммарным тепловым потоком, выносимым

частицами плазмы из центральной зоны разряда через последнюю замкнутую поверхность (ПЗМП) и (2) потоком тепла, преимущественно поглощаемым узким слоем поверхности вблизи контакта сепаратрисы с диверторными пластинами (радиальная ширина такого слоя может быть всего несколько миллиметров). В оценке баланса следует учитывать предел поглощения потока тепла (на единицу площади) материалом в зоне контакта с сепаратрисой [6].

В результате рассмотрения такого баланса и учета критерия  $R_H/S$  можно получить степенную взаимозависимость параметров плазмы  $T_{sep}$  и  $n_{sep}$  вблизи сепаратрисы: при экстремально высоких потоках тепла в дивертор температура электронов  $T_{sep}$  и плотность  $n_{sep}$  на сепаратрисе соотносятся как:

$$T_{sep} \sim n_{sep}^{-2} \quad (1)$$

Зависимость (1) предполагает уменьшение температуры электронов с увеличением плотности. Это отражает наблюдаемые в современных экспериментах с H-режимами эффекты падения электронной температуры с увеличением плотности плазмы или потоков частиц плазмы на сепаратрисе: в экспериментах на токамаках JET, D-III-D (см. рис. 3 в [7]) и др. наблюдалась похожая зависимость температуры электронов на сепаратрисе от радиального потока частиц на сепаратрисе (он пропорционален плотности плазмы). Степенная зависимость (с отрицательным показателем) электронной температуры от плотности плазмы на сепаратрисе наблюдалась также в экспериментах на токамаке T-10 [8].

В заключение, предельная плазменно-тепловая нагрузка на диверторные пластины в токамаке-реакторе зависит от условий на материальной поверхности и в приповерхностном (пограничном) плазменном слое, в т.ч., от степени неоднородности и шероховатости, вторичной электронной и ионной эмиссии, неамбиполярных и дуговых эффектов. Анализ экспериментальных результатов с выявлением зависимости (1) может способствовать обоснованной оценке баланса тепла в периферии токамака-реактора.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-19-01469.

### **Список литературы**

- [1] Mirnov S.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V.58. P. 022001.
- [2] Будаев В.П. // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
- [3] Eich T., et al. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. P. 093031.

- [4] Goldston R.J. // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 013009.
- [5] Khimchenko L., e a. // Proc. 27th IEEE Symposium On Fusion Engineering (SOFE). Book of Abstracts. T.OA2.496. 06 June 2017, Shanghai (2017) P.153.
- [6] Stangeby P.C. The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices. Bristol: Institute of Physics, 2000.
- [7] Porter G.D., e a // J. Nuclear Materials. 1999. V. 266-269.P. 917.
- [8] Budaev V.P., Grashin S.A., e a, Proc. 33<sup>rd</sup> EPS Conference on Plasma Phys. Rome, 19 - 23 June 2006. ECA 2006.Vol.30I. P-4.108.

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, Ю.В. МАРТЫНЕНКО<sup>2</sup>,  
 А.В. КАРПОВ<sup>2</sup>, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.П. СЛИВА<sup>1</sup>, А.В. ЛАЗУКИН<sup>1</sup>,  
 Г. ВАН ООСТ<sup>1,4,5</sup>, А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Д.Н. ГЕРАСИМОВ<sup>1</sup>,  
 М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, И.В. ВОИНКОВА<sup>1</sup>, Е.А. ШЕСТАКОВ<sup>2</sup>,  
 Д.С. ГВОЗДЕВСКАЯ<sup>1</sup>, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ<sup>1</sup>, К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва  
<sup>2</sup>НИЦ Курчатовский институт, Москва  
<sup>3</sup>Университет Гент, Гент

## ИСПЫТАНИЕ ВОЛЬФРАМА СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ И ПУЧКОВЫМИ НАГРУЗКАМИ

На установке ПЛМ [1] проведены серии экспериментов с образцами из различных марок вольфрама (ВМП марки ИТЭР, ВМ), которые облучались гелиевой плазмой в стационарных разрядах длительностью от 180 минут до 210 минут. Параметры плазмы при облучении были: плотность плазмы  $(0,5-5) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , температура электронов основной фракции 2-5 эВ, с фракцией горячих электронов до 50 эВ, потоки ионов на образец достигали  $10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , энергия ионов на образец достигала 50-70 эВ при подаче потенциала на образец до -108 В.

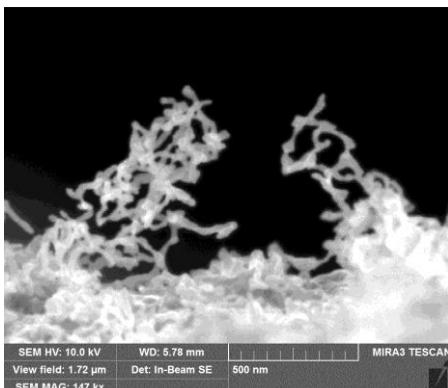
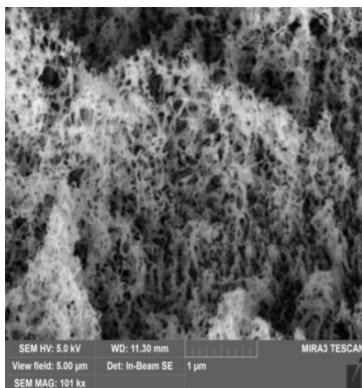


Рис. 1. W «пух» на пластине ВМП после обработки в ПЛМ.

Проведены систематические исследования до и после плазменного облучения вольфрамовых образцов методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской спектроскопии. Анализ полученных микрофотографий показал формирование наноструктурированной

высокопористой поверхности на всех этих образцах. На вольфрамовых мишенях устойчиво формируется наноструктурированная высокопористая поверхность со структурой типа «пух» с размером нановолокон от ~ 20 до ~50 нанометров. Такая поверхность толщиной более микрометра (толщина слоя «пуха» достигает 1,6 мкм, Рис. 1) формируется на вольфраме марки ВМП, сертифицированной ИТЭР и поставленной из НИИЭФА им. Ефремова, вольфрамовой проволоке диаметром 0,5 мм и вольфрамовой фольге толщиной 0,5 мм, Рис. 1.

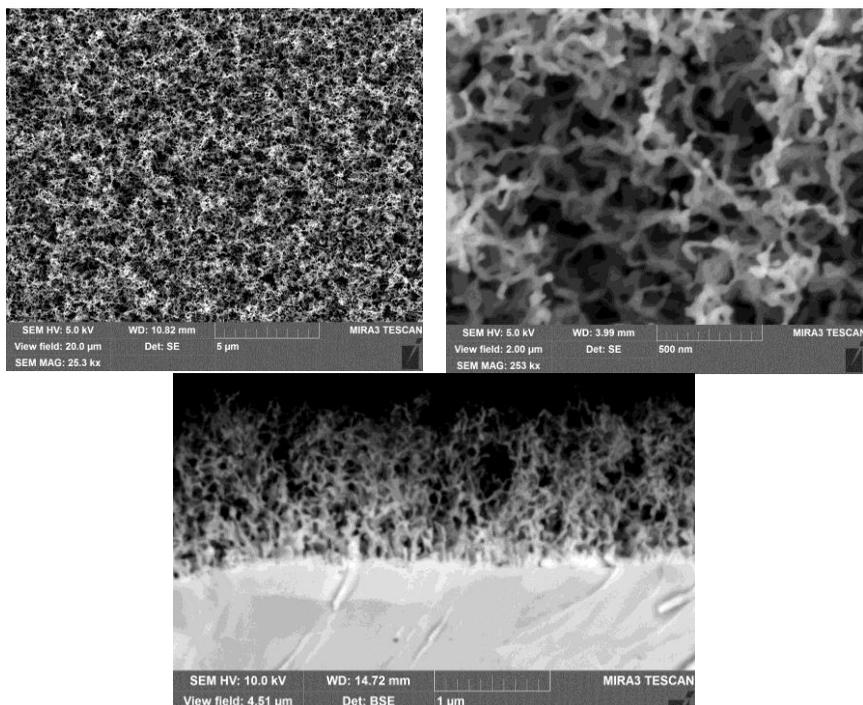
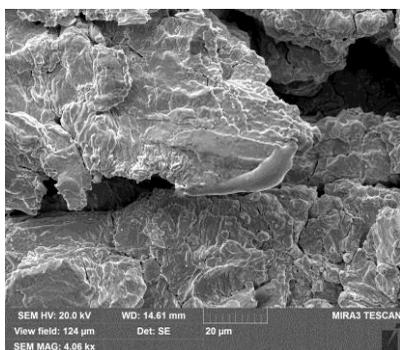
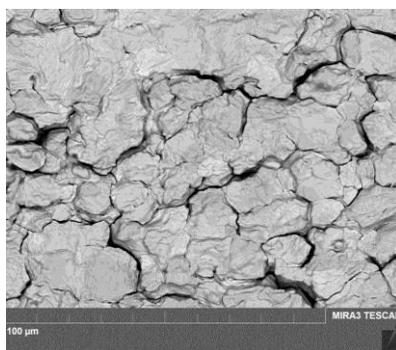


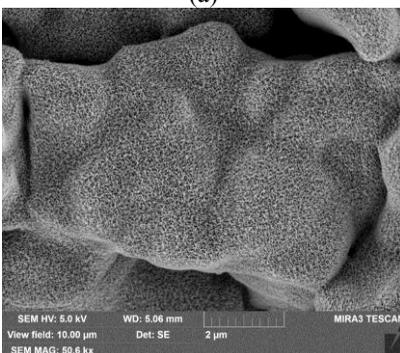
Рис. 2. W «пух» на фольге толщиной 0,1 мм после обработки в ПЛМ.



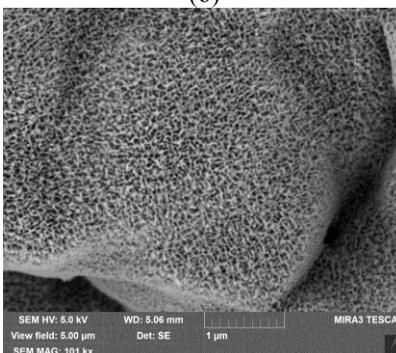
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 3. Поверхность вольфрама ВМП-ИТЭР; (а,б) после обработки электронным пучком  $40 \text{ МВт/м}^2$ ; (в,г) структура типа «пух» формируется на образцах (а,б) после последующей плазменной обработки в ПЛМ.

Был проведен сравнительный анализ поверхности вольфрамовых образцов (изготовленных из материала ВМП ИТЭР) после обработки мощными стационарными тепловыми потоками двух типов: (1) после действия пучковых нагрузок мощностью  $20, 40 \text{ МВт/м}^2$  в установке с электронным пучком НИУ «МЭИ», Рис. 3а,б, и (2) после дальнейшего экспонирования таких обработанных е-пучком пластин в плазменной установке ПЛМ потоками более  $1 \text{ МВт/м}^2$ , Рис. 3в,г. На основе сравнения полученных микрофотографий СЭМ и рентгеновского анализа сделан вывод, что структура поверхности таких образцов значительно отличается. После действия электронного пучка с параметрами нагрузки на вольфрамовую поверхность, аналогичной множественным циклическим

нагрузкам, ожидаемых в токамаке ИТЭР, на мишени наблюдается формирование нано- и микроструктурированной развитой поверхностью с большим количеством трещин различных масштабов, переплавленных зон и неоднородно локализованных кластеров нерегулярной формы (см. Рис. 3а для нагрузки 40 МВт/м<sup>2</sup>). Такая форма поверхности значительно отличается от формы поверхности вольфрамовых мишеней (той же марки) после плазменного облучения в течении 200 минут в установке ПЛМ с нагрузками более 1 МВт/м<sup>2</sup> (Рис. 3в,г) - под плазменной нагрузкой на поверхности формируется наноструктурированная высокопористая поверхность со структурой типа «пух», Рис. 3в,г.

Полученные результаты следует учитывать при анализе условий эрозии и модификации вольфрамовых пластин в диверторе ИТЭР, где ожидаются условия подобные тем, которые были при проведенных испытаниях электронным пучком и плазмой в ПЛМ. Подробный анализ структуры этих поверхностей позволит определить оптимальные условия для дальнейших экспериментов и разработки технологии получения высокопористых наноструктурированных поверхностей.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-19-01469, работы по созданию АСНИ на установке ПЛМ выполнены при поддержке Мегагранта РФ № 14.Z50.31.0042.

#### **Список литературы**

- [1] В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40.3. 23.
- [2] Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель, Физика плазмы 2012. Т. 38.1082.
- [3] S. Kajita et al. Sci Rep. 2018. 8(1) 56.
- [4] В.П. Будаев. Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.

Я.А. ВАСИНА<sup>1,2</sup>, А.Н. ЩЕРБАК<sup>2</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1,2</sup>,  
С.В. МИРНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>2</sup>АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-11М С ПОМОЩЬЮ ЗОНДА МАХА**

Промышленное использование результатов управляемого термоядерного синтеза предполагает переход от импульсных устройств к стационарным, либо квазистационарным. При конструировании таких стационарных установок принципиальным является вопрос выбора материала элементов, контактирующих с плазмой токамака.

Литий, как элемент с малым атомным номером, рассматривается в качестве материала, контактирующего с плазмой токамака. В настоящее время активно исследуются различные аспекты использования, такие как накопление изотопов водорода, влияние на параметры плазмы, технологические аспекты.

Эксперименты на токамаке Т-11М посвящены разработке системы замкнутого контура циркуляции лития. В рамках данной программы необходимо исследовать параметры пристеночной плазмы токамака Т-11М. Для измерения параметров пристеночной плазмы на токамаке Т-11М установлен зонд Маха.

В ходе работы получены радиальные распределения ионного тока насыщения и электронной температуры в различных режимах работы токамака. На радиальном распределении ионного тока насыщения и электронной температуры в L-режиме наблюдается максимум при 4 см, что может быть связано с образованием магнитного острова вблизи вертикального лимитера. Этого не наблюдается в H-режиме, что может быть связано с более слабым взаимодействием плазменного шнура с лимитером.

Получены радиальные распределения электронной температуры и ионного тока насыщения в H-режиме при горячем и холодном вертикальном лимитере (Рисунок 1). По этим данным определена электронная плотность. Наблюдается уплощение профиля электронной температуры при горячем лимитере.

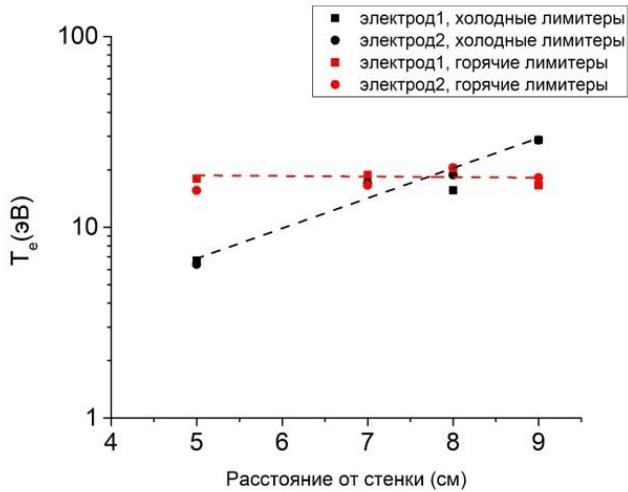


Рисунок 1. Радиальное распределение электронной температуры при горячих и холодных лимитерах

В. ВЕРШКОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>2</sup>, А. В. ВЕРТКОВ<sup>2</sup>,  
М.Ю. ЖАРКОВ<sup>2</sup> И ГРУППА Т-10<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

<sup>2</sup>АО «Красная Звезда», Москва, РФ

## **ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЛИТИЕВОЙ ПОРИСТОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ В ТОКАМАКЕ Т-10 С ВОЛЬФРАМОВЫМИ ДИАФРАГМАМИ**

Выбор материала диверторных пластин и стенки является в настоящее время одной из основных проблем для построения реактора на основе токамака. Одним из рассматриваемых материалов является литий. Возможности применения лития исследовались на токамаке Т-10 с помощью дополнительной подвижной литиевой диафрагмы. При этом основные диафрагмы были сделаны из вольфрама. Подвижная литиевая диафрагма была выполнена на основе капиллярно пористой структуры [1] и была снабжена нагревателем для регулировки температуры перед импульсом токамака. Она использовалась в трех режимах. В первом режиме камера токамака покрывалась литием перед разрядами с помощью испарения. В втором режиме диафрагма вдвигалась в SOL плазмы на различные радиусы в течении разряда. В третьем режиме диафрагма вводилась на радиус основного вольфрамового лимитера и играла роль основной диафрагмы. Результаты первых экспериментов были опубликованы в [2]. В данном докладе суммируются как ранее полученные, так и результаты новых экспериментов.

Было показано, что использование литиевой диафрагмы эффективно уменьшает притоки легких примесей, приходящих со стенок более чем на порядок. В хороших вакуумных условиях эффект уменьшения легких примесей накапливается при использовании литиевой диафрагмы в течение нескольких дней и сохраняется в течение двух-трех недель после прекращения ее использования. Уменьшение легких примесей связано с накопленным в камере количества Li, но не с его потоком в конкретном импульсе. Одновременно со снижением легких примесей также снижается до 30 раз концентрация вольфрама в центральных областях плазмы. Однако это не связано с созданием литиевой защитной пленки на вольфрамовой диафрагме. Уменьшение концентрации вольфрама в центре объясняется снижением в три раза притока вольфрама, так как чистая плазма менее эффективно распыляет вольфрам, чем плазма с многозарядными примесями. Дополнительное снижение в десять раз связано с уменьшением эффекта неоклассической аккумуляции

вольфрама в чистой плазме по сравнению с загрязненной. Эффект накопления лития сильно зависит от вакуумных условий. При плохих вакуумных условиях влияние лития снижается, вероятно, из-за его отравления. В этих условиях приходилось проводить напыление лития каждый день перед разрядами, так как ночная тренировка камеры Тейлоровским разрядом уменьшала эффективность работы ранее напыленного лития. Сильный рост потоков Li при вводе диафрагмы в плазму не влияет на распыление W. То есть потоки Li не формируют стационарную защитную пленку на W диафрагме на больших временах. На малых временах напыление Li перед разрядами образует защитную пленку и уменьшает приток W. Однако это уменьшение исчезает за 3-5 разрядов. Поскольку потоки Li с дополнительной диафрагмы не формируют защитного слоя на основной W диафрагме, то единственным способом исключить приток W является использования Li в качестве материала основной диафрагмы. В экспериментах на T-10 это достигалось путем введения литиевой диафрагмы на радиус основной вольфрамовой диафрагмы. В течении кампании 2017 года было сделано три серии таких экспериментов. Во всех трех случаях при глубоком введении литиевой диафрагмы наблюдался неконтролируемый рост плотности в разряде. В первом импульсе после введения рост плотности происходил, в основном, из-за обезгаживания диафрагмы. В последующих импульсах результирующая плотность в разряде снижалась, однако она все равно оставалась выше запрограммированной. В этих условиях газонапуск дейтерия прекращался и основной приток происходил из-за распыления лития. Измерения с помощью рекомбинационной спектроскопии на диагностическом пучке водорода показали, что концентрация дейтерия в разряде снизилась в два-три раза и основной вклад в электронную концентрацию давал литий. То есть, получалась практически чисто литиевая плазма. Тем не менее радиационные потери литиевой плазмы не превышали 20% от мощности омического вклада. То есть в условиях лимитерной плазмы Li не является эффективным излучателем и не может переизлучить значительную долю вкладываемой энергии даже в омическом разряде. Специальные исследования показали, что Li диффундирует также как все остальные примеси. То есть в условиях лимитерной плазмы не существует специфического механизма экранирования Li. Измеренный ток из плазмы на диафрагму доходил до 11 ампер и приводил к пондеромоторным силам в капиллярной структуре. Эти силы приводили к выбросам капель лития в плазму с одного из концов диафрагмы. При изменении направления магнитного поля капли

наблюдались на ее противоположном конце. В течении кампании периодически проводились контрольные прогревы диафрагмы в вакууме до температуры 420 С<sup>0</sup>. Они показали, что литиевая диафрагма через несколько дней выходит на некоторый уровень гажения дейтерия, однако далее этот уровень не менялся в течении всей кампании. Таким образом, длительная работа диафрагмы, воспринимающей потоки дейтерия из плазмы не приводила к накоплению дейтерия в литии. То есть при рабочих температурах 300-340 °С в Li не происходит накопления дейтерия.

Работа проводилась по контракту с РОСАТОМOM № 1/15470-D/230/1040-18.

#### **Список литературы**

- [1] V.A. Evtikhin, et al., Plasma Phys. Control. Fus. 44 (2002) 95.
- [2] V.A. Vershkov, D.V. Sarychev, G.E. Notkin, et al, Nucl. Fusion 57 (2017) 102017 (15pp)

А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>1</sup>, В.Л. БУХОВЕЦ<sup>1</sup>, А.В. МАРКИН<sup>1</sup>,  
В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ<sup>1</sup>, А.П. ЗАХАРОВ<sup>1</sup>,  
В.Л. ВОЙТИЦКИЙ<sup>1</sup>, А.М. ДМИТРИЕВ<sup>2</sup>,  
А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>2</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

## **ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ И СВЕТОПРОПУСКАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ОКОН В ЧИСТЯЩЕМ ВЧ РАЗРЯДЕ В СМЕСИ D<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>**

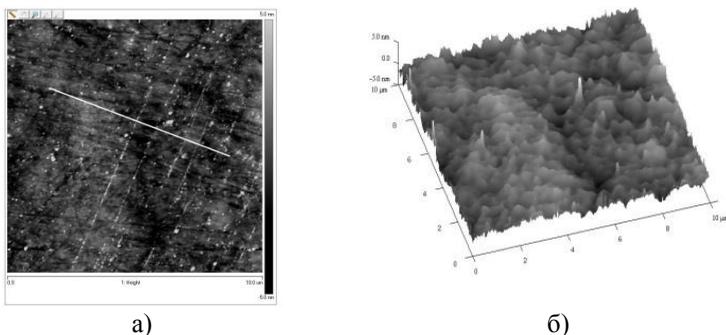
При выборе материала для первого окна, защищающего устройства диагностики Томсоновского рассеяния в диверторе ИТЭР, следует учитывать влияние нейтронных и гамма потоков, проникающих в канал. Одним из наиболее радиационно-стойких материалов, сохраняющим свою прозрачность при радиационных воздействиях, является плавленный кварц КУ-1 (далее КУ) [1]. К радиационному воздействию необходимо добавить возможное осаждение бериллия на поверхность окна, ухудшающего его прозрачность в интервале длин волн 900–1100 нм. В этой связи возникает задача восстановления пропускательной способности КУ после его очистки от Ве.

В наших экспериментах добавление азота в дейтериевую плазму увеличивало скорость распыления Al, Mo и Ве [2]. Поэтому мы предложили и апробировали методику удаления Al (модельного материала, аналога Ве) с поверхности КУ в скрещенных разрядах постоянного тока и высокочастотном разряде (13.56 МГц), далее С-ПТ-ВЧ разряд, в смеси D<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>. Поверхность кварца полностью очищалась от нанесенной пленки Al толщиной 30 нм за 30 мин экспозиции в разряде смеси D<sub>2</sub>/25 мольн.% N<sub>2</sub>. Одна из проблем, возникающая в методике плазменной чистки, связана с вопросом сохранения оптических параметров КУ после удаления металла и продолжающегося воздействия плазменного потока на чистое кварцевое окно. В этой связи необходимо рассмотреть вопросы сохранения светопропускания КУ при длительной экспозиции в чистящей ВЧ плазме. Молекулярный азот обычно химически инертен, но его радикалы и ионы, а также образующийся в плазме аммиак, химически активны по отношению ко многим материалам и, возможно, к плавленому кварцу.

Цель работы – исследование оптической стойкости кварца (коэффициента пропускания света в диапазоне длин волн 400–1000 нм) в плазме D<sub>2</sub> или в плазме смеси D<sub>2</sub>/25 мольн.% N<sub>2</sub> в С-ПТ-ВЧ разряде.

В используемой схеме очистки разряд постоянного тока между полым катодом и заземлённым анодом являлся источником плазмы. ВЧ генератор (мощность 50 Вт) создавал смещение в 300 В на мишени из КУ. Во время опыта давление газовой смеси поддерживалось на уровне 15 Па при температуре образца 60–100 °С.

Наблюдаемые в оптическом микроскопе царапины не снижали коэффициент пропускания пластин КУ, равный  $(93 \pm 0.5)\%$  в интервале длин волн 400–1000 нм.



- а) – топография поверхности площадью  $S_g = 10 \times 10 \text{ мкм}^2$ ;  
 б) – изометрическая проекция рельефа поверхности:  
 $S_g = 100 \text{ мкм}^2$ ;  $S_{ph} = 100 \text{ мкм}^2$ ;  $(S_{ph} - S_g) / S_g = 0.001$

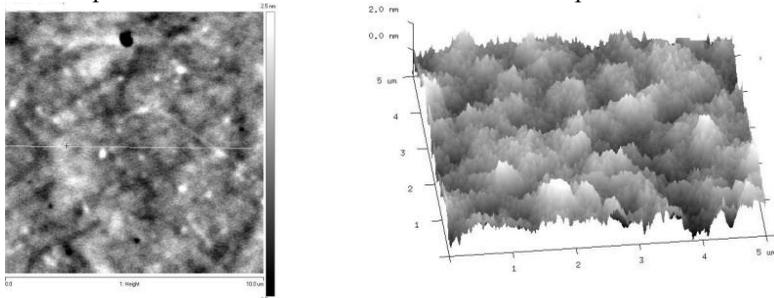
Рисунок 1 – АСМ изображение исходной поверхности кварца КУ

Царапины и следы хрупкого выкрашивания были видны и в атомно-силовом микроскопе (АСМ) (рис. 1а). Ансамбль выступов и впадин, показанный на изометрической поверхности (рис. 1б), – результат пластического выглаживания при финишной полировке. При анализе АСМ изображений следует помнить, что эта поверхность показана в нанометровом масштабе. Реальное соотношение между геометрической ( $S_g$ ) и физической проекциями ( $S_{ph}$ ) небольшое:  $(S_{ph} - S_g) / S_g = 0.001$ . Среднеквадратичная шероховатость поверхности кварца –  $R_q = 1.3 \text{ нм}$ .

#### **Экспозиция пластин кварца КУ в С-ПТ-ВЧ разряде D<sub>2</sub>**

В результате экспозиции в плазме дейтерия в течение 4 часов толщина распыленного слоя кварца оказалась равной  $(135 \pm 10) \text{ нм}$ , а скорость распыления –  $34 \text{ нм/час}$ . После облучения спектры пропускания (СП) исходного кварца и кварца, экспонированного в плазме, практически не различались. При анализе в АСМ шероховатость понизилась до  $R_q = 0.68 \text{ нм}$  (рис. 2).

Согласно данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) в спектре основного уровня Si 2p от облученного кварца присутствовал только пик кремния с максимальной степенью окисления SiO<sub>2</sub>, т.е. дейтериевая плазма не восстанавливала оксид кремния.



а)

б)

а – топография поверхности площадью  $S_g = 10 \times 10 \text{ мкм}^2$ ;

б – изометрическая проекция  $(S_{ph} - S_g) / S_g < 0.001$

Рисунок 2 – АСМ изображение поверхности КУ, экспонированной в С-ПТ-ВЧ разряде D<sub>2</sub>

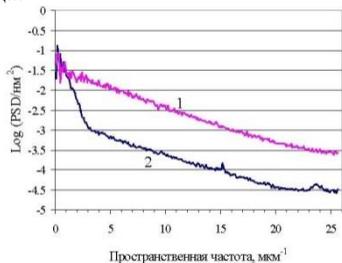
### Экспозиция пластин кварца КУ в С-ВЧ-ПТ разряде D<sub>2</sub>/25 мольн.% N<sub>2</sub>

При экспозиции в указанной смеси (4 часа) был удален слой кварца толщиной 1200 нм (скорость распыления 300 нм/час). Одно из объяснений повышенной скорости распыления – образование на поверхности SiO<sub>2</sub>-ND<sub>3</sub> комплексов, слабо связанных с кварцем [3]. На вновь образованной поверхности шероховатость уменьшилась до значений  $R_q = 1 \text{ нм}$ . По данным СП процесс восстановления SiO<sub>2</sub> до субоксидов или до кремния не обнаружен. СП исходного кварца и кварца, экспонированного в плазме, совпадали.

#### Функции спектральной плотности мощности (СПМ)

На рис. 3 приведены одномерные функции спектральной плотности мощности (СПМ) для исходной и облученной поверхностей КУ. Размерность одномерной СПМ – нм<sup>2</sup>. Физический смысл СПМ – функция показывает, какой вклад вносит конкретная пространственная частота, являющаяся обратно пропорциональной величиной расстояния между отдельными выступами или впадинами, в шероховатость  $R_q$ . Понижение СПМ в интервале пространственных частот 2–26 мкм<sup>-1</sup> свидетельствует о процессе выглаживания поверхности. В результате экспозиции в плазме дейтерия вклад в шероховатость низких частот (масштаб – 1 мкм<sup>-1</sup>),

связанных с механической полировкой, остался прежним. На средних (15 мкм<sup>-1</sup>) и высоких (24 мкм<sup>-1</sup>) частотах наметились два максимума, указывающих на формирование упорядоченных поверхностных структур при распылении кварца.



1 – СПМ исходной поверхности,  $R_q = 1.3$  нм;

2 – СПМ поверхности после экспозиции в дейтерии,  $R_q = 0.67$  нм

Рисунок 3 – Функции СПМ исходной поверхности КУ и после экспозиции в дейтерии в течение 4-ёх часов

### Заключение

При экспозиции кварцевого окна в С-ПТ-ВЧ разряде дейтерия шероховатость понижалась до значений  $R_q = 0.67$  нм. Скорость распыления кварца составила 34 нм/час. В разряде D<sub>2</sub>/25 мольн.% N<sub>2</sub> скорость распыления кварца возросла до 300 нм/час. После удаления слоя кварца толщиной 1200 нм шероховатость составила  $R_q = 1$  нм.

В обоих режимах облучения отсутствовали следы восстановления поверхностных слоев SiO<sub>2</sub> до субоксидов или чистого кремния. Светопропускание окна оставалось неизменным и равным (93 ± 0.5) % в интервале длин волн 400–1000 нм.

Дейтерий и смесь D<sub>2</sub>/25 мольн.% N<sub>2</sub> являются приемлемыми газами для их использования в С-ПТ-ВЧ чистящих разрядах при температурах 20–100 °С и мощности ВЧ разряда в несколько Вт/см<sup>2</sup>.

### Список литературы

- [1] D.V. Orlinski, V.T. Gritsyna // Problems of Atomic Science and Technology 2000. No 3. Series: Plasma Physics (5). P. 60–63.
- [2] V.L. Bukhovets, A.E. Gorodetsky, R.Kh. Zalavutdinov, A.V. Markin, L.P. Kazansky, I.A. Arkhipushkin, A.P. Zakharov, A.M. Dmitriev, A.G. Razdobarin E.E. Mukhin // Nuclear Materials and Energy. 2017. №12. P. 458–461.
- [3] M. Zhou, M. Chen «Reactions of silicon dioxide with ammonia molecules: Formation and characterization of SiO<sub>2</sub>–NH<sub>3</sub> complex and the H<sub>2</sub>NSiOOH molecules» // Chemical Physics Letters. 2001. 349(1). P. 64–70.

А.В. ДЕДОВ<sup>1</sup>, С.В. МИРНОВ<sup>1,2</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,3</sup>, А.Т. КОМОВ<sup>1</sup>,  
С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, А.Н. ВАРАВА<sup>1</sup>, А.В. ЗАХАРЕНКОВ<sup>1</sup>, П.Г. ФРИК<sup>1,5</sup>,  
В.Г. СВИРИДОВ<sup>1</sup>, Д.Н. ГЕРАСИМОВ<sup>1</sup>, А.В. ВЕРТКОВ<sup>4</sup>,  
И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>4</sup>, А.П. СЛИВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

<sup>2</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

<sup>4</sup>АО «Красная Звезда», Москва

<sup>5</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

## СТАТУС РАБОТ В НИУ «МЭИ» ПО ПЛАЗМЕННЫМ, ПУЧКОВЫМ И ТЕПЛОВЫМ ИСПЫТАНИЯМ КОМПОНЕНТОВ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

В НИУ «МЭИ» исследования по проблеме управляемого термоядерного синтеза проводятся с 1979 г. В настоящее время [1], используя современные экспериментальные стенды и установки, проводятся плазменные и пучковые испытания термоядерных материалов, включая вольфрам, конструкционные стали, графитовые и композиционные материалы, макеты диверторных пластин ИТЭР, элементы жидкометаллических систем на основе лития и олова; проводятся исследования теплообмена и гидродинамики в компонентах систем охлаждения термоядерных реакторов, включая модули, обращенные к плазме, в условиях экстремально высоких тепловых нагрузок мегаваттного масштаба. Большинство этих испытаний и исследований выполняются впервые в мире и направлены на решение острых критических вопросов [2] стойкости материалов и компонентов термоядерного реактора в обеспечение участия России в проекте международного токамака-реактора ИТЭР и сооружения отечественных реакторов - термоядерного источника нейтронов ТИН и ДЕМО.

На уникальной плазменной установке ПЛМ [3], рис. 1а, проводятся испытания модулей из различных марок вольфрама (ВМП марки ИТЭР и др.) в стационарных плазменных разрядах длительностью более 200 минут с параметрами: плотность плазмы  $(0,5—5) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , температура электронов основной фракции 2—5 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ, потоки ионов на материал до  $10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , мощность более 1 МВт/м<sup>2</sup>, энергия ионов на образец до 70 эВ при подаче потенциала на образец до -100 В, магнитное поле 0,01 Т, до 0,2 Т в каспах. Такие параметры обеспечивают адекватные условия стационарных плазменных испытаний термоядерных материалов. Получены результаты в гелиевых разрядах: на

поверхности вольфрама формируется наноструктурированная развитая поверхность типа «пух», рис. 1в; это необходимо учитывать при анализе эрозии диверторных пластин в термоядерном реакторе ИТЭР.

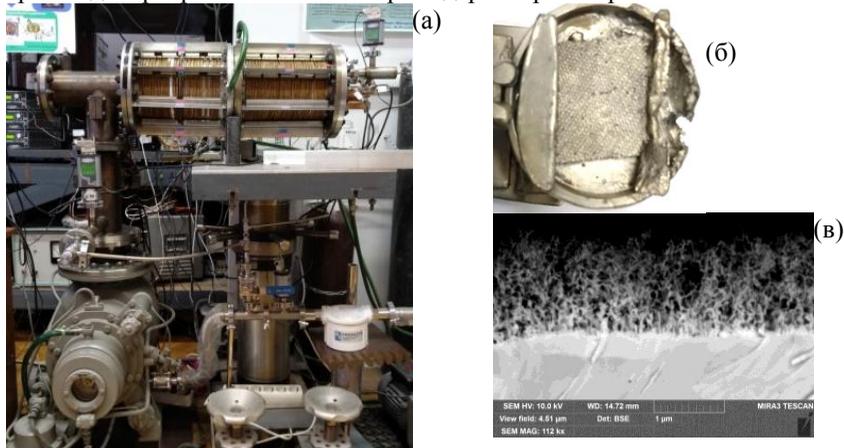


Рисунок 1. (а) Плазменная установка ПЛИМ – 8-полюсный плазменный линейный мультикасп для стационарных испытаний термоядерных материалов. (б) КПС с оловом после испытаний в ПЛИМ. (в) наноструктурированная поверхность типа «пух», образованная на вольфрамовой мишени после испытаний в ПЛИМ.

Испытания в ПЛИМ капиллярно-пористой системы (КПС) с оловом показали стойкость КПС под стационарными плазменными нагрузками ( $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$ ), рис. 1б. Испытания литевой КПС будут проведены в ПЛИМ для обеспечения их установки в токамаки Т-15 и ТИН.

Для пучковых испытаний материалов используются стенды с электронным пучком, обеспечивающие нагрузки от 0,1 до 300 МВт/м и более, что моделирует тепловые нагрузки на стенки и диверторные пластины в токамаке-реакторе, том числе и экстремальные, рис.2б. На стендах с большим объемом вакуумной камеры, рис.2а, планируется испытание полномасштабных макетов дивертора реактора. Для испытаний используются водоохлаждаемые макеты с вольфрамовой облицовкой, разработанные и изготовленные в НИИЭФА им. Ефремова, рис. 2в. Проводятся комбинированные испытания таких макетов в комбинированной схеме плазменно-пучковых испытаний – (1) термоциклические испытания в установке с электронным пучком с нагрузкой от 1 до 40 МВт/м<sup>2</sup>, при испытаниях обеспечивается охлаждение водным потоком; и затем (2) испытание в плазменной установке ПЛИМ стационарными плазменными нагрузками 0,5—1 МВт/м<sup>2</sup> и более. Такие

комбинированные испытания проводятся впервые и моделируют переменную нагрузку в диверторе ИТЭР, в том числе при ЭЛМах.

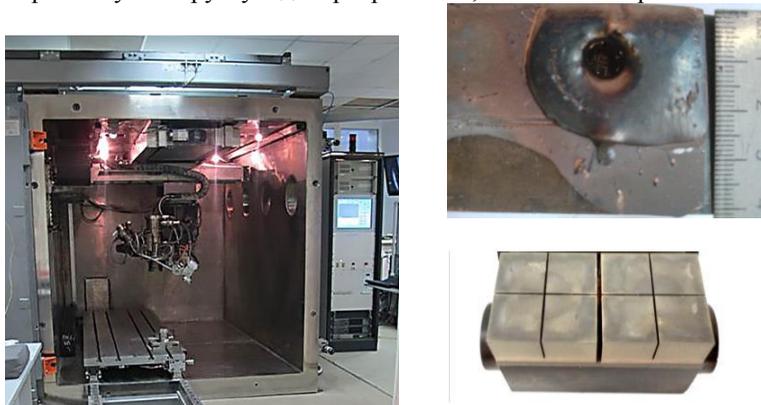


Рисунок 2. (а) Установка для испытаний материалов электронным пучком: ускоряющее напряжение 60 кВ, мощность 60 кВт, нагрузка на мишень до 300 МВт/м<sup>2</sup> и более, объем вакуумной камеры 12 м<sup>3</sup>. (б) Вольфрам после испытаний мощным электронным пучком 310 МВт/м<sup>2</sup> (в) Вольфрамовый охлаждаемый макет диверторной облицовки из материалов ИТЭР для тепловых испытаний.

Исследования теплообмена в обращенных к плазме модулей термоядерных установок проводятся на стендах (рис.3) [4], в том числе с системой сканирующего нагрева электронным пучком с ускоряющим напряжением до 60 кВ и током до 250 мА. Гидравлическая система стендов обеспечивает стабильные параметры потока воды с давлением до 2,5 МПа, массовый расход до 1 кг/с, температура воды на входе 15 – 60 °С, что полностью моделирует проектируемые параметры систем охлаждения термоядерного реактора. Исследуется вынужденная конвекции для каналов охлаждения с закруткой, изготовленных по инновационной технологии, планируемой к применению в отечественном термоядерном реакторе, что обеспечивает интенсивный конвективный теплообмен при тепловом потоке до 4,5 МВт/м<sup>2</sup> и более.



Рисунок 3. Стенды для исследования теплообмена в конструктивных компонентах и гидродинамики теплоносителя при высоком давлении.

Проводятся разработки и теплофизические испытания лимитеров на основе литиевой КПС тепловыми потоками до  $10,2 \text{ МВт/м}^2$  с применением охлаждения диспергированным газожидкостным потоком [5].

Работы выполняются при финансовой поддержке: испытание вольфрама - грантом РФФ 17-19-01469, испытание литиевой КПС - грантом РФФ 16-19-10457, создание АСНИ на ПЛМ - Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

#### **Список литературы**

- [1] А. Дедов. Физико-технические проблемы управляемого термоядерного синтеза. LAP, 2018.
- [2] В.П. Будаев. ВАНТ, Сер. Термояд.синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5
- [3] В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40.3. 23.
- [4] А.Н. Варава, А.В. Дедов, А.Т. Комов, В.В. Ягов. ТВТ, 2006, 44,5, 699.
- [5] А.В. Вертков и др. ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез, 2018,Т. 41.1. С.51.

А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1,3</sup>, Н.А. БАБИНОВ<sup>1,3</sup>, А.Н. БАЖЕНОВ<sup>1</sup>,  
И.М. БУКРЕЕВ<sup>1</sup>, Л.А. ВАРШАВЧИК<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1</sup>,  
Н.С. ЖИЛЬЦОВ<sup>1</sup>, П.А. ЗАТЫЛКИН<sup>1</sup>, А.Н. КОВАЛЬ<sup>1</sup>,  
Г.С. КУРСКИЕВ<sup>1</sup>, С.В. МАСЮКЕВИЧ<sup>1</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>,  
А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, В.А. СЕНИЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Д.С. САМСОНОВ<sup>1</sup>,  
В.А. СОЛОВЕЙ<sup>1</sup>, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ<sup>1</sup>, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1</sup>,  
А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>2</sup>, В.Л. БУХОВЕЦ<sup>2</sup>, А.В. МАРКИН<sup>2</sup>,  
Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ<sup>2</sup>, АЛ.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, АН.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>,  
П.В. ЧЕРНАКОВ<sup>3</sup>, П.А. ШИГИН<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ИФХЭХ им. Фрумкина, Москва

<sup>3</sup>ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

<sup>4</sup>Международная Организация ИТЭР, Кадараши, Франция

## ПЛАЗМЕННАЯ ЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ С СИСТЕМОЙ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОГО ФИЛЬТРА

**Введение.** Обращенные к плазме диагностические зеркала токамак-реактора ИТЭР (т.н. первые зеркала) будут подвержены нагреву до высоких температур за счет интенсивного нейтронного и гамма излучения термоядерной плазмы [1, 2]. Для предотвращения деформации поверхности первых зеркал, обусловленных температурными градиентами, планируется оборудовать их системой водяного охлаждения [3]. Осаждение пленок, состоящих из материалов эрозии первой стенки (преимущественно Ве с примесями О, N, D, W) будет приводить к деградации оптических свойств первых зеркал [4]. Для восстановления отражательной способности зеркал будет применяться система очистки, основанная на высокочастотном емкостном (ВЧЕ) разряде, в котором очищаемое зеркало играет роль одного из электродов [5]. Ионы, ускоренные в приэлектродном слое ВЧЕ разряда, бомбардируют поверхность зеркала, приводя к физическому распылению или химическому травлению осадений. Для совмещения системы охлаждения зеркала с системой ВЧ чистки предложено выполнять трубки водяного охлаждения по принципу коаксиального четвертьволнового короткозамкнутого фильтра, имеющего бесконечный импеданс и не влияющего на S-параметры зеркала, как элемента ВЧ тракта [6].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования параметров ионного потока (плотности тока и функции распределения ионов по энергиям) на заземленный и нагруженный

электроды в ВЧЕ разряде низкого давления с заземленным и изолированным ВЧ электродом. Исследование основных характеристик разряда и их зависимостей от геометрических параметров, типа газа и давления проводилось на круглом зеркале с электрической моделью четвертьволновой линии, выполненной из гибкого коаксиального кабеля. На основании полученных данных был разработан и протестирован макет узла первого зеркала (УПЗ) диагностики edge-CXRS с активной системой охлаждения. Исследована неоднородность распыления металлических пленок с поверхности прямоугольного зеркала для схемы с заземленным и изолированным ВЧ электродом. С учетом результатов данных исследований в рамках контракта с центральной командой ИТЭР была разработана конструкция узла двух первых зеркал диагностики Infrared Thermography (PBS 55.G6).

**1. Результаты измерений параметров ионного потока на электроды в ВЧЕ разряде с заземленным ВЧ электродом.** Параметры приэлектродных слоев вблизи заземленного и нагруженного электродов в ВЧЕ разрядах низкого давления существенно различаются ввиду сильной несимметричности разрядов такого типа. В случае изолированного ВЧ электрода около него создается отрицательный по отношению к плазме постоянный потенциал. Следовательно, энергия ионов, ускоряющихся в слое у заземленного электрода, оказывается существенно ниже энергии ионов, бомбардирующих поверхность нагруженного электрода. В случае заземленного ВЧ электрода несимметричность разряда выражается в протекании постоянного тока из плазменного столба к электродам. Ионная компонента тока замыкается на заземленном электроде, а электронная – на нагруженном. Падение напряжения на обоих электродах выравнивается, обеспечивая одинаковую энергию ионов, бомбардирующих их поверхность. При этом существенным становится процесс переосаждения пленок, распыленных с противоположного электрода.

Измерения энергии бомбардирующих поверхность зеркала ионов показали, что в случае заземленного ВЧ электрода для достижения энергии в 100 эВ требуется в несколько раз больше мощности, чем в случае изолированного электрода. Разница в потребляемой мощности вызвана потерями, вызванными неоднородностью разряда. Существенная часть подводимой ВЧ мощности расходуется на постоянный ток, электронная часть которого приводит к нагреву ВЧ электрода и рассматривается как паразитная. При включении аксиального магнитного

поля происходит уменьшение постоянного тока и рост энергии ионов в приэлектродных слоях.

**2. Измерение неоднородности распыления.** Важным аспектом разработки системы очистки первого зеркала является минимизация неоднородности ионного потока по поверхности очищаемого элемента. Измерение неоднородности чистки проводилось с помощью распыления золотых пленок с поверхности зеркала. Толщина пленки, осажденной на зеркало магнетронным способом, измерялась с помощью эллипсометра Sentech SE 850 DUV. Профиль неоднородности распыления высчитывался как разность толщин пленки до и после экспозиции в плазме.

В случае изолированного ВЧ электрода профиль неоднородности распыления хорошо соотносится с данными, полученными на круглом зеркале, опубликованными в [7]. На краях скорость чистки вырастает в несколько раз по отношению к центральной части зеркала. Такой характер неоднородности объясняется повышением ионного тока на краях зеркала, обусловленного несимметричностью разряда. Данные экспериментов качественно согласуются с расчетами ВЧЕ разряда в гидродинамическом программном пакете CFD ACE+. Краевые эффекты неоднородности травления объясняются радиальной диффузией электронов из плазменного столба к стенкам камеры.

В схеме с заземленным ВЧ электродом наблюдался седловидный профиль распыления с незначительным краевым эффектом. Расчет ВЧЕ разряда в пакете Fraunhofer-IST (для описания используется метод Монте-Карло) качественно подтверждает полученные данные в эксперименте. Расчет показал существенное уменьшение плотности плазмы на периферии положительного столба ВЧЕ разряда, что приводит к пропорциональному уменьшению плотности тока падающих на электрод ионов.

**3. Чистка пленок  $Al/Al_2O_3$  с поверхности макета УПЗ.** Применимость использования четвертьволнового короткозамкнутого фильтра в качестве элемента системы водяного охлаждения зеркала была проверена в эксперименте по удалению алюминиевой пленки в ВЧЕ разряде. Пленка алюминия толщиной  $\sim 30$  нм была нанесена на зеркало из нержавеющей стали магнетронным способом. Чистка зеркала была проведена в разряде в неоне при давлении 1 Па и поглощенной ВЧ мощности 116 Вт ( $\sim 2.3$  Вт/см<sup>2</sup>). Одновременно с процессом очистки зеркало охлаждалось водой при температуре 20° С. Максимум ФРИЭ в приэлектродном слое находился на уровне  $\sim 95$  эВ. Алюминиевая пленка

была полностью удалена с поверхности зеркала после 14 часов экспозиции в плазме ВЧЕ разряда.

**4. Разработка конструкции узла первого зеркала.** На основании данных полученных в тестовых экспериментах была разработана конструкция узла двух первых зеркал диагностики Infrared Thermography (PBS 55.G6), находящейся в экваториальном порту №17. При разработке конструкции учитывались требования ИТЭР для внутривакуумного и электрического оборудования. Сборка каждого зеркала включает в себя систему охлаждения, выполненную по схеме четвертьволнового короткозамкнутого фильтра, системы предварительного согласования и измерения ВЧ мощности, выполненных в виде планарной схемы. Обе зеркальные сборки закреплены на раме, имеющей интерфейс крепления к кассете DSM (diagnostic shield module). В разработанной конструкции предусмотрено место под установку затвора с пьезоэлектрическим приводом, необходимого для защиты зеркал во время процедуры обслуживания первой стенки токамака.

**5. Выводы.** В данной работе представлены результаты экспериментального исследования параметров ВЧЕ разряда в схеме с изолированным и заземленным ВЧ электродом. Неоднородность чистки прямоугольного зеркала, измеренная по распылению золотой пленки на макете УПЗ edge-CXRS, качественно описывается с помощью численных расчетов плотности плазмы ВЧЕ разряда. Применимость системы охлаждения, выполненной на основе четвертьволнового короткозамкнутого фильтра продемонстрирована в эксперименте по чистке зеркала от алюминиевых осадений.

На основе полученных данных была проведена разработка конструкции узла двух первых зеркал диагностики Infrared Thermography (PBS 55.G6) с учетом требований ИТЭР.

**Благодарность:** Данная работа частично поддержана центральной командой ИТЭР в рамках контрактов IO/17/CT/4300001626 (разделы 2, 3) и IO/17/CFT/7-308/CDP (раздел 4). Решения и мнения, представленные в данном докладе, не обязательно выражают интересы организации ИТЭР.

#### **Список литературы**

[1] E.E. Mukhin et al., Nucl. Fusion **52** (2012) 013017, [2] A. Litnovsky et al., Fusion Eng. Des. **86** (2011) 1780, [3] M. Joanny et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **40** (2012) 692, [4] M. Rubel et al., Phys. Scr. **T145** (2011) 014070, [5] A.M. Dmitriev et al., Phys. Scr. **T170** (2017) 014072, [6] F. Leipold et al., Rev. Sci. Instrum. **87** (2016) 11D439, [7] A.G. Razdobarin et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 093022

М.Ю. ЖАРКОВ<sup>1</sup>, А.В. ВЕРТКОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
В.А. ВЕРШКОВ<sup>3</sup>, Г.Е. НОТКИН<sup>3</sup>, С.В. МИРНОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АО «Красная звезда», Москва, РФ

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, РФ

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

<sup>4</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, РФ

## РАЗРАБОТКА ЛИТИЕВЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

Реализация стационарного термоядерного реактора коммерческого масштаба типа ДЕМО и термоядерного источника нейтронов на основе токамака требует разработки новых технологических решений для ресурсоспособных внутрикамерных элементов (лимитеров, диверторов), контактирующих с плазмой и подвергающихся воздействию интенсивных потоков частиц и энергии, превышающих величину 10 МВт/м<sup>2</sup>.

Эксперименты на токамаках Т-11М и Т-10 [1], [2] убедительно показали преимущества внутрикамерных элементов на основе пропитанных жидким металлом капиллярно-пористых структур (КПС) перед твердотельными приёмными устройствами вследствие реализации «самовозобновляемости» поверхности за счёт сил поверхностного натяжения жидкометаллического покрытия. Проведённые эксперименты позволили исследовать поведение этих устройств при импульсном воздействии плазмы (до 1 с). При этом вся тепловая нагрузка отводилась от приёмной поверхности путём теплопроводности в элементы конструкции. Первая попытка создать приёмные элементы с активной системой термостабилизации была предпринята на токамаке FTU [3], для которого были созданы лимитеры на основе КПС с литием и оловом. К сожалению, эксперименты на FTU не позволили продемонстрировать в полной мере активную термостабилизацию приёмной поверхности в момент разряда в силу большого вклада тепловой инерционности конструкции при длительности воздействия плазмы до 3 с. Однако эти эксперименты дали возможность приобрести необходимый опыт в создании и работе с такими системами в условиях реального токамака.

Следующим шагом на пути обоснования разрабатываемой концепции внутрикамерных элементов на основе КПС с жидкими металлами станет разработка и создание внутрикамерных жидкометаллических устройств с активной системой термостабилизации и системой рекуперации изотопов водорода для токамаков с длительностью разряда 10 с и более. Первым

таким токамаком может стать строящийся в НИЦ «Курчатовский институт» токамак Т-15МД.

Токамак Т-15МД – токамак с диверторной конфигурацией плазмы. Значение аспектного соотношения – 2,2, большой и малый радиус соответственно равны 1,48 м и 0,67 м. Тороидальное магнитное поле может достигать 2 Тл, ток разряда – 2 МА. Токамак будет оснащён различными системами нагрева плазмы общей мощностью до 16 МВт, в числе которых электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН), ионно-циклотронный резонансный нагрев (ИЦРН), нижнегибридный нагрев (НГН) и др.

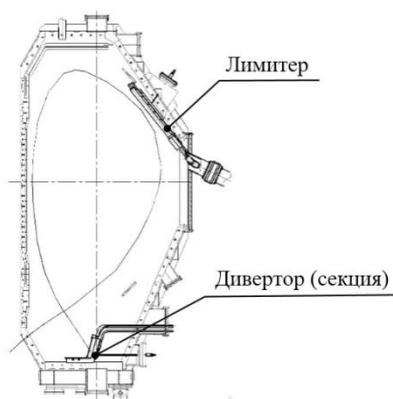


Рисунок 1 – разрабатываемые ВЭ токамака Т-15МД

Внутрикамерные элементы для токамака Т-15МД планируется разработать в двух вариантах – в виде литиевого лимитера (ближайшая перспектива) для физического пуска и проведения первых экспериментов; в виде секции литиевого дивертора для последующей научной работы (рисунок 1). В качестве материала, обращённого к плазме, были выбраны КПС с литием. Величина приходящей тепловой нагрузки (до 10 МВт/м<sup>2</sup>) и длительность разряда (до 10 с) предполагают наличие активной системы

термостабилизации и возможность смены/подпитки жидким металлом для рекуперации захваченных изотопов водорода.

Предварительные расчёты и комплексный анализ вопроса выбора теплоносителя системы термостабилизации показали [4], что для обеспечения эффективного теплосъёма и совместимости с жидким литием, упрощения конструкции и повышения ее безопасности в качестве хладагента следует выбрать мелкодисперсный водяной спрей в потоке газа.

Литиевый лимитер будет крепиться на фланце люка экваториального патрубка 1 (рисунок 2) камеры токамака. Конструкция литиевого лимитера токамака Т-15МД включает в себя приемный элемент 2, сильфонный узел качания 3, вакуумный затвор 4, шлюзовую камеру 5, систему позиционирования 6 и опорную раму 7. Приёмный элемент имеет

возможность позиционирования согласно стрелкам а, б. Более подробно приёмный элемент лимитера изображён на рисунке 3. Он представляет собой трубчатую конструкцию, в которой на молибденовую трубу 8 устанавливается пористый мат из вольфрамового «войлока» 9. Молибденовая труба 8 выполняет роль канала хладагента. Образование охлаждающего спрея происходит в форсунке 10. Лимитер имеет возможность подпитки литием.

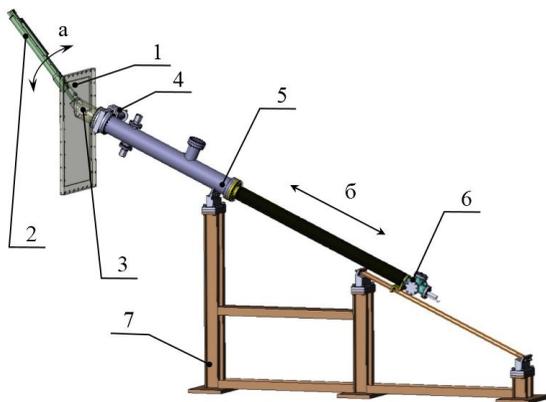


Рисунок 2 – Конструктивная схема литиевого лимитера токамака Т-15МД

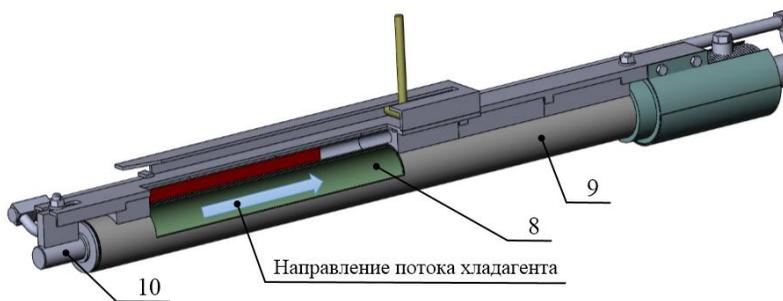


Рисунок 3 – Приёмный элемент литиевого лимитера токамака Т-15МД

Конструктивная схема секции литиевого дивертора токамака Т-15МД представлена на рисунке 4. Приемный элемент 11 представляет собой коробчатую конструкцию, на переднюю стенку которой устанавливается пропитанный литием пористый мат из КПС 12. Также как и для лимитера, хладагент подаётся во внутреннюю полость приёмного элемента через

форсунки 13, расположенные на задней стенке 14 приёмного элемента. В конструкции реализована возможность циркуляции лития через КПС: литий протекает из подающего коллектора 15 в принимающий 16 под действием силы тяжести. Во внешней части системы литий возвращается в подающий коллектор под действием электромагнитного насоса. Предусмотрено позиционирование приемного элемента относительно плазмы в радиальном направлении (стрелка в).

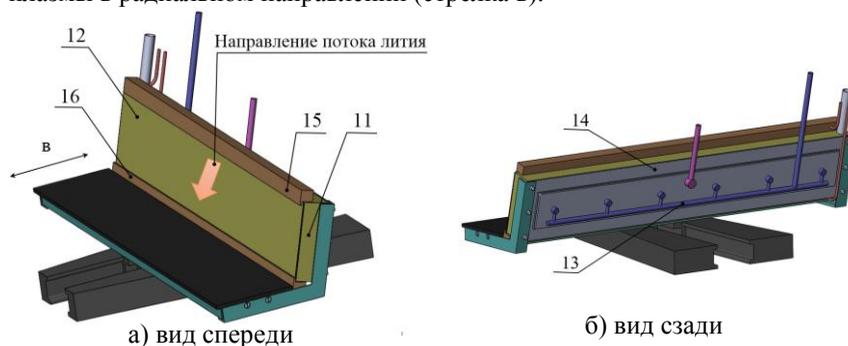


Рисунок 4 – Конструктивная схема секции литиевого дивертора токамака Т-15МД

### Список литературы

- [1] Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu. In-Vessel Devices Based on Capillary-Porous Systems with Liquid Metal for a Stationary Tokamak. Plasma Physics Reports, 2018, Vol. 44, No. 7, pp. 664 – 670.
- [2] Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Mirnov S.V., Vershkov V.A., Glazyuk Ya.V., Notkin G.E., Grashin S.A., Kislov A.Ya., Komov A.T. Complex of lithium and tungsten limiters for 3 MW of ECR plasma Heating in T-10 tokamak. Design, first results. Nuclear Fusion, Volume 57, Number 6, June 2017 (2017 Nucl. Fusion 57 066006).
- [3] Iafrafi M., Apicella M.L., Boncagnia L., Mazzitelli G., Vertkov A., Lyublinski I. FTU cooled liquid lithium upgrade. Fusion Eng. Des. 117 (2017) 157 – 162.
- [4] Vertkov A. The Concept of Lithium Based Plasma Facing Elements for Steady State Fusion Tokamak-Reactor and its Experimental Validation // 27th IAEA Fusion Energy Conference, 22–27 October 2018 Ahmedabad, India. Programme & Book of Abstracts & Conference Material. URL: [https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/FEC2018\\_ConfMat\\_Online.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/FEC2018_ConfMat_Online.pdf) (дата обращения: 19.12.2018)

З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ<sup>1</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

<sup>2</sup>НИИ Курчатовский институт, Москва

## РАСЧЕТЫ КРИТИЧЕСКИХ ТОКОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИИ И ФОРМИРОВАНИЮ ДУГИ НА ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Анализ поверхности вольфрамовых пластин после плазменных испытаний в токамаке Т-10 выявил эффекты дугообразования [1], рис.1. Эти эффекты наблюдались на краях вольфрамовых пластин. Условия в плазменном слое над шероховатой поверхностью и расплавом благоприятны для формирования дуг и искр [2]. Множественные эффекты эрозии, такие как растрескивание, плавление поверхностного слоя, движение расплавленного металла по поверхности, рекристаллизация расплавленного слоя формируют шероховатую поверхность [3]. Воздействие униполярных дуг и искр на взаимодействие плазмы с поверхностью может привести к повышенному переносу тепла от плазмы к поверхности и к охлаждению плазмы, вызванного неамбиоплярным потоком. Эффекты дугообразования должны учитываться для прогнозирования и оценки эрозии диверторных вольфрамовых пластин в ИТЭР [2].

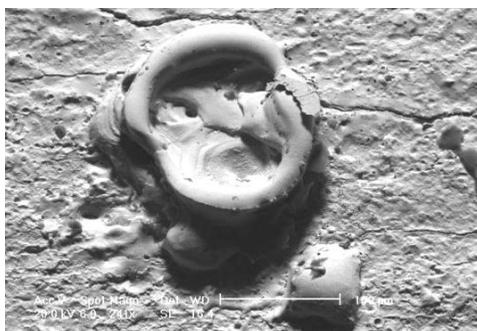
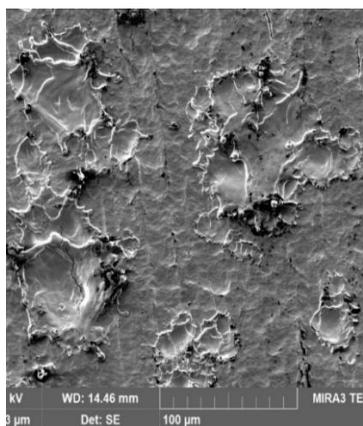


Рис.1. Кратеры на вольфрамовой поверхности внутреннего обвода полоидальной диафрагмы токамака Т-10 в зоне максимальной плазменной нагрузки

В работе для условий плазмы в токамаке Т-10 и плазменной установки ПЛМ [5] проведены расчеты критических токов эмиссии, приводящих к взрывной эмиссии (экстонный механизм, см [4]) и формированию дуги на поверхности вольфрама с развитой поверхностью различной шероховатости. Оценены параметры дуговой эрозии вольфрама при различной степени шероховатости. Приведены оценки возможной дуговой эрозии для вольфрамового дивертора в международном токамаке ИТЭР.

Расчет проведен для удельного ионного тока насыщения величиной  $J_i=0.07 \text{ A/cm}^2$  – это значение типично для пристеночной плазмы в токамаке Т-10 и установке ПЛМ. Рассмотрены различные типы шероховатой (развитой) вольфрамовой поверхности (см. пример на рис. 2). Для шероховатых поверхностей значительно увеличивается суммарный ионный ток насыщения для параметров плазмы в установке ПЛМ и Т-10 (см. табл. 1), характерный диаметр эмиссионной ячейки принят 0.1 мкм.

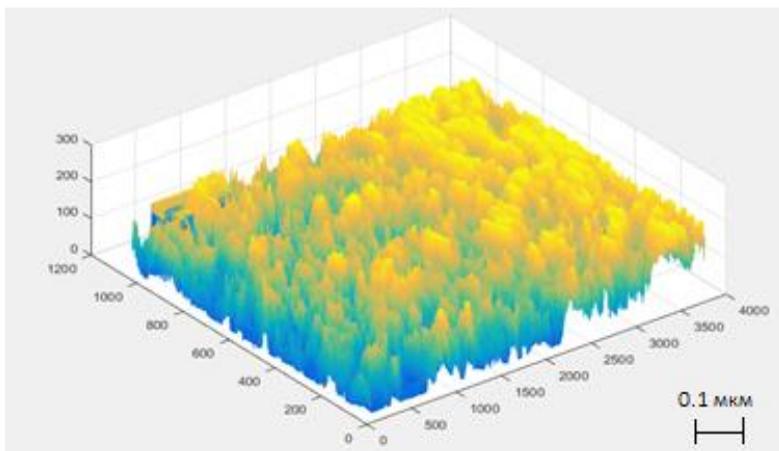


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности вольфрамовой пластины после мощной плазменной нагрузки.

Эффект увеличения тока справедлив не только для ионного тока насыщения, но и для иного тока, эмитируемого поверхностью или принимаемого ею. В том числе, при нагреве поверхности катода в установке ПЛМ до высокой температуры, поверхность микровыступа будет эмитировать ток термоэлектронной эмиссии, плотность которого в области микровыступов больше, чем средняя по поверхности.

Таблица 1 Расчет ионного тока  $J_{\text{им}}$  на шероховатую поверхность для приповерхностной плазмы в установке ПЛИМ и токамаке Т-10.

Эффективная площадь поверхности $S$	ПЛИМ	Т-10
	Малая шероховатость $S = 1 - 4 \text{ мкм}^2$	$5.7 \times 10^2 \text{ А/см}^2$
Средняя шероховатость $S = 5-15 \text{ мкм}^2$	$6.3 \times 10^3 \text{ А/см}^2$	$9.4 \times 10^4 \text{ А/см}^2$
Высокая шероховатость $S = 10-20 \text{ мкм}^2$	$1.4 \times 10^4 \text{ А/см}^2$	$2.1 \times 10^5 \text{ А/см}^2$
Максимальная площадь $S = 25.7 \text{ мкм}^2$	$4.2 \times 10^4 \text{ А/см}^2$	$6.3 \times 10^5 \text{ А/см}^2$

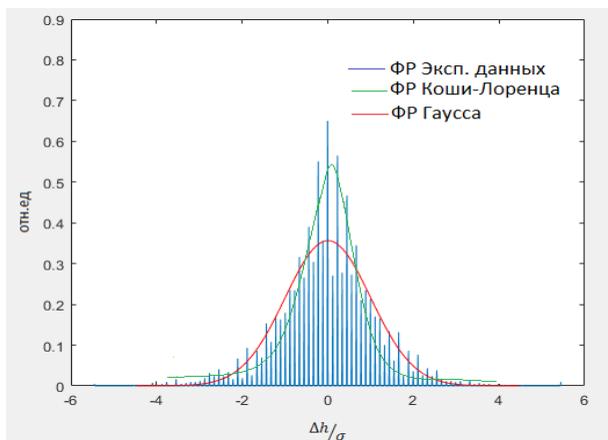


Рис. 3. Негауссова статистика высот вольфрамовой шероховатой поверхности. Функция распределения плотностей вероятностей для приращения высот, нормированных на величину стандартного отклонения, гауссова функция приведена для сравнения.

Особое свойство шероховатой поверхности - функция распределения приращения высот (см. рис.3) является негауссовой. Для оценки площади такой шероховатой поверхности использовалась фрактальная размерность как мера самоподобия. Увеличение фрактальной поверхности в сравнении с площадью ее проекции на плоскость - отношение площади фрактальной

структуры  $A_r$  к площади ее проекции на плоскость  $A_p$  можно записать как [6]:

$$Q = A_r(\varepsilon) / A_p = \varepsilon^{2-d_f}$$

где  $\varepsilon$ —параметр масштабирования,  $d_f$ —фрактальная размерность. Для оценки  $Q$  мы принимаем максимальный размер гранул  $r_{ex}=0,1$  мкм, фрактальная размерность  $d_f = 2,32$  [6], минимальный масштаб порядка атомного размера  $a=1$  нм [6]. Вычисленный параметр  $\varepsilon = a^2 / r_{ex}^2 = 10^{-4}$ . Такое увеличение эффективной поверхности приводит к усилению максимального ионного тока в эмиссионные ячейки для параметров плазмы в токамаке Т-10 до  $J_{im} = 1,07 \times 10^7$  А/см<sup>2</sup>. Эта величина превышает необходимый предел, выше которого могут формироваться дуги [4] по эктонному механизму. Таким образом, для токамака Т-10 при воздействии мощной плазменной нагрузки, приводящей к формированию шероховатой поверхности лимитера, возможно инициирование униполярных дуг, приводящее к эрозии (см. рис.1).

Работа поддержана грантом РФФИ 17-19-01469.

#### **Список литературы**

- [1] Grashin S.A. et al. ITER-grade tungsten limiters damage under high heat flux in the T-10 tokamak. 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2018) Naxos (Messina, Sicily), 16th - 21st September 2018. Book of abstracts P2.126, P. 438
- [2] Khimchenko L.N. et al. Investigation of ITER-grade tungsten under very high heat loads, Т.ОА2.496. 06 June 2017, SOFE-2017, Shanghai, China.
- [3] Будаев В.П. ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез, 2015, т. 38, 4, с. 5-31.
- [4] Месяц Г.А. УФН. 1995. 165, 6 601–626.
- [5] Будаев В.П., Федорович С.Д., Лукашевский М.В., Мартыненко Ю.В., и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017, т. 40, вып. 3, с. 23-36.
- [6] Budaev V.P., Khimchenko L.N. Physica A. 2007, vol. 382, p. 359—377.

В.А. ИВАНОВ<sup>1,2</sup>, А.С. САХАРОВ<sup>1</sup>, М.Е. КОНЫЖЕВ<sup>1</sup>,  
А.А. ДОРОФЕЮК<sup>1</sup>, Т.И. КАМОЛОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им.А.М. Прохорова Российской Академии Наук, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

## **МИКРОПЛАЗМЕННЫЕ РАЗРЯДЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТ, ТЕОРИЯ, ПРИЛОЖЕНИЯ**

Взаимодействие импульсного потока плазмы с отрицательно заряженной (~100–450 В) металлической поверхностью, частично покрытой диэлектрической пленкой толщиной ~1 мкм, приводит к возбуждению микроплазменных разрядов (МПР) на краю пленки [1–3] (Рис. 1). Механизм возбуждения МПР следующий. Под действием потока ионов внешняя поверхность пленки приобретает положительный электрический потенциал по отношению к металлу, вследствие чего на краю пленки возникает сильное электрическое поле порядка нескольких МВ/см. Это электрическое поле в результате дополнительного усиления на микроостриях металлической поверхности, инициирует автоэлектронную и взрывную электронную эмиссию из металла (Рис. 2), и, таким образом, приводит к развитию локализованных вблизи края диэлектрической пленки на поверхности металла МПР, в которых образуется плазма с характерными параметрами: плотность  $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, температура 0.5–1 эВ [4]. Высокое давление ( $\sim 10^7$  Па) плазмы и паров металла над локальной поверхностью расплавленного металла приводит к деформации поверхности расплава металла в виде вогнутой поверхности микрократера. В результате быстрого перемещения МПР по поверхности металла локальная расплавленная область охлаждается и затвердевает за короткое время менее 1 мкс вследствие отвода тепла вглубь металла. В результате происходит локальная термическая закалка поверхности металла и формируется микрократер. В импульсном МПР длительностью 20 мс возникают десятки кратеров с размерами от 0.1–10 мкм, перемещающихся со скоростью до 100 м/с. Одновременно с плавлением локальной области металла МПР испаряют диэлектрическую пленку, покрывающую поверхность металла (Рис. 3). В результате возбуждения на поверхности образцов из конструкционных металлов (титан, алюминий, сталь) 10 разрядов с импульсным электрическим током 100–600 А поверхность образцов площадью 2 см<sup>2</sup> оказывается полностью переплавленной и очищенной от диэлектрической пленки (Рис.4).

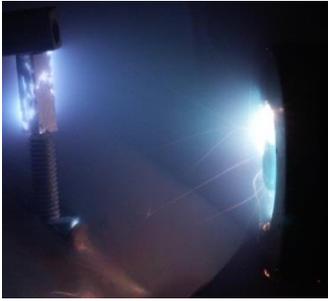


Рис. 1. Выход плазменного инжектора, создающего инициирующий поток плазмы (справа) с концентрацией  $n_e = 4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и температурой электронов  $T_e = 10 \text{ эВ}$ , и микроплазменные разряды, возбуждаемые на поверхности образца из титана (слева).

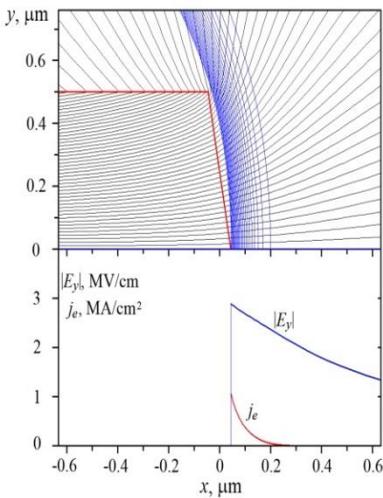


Рис. 2. На верхней части рисунка: распределение электрического потенциала (серые линии эквипотенциалей при разности между соседними  $\Delta\phi = 0,5T_e/e$ ) вблизи края пленки (красный контур) толщиной  $d = 0,5 \text{ мкм}$ , траектории эмитированных электронов (синие линии). На нижней части рисунка: профили напряженности электрического поля на металле  $|E_y|$  и плотности тока автоэлектронной эмиссии  $j_e$  в момент времени, соответствующий максимальному току эмиссии ( $t = 0,71 \text{ мкс}$ ), при  $\phi_0 = -400 \text{ В}$ , (водородная плазма). Угол среза края диэлектрической пленки  $\alpha = 80^\circ$ , работа выхода электронов из металла  $\phi = 3 \text{ эВ}$ , дополнительное усиление поля на микроостриях металла  $\beta = 15$ .

В результате микроплазменной обработки на поверхности металла формируется прочный микрорельеф в виде перекрывающихся микрократеров, при этом характеристики микрорельефа зависят от возбуждаемого тока разрядов (Рис. 4).

Результаты трибологических испытаний образцов конструкционных металлов, обработанных МПР [5], показывают, что допустимое прикладываемое к образцам максимальное давление, при котором не образуются задиры на их поверхности при трении, увеличивается в 5–10 раз (Рис. 5, 6).

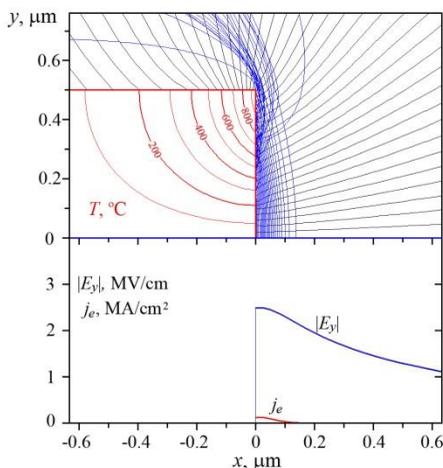


Рис. 3. Распределения электрического потенциала вблизи края пленки и температуры внутри диэлектрика, траектории эмитированных электронов, а также профили напряженности электрического поля на металле  $|E_y|$  и плотности тока автоэлектронной эмиссии в момент времени, соответствующий максимальному току эмиссии ( $t = 0.71$  мкс), для тех же параметров, что и на рис. 4, но для вертикального среза края пленки ( $\alpha = 90^\circ$ ).

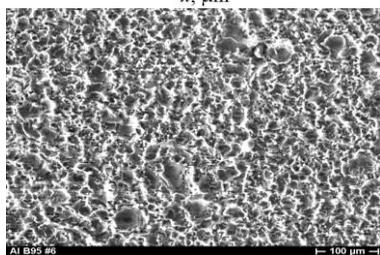


Рис. 4. Микрорельеф, сформированный на поверхности алюминиевого сплава B95 после воздействия 10 импульсных МПР: ток 200 А, длительность импульсов 20 мс.

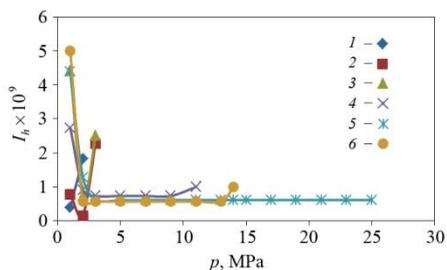


Рис. 5. Зависимости  $I_h$  — интенсивности относительного износа при трении образцов из стали-45: 1 — в исходном состоянии, 2 — после отжига, 3–6 — после отжига и микроплазменного упрочнения соответственно при значениях тока  $i = 100, 200, 400$  и  $650$  А.

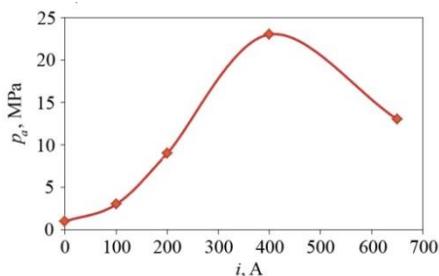


Рис. 6. Допустимое давление  $p_a$  для образцов из стали 45 в зависимости от величины тока  $i$  импульсных МПР. Крайняя точка слева (в окрестности значения «0») соответствует образцу из стали 45, который не подвергался обработке МПР.

Эксперименты по биологической совместимости стволовых клеток костной ткани с поверхностью титана, обработанного МПР, показали их хорошее сродство к микрорельефу, создаваемому на поверхности титана [6]. Применение МПР, возбуждаемых на металлах, открывает широкие перспективы для создания износостойких поверхностей на готовых изделиях из конструкционных металлов, которые могут найти применение в различных отраслях промышленности и в медицине.

#### Список литературы

- [1] Иванов В. А., Сахаров А. С., Кобышев М. Е. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 171.
- [2] Иванов В. А., Сахаров А. С., Кобышев М. Е. // Успехи прикл. физики. 2013. Т. 1. С. 697.
- [3] Сахаров А. С., Иванов В. А. // Успехи прикл. физики. 2016. Т. 4. С. 150.
- [4] Ivanov V. A., Jüttner B., Pursch H. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13. P. 334.
- [5] Иванов В. А., Кобышев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Хренникова И. А. // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 96.
- [6] Димитрович Д. А., Бычков А. И., Иванов В. А. // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 35.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ПОРИСТОСТИ ПО ГЛУБИНЕ ОБРАЗЦОВ ВАНАДИЕВЫХ СПЛАВОВ МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА

В работе изучена микроструктура и особенности распределения газовых пузырьков по глубине образцов в ванадиевых сплавах с Cr, W, Ta и Zr после имплантации ионами  $\text{He}^+$  с энергией 40 кэВ до флюенса  $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$  при 650 °С и имплантации  $\text{He}^+$  в тех же условиях и дополнительном облучении ионами  $\text{H}^+$  с энергией 25 кэВ до  $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$  при 20 °С. Изучение микроструктуры проводилось с помощью ПЭМ после препарирования образцов по методике фокусированного ионного пучка (ФИБ) перпендикулярно облученной поверхности.

Выявлено, что в V, сплавах V–Cr и V–Zr гелиевая пористость формируется на расстоянии от поверхности, практически совпадающем с глубиной имплантации ионов  $\text{He}^+$  (рассчитанный по программе *SRIM* проективный пробег ионов составляет ~170 нм, максимальный пробег ~300 нм). Дополнительное облучение ионами  $\text{H}^+$  сдвигает зону формирования крупных пузырьков (газонаполненных пор) вглубь мишеней. Особый интерес представляют результаты исследования развития пористости в сплавах ванадия с вольфрамом и танталом. В сплаве V–2%W поры обнаружены на расстоянии 450 нм от облученной поверхности, а в сплавах V–1%Ta и V–2%Ta – на глубинах 600 и 900 нм соответственно, т.е. существенно превышающих рассчитанный максимальный пробег ионов  $\text{He}^+$ , хотя основная часть газовых пор все же расположена в слое до 300 нм. Интересным является тот факт, что пузырьки, обнаруженные на большой глубине, часто располагаются в виде упорядоченных цепочек длиной от 100 до 600 нм.

По результатам исследований облученных образцов рассчитаны параметры пористости и газовое распухание сплавов. Проведено сравнение результатов расчета параметров пористости образцов, препарированных с помощью методики ФИБ, с результатами более ранних работ, в которых препарирование фольг для ПЭМ проводилось по методике одностороннего электролитического утонения с необлученной стороны образцов. В последнем случае в ПЭМ можно зафиксировать пористость только в слое материала толщиной не более 100 нм от

облученной поверхности, что приводит к занижению величины распухания. При сравнении результатов на ПЭМ объектах, полученных с помощью ФИБ или электролитическим утонением, выявлено, что разница в оценке распухания может достигать до двух и более раз.

С.А. КРАТ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1,2</sup>, А.П. ХАРИНА<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЕРОСТИ ЛИТИЯ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА Т-11М**

Среди всех жидких металлов, рассматриваемых в качестве потенциальных для обращённых к плазме элементов (галлий, олово, литий, эвтектики этих металлов), литий - наиболее перспективный. Малый атомный номер лития, его низкая температура плавления и высокая температура кипения, геттерные свойства по отношению к изотопам водорода и основным составляющим атмосферного воздуха, низкая энергия ионизации, а также другие физические и химические свойства делают его хорошо совместимым с термоядерной плазмой. Экспериментально было показано, что использование лития в термоядерных установках типа токамак ведёт к увеличению времени удержания плазмы, уменьшению количества примесей в плазме, понижению рециклинга водорода.

В данной работе представлены результаты калибровки уникальной диагностики плазмы токамака Т-11М инфракрасного (ИК) диапазона для лития и КПС с литием. Приведены результаты измерений коэффициентов серости (черноты) лития в зависимости от температуры поверхности, в условиях, приближённых к условиям токамака Т-11М. (Рис.1.)

Для металлов теоретически приближение с ростом температуры по излучению к характеристикам идеально чёрного тела. Такое приближение, то есть рост коэффициента серости от ~0.05 до ~0.15 можно видеть на полученной зависимости. Резкий скачок серости при температуре ~180 °С обусловлен фазовым переходом лития из жидкого состояния в твёрдое.

Резкое возрастание коэффициента серости при уменьшении температуры образца ниже 100 °С связано, по всей видимости с влиянием излучения стенок и, вероятно, некорректно рассматривать их именно как физический коэффициент черноты. При этом остаётся возможным их использования как переводных коэффициент для схожих систем ИК-диагностик, включая уникальную ИК диагностику токамака Т11-М.

Так же было обнаружено, что для полностью смоченной литием поверхности КПС коэффициент серости совпадает с данными, полученными для свободной чистой литиевой поверхности для температур до 300 °С, при которых разница в скоростях испарения может

начинать оказывать существенную роль на фактическую температуру и, как следствие, на измеряемую температуру. Альтернативным объяснением отклонения в серости КПС от серости свободной литевой поверхности может являться роль металлической матрицы молибдена, приводящей к появлению капиллярных сил и искажению геометрии литевой поверхности.

По полученным в заведомо избыточных ( $p=2E-2$ мбар) по отношению к ожидаемым в Т11-М давлениях чистых газов результатах было установлено, что взаимодействие с ними с точки зрения изменения коэффициента серости происходит крайне медленно, иными словами присутствие атмосфер газов не оказывало роли на серость лития на временных масштабах экспериментов. Так как временные масштабы экспериментов в токамаке Т11-М, длина плазменного импульса которого составляет приблизительно 300 мс заведомо меньше, можно говорить о том, что для уникальной ИК диагностики токамака изменением серости поверхности лития в результате взаимодействия с газами, напускаемыми во время разрядов, можно пренебречь.

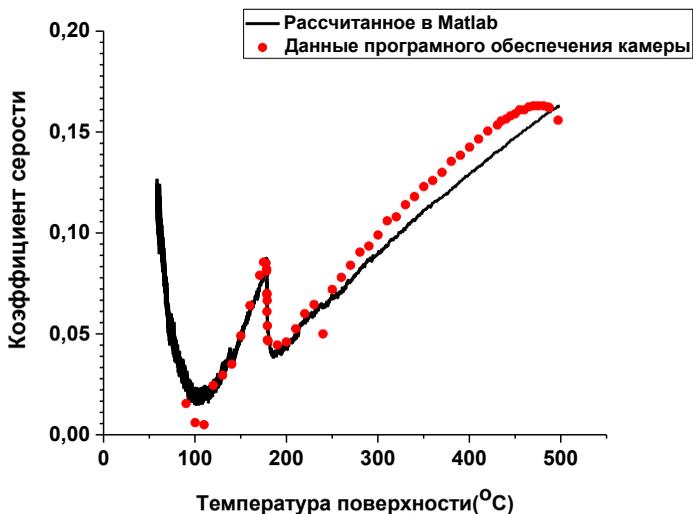


Рисунок 1. Зависимость коэффициента серости свободной литевой поверхности от её температуры. Точки – расчёт при помощи программного обеспечения ResearchIR. Линия – расчёт на основе экспериментальных данных при помощи программного пакета Matlab.

С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Я.А. ВАСИНА,  
А.С. ПРИШВИЦЫН, А.А. ПИСАРЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СООСАЖДЕННЫХ С ЛИТИЕМ СЛОЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ ВО ВРЕМЯ ОСАЖДЕНИЯ**

Накопление изотопов водорода, включая радиоактивный тритий, в термоядерных реакторах – большая проблема, как с точки зрения радиационной безопасности, так и из-за влияния накопленного водорода на функциональность реакторов. Накопление водорода способно негативно влиять на свойства обращённых к плазме элементов. Последующий выход водорода из материалов стенки (рециклинг водорода) приводит к попаданию холодного газа в плазму и её остужению. Одним из основных каналов накопления изотопов водорода в термоядерных реакторах является совместное осаждение (соосаждение) изотопов водорода с частицами стенки, распылёнными плазмой и переосаждающимися в других областях реактора. Возможным решением описанных проблем является использование жидкометаллических элементов первой стенки, в особенности жидколитиевых элементов. Использование жидкометаллических поверхностей позволяет разрешить проблему накопления радиационных повреждений, постоянная циркуляция металла позволяет обеспечить контроль за общим содержанием изотопов водорода в установке, а физические свойства лития потенциально позволяют реализовать новые перспективные режимы удержания плазмы, в том числе режимы с малым или нулевым рециклингом. Сбор частиц лития из газовой фазы является критическим элементом, необходимым для реализации системы замкнутой циркуляции лития. В зависимости от температурных режимов сбора, большое накопление изотопов водорода, выпадение твёрдой фазы в жидком литии, может представлять опасность. В данной работе представлены результаты исследования зависимости содержания изотопов водорода в соосаждённых с литием слоях в зависимости от температуры подложки во время осаждения.

Исследование проводилось на экспериментальной установке МР-2. Литий-дейтериевые слои осаждались путём магнетронного распыления жидкого литиевого катода дейтериевой плазмой. Рабочее давление разряда составляло 4 Па. Остаточное давление после литизации стенок камеры напыления составляло  $2 \times 10^{-5}$  Па. Поверхность литиевого катода

стабилизировалась от расплёскивания при помощи капиллярно-пористой системы, состоящей из двуслойной молибденовой сетки, с линейным размером ячейки 53 мкм, прозрачностью одного слоя 83%. Нагрев катода до жидкого состояния производился непосредственно плазмой разряда без дополнительного внешнего подогрева. Скорость осаждения контролировалась при помощи кварцевых микровесов в реальном времени. Толщина осаждаемых слоёв составляла ~ 500 нм. Температура подложки во время осаждения контролировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары и регулировалась при помощи радиационного нагревателя (лампы), расположенного с задней стороны подложки. Для предотвращения дополнительной атомизации изотопов водорода, нагреватель образца был помещён в запаянную кварцевую колбу. Температура подложки варьировалась от близкой к комнатной (без дополнительного нагрева) до 500 °С.

Содержание изотопов водорода в литиевых слоях определялось при помощи термодесорбционной спектроскопии (ТДС). Анализ проводился в установке МР-2, в сверхвысоковакуумной камере ТДС анализа, транспорт образцов в которую осуществлялся без их контакта с атмосферным воздухом. Нагрев во время ТДС анализа проводился до 1400 К со скоростью 2 К/с. За время ТДС анализа весь литий полностью испарялся. Зависимость содержания изотопов водорода в соосаждённых с литием слоях от температуры подложки представлена на рисунке 1.

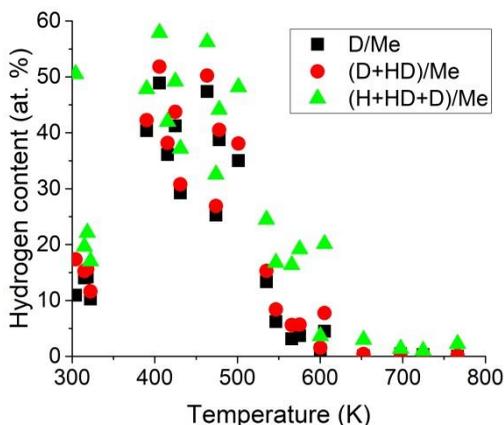


Рисунок 1. Зависимость содержания изотопов водорода в литий-дейтериевых соосаждённых слоях в зависимости от температуры подложки во время осаждения

Большое содержание протия в исследованных слоях, по всей видимости, объясняется низкой чистотой использованного лития и присутствием в нём растворённого протия. В целом можно видеть, что содержание изотопов водорода в плёнках имеет максимум в температурном диапазоне от  $\sim 400$  К до  $\sim 500$  К. При температурах от  $\sim 550$  К содержание изотопов водорода в плёнке быстро спадает.

Так как литий является легкоплавким материалом и мог испаряться с поверхности подложки непосредственно во время осаждения, было проведено дополнительное исследование, определяющее скорость испарения плёнок. Для этого было подготовлено несколько плёнок, осаждённых на образцы, находившиеся при разных температурах во время осаждения. Толщины плёнок контролировались при помощи кварцевых микровесов, расположенных вблизи подложек, на которые происходило осаждение. Поверхность кварцевых микровесов находилась при комнатной температуре. Толщины плёнок, осаждённых на подложки с разными температурами, измерялись при помощи методики обратного рассеяния Резерфорда (ОРР). Устанавливалось соотношение между количеством лития на подложке и на кварцевых микровесах. Для осаждения без дополнительного подогрева предполагалось, что 100% лития, попадавшего на подложку, оставалось на ней. По уменьшению отношения количества лития на горячей подложке к количеству лития на микровесах при постоянной скорости осаждения судилось о скорости испарения лития с подложки во время осаждения.

Было установлено, что при температурах до 570 К испарением с поверхности во время осаждения можно пренебречь, а при 620 К на поверхности сохранялось  $\sim 10\%$  осаждённого лития. Такая зависимость находится в пределах литературных данных о температурной зависимости скорости испарения металлического лития (рисунок 2). При этом даже при 800 К на поверхности сохранялись следы присутствия лития в виде отдельных кристаллов на поверхности, что говорит о быстром образовании на поверхности тугоплавких литиевых соединений.

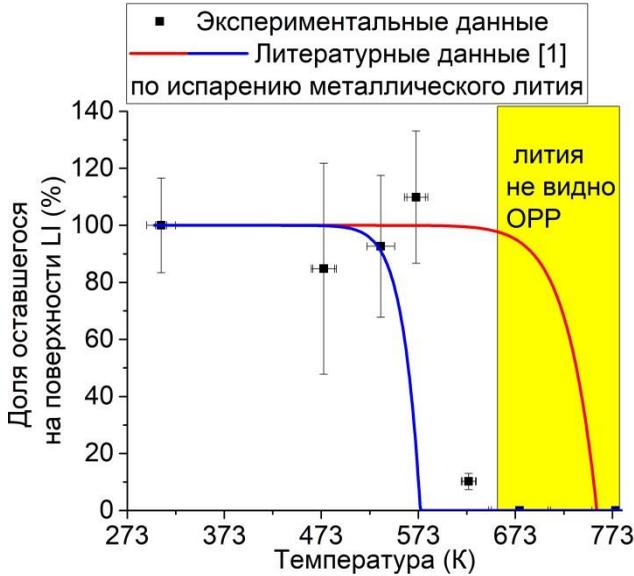


Рисунок 2. Зависимость доли лития, остающегося на подложке после соосаждения от температуры подложки

В целом полученные результаты подтверждают данные [2], говорящие о наличии температурного диапазона работы коллекторов лития в котором скорость испарения лития с поверхности ещё мала, позволяя осуществлять его эффективный сбор, а содержание дейтерия в них уже мало, делая низкой вероятностью выпадения твёрдых гидридных фаз.

#### Список литературы

- [1] Субботин В.И. и др., Литий, Москва, ИЗДАТ, 1999, ISBN:5-86656-088-7
- [2] S.V. Mirnov 2019 Nucl. Fusion 59 015001

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Когда в установке пойдёт термоядерная реакция, выделяемая мощность и продукты реакции должны будут отводиться без разрушения машины и отравления плазмы примесями или потери контроля плотности, и на первый план выходит взаимодействие плазмы со стенкой. Анализ имеющихся экспериментальных данных, полученных до настоящего времени на различных токамаках и стеллараторах [1], показывает устойчивую тенденцию сокращения максимального времени разряда с увеличением средней удельной нагрузки на первую стенку. Вероятной причиной этого является изменение характеристик поверхностей при длительном взаимодействии с плазмой.

Поскольку экспериментов с термоядерной плазмой пока нет, основным источником информации о свойствах пристеночной плазмы в реакторных условиях является численное моделирование, основанное на разумных теоретических соображениях, опробованных сравнением с существующим экспериментом и позволяющее экстраполировать результаты этих экспериментов к реакторным условиям. Разработка расчётных моделей, их сравнение с экспериментом и приложение к реакторным проектам занимают многие годы и ведутся совместными усилиями специалистов из различных лабораторий и разных стран.

В настоящем докладе обсуждаются различные аспекты взаимодействия плазмы с поверхностью с точки зрения проблем и потребностей реактора. Рассматриваются тепловые нагрузки на диверторные пластины и первую стенку, откачка частиц, эрозия и перераспределение материала стенки, образование пыли и влияние её на плазму, а также захват газа в материале первой стенки и выход его оттуда. В частности, концентрация тепловых нагрузок на диверторных пластинах может в значительной степени компенсироваться диссипативными процессами в диверторе при увеличении давления рабочего газа и добавлении излучающей примеси. При этом достижимая мощность термоядерных реакций ограничена максимальной допустимой тепловой нагрузкой на диверторные пластины. Это ограничение, а также повреждение твердых поверхностей при наличии импульсных сбросов энергии и частиц с края плазменного шнура (ЭЛМов), пылеобразование и

сложность удаления трития, захваченного материалом твёрдой стенки, стимулируют поиск нестандартных решений, обеспечивающих восстанавливаемость стенки в процессе разряда – таких как жидкометаллические поверхности.

#### **Список литературы**

[1] S. V. Mirnov, “Tokamak evolution and view to future”, *Nucl. Fusion*, vol. 59, no. 1, p. 015001 (15pp), 2019.

## **ИСТОЧНИКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ МАТЕРИАЛОВ И ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Источники нейтронов ДТ-синтеза с энергией 14.1 МэВ с интенсивностью до  $10^{19}$  н/с необходимы для развития инновационных материалов, компонент и базовых технологий демонстрационных установок термоядерного синтеза (DEMO) и гибридных систем синтеза-деление (ГССД). Важность создания таких источников неоднократно подчеркивалась международным термоядерным сообществом [1,2]. В докладе обсуждаются современное состояние и перспективы развития источников термоядерных нейтронов в нашей стране и за рубежом на временном интервале стратегического развития установок УТС и ГССД до 2070 г.

Существенными требованиями к источникам нейтронов являются, прежде всего, спектральные характеристики нейтронных потоков и соответствие регулированию ядерных объектов в стране сооружения, а также работа в непрерывном режиме длительностью до года, нейтронные нагрузки более  $0.2$  МВт/м<sup>2</sup>, совместимость с системами испытаний свойств материалов в процессе облучения, значительные размеры зоны облучения от литров до кубометров, низкие градиенты нейтронных потоков и температуры в области размещения испытательных образцов.

Несмотря на высокие скорости набора повреждений, современные нейтронные источники на основе высокопоточных испытательных реакторов с быстрым спектром деления и ускорителей, поддерживающих реакцию скалывания/глубокого расщепления/spallation (до 10 сна/год), не обеспечивают соответствующих спектральных характеристик нейтронных потоков и не способны дать информацию о повреждениях материалов за счет генерации газов и трансмутаций в условиях работы DEMO и ГССД. Не обеспечивает спектральные характеристики завершившая стадию технического проектирования установка IFMIF и ее более современная модификация DONES с энергиями пучка 40 МэВ, использующие реакции  $\text{Li}(d, n) 2\text{He}$  и др.

Определенные надежды связываются с пока находящимися на уровне концептуального проектирования нейтронными источниками на основе сферического токамака (СТ и КТ) (США, ЕС, РФ), газодинамической ловушки (КНР) и плазменно-пучкового разряда (США). Обсуждаемые установки могут быть построены и начать давать необходимую для

проектирования, сооружения и лицензирования ГССД в 10 летней перспективе. Выполненное сравнение показывает, что при реализации длительных разрядов НИ на СТ способны обеспечить развитие ГССД уровня ГРУ. Открытые ловушки потребуют существенных физических НИОКР и усилий по проектированию НИ, что снижает их шансы на вклад в развитие ГССД. НИ на основе плазменно-пучкового разряда представляются весьма перспективной системой, если будет найдено техническое решение по вводу дейтериевого пучка в тритиевую газовую мишень с давлением 60 тор.

Успешная реализация программы УТС и ПТ в РФ потребует не только создание НИ но и эффективной координации всех работ в области материалов.

#### **Список литературы**

- [1] Б.В. Кутеев и др. Физика плазмы, 2010, том 36, № 4, с. 307–346.
- [2] Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research. 2018. <https://www.goodreads.com/book/show/43328665-final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-u-s-burning-plasm>

М.А. ЛАРЧЕНКО<sup>1,2</sup>, И.М. ПОЗНЯК<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМА ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ

Во время переходных плазменных процессов в ИТЭР (ELM-ы, срывы, вертикальные перемещения плазменного шнура) ожидается воздействие интенсивных потоков плазмы на защитные покрытия вакуумной камеры. При длительности воздействия  $t = 1 - 3$  мс тепловые нагрузки на вольфрамовые (дивертор) и бериллиевые (первая стенка) облицовочные пластины будут доходить до  $Q = 80$  МДж/м<sup>2</sup> [1], что соответствует фактору теплового воздействия  $F = Q/t^{0.5}$   $F = 2500$  МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0.5</sup> и существенно превосходит пороги плавления материалов.

Эрозия за счет испарения защитных пластин и образования металлической пыли может повлечь поступление примесей в горячую термоядерную плазму и вызвать ее радиационное охлаждение. Кроме этого, будет происходить сокращение срока службы защитных покрытий и накопление пыли в вакуумной камере токамака [1]. Для создания и проверки расчетно-теоретических моделей [2,3], описывающих указанные процессы, нужны экспериментальные данные о поведении материалов под действием интенсивных плазменных потоков, а также – о свойствах образующихся продуктов эрозии. Получить такие данные являлось основной целью представленной работы.

Существующие токамаки не обладают достаточной мощностью, чтобы воспроизводить условия, ожидаемые во время переходных процессов в ИТЭР, поэтому для испытания материалов применяют плазменные ускорители, магнитные плазменные ловушки, лазеры, электронные и ионные пучки. В представленной работе эксперименты по облучению материалов плазмой были выполнены на исследовательской установке МК-200UG. Интенсивность плазменного потока, фактор теплового воздействия, энергия ионов, плотность и давление плазмы на МК-200UG близки к параметрам, ожидаемым во время срывов и ELM-ов в ИТЭР [4].

В рамках представленной работы мишени из вольфрама, стали и алюминия в виде плоских пластин с размерами 6 см на 12 см подвергали воздействию потока водородной плазмы длительностью 25 мкс, плотностью тепловой энергии до 10 МДж/м<sup>2</sup> ( $F \leq 2000$  МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0.5</sup>) и энергией ионов  $\approx 1,5$  кэВ. Взаимодействие плазмы с мишенями происходило в продольном магнитном поле величиной 1,5 Тл.

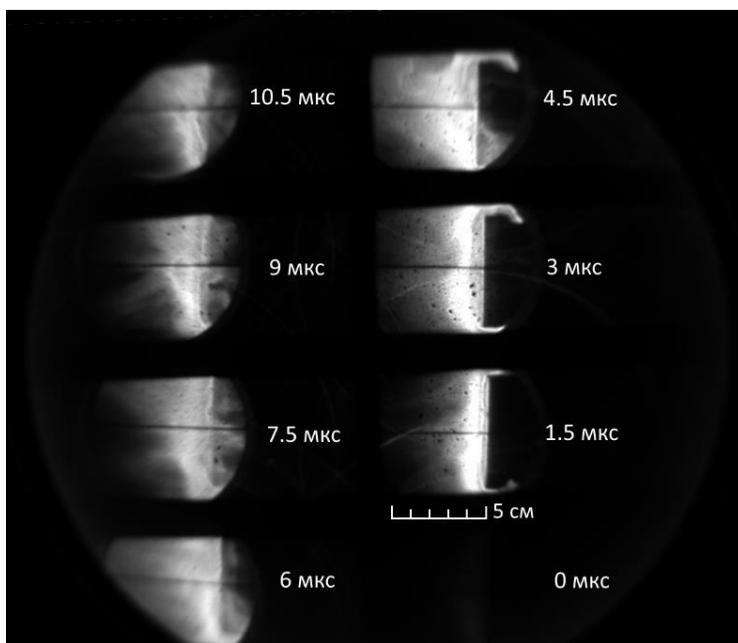


Рис 1. Динамика свечения приповерхностного плазменного слоя в мягком рентгеновском диапазоне. Поток водородной плазмы падает на мишень из вольфрама слева.

Для исследования формирования и динамики ионизованных паров материалов применялась восьмикадровая камера-обскура, чувствительная к излучению в мягком рентгеновском диапазоне. Получены данные о времени формирования, скорости распространения и длительности существования мишенной плазмы. Показано, что ее распространение происходит преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля. – рис. 1.



Рис. 2. Треки капель, инжектируемых с вольфрамовой мишени.  
Поток водородной плазмы падает на мишень справа.

Капли, выбрасываемые с поверхности металлических мишеней, регистрировались при помощи фотокамеры. Типичный снимок, полученный в эксперименте с вольфрамовым образцом, представлен на рис. 2. Получены данные о направлении и интенсивности выброса капель с вольфрамовой, стальной и алюминиевой мишеней. Проведена оценка скорости их движения.

#### **Список литературы**

- [1] Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. // J. Nucl. Mat., 2013, V.438, P. S48-S56.
- [2] Bazylev B.N., Janeschitz G., Landman I.S. et al. Melt damage simulation of W-macrobush and divertor gaps after multiple transient events in ITER // J. Nucl. Mat., 2007 V. 363, P.1011-1015.
- [3] Pestchanyi S., Arkhipov N., Landman I. et al. Simulation of tungsten plasma transport along magnetic field under ELM-like heat loads. // J. Nucl. Mat., 2013 V.438, P. S459-S462.
- [4] Позняк И.М., Архипов Н.И., Карелов С.В. и др. Свойства примесей вольфрама, образующихся в плазме при облучении вольфрамовых мишеней мощными плазменными потоками. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, Т.37, №1, С.70-79

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НАБЛЮДАЕМЫХ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ**

Анализ теоретических моделей [1], описывающих плазменные потоки и их взаимодействие с веществом выявил, что они не обеспечивают однозначную интерпретацию наблюдаемых явлений и не отвечают на фундаментальные вопросы: механизмы передачи энергии от интенсивных плазменных потоков материалу мишени, механизмы массопереноса в облучаемой мишени, механизмы формирования рельефа поверхности и ряд других. Необходимость проведения фундаментальных исследований по данной проблеме требует дальнейшего развития теоретических методов исследования.

В данной работе представлена математическая модель, описывающая взаимодействие интенсивных плазменных потоков с веществом. Двухмерная осесимметричная математическая модель включает в себя одножидкостные, двухтемпературные уравнения газовой динамики и уравнение переноса излучения, а также систему уравнений механики сплошной среды, описывающую упругопластические течения в мишени.

Численные исследования показали, что при торможении плазмы на мишени формируется отраженный поток. Взаимодействие отраженного потока плазмы с инжектированной плазмой в дрейфовую область приводит к формированию весьма сложных течений, которые характеризуются образованием вихрей, размеры которых зависят как от геометрии дрейфовой камеры, так и от параметров инжектированной плазмы. Основная доля инжектированной в дрейфовую область плазмы распространяется вдоль оси  $z$ , а часть – движется в радиальном направлении и захватывается вихрем. Такие сложные течения плазмы приводят к формированию сильно неоднородных по объему распределений плотности, давления и температуры. По мере роста вихря, часть плазмы начинает из него уходить на боковую стенку камеры, как и плазма, отраженная от мишени. В итоге по истечении определенного времени в рассматриваемой системе устанавливается состояние, которое можно рассматривать как стационарное. Как видно из приведенного ниже примера (рис. 1), время установления «стационарного» состояния составляет 10 – 20 мкс. При таком состоянии радиальное распределение потока энергии на поверхности мишени остается практически

неизменным. Также практически остаются неизменными полная масса и полная энергия плазмы в дрейфовой области.

Представленные на рис. 1 зависимости от времени теплового, радиационного и суммарного потоков мощности на поверхности мишени, для различных начальных температур свидетельствуют об определяющей доле радиационного механизма передачи энергии от КПП мишени.

Отметим, что доля энергии, передаваемая мишени в виде радиационного и теплового потоков, зависит как от параметров плазмы, так и от геометрии облучения. При инжекции плазмы с температурой 1эВ в камеру с расстоянием до мишени 5см, переданная мишени доля от инжектированной энергии  $W_E \cdot \tau_u$  составляет 0.24. Увеличение температуры инжектированной плазмы до 2эВ приводит к развитию более интенсивных течений, что приводит к уменьшению времени взаимодействия плазмы с мишенью. Доля переданной энергии в этом случае составляет  $\sim 0.1$ . Если же не меняя температуры плазмы уменьшить размер дрейфовой области до  $z_M = 3\text{см}$ , то переданная энергия составляет  $\sim 0.07$ .

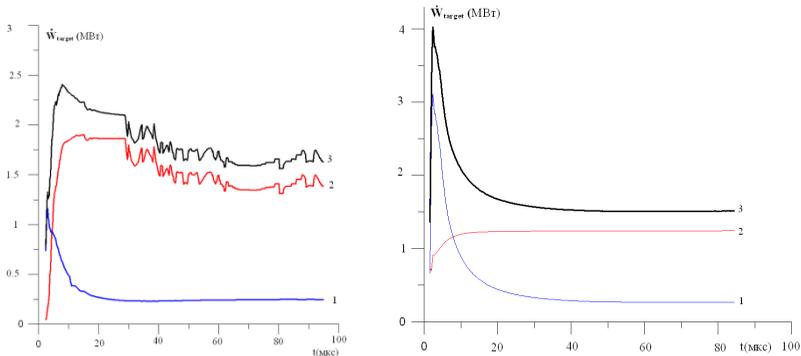


Рис. 1. Зависимость от времени теплового (кривая 1), радиационного (2) и суммарного (3) потоков мощности на поверхности мишени при инжекции в дрейфовую область гелиевой плазмы с начальной скоростью  $v_0 = 10^4$  м/с, а – температурой  $T_0=1\text{эВ}$ , б –  $T_0=2\text{эВ}$  и плотностью  $\rho = 0.1\rho_0$ , где  $\rho_0=1.78 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> – плотность при нормальных условиях.

Характер течений плазмы в дрейфовой области определяет радиальное распределение плотности потока энергии на поверхности мишени. Как показано на рис. 2, в зависимости от параметров КПП на поверхности

мишени могут формироваться различные распределения плотности потока энергии. Данный результат имеет экспериментальное подтверждение. В некоторых экспериментах на установке [2] след пучка плазмы на мишени имел кольцевую структуру.

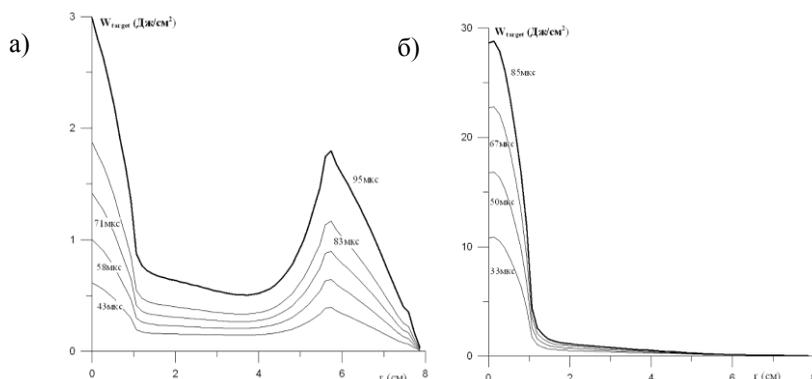


Рис. 2. Радиальное распределение плотности энергии на поверхности мишени в различные моменты времени при облучении гелиевой плазмой. *a* – условия облучения, как на рис. 1*a*; *б* – условия облучения, как на рис.1*б*.

Полученные значения термодинамических параметров вещества при воздействии интенсивных плазменных потоков были использованы при моделировании массопереноса вещества [3], динамики рельефа поверхности [4-6].

В результате проведенных численных исследований были получены поля напряжений и температур формирующиеся в мишени при воздействии на нее интенсивными потоками энергии. Показано, что при увеличении длительности импульса при одинаковой плотности поглощенной энергии уменьшается температура поверхности мишени. Полученные значения глубины проплава от 5 до 50 мкм согласуются с экспериментальными данными [2,7].

Исследования массопереноса вещества показали, что неравномерный прогрев поверхности мишени может приводить к возникновению объемных течений расплава приводящие к более равномерному распределению температуры по объему расплава. Следует отметить, что роль термокапиллярной конвекции в процессах массопереноса при обработке плазменными потоками мала, в сравнении с обработкой низкоэнергетическими электронными пучками.

The research was supported in part by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (2017122-GZ) for support of research at the South Ural State University).

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0011

### **Список литературы**

- [1] А.Я. Лейви, А.П. Яловец. Моделирование воздействия интенсивных плазменных потоков на вещество. // Челябинск -2016, 111 с
- [2] В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.М.Анищик, В.М. Асташинский, Н.Т. Квасов. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками.// Минск: БГУ.2013. С. 248.
- [3] A. Ya Leyvi, A.P. Yalovets Numerical study of mass transfer of a material under intensive flows of high-speed electrons and plasma // IOP Journal of Physics: Conference Series 830 (2017) doi :10.1088/1742-6596/830/1/012071
- [4] А.Я. Лейви, В.М. Асташинский, Н.Н. Черенда, В.В. Углов, А.П. Яловец. Формирование рельефа поверхности металлической мишени при воздействии компрессионных плазменных потоков// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. –2014. –№ 6. –С.12-18 DOI: 10.7868/S0207352814060055
- [5] А.Я. Лейви, В.М. Асташинский, Н.Н. Черенда, В.В. Углов, А.П. Яловец Сравнительный анализ процессов формирования поверхности материала при различных способах воздействия интенсивными потоками энергии // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. –Т.57, – №12/3 март. –С. 294-298.
- [6] А.Я. Leyvi, N.N. Cherenda, V.V. Uglov, A.P. Yalovets. The impact of a shock-compressed layer on the mass transfer of target material during processing compression plasma flows.// Resource-Efficient Technologies 3 (2017) 222–225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.refit.2017.06.003>
- [7] И.М. Позняк, Н.С. Климов, В.Л. Подковыров и др. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы.// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 4. С. 23-33.

А.Б. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>, Ю. ПОЛВИ<sup>2</sup>, Э. САФИ<sup>2</sup>  
Ф. ДЖУРАБЕКОВА<sup>1,2</sup>, К. НОРДЛУНД<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>2</sup>University of Helsinki, Helsinki, Finland

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА АЗОТОМ

Экстремально большие потоки тепла на материалы первой стенки, ожидающиеся в токамаках-реакторах, одна из основных проблем на пути реализации термоядерной энергетики. Возможное решение – добавление в диверторную плазму небольшого количества специально выбранного газа. В вольфрамовом диверторе реактора ITER предлагается использовать для этого азот (N) [1]–[3]. Но взаимодействие азота с пластинами дивертора будет приводить к эрозии и изменению свойств вольфрама (W).

Энергия активации диффузии азота в вольфраме очень велика:  $E_a = 2.32 \pm 0.16$  эВ [4]. По этой причине в ходе бомбардирования вольфрама азотом последний накапливается в материале, формируя слой моонитрида (WN), ограниченный несколькими нанометрами.

В данной работе мы исследуем распыление вольфрама азотом методом молекулярной динамики. Для расчёта используется недавно разработанный потенциал взаимодействия W-N [5]. Мы моделируем кумулятивное распыление вольфрама азотом для энергий в диапазоне 10 – 1000 эВ при температуре 300К и 600К. Начальный образец состоит из 3000 атомов вольфрама расположенных в узлах объёмно-центрированной кристаллической (ОЦК) решётки. Характерный размер образца  $27 \times 27 \times 67$  Å. Для моделирования макроскопического бруска металла на параллельные грани наложены периодические граничные условия. Атомы азота запускаются с высоты 5 Å над поверхностью под углом 10 градусов к нормали верхней грани образца. Последние 3 слоя атомов вольфрама в начальном образце жёстко зафиксированы, рис.1. Один запуск моделирует 7 пс времени эксперимента. Этого времени достаточно для релаксации образца перед запуском следующего атома азота.

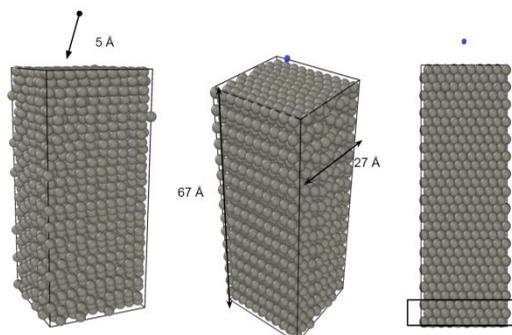


Рис. 1 Образец до начала распыления. Серые сферы визуализируют атомы вольфрама, синяя – атом азота. На рисунке также указаны характерные размеры образца и параметры моделирования.

В ходе моделирования азот накапливается в исходном образце. В начале зависимость концентрации азота от количества запусков близка к линейной. Однако, по мере того как поверхность вольфрама наполняется азотом, процесс его накопления замедляется за счёт роста коэффициента распыления уже накопленного в образце азота, рис.2. Это происходит тем быстрее, чем меньше энергия налетающих частиц и, соответственно, чем меньше глубина слоя насыщения. Для энергии 10 эВ насыщение было достигнуто после 6000 запусков.

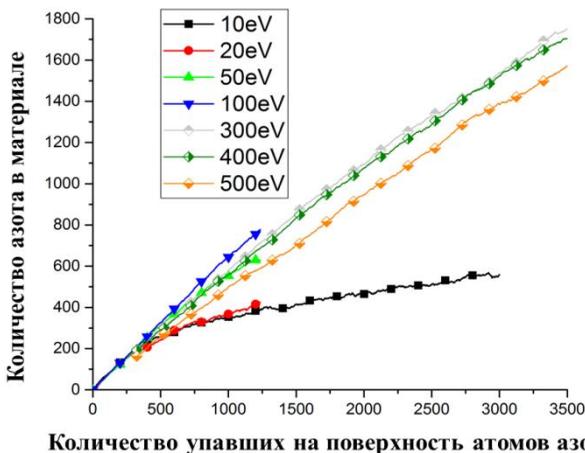


Рис. 2 Зависимость количества накопленного в материале азота от числа налетающих атомом для различных энергий.

Накопление азота уменьшает коэффициент распыления вольфрама почти на порядок. На рис. 3 представлен график, иллюстрирующий этот процесс. Объяснить это можно уменьшением концентрации вольфрама на поверхности материала [6]. Кроме того, в ходе работы было обнаружено, что энергия связи атомов вольфрама с материалом увеличивается при накоплении в образце азота. Это так же может быть причиной уменьшения коэффициента распыления. Коэффициент распыления вольфрама выходит перестает уменьшаться после накопления определенного количества азота. Эти значения сходятся с экспериментальными данными, рис. 4. Моделирование также показало, что до половины атомов вольфрама распыляются в виде молекул мононитрида (WN) при энергиях 300 эВ, 400 эВ и 500 эВ.

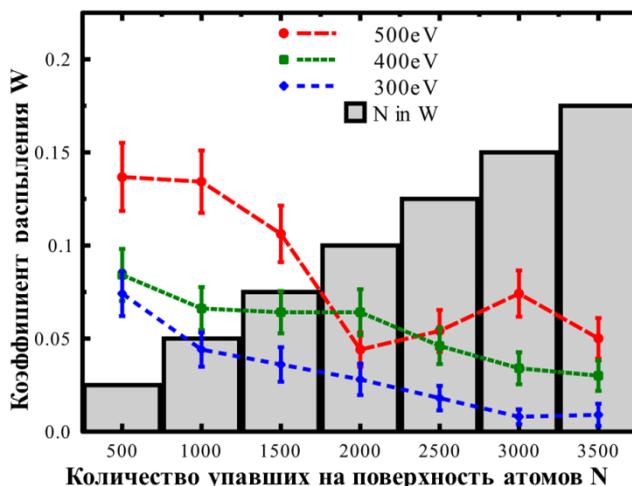


Рис. 3 Зависимость коэффициента распыления вольфрама от числа налетающих частиц атомарного азота. Серые столбики иллюстрирует относительное количество накопленного в образце азота.

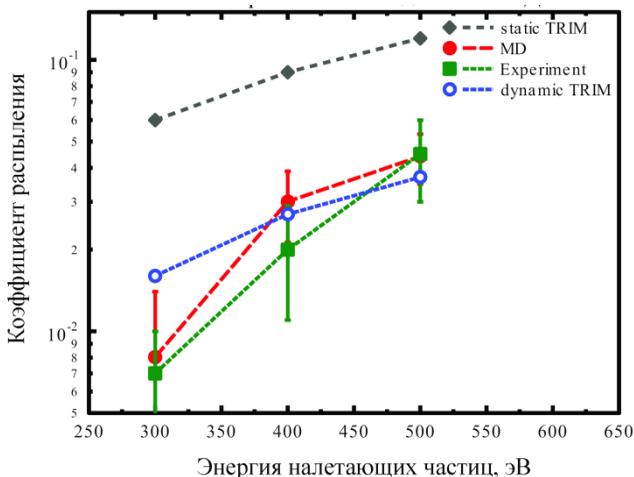


Рис. 4 Зависимость коэффициента распыления вольфрама от энергии налетающих частиц атомарного азота: эксперимент (квадраты), молекулярная динамика (цельные круги).

### Список литературы

- [1] G. Pacher, H. Pacher, G. Janeschitz, A. Kukushkin, V. Kotov, and D. Reiter, “Modelling of DEMO core plasma consistent with SOL/divertor simulations for long-pulse scenarios with impurity seeding,” *Nucl. Fusion*, 2007.
- [2] K. Tobita *et al.*, “Compact DEMO, SlimCS: design progress and issues,” *Nucl. Fusion*, 2009.
- [3] X. Bonnin *et al.*, “ITER divertor plasma response to time-dependent impurity injection,” vol. 0, pp. 1–6, 2017.
- [4] J. Keinonen, J. Räisänen, and A. Anttila, “Diffusion of Nitrogen in Ion-Implanted Chromium and Tungsten,” *Appl. Phys. A Solids Surfaces*, vol. 35, no. 4, pp. 227–232, 1984.
- [5] J. Polvi, K. Heinola, and K. Nordlund, “An interatomic potential for W–N interactions,” *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, vol. 24, no. 6, p. 65007, 2016.
- [6] K. Schmid *et al.*, “Interaction of nitrogen plasmas with tungsten,” *Nucl. Fusion*, vol. 50, no. 2, p. 25006, 2010.

Ю.В. МАРТЫНЕНКО<sup>1</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ Курчатовский институт, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

## **ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИПА «ПУХ» ИЗ РУТЕНИЯ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДОВ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ**

Электрокардиостимулятор (ЭКС) – устройство для электростимуляции миокарда, широко применяется в практике лечения и реабилитации после перенесенных инфарктов и других заболеваний сердца (см. [1]). Одним из важнейших условий работы ЭКС является стабильность передачи энергии в импульсах от ЭКС в сердце и оптимальное согласование параметров ЭКС и электродов кардиостимуляторов (см. [2]). Электрод ЭКС вживляют в ткани сердца, положительным электродом является корпус ЭКС. Электрическая связь электрода с тканью миокарда является, в основном, ёмкостной, поэтому необходимо максимально уменьшить это ёмкостное сопротивление. Для стимуляции миокарда требуется электрический импульс длительностью 100—300 мкс с энергией 1—5 мкДж, при пороге стимуляции 1 В переходная ёмкость должна быть 2—10 мкФ. В электролите крови у поверхности электрода при подаче на него потенциала возникает двойной электрический слой (ДЭС). Ёмкостное электрическое сопротивление ДЭС значительно превышает омическое сопротивление. ДЭС электрически эквивалентен двум последовательно включенным конденсаторам, его ёмкость определяется ёмкостью внутренней плотной части ДЭС и ёмкостью внешней диффузной части ДЭС. Для улучшения эффективности необходимо увеличить ёмкость ДЭС. Для этого используются два способа – (1) увеличение площади поверхности электрода, создавая развитую поверхность электрода, и (2) увеличение адсорбции поверхности специальными покрытиями. Современные электроды кардиостимуляторов имеют характерный размер неоднородности развитой поверхности ~ 1 мкм, что меньше внутреннего плотного слоя ДЭС толщиной менее 1 нм. Поэтому для электродов кардиостимуляторов следует уменьшать размер элементов структуры поверхности вплоть до 1 нм. Такие мелкомасштабные структуры можно получать при плазменной обработке металлов плазмой. В НИУ «МЭИ» создана плазменная установка ПЛИМ [3] для получения такой развитой наноструктуры поверхности на металлах. Недавно в экспериментах на плазменных установках при облучении в гелиевых разрядах плазмой

металлов были получены наноструктурированные поверхности [4,5] со структурой типа «пух», см. рис.1., которая состоит из волокон с размером ~ 20 нм, что на 2 порядка меньше размеров структурных элементов поверхности современных электродов ЭКС. Такие поверхности формируются при длительном (до сотен минут) плазменном облучении тугоплавких металлов, в том числе вольфрама, молибдена, титана, платины и некоторых других металлов. Это открывает возможности для развития технологии изготовления электродов электрокардиостимуляторов с улучшенными характеристиками.

В качестве материала покрытия электродов ЭКС в настоящее время наилучшие характеристики имеют элементы платиновой группы - платина Pt и иридий Ir (иридиевое покрытие имеет малое ёмкостное сопротивление), а также нитрид титана TiN. Основная функция покрытия заключается в увеличении адгезии положительных ионов. Адгезию положительных ионов металлами определяет электроотрицательность металла [6]. Элементы платиновой группы имеют наибольшее сродство к электрону среди металлов (за исключением W, который не подходит для контакта с кровью по некоторым причинам), поэтому предпочтительны для использования в качестве покрытий электродов ЭКС.

Мы впервые предлагаем использовать для покрытия электродов элемент платиновой группы рутений Ru [7], который является химическим аналогом иридия, но имеет ряд преимуществ. Рутений единственный из элементов платиновой группы естественно присутствует в организме человека. Рутений, так же как платина и палладий, обладает каталитическими свойствами, но отличается от них большей селективностью. Тонкая пленка рутения существенно изменяет свойства и качество изделий, повышает их химическую и механическую стойкость, делает их коррозионно-устойчивыми, улучшает электрические свойства. В медицине препараты на основе рутения применяют в качестве лекарства и диагностических средств. Рутений значительно дешевле иридия (в 5,5 раз).

На установке ПЛМ [2] планируется провести эксперименты, направленные на создание улучшенного покрытия электрода ЭКС: в плазменном гелиевом разряде на электроде будет формироваться наноструктурированное покрытие из рутения распылением Ru мишени. Предполагается проверить несколько подходов, в т.ч., создание структуры типа «пух» на поверхности титана и впоследствии на эту структуру напылять рутений; либо формировать структуру типа «пух» на слое напыленного рутения. Такие эксперименты открывают возможность

разработать новую технологию изготовления электродов электрокардиостимуляторов с улучшенными характеристиками.

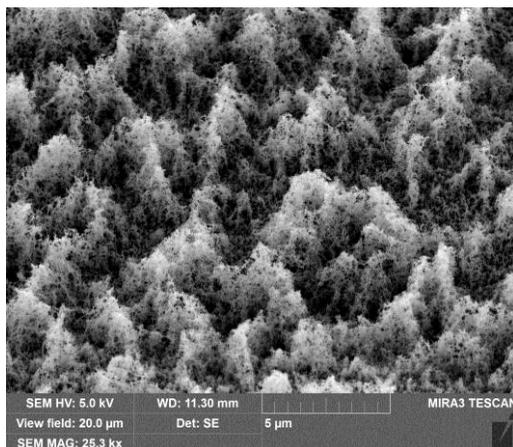


Рис. 1. Наноструктура типа «пух» на поверхности вольфрама, сформированная в гелиевом разряде в установке ПЛМ.

В заключение, впервые предлагается создать на поверхности электродов ЭКС наноструктуру типа «пуха», которая состоит из волокон с размером  $\sim 20$  нм, что на  $\sim 2$  порядка меньше размеров элементов структуры поверхности современных электродов ЭКС. Мы впервые предлагаем использовать для покрытия электродов рутений Ru, который является химическим аналогом иридия и имеет ряд преимуществ для технологического применения. Такие работы будут проведены на установке ПЛМ (НИУ «МЭИ»), в которой при плазменной обработке в гелиевом разряде будут использованы различные комбинации плазменного облучения электродов ионами гелия и напыления рутения для получения оптимальной поверхности электродов ЭКС. Такие эксперименты открывают возможность разработать новую технологию изготовления электродов электрокардиостимуляторов с рутениевой наноструктурированной поверхностью для обеспечения повышенной эффективности и надежности ЭКС.

Работа поддержана грантом РФФ 17-19-01469.

#### **Список литературы**

[1] М. Шальдах. Электрокардиотерапия. Санкт-Петербург. Изд. «Северо-Запад». 1992.

- [2] О.И. Обрезков и др. Исследование электрохимических свойств тонкопленочных материалов для покрытий электродов кардиостимуляторов, Медицинская техника, в печати /
- [3] В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, стр. 3-36/
- [4] S. Kajita e a. Sci Rep. 2018.8(1) 56.
- [5] S. Kajita e a. Nucl. Fusion. 2018. 58. 106002.
- [6] К.В. Иконникова и др. Теория и практика рН-метрического определения кислотно-основных свойств поверхности твердых тел, Издательство Томского политехнического университета. 2011.
- [7] М. В. Раевская, Е.М. Соколовская. Физикохимия рутения и его сплавов, М., 1979.

С.В. МИРНОВ<sup>1,2</sup>, А.Т. КОМОВ<sup>1</sup>, А.Н. ВАРАВА<sup>1</sup>,  
И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>3</sup>, А.В. ДЕДОВ<sup>1</sup>, А.В. ЗАХАРЕНКОВ<sup>1</sup>,  
А.В. ВЕРТКОВ<sup>3</sup>, Ю.В. СМОРЧКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

<sup>2</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

<sup>3</sup>АО «Красная Звезда», Москва

## **ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЯДЕННОГО РЕАКТОРА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ**

Одной из проблем, которые предстоит решать при создании стационарного термоядерного токамака-реактора, является разработка конструкций его внутрикамерных элементов (ВЭ). Конструктивные элементы первой стенки термоядерного реактора подвергаются разрушительному воздействию нейтронного потока с энергией 14,1 МэВ, высокотемпературной плазмы с энергией десятки кэВ, электромагнитного и теплового излучения. Все это приводит к деградации структуры и распылению материала структур, обращенных к плазме. На сегодняшний день традиционные конструкторские решения и материалы (в том числе тугоплавкие) не могут обеспечить создание ВЭ, способного выдерживать воздействие тепловых потоков плотностью 10 – 20 МВт/м<sup>2</sup> в течение коммерчески приемлемого периода эксплуатации.

Альтернативным решением этой проблемы является использование капиллярно-пористых структур (КПС), насыщенных жидкими металлами с низким (например, Li) или с высоким числом Z, но низким давлением пара (например, Sn). Это позволит создать долгоживущую, не повреждаемую и самообновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов, которая оказывает незначительное загрязняющее влияние на плазму [1-4].

Одной из основных проблем, возникающих при использовании жидкого металла, является выбор схемы охлаждения ВЭ и вида теплоносителя, который бы отвечал требованиям безопасности, предъявляемым к термоядерному реактору.

Экспериментальные исследования, выполненные авторами [5], по охлаждению ВЭ водой, недогретой до температуры насыщения, при высоких давлениях, показали хорошие результаты. Несмотря на это, применение высоких давлений в системах охлаждения можно рассматривать только для небольших исследовательских систем из-за высокой потенциальной опасности нарушения герметичности системы

охлаждения, что недопустимо для стационарно работающих установок типа токамак.

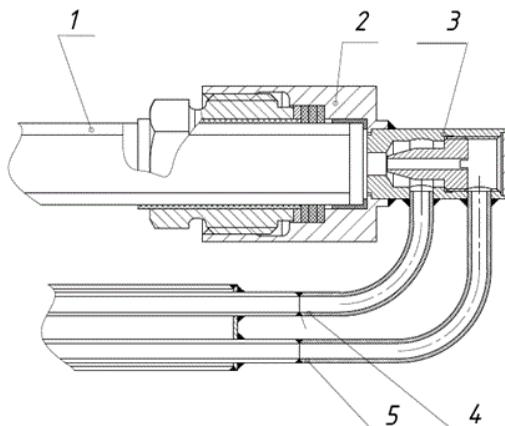


Рисунок 1. Схема генератора газожидкостного спрея: 1 – рабочий участок, 2 – узел уплотнения, 3 – форсунка, 4 – линия подачи воздуха (газа), 5 – линия подачи воды.

В качестве альтернативного метода теплосъема можно рассматривать применение литевых КПС со стороны ВЭ, обращенной в плазму, и охлаждением мелкодисперсной смесью воды и газа. При таком подходе система работает при низком давлении, удельное объемное содержание воды в теплоносителе не превышает 10% и может легко регулироваться. Конструктивно система проста и может быть изготовлена из обычных нержавеющей сталей аустенитного класса типа X18H10T.

Для работы в этом направлении на основе имеющегося оборудования авторами была разработана конструкция генератора диспергированного газожидкостного факела (рис.1).

Рабочий участок и гидравлический контур системы охлаждения изображены на рис. 2. Нагрев образца осуществлялся электронно-лучевым агрегатом ЭЛА-60/15Т.

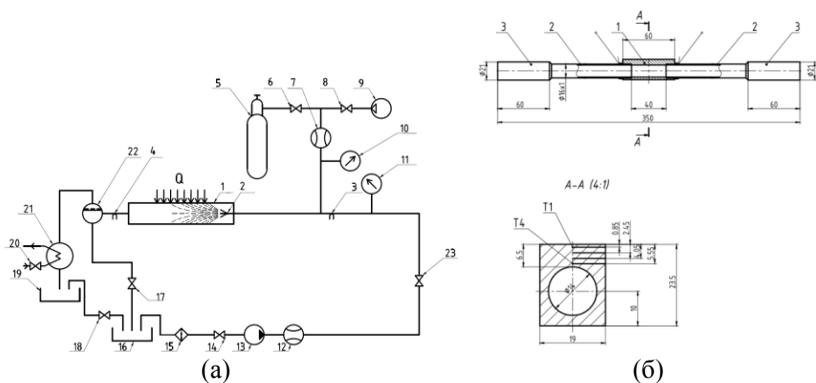


Рисунок 2. (а) Схема гидравлического контура для охлаждения рабочего участка: 1-обогреваемый рабочий участок, 2-форсунка (генератор газовойдынного спрея), 3-термопара на входе в РУ, 4-термопара на выходе из РУ, 5-баллон с рабочим газом, 6, 8, 14, 23 – вентили регулирующие расход компонентов, 17, 18, 20 – Схема гидравлического контура для охлаждения рабочего участка: 1 – обогреваемый рабочий участок, 2 – форсунка (генератор газовойдынного спрея), 3 – термопара на входе в РУ, 4 – термопара на выходе из РУ, 5 – баллон с рабочим газом, 6, 8, 14, 23 – вентили регулирующие расход компонентов, 17, 18, 20 – вентили запорные проходные, 7-расходомер газового потока, 9 – компрессор, 10 – манометр давления газа на входе в форсунку, 11 – манометр давления воды на входе в РУ, 12 – расходомер водяного потока, 13 – насос водяной, 15 – фильтр очистки, 16 – бак, 19 – мерная емкость, 21 – конденсатор, 22 – сепаратор. (б) Схема рабочего участка - 1 – мишень, 2 – несущие трубы, 3 – посадочные места

Экспериментальные исследования проводились в следующем диапазоне режимных параметров: давление воды  $p_{\text{воды}} = (1,0 \div 3,5) \cdot 10^5$  Па, давление воздуха  $p_{\text{возд}} = (1,0 \div 4,0) \cdot 10^5$  Па, массовый расход воды  $G_{\text{воды}} = 0,025 \div 0,058$  кг/с, массовый расход воздуха  $G_{\text{возд}} = 0,001 \div 0,0023$  кг/с, плотность теплового потока на стенке мишени  $q = 1 \div 5$  МВт/м<sup>2</sup>. Некоторые экспериментальные данные в виде зависимости

Первичный анализ полученных результатов показал эффективность данного метода охлаждения [6]. Вместе с тем, по мнению авторов, целесообразно продолжить подобные детальные исследования, расширив диапазон плотности теплового потока (до 10 МВт/м<sup>2</sup>), расходных характеристик воды и воздуха. Интерес также представляют исследования эффективности теплосъема газовойдынным спреем, где используется газ, существенно отличающийся по свойствам от воздуха (например, гелий).

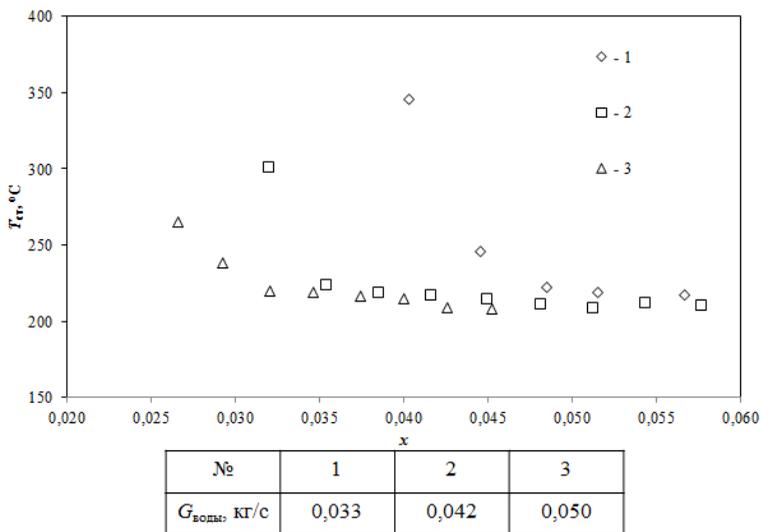


Рисунок 3. Зависимость температуры стенки мишени ( $T_{\text{ст}}$ ) от массового расходного газосодержания  $x = G_{\text{возд}}/G_{\text{воды}}$  ( $q = 4,2 \text{ МВт/м}^2$ )

Работа выполняется при финансовой поддержке гранта РНФ 16-19-10457.

### Список литературы

- [1] И.Е. Люблинский и др. Nucl. Mater., 2015, 463, С. 1156–1159.
- [2] С.В. Мирнов и др. Nucl. Mater., 2013, 438, С. 224–228.
- [3] С.В. Мирнов и др. Nuclear Fusion, 2015, 55, 123015.
- [4] И.Е. Люблинский и др. Nuclear Fusion, 2017, 57, 066006.
- [5] А.Н. Варава, А.В. Дедов, А.Т. Комов, В.В. Ягов. ТВТ, 2006, 44,5, 699.
- [6] А.В. Вертков и др. ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез, 2018,Т. 41.1. С.51.

O.V. OGORODNIKOVA, N.S. KLIMOV\*, Yu.M. GASPARYAN,  
V.S. EFIMOV, A.G. POSKAKALOV, A.V. KAZIEV,  
M.M. KHARKOV, N.V. VOLKOV

*National Research Nuclear University "MEPHI", Kashirskoe sh. 31, Moscow, Russia*

*\*State Research Centre of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and  
Fusion Research, ul. Pushkovykh, vladenie 12, Troitsk, 108840 Moscow, Russia*

## **PERSPECTIVE FUNCTIONAL MATERIALS UNDER EXTREME CONDITIONS: HIGH HEAT AND PARTICLE FLUXES AND NEUTRON IRRADIATION**

In a thermonuclear reactor, materials will be irradiated with energetic particles of hydrogen isotopes and helium (He), neutrons, and heat fluxes. Tungsten and dense nano-structured tungsten (W) coatings are used as plasma-facing materials in current tokamaks and are the reference materials of the ITER divertor and DEMO reactor and the possibility of using reduced-activated ferrite-martensitic, RAFM, steels not only as structural materials, but also as the material of the first wall of the thermonuclear reactor is considered. Also, these steels, together with a new generation oxide dispersion strengthening (ODS) steels by the addition of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles are considered as promising materials for fast neutron fuel cladding. In structural materials of the reactor core on fast neutrons at deep burn-up of nuclear fuel (15-20% and more t.a.) and, especially, the first wall and other nodes of the fusion reactor chamber, together with a high level of radiation damage, there will be an accumulation of significant amounts of helium and hydrogen isotopes. Hydrogen embrittlement and helium swelling in a fusion reactor are important issues that determine the applicability of the material and can cause a reduction in the lifetime of reactor components. Moreover, accumulation of helium in a metal at elevated temperatures leads to the growth of the so-called nano-structured 'fuzz' on the metal surface as well as high heat fluxes significantly change the near surface layers by melting and cracking. In this regard, the study of the accumulation of helium and hydrogen isotopes in W-based materials and in RAFM steels, the study of surface modification under the influence of plasma irradiation and a fundamental understanding of radiation damage in W- and Fe- based materials is critical for the design of materials in extreme environment, for example, for fusion reactors. In the present project, we investigate step by step the production of radiation-induced defects in perspective materials irradiated with protons, self-ions and neutrons. The strategy is to use simple materials as a first step, such as single crystal and well-annealed materials. Then we use materials with controlled micro- and nano- structure, namely, grain size, dislocations and

pores to define an effect of each type of initial defects on the development of the radiation damage. Afterwards, we use complex materials with additional chemical elements to define an effect of chemical composition on the radiation tolerance of the materials. In this way, we obtain new knowledge on primary defect formation in functional materials for advance fission and nuclear fusion reactors and influence of initial microstructure on the radiation defect evolution. The similar strategy is applied for investigation of the deuterium and helium retention in perspective materials with and without radiation damage irradiated by stationary plasma and pulsed plasma gun (QSPA-T). Methods of investigations are well-established method of positron-annihilation lifetime-spectroscopy (PALS), electron microscopy, Fib, NRA and TDS. Prediction of generation of radiation defects and tritium accumulation in radiation defects is important from the point of view of safety of fusion reactor due to the radioactivity of tritium, radiation embrittlement of the material and monitoring of the tritium cycle in the reactor. We focuses on a number of compelling fundamental science problems relevant to plasma-material interactions such as comprehensive studies of erosion, transport and retention of hydrogen and helium in perspective materials, changes in the microstructure, composition and morphology of promising new-generation materials under long-term irradiation and high heat flux irradiation, and the effect of helium on the deuterium retention and migration. We study the accumulation of deuterium (D) and He in W not only under normal operation conditions but also under transit events relevant to ITER using pulsed heat loads in quasi-stationary high-current plasma gun QSPA-T. We showed that the D retention after 10 pulses of plasma gun exposure was much higher than that after stationary low-energy plasma exposure at sample temperature of either 600 or 700 K indicating the dominate influence of ELM's-like events on the D retention compared to normal operation regime. The D retention in W samples with the presence of He-induced W 'fuzz' was smaller than without that. The results obtained give possibility to assess the particle retention in divertor areas subjected to high thermal loads at different operation regimes. Experimental study is accompanied by modelling to clarify the underlying physics and to define fundamental parameters of the hydrogen/helium/radiation damage/-metal interaction. Finally the comparison of the lab data with data obtained in current tokamaks is performed to identify the main parameters govern the tritium and helium retention in tokamaks and make reliable prediction for future experiments in ITER and DEMO.

## **НАКОПЛЕНИЕ ТРИТИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР**

Одним из каналов накопления трития в диверторе ИТЭР является диффузия трития вглубь вольфрамовых приемных пластин с последующим захватом на дефекты. Весь имеющийся предыдущий экспериментальный опыт свидетельствует, что из-за высокой температуры накопление трития в вольфраме будет умеренным или незначительным. Об этом же свидетельствуют и многочисленные расчеты. Такое оптимистичное заключение, однако, сделано в экспериментах и расчетах, в которых температура вольфрама считалась постоянной по глубине. При наличии градиента температуры, что характерно для приемных пластин ИТЭР, ситуация может оказаться не столь простой, поскольку тритий может диффундировать в холодные области тайла и захватываться там дефектами. В этом случае накопление может оказаться высоким, а детритизация с большой глубины доступными в ИТЭР способами проблематичной. Оценки накопления в дефектах в вольфраме в ИТЭР при диффузии в поле температур не производились ни экспериментально, ни расчётно.

Для качественной демонстрации эффекта непостоянной по глубине температуры воспользуемся простейшими одномерными уравнениями диффузии в поле дефектов без учета эффекта Сорэ, который дает поправку, непринципиальную для качественной демонстрации.

На рис.1 показан пример распределения подвижного и захваченного водорода в вольфраме толщиной 1 см при температуре 1000К равномерно распределенной по толщине, а на рис. 2 тоже самое, но при разной температуре на входе и выходе (1000 и 500 К соответственно). Концентрация ловушек  $10^{-3}$  ат.долей, концентрация подвижного водорода на входной границе тайла  $10^{-6}$  ат.долей, энергия связи с дефектами 1 эВ. Коэффициент диффузии по Фраунфельдеру. Видно, что при постоянной температуре профили подвижного и захваченного водорода пропорциональны друг другу, что и должно следовать из условия локального равновесия в растворе и дефектах, приемлемого для рассматриваемого случая. В случае же уменьшения температуры с глубиной наблюдается накопление большого количества водорода в холодной части тайла вплоть до состояния насыщения всех дефектов.

На рис.3 сравнивается накопление в рассмотренных двух случаях в зависимости от времени. Видно, что различие достигает порядка величины при больших временах

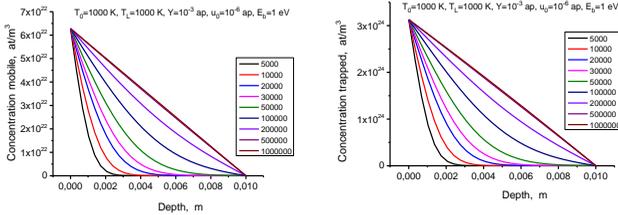


Рис. 1 Профили концентрации подвижного и захваченного водорода при постоянной по глубине температуре

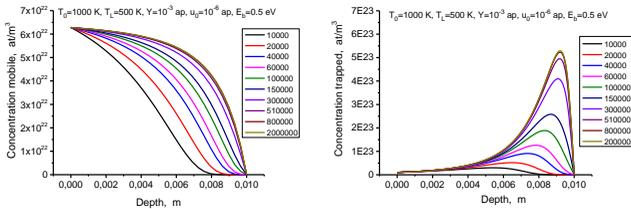


Рис. 2 Профили концентрации подвижного и захваченного водорода при уменьшающейся с глубиной температуре

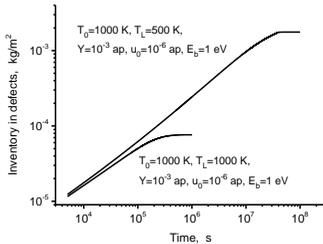


Рис.3 Количество водорода, накопленного в вольфраме в зависимости от времени для случаев постоянной и переменной по глубине температуры.

Среди параметров, которые могут оказать влияние на захват следует выделить энергию связи с дефектами и концентрацию дефектов, влияние которых показано на рис.4. Из рисунка видно, что дислокации (энергия связи  $E_b=0.5\text{эВ}$ ) оказывают незначительное влияние на захват водорода, а неопределенность  $E_b$  вакансий (1 эВ) и вакансионных кластеров (1.6эВ) играет незначительную роль. В состоянии насыщения дефектов количество захваченного водорода пропорционально концентрации

дефектов, а в переходном режиме это влияние существенно слабее. Влияние температуры существенно только в состоянии, близком к насыщению.

На этом же рисунке показано влияние условий на поверхности, которые характеризуются энергией активации для хемосорбции  $E_s$ , которая по теории Пика и Сонненберга определяет концентрацию растворенного водорода на входной поверхности при известном потоке водорода на неё. Видно, что этот параметр драматично влияет на уровень накопления в переходных режимах (до трех порядков величины). Все перечисленные выше параметры крайне неопределенны, но можно считать, что неопределенность  $E_s$  является наиболее существенным фактором, влияющим на накопление водорода. Стоит обратить внимание на необычный эффект: при определенных условиях накопление не уменьшается, а возрастает с температурой. То есть в ИТЭР можно ожидать большего накопления в горячих, а не в холодных частях дивертора.

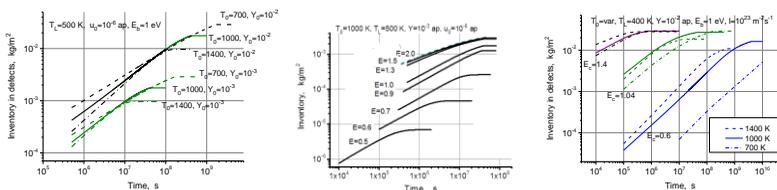


Рис. 4 Влияние энергии связи, концентрации дефектов и условий на поверхности на временные зависимости захваченного в дефекты водорода в пластине с переменной температурой. Параметры расчета указаны на поле рисунков.

Для демонстрационных расчетов диффузионного накопления трития в радиационных дефектах дивертора ИТЭР использовались расчетные данные Кукушкина [1] для потоков и оценки для температур на поверхности. На рис.5 показаны потоки частиц, температура на поверхности и пример расчета накопления. Поток частиц на поверхность состоял из потока ионов и надтепловых атомов. Поток возбужденных молекул не учитывался, хотя он дает существенный вклад в накопление трития. Интересно, что максимумы температуры и максимумы потоков не совпадают. При этом накопление происходит преимущественно в областях максимального потока (где температура невелика) и максимальной температуры (где поток невелик).

На рис.6 показаны примеры расчетов распределения захваченного трития по поверхности пластин дивертора и накопления трития в дефектах в зависимости от времени. Параметры расчетов приведены на поле рисунка. Видно, что при концентрации дефектов порядка 1 ат% накопление в диверторе может превысить 1 кг.

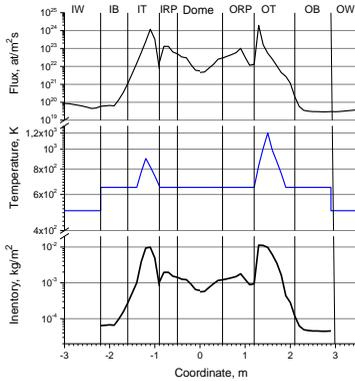


Рис.5 Распределение температуры и потоков частиц на пластины дивертора ИТЭР

Координата 0 соответствует середине купола дивертора. Положительные и отрицательные координаты в сторону внешней стенки и внутренней стенки соответственно.

Параметры расчета накопления  $E_c=0.85$  eV, концентрация дефектов  $Y=0.01$  ат.долей,  $E_b=1.2$  eV,  $E_D=0.4$  eV.

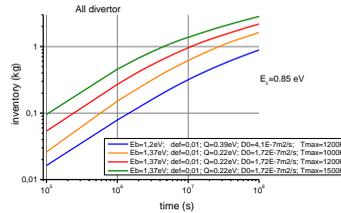
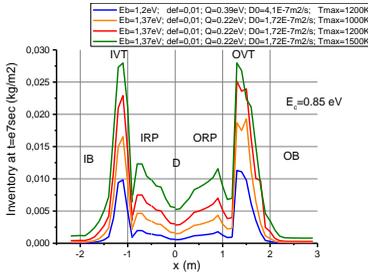


Рис.6 Примеры расчетов распределения захваченного трития по поверхности пластин дивертора и накопления трития в дефектах в зависимости от времени

Таким образом, наличие градиента температуры в пластинах дивертора может привести к драматичному накоплению трития в дефектах в холодных областях. Предсказания накопления крайне неопределенны в основном из-за неопределенности концентрации дефектов, условий на поверхности тайлов и температуры поверхности.

### Список литературы

[1] A.S. Kukushkin, Particle fluxes and energies expected on the walls, baffles, and dome in ITER at normal operation, ITER\_D\_27TKC6

А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, И.И. АРХИПОВ<sup>2</sup>, Я.А. БАБИЧ<sup>1</sup>, М.М. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>,  
Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, С.А. ГРАШИН<sup>3</sup>, В.Е. ДРОБНИН<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>,  
М.Г. ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, О.А. КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>,  
Т.М. СТЕПАНОВА<sup>1</sup>, В.А. ФЕСЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

<sup>3</sup>Научно исследовательский центр «Курчатовский институт»

## **АНАЛИЗ ВОЛЬФРАМОВЫХ ПЛАСТИН ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-10 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ**

Лимитер токамака Т-10 представлял собой кольцо из нержавеющей стали, на котором были установлены 32 пары вольфрамовых пластин с электронной стороны (е-тайлы) и столько же пластин с ионной стороны (i-тайлы). Пластины были изготовлены в НИИЭФА им.Ефремова из вольфрама марки ВМП производства фирмы «Полема» (г.Тула).

Пластины с внешней стороны подвергались максимальным нагрузкам до  $1 \text{ ГВт/м}^2$  убегаящими электронами и имели максимальные разрушения. Пластины на внутренней стороне имели минимальные нагрузки, достигающие, тем не менее  $30 \text{ МВт/м}^2$ . В данной работе исследовались пластины с минимальными тепловыми нагрузками с номерами 1-е и 1-і, ограничивающими плазменный шнур с внутренней стороны. Пластины исследовались с помощью растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгеновского фазового анализа, термодесорбционной спектроскопии и микротвердости.

Поверхности пластин, обращенные к плазме были сильно повреждены, на них видны глубокие трещины, оплавленные области, осажденные пленки, осажденные капли, следы дуг. Пластина с электронной стороны имела большее разрушение. На теневых сторонах пластин, обращенных в щель между е- и і- пластинами, видны толстые осажденные пленки и большие капли. На поперечных шлифах видны глубокие поперечные и латеральные трещины, выделения карбидов и большое количество пор, образованных при спекании порошкового материала, которые могут служить стоками для накопления водорода. На внешних сторонах пластин образуется карбид вольфрама  $W_2C$ , а на внутренних присутствуют еще и  $WC$ ,  $WO_2$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $Li_2O$  и др. На внешней поверхности пластин зарегистрированы растягивающие напряжения от 360 до 920 МПа; а на внутренней – сжимающие напряжения от –118 до –720 МПа. Твердость на поверхности крайне неоднородна даже в геометрически близких точках и меняется в диапазоне 200-2000 HV.



Рис.1 Вид обращенных к плазме сторон пластин 01e и 01i



Рис.2 Вид обращенных в щель поверхностей пластин 01e и 01i

В данной работе описываются эксперименты по термодесорбции дейтерия и гелия из различных участков пластины лимитера.

Термодесорбция исследовалась с разделением сигналов D2 и He (спектрометр Hiden Hal). Суммарный спектр m4 регистрировался квадруполом Pfeiffer. Для исследований было взято три образца с обращенной к плазме стороны пластины 1-е (образцы # 1, 2, 7), три образца с теневой стороны образца 1-е, обращенной в щель (образцы # 3, 4, 5) и для сравнения один образец (# 8) со стороны обращенной к плазме пластины 1-и (рис.3).

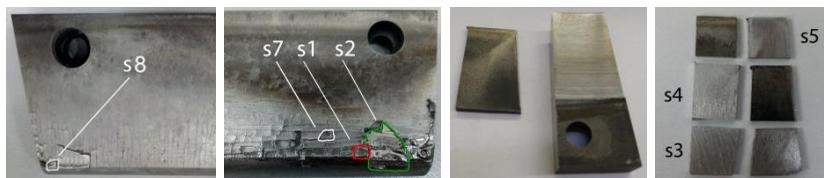


Рис. 3 Образцы с пластин 1-е (1, 2, 7) и 1-и (8), обращенные к плазме и с пластины 1-е, (3, 4, 5) обращенные в щель

На рисунках 4,5 показаны ТДС, измеренные суммарно для D2+He и для D2 отдельно. Десорбция дейтерия происходит в диапазоне 350-1300 К, а десорбция гелия в диапазоне 1100-2050 К. Полученные спектры мало похожи на спектры, которые получаются в экспериментах с ионным

облучением. В экспериментах с ионным облучением не происходит захвата дейтерия и гелия при таких высоких температурах, как в данных измерениях. Термодесорбция гелия из пластин лимитера происходит только при очень высоких температурах. Термодесорбция дейтерия наблюдается в очень широком диапазоне температур, и ее максимум приходится на существенно более высокие температуры, нежели в экспериментах с ионным облучением. Можно сделать вывод, что и гелий и дейтерий захватываются не только в зоне внедрения, но глубоко в металле, куда они диффундируют при высокой температуре и захватываются на дефектах далеко от поверхности. Количество захваченного дейтерия вблизи кромки на электронной стороне больше, чем на ионной стороне, хотя температура на электронной стороне больше. То есть с увеличением температуры на поверхности захват дейтерия не уменьшается, а увеличивается, а в экспериментах с ионным облучением все наоборот: захват всегда уменьшается с увеличением температуры. Температуры выхода с электронной стороны также больше. Это также можно объяснить диффузией дейтерия от горячей поверхности к более холодной середине пластины и захватом в более холодной области дефектами. Количество захваченного дейтерия и гелия вблизи рабочей кромки в теневой области, обращенной в щель между двумя пластинами, больше, чем в области, обращенной к плазме. Это может быть результатом высокочастотных разрядов в щелях в магнитном поле, которые мы наблюдали ранее в экспериментах с плазменно-пучковым разрядом в сильном магнитном поле на установке Пробкотрон, и которые приводили к осаждению углеводородной пленки в узкой щели между двумя пластинами. Эти разряды могут быть причиной осаждения углерода в щелях токамаков, которые работали с углеродными тайлами. При удалении от рабочей кромки вглубь щели количество захваченного гелия и дейтерия убывает.

В приповерхностном слое пластин температура слишком высока для захвата, поэтому, концентрация дейтерия в ней, вероятно, очень мала. Захват происходит в дефектах на большой глубине, где температура меньше, чем на поверхности. В качестве дефектов, захватывающих дейтерий, могут служить поры, которые в большом количестве образуются при спекании порошкового вольфрама, и которые наблюдаются на поперечных шлифах. При высокой температуре появляются также термические вакансии, не все из которых успевают рекомбинировать при остывании, вследствие чего также могут образовываться поры. Они же могут приводить и к появлению трещин,

которые также наблюдались в РЭМ. Дефекты в большом количестве могут появляться и на границах фазовых выделений, которые наблюдаются в большом количестве. В результате облучения ионами гелия также появляются дефекты, которые могут диффундировать в объем под действием температуры и напряжений.

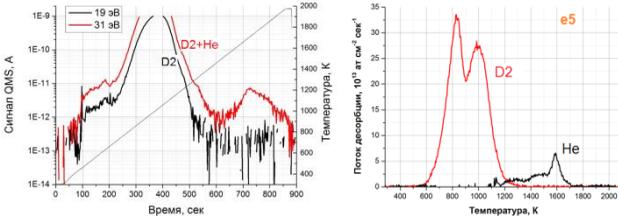


Рис. 4. Спектры термодесорбции ( $m/z = 4$ )

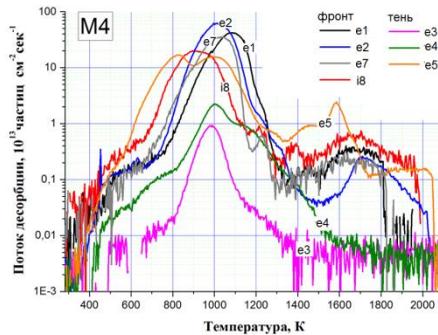


Рис. 5. Спектры термодесорбции ( $m/z = 4$ )

В заключение следует отметить следующее. Вольфрамовые пластины лимитера Т-10 претерпели существенные разрушения. При этом, в пластинах, несмотря на высокую температуру, накоплено большое количество гелия, и дейтерия. Особенности захвата и обратного газывыделения гелия и дейтерия в образцах из Т-10 существенно отличаются от особенностей захвата и газывыделения в традиционных экспериментах с ионами. Необходимо активизировать исследования плазменного воздействия в режимах, близких к штатным и внештатным режимам реактора, как на предмет разрушения материала, так и на предмет накопления гелия и изотопов водорода в глубоких слоях материала как на стороне, обращенной к плазме, так и в тневых областях.

А.Г. ПОСКАКАЛОВ<sup>1,2</sup>, Н.С. КЛИМОВ<sup>1,2</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>,  
О.В. ОГОРОДНИКОВА<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, М.С. ЗИБРОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  
<sup>2</sup>Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт  
инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва  
<sup>3</sup>Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany

## НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

В Международном термоядерном реакторе ИТЭР в качестве обращенных к плазме материалов будут использоваться вольфрам (W) и бериллий (Be). Из вольфрама будет изготовлено защитное покрытие диверторных пластин, а из бериллия — поверхность первой стенки. Тепловые нагрузки на пластины дивертора в токамаке масштаба ИТЭР в стационарной стадии DT-разряда будут достигать  $\sim 10$  МВт/м<sup>2</sup>, приводя к повышению температуры пластин в среднем до 1400 К; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины 0,6 – 3,5 ГВт/м<sup>2</sup>, что будет вызывать периодическое повышение температуры материала до температуры, сопоставимой с температурой плавления материала [1].

В силу кратковременности импульсных событий ранее предполагалось незначительное влияние данных процессов на общее накопление дейтерия в материалах первой стенки. Однако в работах [2,3] установлено, что данное утверждение требует детального изучения. Удалось выяснить, что накопление дейтерия после 10 плазменных импульсов выполненных на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия) выше, чем накопление дейтерия после стационарного плазменного воздействия на образец температурой 600 или 700 К (при аналогичной интегральной дозе облучения), что может указывать на доминирующее влияние событий подобных ЭЛМ на накопление дейтерия по сравнению со стационарным режимом. Кроме того определено, что с ростом числа импульсов накопление дейтерия в вольфраме увеличивается. Исследование поверхностного слоя образцов толщиной 6 мкм методом ядерных реакций показало незначительное содержание дейтерия в данном слое, тогда как основной накопление происходит в глубине образца, что объясняется высоким градиентом температуры у поверхности во время импульсных плазменных событий.

В настоящей работе проводилось облучение вольфрама потоком водородной плазмы длительностью 0,8 мс и тепловой нагрузкой 0,4 –

2,2 МДж/м<sup>2</sup> (0,5 – 2,8 ГВт/м<sup>2</sup>) с целью исследовать закономерности захвата газа поверхностным слоем вольфрама во время облучения импульсным потоком плазмы. После плазменного облучения образцы исследовались с использованием электронной микроскопии, методом термодесорбционного анализа, методом ядерных реакций. Так же было выполнено моделирование диффузионных процессов происходящих во время облучения с помощью пакета TMAP7.

На рисунке 1 приведены экспериментальные данные термодесорбционной спектроскопии после одного выстрела с различной тепловой нагрузкой. Можно видеть, что интегральное накопление непрерывно растет с увеличением нагрузки. Для образцов, поверхностный слой которых плавился в ходе облучения, количество захваченного дейтерия находилось на уровне  $(2 - 5) \cdot 10^{20}$  D/м<sup>2</sup>, что почти на порядок превосходит соответствующее значение при минимальной нагрузке.

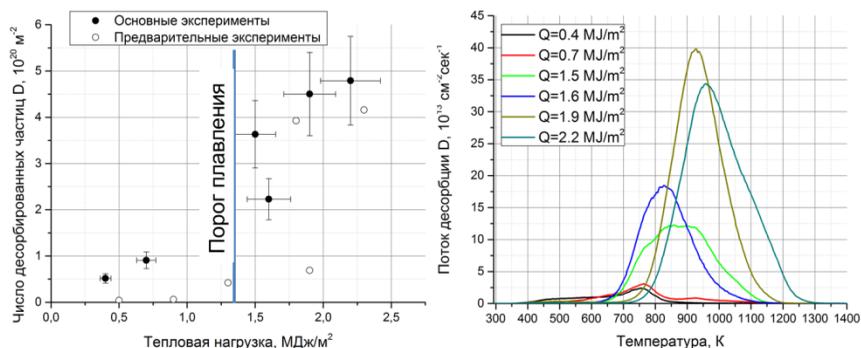


Рисунок 1. Слева - зависимость числа десорбированных частиц с единицы поверхности от тепловой нагрузкой (граница плавления вольфрама при импульсе длительностью 0,8 мс - 1,4 МДж/м<sup>2</sup>). Справа – спектры термодесорбции дейтерия.

Спектры термодесорбции преимущественно расположены в высокотемпературной области 700-1200 К и постепенно смещаются в область больших температур с увеличением нагрузки. Интересно, что схожие спектры наблюдались при ТДС анализе вольфрамовых пластин, являющихся частью лимитера токамака Т-10 [5].

Для выявления основных механизмов накопления в ходе воздействия импульсных плазменных нагрузок на поверхность вольфрама, было проведено моделирование с помощью расчетной программы TMAP7, которая позволяет моделировать коллективное движение частиц в

твердом теле на базе решения одномерного уравнения диффузии. Хорошее согласие было получено только в предположении неоднородного профиля ловушек, вызванного отжигом дефектов в приповерхностной области при тепловых нагрузках. При этом основное накопление происходит на глубинах в несколько десятков микрометров. На основе сравнения экспериментальных данных и моделирования видно, что основная причина высокого накопления – формирование большого градиента температуры в ходе облучения и наличие в глубине холодной области с большой концентрацией ловушек.

#### **Список литературы**

- [1] D.V. Kovalenko, et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions. // (2017) Nuclear Materials and Energy, 12, pp. 156-163.
- [2] А.Г. Посакалов. Изменение структуры приповерхностного слоя вольфрама и накопление дейтерия при импульсных плазменных нагрузках. "ВАНТ. Термоядерный синтез" (Том 41 Выпуск 1 2018 г.).
- [3] O.V. Ogorodnikova, et. al. D and He retention in W with and without He-induced W “fuzz” after irradiation with pulsed high-temperature D-plasma. Journal of nuclear materials.
- [4] ITER Vacuum Handbook.
- [5] А.А. Писарев и др. Анализ вольфрамовых пластин лимитера токамака Т-10 после длительной кампании (данный сборник).

С.А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, З.Р. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>,  
А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, С.Л. КАНАШЕНКО<sup>2</sup>, Ю.Д. ИВАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт биомедицинской химии им.В.Н. Ореховича

## **ЗАХВАТ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМ ПРИ ИОННОМ ВНЕДРЕНИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ И НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА**

В случае использования дейтерий-тритиевой смеси в качестве топлива в термоядерном реакторе неизбежно появление примеси гелия (He), являющегося продукта D–T реакции. Внедрение He в обращенные к плазме материалы может существенным образом влиять как на структуру их поверхностного слоя, так и на накопление изотопов водорода в этих материалах. Как известно, в области дивертора ITER в качестве обращенного к плазме материала будет использован вольфрам (W), который будет подвержен облучению высокими потоками ( $>10^{22}-10^{24} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) ионов He с низкой энергией (от десятков до сотен эВ) при повышенных температурах. В связи с этим, исследование взаимодействия He с W представляет большой интерес.

Распространенным методом исследования захвата He является термодесорбционная спектроскопия (ТДС). Несмотря на высокий интерес, существует не так много работ по десорбции He из W, особенно, при высоких температурах. Термодесорбционный анализ W, облученного при температурах, превышающих 900 К, проводился только для доз облучения выше  $10^{24} \text{ м}^{-2}$  [1–3]. Этот недостаток данных может частично объясняться исключительно высокими температурами десорбции. He может оставаться в металлах вплоть до температур порядка  $(0,6-0,7) \times T_{\text{пл}}$ , а для W это значение существенно выше технических ограничений большинства существующих ТДС-установок. Для того, чтобы преодолеть это ограничение, нагреватель установки «ТДС-стенд», которая использовалась для ТДС в данной работе, был геометрически оптимизирован, что позволило достигать температур вплоть до 2500 К в ходе ТДС.

Работа посвящена исследованию накопления гелия (He) и сопутствующей модификации поверхности вольфрама (W) после облучения пучком ионов  $\text{He}^+$  при температурах поверхности порядка 700–1200 К и относительно низких дозах облучения ( $10^{20}-10^{22} \text{ м}^{-2}$ ), а также

влиянию предварительного облучения He на накопление дейтерия (D) в W.

Внедрение He в материал проводилось посредством ионного облучения на установке «Медион». Источник ионов He<sup>+</sup> установки позволяет облучать расположенный в основной камере образец масс-сепарированным ионным пучком в диапазоне энергий 0,1–3 кэВ. В качестве образцов использовалась W фольга толщиной 50 мкм производства Plansee, Германия (чистота 99,97%). Перед установкой в вакуумной камере, образцы подвергались ультразвуковой очистке в ацетоне и спирте. Кроме того, все образцы были предварительно отожжены при 2200 К в течение 30 минут в сверхвысоковакуумной установке «ТДС-стенд» для того, чтобы минимизировать количество естественных дефектов и примесей с целью улучшения воспроизводимости результатов. Затем образцы облучались масс-сепарированным пучком ионов He<sup>+</sup> с энергией 3 кэВ при температурах 700 К, 1000 К, 1200 К до доз облучения в диапазоне 10<sup>20</sup>–10<sup>22</sup> м<sup>-2</sup>. Среднее значения тока пучка составляло порядка 0,55 мкА, что соответствует потоку ионов 5×10<sup>17</sup> м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, это значение поддерживалось постоянным во всех экспериментах. Нагрев образца во время облучения осуществлялся с помощью W нагревателя, расположенного позади образца. Температура измерялась посредством приваренной к образцу вольфрам-рениевой термопары.

Как было отмечено выше, ТДС-анализ проводился в сверхвысоковакуумной установке «ТДС-стенд». Десорбция He из образца во время ТДС регистрировалась при помощи квадрупольного масс-спектрометра, после каждого эксперимента проводилась калибровка сигнала. Скорость нагрева образца в ходе ТДС составляла 2 К/с.

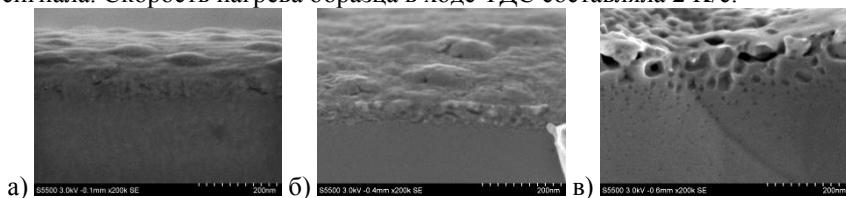


Рис. 1. SEM-фотографии поперечного сечения образцов W, облученных пучком ионов He<sup>+</sup> с энергией 3 кэВ до дозы 10<sup>22</sup> м<sup>-2</sup> при температурах: а) 700 К, б) 1000 К, в) 1200 К.

Поверхность и поперечное сечение образцов после облучения исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (SEM).

На рис. 1. представлены SEM-изображения поперечного сечения образцов, облученных до дозы  $10^{22} \text{ м}^{-2}$  при различных температурах.

На поверхности образцов, облученных при 700 К и 1000 К, хорошо различимы блистеры. Поверхностный слой образцов достаточно пористый толщиной порядка 50–70 нм, что сравнимо с глубиной зоны внедрения ( $140 \text{ \AA}$ , хвост до  $500 \text{ \AA}$  согласно расчетам SRIM). Поврежденный слой может быть толще за счет распухания и диффузии He и дефектов. В модифицированном слое наблюдаются также пузыри диаметром до 10 нм. В случае облучения при 1200 К (рис. 1 в), модифицированный слой толще, а пузыри сильно различаются по диаметру. Наблюдаются сильные повреждения образца на глубине вплоть до 100 нм с крупными пузырями внутри, в то время как маленькие пузыри диаметром менее 100 нм различимы на глубине до 500 нм. Такая более глубокая модификация поверхностного слоя при 1200 К, вероятно, связана с более высокой подвижностью вакансий и кластеров вакансий (как с захваченным He, так и без него) при высоких температурах.

Зависимость интегрального накопления He от дозы облучения при различных температурах облучения представлена на рис. 2 вместе с некоторыми данными из наших предыдущих работ [4–6]. Видно, что в случае облучения при 1000 К интегральное накопление близко к 100% (с учетом коэффициента отражения) вплоть до дозы облучения порядка  $10^{21} \text{ м}^{-2}$  и имеет тенденцию к насыщению при увеличении дозы облучения до  $10^{22} \text{ м}^{-2}$ , оставаясь приблизительно на том же уровне в  $10^{21} \text{ м}^{-2}$ .

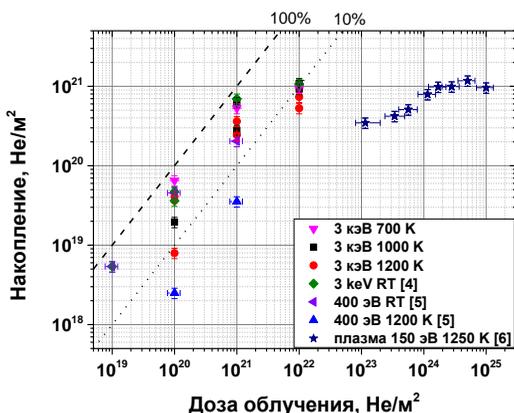


Рис. 2. Зависимость интегрального накопления He от дозы облучения ионами  $\text{He}^+$  при различных температурах.

Высокая эффективность захвата при низких дозах облучения объясняется высокой концентрацией ловушек и высокой энергией связи He с дефектами, тогда как насыщение накопление может быть связано с насыщением концентрации дефектов в зоне внедрения и их низкой подвижностью при небольших температурах. Увеличение температуры облучения до 1200 К приводит к снижению эффективности захвата He из-за частичного отжига дефектов. Выход He из точечных дефектов и кластеров при 1200 К все еще не происходит, и концентрация He в поверхностном слое постепенно увеличивается с увеличением дозы облучения, достигая примерно одного и того же уровня в  $10^{21} \text{ м}^{-2}$  для всех исследуемых температур. Из рис. 2 также видно, что доза облучения, при которой происходит насыщение накопления He, увеличивается с уменьшением энергии ионов He. Можно предположить, что ионы с более высокой энергией производят больше дефектов в образце, что приводит к более быстрому насыщению поверхностного слоя дефектами.

В работе также представлены результаты экспериментальной серии по последовательному облучению W ионными пучками He<sup>+</sup> и D<sub>3</sub><sup>+</sup> на сверхвысоковакуумной установке «Медион» без выноса образцов на атмосферу с целью исследования влияния вызываемых He изменений морфологии поверхности W на накопление дейтерия. Образцы W предварительно облучались ионами He с энергией 3 кэВ до доз  $10^{19}$ – $10^{22} \text{ м}^{-2}$ , а затем проводилось ионное внедрение D посредством облучения пучком ионов D<sub>3</sub><sup>+</sup> с энергией 2 кэВ до дозы  $3 \times 10^{19} \text{ м}^{-2}$  с последующим линейным нагревом до температуры 873 К и термодесорбционной спектроскопией. Было выявлено, что предварительное облучение He снижает захват дейтерия в W даже при малых дозах облучения.

### **Список литературы**

- [1] Yu. Gasparyan, V. Efimov, K. Bystrov, Nuclear Fusion 56 (2016) 054002.
- [2] M.J. Baldwin et. al., Journal of Nuclear Materials 415 (2011) S104–S107.
- [3] M. Yajima et. al., Journal of Nuclear Materials 449 (2014) 9–14.
- [4] S.A. Ryabtsev et. al., Physics of Atomic Nuclei 81 (2018).
- [5] S. Ryabtsev et. al., to be published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2019.
- [6] Yu. Gasparyan et. al., in preparation.

А.И. РЯЗАНОВ

*Национальный Исследовательский Центр “Курчатовский Институт”*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БУДУЩИХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Экспериментальные и теоретические результаты для анализа радиационной стойкости конструкционных материалов для будущих термоядерных реакторов представлены в этом докладе. Здесь представлены результаты по развитию специальных методик для облучения образцов вольфрама под действием облучения их на циклотроне НИЦ КИ потоками быстрых легких и тяжелых заряженных частиц в интервале температур облучения от 500 °С до 1000 °С. При этом исследовалась радиационная стойкость монокристаллического и поликристаллического вольфрама под действием облучения на циклотроне НИЦ КИ потоками ионов углерода с энергией 10 МэВ при температурах облучения:  $T_1 = 850$  °С,  $T_2 = 600$  °С и дозах облучения до 10 сна (смещений на атом). Экспериментальные результаты по исследованию радиационного распухания в облученных образцах монокристаллического и поликристаллического вольфрама под действием облучения их ионами углерода с энергией 10 МэВ при температурах облучения:  $T_1 = 850$  °С,  $T_2 = 600$  °С и дозах облучения до 10 сна показывают, что радиационное распухание монокристаллического кремния существенно меньше, чем для поликристаллического кремния и при этих температурах и дозах облучения они соответственно составляют величины:  $S = 0.61\%$  для монокристаллического кремния и  $S_1 = 1.07\%$  и  $S_2 = 1.05\%$  для поликристаллического кремния.

В этом докладе представлены также новые теоретические результаты для исследований дозовой и температурных зависимостей величин радиационного распухания монокристаллического и поликристаллического вольфрама, которые облучаются потоками быстрыми нейтронами и ионами на циклотроне НИЦ КИ и которые имеют различные скорости образования точечных радиационных дефектов. Теоретические расчеты для изменений радиационного распухания вольфрама, полученные с использованием новых теоретических моделей показывают, что монокристаллический вольфрам является более радиационно-стойким материалом по сравнению с поликристаллическим вольфрамом.

Численные расчеты были проведены также для различных скоростей образования точечных дефектов, каскадов и субкаскадов атомных столкновений, а также для изменения величин радиационного распухания вольфрама под действием нейтронного облучения в реакторах: ITER, DEMO и HFIR. Для того, чтобы сравнить радиационную стойкость различных материалов при одних и тех же условиях облучения были проведены также дополнительные расчеты и получены численные результаты для вольфрама и нержавеющей 316 стали. Было показано, что вольфрам имеет очень хорошую радиационную стойкость и он имеет намного меньшую величину радиационного распухания при различных дозах облучения по сравнению с нержавеющей 316 сталью.

В.М. САФРОНОВ

*Частное учреждение Государственной корпорации атомной энергии «Росатом»  
«Проектный центр ИТЭР», Москва*

## **ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ ИТЭР: ЧТО ИССЛЕДОВАНО И ЧТО НЕОБХОДИМО ИЗУЧИТЬ**

Одной из ключевых проблем в создании экспериментального токамака-реактора ИТЭР является проблема теплозащитных материалов дивертора и первой стенки. Эти материалы должны противостоять интенсивному плазменно-тепловому воздействию как во время стационарного режима работы токамака, так и во время переходных плазменных процессов, таких как ЭЛМ-события и срывы тока. Предполагается, что тепловая нагрузка на диверторные пластины ИТЭР во время ЭЛМ-событий будет достигать  $Q = 0,2 - 5$  МДж/м<sup>2</sup> при длительности воздействия  $t = 0,1 - 1$  мс, а во время срывов тока –  $Q = 10 - 100$  МДж/м<sup>2</sup> при  $t = 1 - 10$  мс.

В качестве теплозащитных материалов для облицовки дивертора и первой стенки ИТЭР используется вольфрам и бериллий. При ожидаемых тепловых потоках будет происходить плавление и даже испарение защитных материалов. С одной стороны, это может привести к быстрому износу теплозащитного покрытия, с другой – к поступлению примесей в вакуумную камеру, что может повлечь радиационное охлаждение плазмы.

Повреждение обращенных к плазме материалов может происходить как в результате испарения, так и за счет т.н. макроскопических механизмов эрозии. Возникающие при плазменном воздействии термические напряжения приводят к образованию трещин, ухудшению теплопроводности и выбросу в вакуумную камеру частичек вещества. Образующаяся при этом пыль обладает большой суммарной поверхностью, что способствует адсорбции радиоактивного трития. Это накладывает ограничение на максимальное содержание продуктов эрозии в вакуумной камере. Серьезную опасность представляют повреждения, обусловленные движением расплавленного слоя по поверхности, которое сопровождается образованием кратера эрозии, а также расплескиванием и выбросом капель из расплава.

Для выяснения физической картины взаимодействия интенсивных плазменных потоков с защитными материалами ИТЭР и получения ключевых экспериментальных данных для разработки расчетно-теоретических моделей необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований. Поскольку ни на одном из

существующих токамаков невозможно воспроизвести энергетические потоки, ожидаемые во время ЭЛМов и срывов тока в ИТЭР, то для испытания материалов применяются мощные плазменные ускорители и электронные пучки.

К настоящему времени в этой области исследований сложилась следующая ситуация:

#### **Эрозия материалов, обусловленная испарением.**

В середине 90-х наиболее опасным механизмом разрушения диверторных пластин считалось испарение теплозащитных материалов при срывах тока. Согласно проведенным расчетам, за каждый срыв с поверхности теплозащитных покрытий должно испаряться около 200 мкм материала и время жизни покрытий не может превышать 20-40 срывов, что ставило под сомнение реализацию проекта ИТЭР в целом.

Экспериментальные и теоретические исследования, организованные в рамках международной кооперации (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НИИЭФА, ИЯФ СО РАН, РНЦ Курчатовский институт, РФЯЦ-ВНИИТФ, ХФТИ, Forschungszentrum Karlsruhe, Forschungszentrum Jülich FZ FZA, Sandia National Labs, Argonne National Lab) позволили установить, что из-за эффекта экранировки реальное испарение материалов меньше 1 мкм при тепловых нагрузках, характерных для срывов в ИТЭР. Коэффициент экранировки (уменьшение количества испаренного вещества) составляет ~ 1000. Испарение не представляет реальной угрозы для повреждений теплозащитных покрытий.

#### **Свойства экранирующего слоя. Формирование и динамика примесей**

Подробные исследования экранирующего слоя были проведены только для графита и С-С композита, которые ранее планировали использовать для облицовки дивертора. Вольфрам был исследован в значительно меньшей степени. Недавно Организация ИТЭР вернулась к исследованиям экранирующего слоя вольфрама и заказала российской стороне проведение соответствующих экспериментов на установке МК-200 в ТРИНИТИ. Среди имеющихся данных следует отметить высокую скорость распространения вольфрамовой мишенной плазмы вдоль силовых линий магнитного поля –  $V = 2 \times 10^6$  см/с. Есть опасение, что вольфрамовые примеси могут быстро попадать из дивертора в основную камеру токамака.

#### **Эрозия расплава. Влияние магнитного поля на эрозию.**

Эрозия металлов в экспериментах на плазменных ускорителях происходит преимущественно за счет перемещения расплава по

поверхности мишени под действием плазменного потока В центре зоны облучения образуется кратер эрозии, а на краях накапливается расплав, перемещенный из центральной зоны. По мере увеличения глубины кратера уменьшается толщина облицовочных пластин и может возникнуть реальная угроза локального разрушения теплозащитного покрытия.

Естественно предположить, что движение расплава происходит за счет градиента давления, создаваемого на поверхности действием плазменного потока  $\rho(dv/dt) = -\nabla P$ . Однако это предположение противоречит имеющимся данным: количество перемещенного материала и расстояние, на которое расплав перемещается, в 10-100 раз больше, чем может обеспечить градиент давления.

Ю.В. Мартыненко предложил модель, которая достаточно хорошо воспроизводит результаты эксперимента. Согласно этой модели, основным механизмом переноса расплава при мощном импульсе плазмы является сдувание плазменным ветром волн, инициированных неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца в жидкометаллическом слое.

До сих пор было принято считать, эксперименты на КСПУ, которые проводятся в отсутствие магнитного поля и при давлении плазмы больше, чем в ЭЛМах и срывах, дают верхнюю оценку для величины эрозии теплозащитных материалов в ИТЭР. Проведенный теоретический анализ указывает на то, что в условиях «косого» магнитного поля, которое интенсифицирует тангенциальное движение приповерхностного слоя плазмы, эрозия в ИТЭР может оказаться выше, чем в модельных экспериментах. Этот результат имеет принципиальное значение и его необходимо проверить экспериментально (ТРИНИТИ, ИТЭР-Центр).

#### **Снижение теплопроводности теплозащитной облицовки**

В проводимых для ИТЭР расчетах используются табличные данные для теплофизических свойств теплозащитных материалов. Однако реальные свойства могут отличаться от табличных из-за модификации поверхностного слоя материала, вызванного плазменным облучением. Ранее было обнаружено, что после облучения С-С композита интенсивными потоками плазмы теплопроводность материала уменьшается в 2-2,5 раза. Аналогичный эффект может иметь место также и в случае бериллия и вольфрама и этот факт необходимо проверить. Соответствующие исследования запланированы на 2019 год (ТРИНИТИ, ВНИИНМ, НИИЭФА).

## **ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ПЫЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА**

Для выхода термоядерных установок на реакторный уровень требуется решить целый ряд проблем, таких как: (1) большие тепловые нагрузки на элементы первой стенки и в особенности дивертора; (2) эрозия за счет потока основной плазмы и самораспыления; (3) захват рабочих газоповерхностями, обращенными к плазме, в результате чего будут формироваться газовые каверны, накапливаться радиоактивный тритий; (4) радиационная стойкость конструкций в нейтронных потоках.

В рамках решения перечисленных проблем сегодня разрабатывается и реализуется концепция обновляющегося жидкометаллического слоя на поверхности первой стенки и дивертора. Она может быть реализована, например, в варианте протекания лития (свободного или внутри капиллярно-пористой структуры), который затем попадает в систему перекачки, очистки и направляется обратно на поверхность или в пристеночную плазму. В качестве примера можно привести параметры лимитера с открытой поверхностью для EAST: скорость подачи до  $10^{23}$  ат/с, поток испаряющегося Li с поверхности до  $10^{21}$  ат/с, запас в контуре 2.5 л с возможностью дозаправки. Для инъекции в плазму предлагаются пылевые системы, которые добавляют литий в SOL в виде потока частиц размерами ~50 мкм (потоки Li в NSTX, DIII-D, EAST составляют при этом  $10^{21}$ - $10^{22}$  ат/с), а также в форме инъекции шариков диаметром до 1 мм с частотой ~70 Гц (~ $10^{21}$  ат/с на EAST). Оценки для ДЕМО-ТИН дают необходимые потоки лития до  $8 \times 10^{22}$  ат/с [1].

Организация циркуляции лития может решить вышеперечисленные проблемы (1)-(4) стационарного режима, а также проблему (5) переходных процессов ELM Type I, во время которых поток из плазмы на элементы обращенных к плазме поверхностей может локально кратковременно возрастать в сотни раз [2].

По проблемам (1)-(3), (5) имеются обширные экспериментальные результаты, полученные на токамаках T-10, T-11M, FTU, NSTX, DIII-D, EAST, которые демонстрируют позитивные свойства жидкометаллических и пылевых технологий. Очевидно, что нейтронный флюенс, проблема (4), не может заметно изменить свойства циркулирующего лития. Однако, желательно заменить современные

конструкционные материалы дивертора (бериллий для ДЕМО-ТИН, вольфрам для ИТЭР) на более устойчивую к нейтронным потокам нержавеющей сталь.

В разработке жидкометаллических литиевых технологиях остаются нерешенные вопросы. Не отработана технология циркуляции лития, хотя исследования в этом направлении ведутся, например, на Т-11М [3]. Важная инженерно-физическая проблема связана с ограничением потоков испаряющегося лития из дивертора в плазму, в области температур жидкого лития ( $200\div 500$  °С в секционированном испарителе). Предложена концепция секционированных литиевых испарителей [4]. Проверка концепции требует теоретической и экспериментальной верификации.

Обсуждается также использование жидкого олова, так как его рабочие температуры гораздо выше (до 1300 °С). Первые эксперименты с оловом в капиллярно-пористой структуре на токамаке FTU [5] продемонстрировали обнадеживающие результаты.

В докладе обсуждаются конкретные достижения с параметрами плазмы и характеристиками технологических систем. Делается прогноз их развития и анализируются технические требования к системам для установок УТС и ГССД, потребности в НИОКР.

#### **Список литературы**

- [1] Sergeev V.Yu., et al., Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 123013.
- [2] Kessel C.E., et al., Fusion Science and Technology, 2015, Vol.67, p.75.
- [3] Mirnov S.V., et al. Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 123105.
- [4] Goldston R. J., et al., Physica Scripta, 2016, Vol.T167, 014017.
- [5] Vertkov A., et al., Fusion Engineering and Design, 2017, Vol.117, p.130.

M.M. TSVENOUKH

*Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow*

## **DYNAMICS OF HIGH-DENSITY VACUUM-ARC CATHODE-SPOT PLASMA IN A MAGNETIC FIELD**

Vacuum electrical discharge implies the plasma production from the electrode material. The current transfer over that plasma occurs with electron emission from the cathode accompanied by the plasma production. It is commonly accepted that the emission and plasma production from the cathode occurs in pulsed-periodic manner, similarly to the boiling. The key features of the single pulse arises from the explosive-electron emission (EEE) event occurring in the micro volume within nanoseconds due to the Joule overheating of the emission region. The current pulse producing by the EEE – ecton being accompanied by the metal explosive plasma expanding outward the emission micro region at the cathode at velocities reaching 5 – 20 km/s. The ensemble of the pulsed-periodically occurring EEE cells forms the cathode spot.

As there is an ignition of new EEE cells instead of the preceding ones, there is an apparent motion of the spot. With the magnetic field applied to the vacuum arc discharge its cathode spot exhibit so-called “retrograde” motion that is average drift motion in anti-amperian direction,  $B \times I$ , where  $B$  is the magnetic field and  $I$  is the arc current. Despite the numerous theoretical model for this phenomenon, it has not received commonly accepted explanation. This paper deals with the dense EEE plasma dynamics in the magnetic field to find conditions of the preferable ignition of the new EEE cells of vacuum arc cathode spot.

The dynamics of the plasma generated by the explosive-emission cells of the cathode spot of a vacuum arc in a magnetic field. It is shown that the expansion of the (high-density) plasma in a transverse magnetic field may cause asymmetry in the plasma density distribution at the cathode spot boundary. The asymmetry, in turn, increases the probability of the ignition of new explosive-emission cells in the region of a stronger magnetic field in the 'anti-amperian' direction of  $B \times I$ . The disturbed plasma density distribution estimated in the MHD approximation is presented. In addition, the velocity of the 'retrograde' spot motion (ignition of new explosive-emission cells) in the stronger field region is estimated as a function of the external magnetic field strength. The velocity estimates (a few to tens of m/(s T)) are shown to agree with experimental data.

The geometry for multiple-EEE-cell cathode spot is presented at fig.1

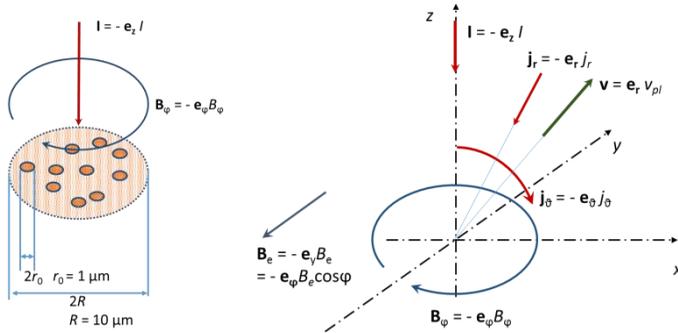


Fig. 1. Geometry of a cathode spot

For the MHD equation of plasma motion in an external magnetic field

$$M \frac{dv}{dt} = Mv \frac{dv}{dr} \approx -T \nabla \ln n - \frac{1}{c} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} Ze(v + v_{1e}) \left( \frac{2I}{cr} + B_e \cos \varphi \right)$$

where  $v$  – is the radial plasma expansion velocity,  $v_{1e}$  – is the electron drift (current) velocity [ $v_{1e} \sim (T_e/M_i)^{1/2}$  see Ref. 1].

Assume that  $\omega \tau \ll 1$ ; then for the plasma velocity we have

$$v = \sqrt{\frac{2}{M} \left( \alpha T \ln \frac{R}{r_0} - v_{1e} \Upsilon \right)} - \frac{\Upsilon}{M},$$

with function  $\Upsilon$  (momentum)

$$\Upsilon \equiv \frac{Ze}{c} \varpi \frac{R^{\alpha-1}}{n_0 r_0^\alpha} \left[ \frac{4I^2}{(\alpha-1)c^2} + \frac{4IB_e \cos \varphi}{\alpha c} R + \frac{B_e^2 \cos^2 \varphi}{\alpha+1} R^2 \right],$$

where

$$\varpi \equiv \frac{e}{mc} \frac{\sqrt{mT}^{3/2}}{\pi \Lambda e^4}, \quad n = n_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^\alpha.$$

Write down the continuity equation in its simple form of a flux conservation law:

$$nv = const = n_{00} \sqrt{\frac{2}{M} \left( -T \ln \frac{n}{n_0} \right)} = n_{00} \sqrt{\frac{2}{M} \alpha T \ln \frac{R}{r_0}},$$

we can obtain the following corrections to the plasma density,  $\delta n/n$ :

$$1 + \frac{\delta n}{n_{00}} = 1 / \left( \sqrt{1 - \frac{v_{1e} \Upsilon}{\alpha T \ln R/r_0}} - \frac{\Upsilon}{\sqrt{2M\alpha T \ln R/r_0}} \right) \\ \approx 1 + \left( \frac{v_{1e}}{2\alpha T \ln R/r_0} + \frac{1}{\sqrt{2M\alpha T \ln R/r_0}} \right) \Upsilon$$

The estimation for the average “retrograde” velocity may be written as

$$\langle v \rangle \Big|_{\mathbf{B} \times \mathbf{I}} \equiv v_{retr} = \frac{R}{\tau_{ign}} \times \frac{n \Big|_{\mathbf{B} \times \mathbf{I}} - n \Big|_{\mathbf{I} \times \mathbf{B}}}{n},$$

One may find that this equation predicts increasing in the average velocity of the spot retrograde motion with both current and magnetic field and simple estimation can be written as

$$v_{retr} \sim \frac{R}{\tau_{ign}} \times 10^{\alpha-6} I B_e \text{ T}^{-1} \text{ A}^{-1}$$

Work was supported in part by RFBR grant # 19-08-01249-a.

### References

- [1] M.M. Tsventoukh 2018 “Plasma parameters of the cathode spot explosive electron emission cell obtained from the model of liquid-metal jet tearing and electrical explosion” *Physics of Plasmas* **25** 053504
- [2] M.M. Tsventoukh 2018. Dynamics of a high-density plasma in a magnetic field. arXiv preprint arXiv:1810.11384 (available at <https://arxiv.org/abs/1810.11384>), PPCF *submitted*

Н.Н. ЧЕРЕНДА<sup>1</sup>, В.И. ШИМАНСКИЙ<sup>1</sup>, В.В. УГЛОВ<sup>1</sup>,  
В.М. АСТАШИНСКИЙ<sup>2</sup>, А.М. КУЗЬМИЦКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь

## **СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЦИРКОНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ**

Цирконий и его сплавы широко применяются в ядерной энергетике, в первую очередь, благодаря своим ядерно-физическим свойствам. Одной из проблем, возникающих при использовании циркония в водородсодержащих средах является его наводороживание и охрупчивание [1]. Подходом к решению этой проблемы может быть формирование пассивирующего поверхностного оксида циркония, затрудняющего диффузию водорода в поверхностном слое. В работе [1] показано, что присутствие дополнительных легирующих элементов в оксиде циркония влияет на диффузионную подвижность водорода в оксиде циркония. Таким образом, формирование поверхностного оксида, легированного дополнительными элементами, может повысить коррозионную стойкость циркония и его сплавов. Концентрированные потоки частиц эффективно используются для легирования поверхностного слоя материалов. Легирование осуществляется путем нанесения пленки или покрытия легирующего элемента на поверхность материала и последующего их перемешивания при последующем высокоэнергетическом воздействии. При использовании режимов воздействия, приводящих к плавлению, основным механизмом формирования легированного слоя является конвективный массоперенос в жидкости. Однородность перемешивания компонентов покрытия и подложки будет увеличиваться с ростом длительности существования расплава. Особый интерес в этом отношении представляют компрессионные плазменные потоки (КПП), генерируемые квазистационарными плазменными ускорителями, с относительно большой длительностью импульса ~ 100 мкс [2]. Целью данной работы являлось предварительное исследование структурно-фазового состояния поверхностного слоя циркония, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков.

Объектом исследований являлись образцы чистого циркония (концентрация гафния не превышала 0.1 ат.%). Обработку образцов на магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии осуществляли 3

импульсами. Эксперименты проводили в режиме “остаточного газа”, при котором предварительно откачанную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па. Расстояние между образцом и срезом центрального электрода варьировалось в диапазоне 6-14 см, что обеспечивало примерное изменение плотности энергии теплого потока, поглощенной поверхностью, 40-13 Дж/см<sup>2</sup> за импульс. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении CuK $\alpha$  в фокусировке параллельных пучков. Изменение массы образцов определялось на аналитических весах RADWAG AS 60/220/C/2/N. Погрешность определения массы образца составляла 0,05 мг.

Результаты анализа структурно-фазового состояния поверхностного слоя образцов до и после воздействия КПП представлены на рисунке 1. Основные изменения структурно-фазового состояния связаны с взаимодействием атомов плазмообразующего газа – азота с атомами поверхности.

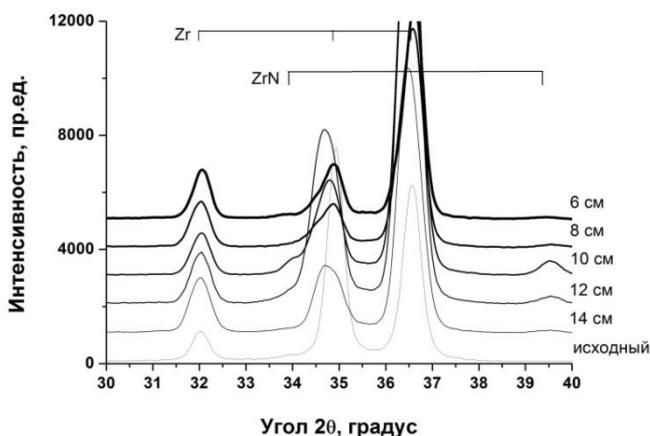


Рис.1. Дифрактограммы исходного образца циркония и образцов, обработанных КПП на различном расстоянии от центрального электрода.

При размещении образца на расстоянии 14 см и последующего воздействия КПП наблюдается сдвиг дифракционной линии (002)  $\alpha$ -Zr (34.869°) в область меньших углов. Причиной этого может являться внедрение атомов азота в поры кристаллической решетки  $\alpha$ -Zr и увеличение расстояния между базовыми плоскостями. При дальнейшем уменьшении расстояния и, соответственно, увеличении плотности

поглощенной энергии, наблюдается появление дифракционных линий ZrN. Максимальная интенсивность дифракционных линий ZrN достигается на расстоянии 10 см, затем интенсивность линий уменьшается с дальнейшим увеличением расстояния. Интенсивность дифракционных линий пропорциональна объемному содержанию нитрида в анализируемом слое и должна коррелировать с концентрацией в нем азота. Такое немонотонное поведение может быть объяснено влиянием двух основных механизмов [3]. Увеличение поглощенной энергии, с одной стороны, ведет к увеличению температуры поверхностного слоя и, как следствие, должно вести к увеличению скорости диффузии и концентрации азота в поверхностном слое. С другой стороны, рост поглощенной энергии приводит к увеличению интенсивности испарения материала, который формирует ударно-сжатый слой, удерживаемый непосредственно у поверхности образца набегающим компрессионным плазменным потоком и препятствующий проникновению атомов азота из атмосферы плазмообразующего вещества в расплав, являясь своего рода барьером. После окончания действия импульса зона компрессии плазменного потока начинает распадаться, что обуславливает рассеяние ударно-сжатого слоя, заполнение приповерхностной области азотом из окружающей атмосферы и, только тогда, создание условий для эффективной диффузии атомов азота в материале. Поэтому длительность диффузионного насыщения поверхностного слоя азотом, определяемая интервалом времени между рассеянием ударно-сжатого слоя и охлаждением поверхности образца до комнатной температуры, снижается при увеличении плотности поглощенной энергии вследствие увеличения времени рассеяния ударно-сжатого слоя.

Результаты измерения массы, удаленной с поверхности при воздействии КПП, представлены на рисунке 2. Из рисунка видно, что при расположении образцов на расстоянии, большем 10 см, начинается резкий рост удаленной массы. Однако, необходимо учитывать, что в используемом диапазоне поглощенной энергии доминирующим механизмом эрозии является гидродинамическое течение расплава под действием давления растекающегося вдоль поверхности плазменного потока [4, 5].

Была сделана оценка массы испаренного вещества (пренебрегая возможным процессом конденсации) через плотность потока атомов  $j$ , испаряющихся с поверхности образца по формуле [6]:

$$j = \alpha P(T) \sqrt{\frac{M}{4\pi kT}},$$

где  $P(T)$  – давление насыщенных паров над поверхностью при температуре  $T$ ,  $M$  – масса атома испаряемого вещества,  $\alpha$ – постоянная (для случая испарения в вакуум  $\alpha=0.53$ ).

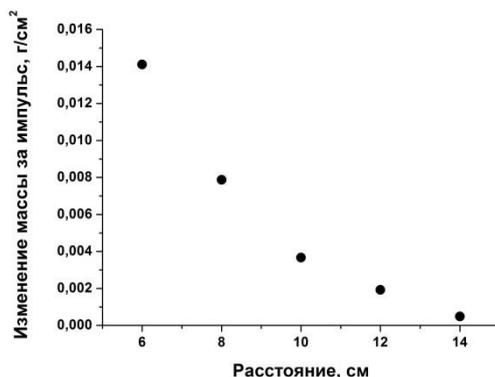


Рис.2. Зависимость удаленной массы с единицы площади поверхности образцов при обработке КПП от расстояния до центрального электрода.

Результаты оценки показали, что масса испаренного вещества на несколько порядков меньше экспериментально определенных величин. Таким образом, результаты, представленные на рисунке 2, преимущественно отражают действие гидродинамического механизма эрозии.

### Список литературы

- [1] Mostafa Youssef, Ming Yang and Bilge Yildiz. *Physical Review Applied*, vol. 5, 2016, 014008-16
- [2] В.В.Углов, Н.Н.Черенда, В.М.Анищик, В.М.Асташинский, Н.Т.Квасов, Модификация материалов компрессионными плазменными потоками, Минск: БГУ, 2013, 248 с.
- [3] Н.Н. Черенда, В. И. Шиманский, В. В. Углов, В. М. Асташинский, В. А. Ухов Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 4, 2012, с. 35-42
- [4] V.I. Tereshin, I.E. Garkusha, A.N. Bandura, et.al. *J. Nucl. Mater.*, vol. 313–316, 2003, 685–689.
- [5] И.М. Позняк, В.М. Сафронов, В.Ю. Цыбенко, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 39, вып. 1, 2016, с. 15-21
- [6] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Статистическая физика*. М.: Наука. 1964. С. 568.

- В.М. ЧЕРНОВ<sup>1-2</sup>, М.В. ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА<sup>1-2</sup>,  
М.М. ПОТАПЕНКО<sup>1</sup>, А.Н. ТЮМЕНЦЕВ<sup>3-4</sup>, А.И. БЛОХИН<sup>5</sup>
- <sup>1</sup>АО «Высокотехнологический НИИ неорганических материалов имени академика  
А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), Москва, Россия
- <sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет - МИФИ,  
Москва, Россия.
- <sup>3</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия.
- <sup>4</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия.
- <sup>5</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,  
Москва, Россия

## **МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА – ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ**

Создание крупно-масштабной ядерной и термоядерной энергетики в условиях требований повышения эффективности и безопасности ядерных реакторов деления (выгорание топлива быстрых реакторов более 15 % т.а.) и синтеза (1-2 ГВтэ), реализации полного замкнутого ядерного топливного цикла с переработкой (рециклированием) и повторным использованием облученных материалов, минимизации радиоактивных отходов (РАО) и их радиационно-эквивалентного захоронения за исторически короткое время после облучения, выдвигает новые требования к конструкционным материалам (КМ) для активных зон реакторов. Эти требования для КМ определяют высокие радиационные нагрузки (более 150 сна-Fe), существенное расширение температурных, механических и радиационных диапазонов применения и существенное сокращение сроков разрешённой переработки (рециклирования) и повторного использования облученных КМ (менее 100 лет после облучения).

Новые КМ должны превосходить по своим функциональным свойствам имеющиеся и разрабатываемые КМ (сильноактивируемые стали и сплавы с длительными временами ядерного охлаждения после облучения - более 1000 лет) и обеспечивать существенные возможности дальнейшего повышения энергетической эффективности и безопасности инновационных реакторов деления и синтеза при существенном уменьшении радиационного влияния на окружающую среду.

Требования к новым КМ могут быть реализованы только на классе малоактивируемых (с быстрым спадом активности) КМ (МАКМ) - ферритно-мартенситных сталях (ФМС), сплавах ванадия, др. В

значительной мере проблемы выбора, создания и дальнейших модификаций элементных составов, структур, структурно-фазовых состояний и свойств МАКМ определены и для их создания и изготовления использовано практически всё имеющееся научное, материаловедческое и технологическое знание об их структурах и свойствах при внешних воздействиях разной природы и интенсивности (термических, механических, коррозионных, радиационных). Уже полученные МАКМ (ФМС, сплавы ванадия) могут обеспечить требования для ядерных реакторов деления и синтеза ближайшего будущего, но обеспечить энергетические реакторы деления и синтеза нового поколения в полной мере не смогут.

ФМС имеют температуру плавления около 1540 С, являются ферромагнитными и полиморфными с высокой чувствительностью структурно-фазовых состояний и полиморфных превращений к элементным составам (легирующим и примесным) и режимам термомеханических (ТМО) и химико-термических (ХТО) обработок. Разработаны и промышленно освоены ФМС системы Fe-(8-9)Cr-(1-2)W-V-Ta типа EUROFER97 (ЕС), ORNL-9Cr-2WV-Ta (США), F82H (Япония), JLF-1 (Япония), CLAM (Китай) и INRAFM (Индия) с жаропрочностью до 550 С и системы Fe-(11-12)Cr-2W-V-Ta типа RUSFER-EK181 (Россия) с жаропрочностью до 670 С.

Созданные и промышленно освоенные ФМС практически исчерпали свои потенциальные возможности дальнейшего существенного повышения своих функциональных свойств для применения в ядерных реакторах деления и синтеза. Практически обоснованы все технологические уровни готовности ФМС и изделий из них, обеспечивающие создание национальных энергетических реакторов деления и синтеза. Созданы национальные базы данных по исходным (не радиационным) свойствам ФМС. Национальные базы данных по радиационным (реакторным) свойствам ФМС имеются, в основном, для средних доз (до 100 сна-Fe) нейтронного облучения, а для получения данных о высокодозных (более 100 сна-Fe) свойствах требуются дальнейшие испытания в разных нейтронных спектрах (быстрые реакторы, мощные источники термоядерных нейтронов). Полученной информации и национальных баз данных для МАФМС достаточно для обеспечения создания термоядерных реакторов типа ДЕМО, что делает МАФМС приоритетным КМ в обеспечение реализации национальных проектов термоядерных реакторов типа ДЕМО.

Для МАКМ нового поколения наиболее потенциально пригодными являются сплавы ванадия как альтернатива всем типам ФМС. Сплавы ванадия отличаются от ФМС по своим свойствам как более технологичные, тугоплавкие (температура плавления около 1900 С), теплопроводные, жаропрочные и жаростойкие, с меньшим тепловым расширением, не магнитные, не полиморфные и простыми и стабильными режимами ТМО и ХТО. Разрабатываются сплавы ванадия системы V-Ti-Cr (основной сплав V-4Ti-4Cr с жаропрочностью до 800 С: США, Япония, Россия, Франция, Китай, Индия) и более жаропрочной (до 1000 С) системы V-Cr-W(Ta)-Zr (Россия). Разработка и изготовление сплавов ванадия и изделий из них для энергетических реакторов деления и синтеза находится на стадиях опытно-промышленных национальных производств и начальных уровнях технологической готовности. Для сплава V-4Ti-4Cr имеются национальные базы данных по исходным (не реакторным) свойствам, базы данных по реакторным данным имеются до средних нейтронных доз (до 100 сна-Fe), а для более высоких доз (более 100 сна-Fe) требуются дальнейшие испытания в разных нейтронных спектрах быстрых реакторов и мощных источников термоядерных нейтронов. Из-за близости технологий изготовления и исследований сплава V-4Ti-4Cr соответствующие национальные базы данных являются взаимно дополняющими.

Приведены результаты материаловедческих и технологических разработок и исследований физико-механических, коррозионных, теплофизических и ядерно-физических свойств МАКМ, созданных в России (АО «ВНИИНМ») - ФМС ЭК-181 (RUSFER-EK181), сплав V-4Ti-4Cr (ВМ-ДПЧ-9), сплавы системы V-Cr-W(Ta)-Zr. Ядерные физические свойства (первичная радиационная повреждаемость, поглощение нейтронов, активация, трансмутация, газообразование, мощность эквивалентной дозы, радиоактивность, энерговыделение и изотопный вклад) определены (расчетный комплекс АСДАМ-2.0) для нейтронных спектров быстрых реакторов БН-600, БРЕСТ-ОД-300, БН-1200, МБИР и термоядерного реактора РФ-ДЕМО (проект НИЦ «Курчатовский институт») при длительных нейтронных облучениях и длительных ядерных охлаждениях после облучения. Существенно различные влияния разных нейтронных спектров (особенно спектров деления и синтеза) определяют, как следствие, существенно различные свойства КМ, что делает использование результатов, полученных для одного нейтронного спектра (реактора, источника нейтронов), на другие нейтронные спектры (реакторы) проблематичной и трудной задачей.

Требуются значительные дальнейшие научные, материаловедческие и технологические исследования МАКМ, включающие оптимизацию элементных составов, структурно-фазовых состояний и режимов ТМО и ХТО обработок, высокодозные (более 100 сна-Fe) нейтронные испытания (быстрые реакторы, мощные нейтронные источники термоядерных нейтронов). Особенно важными и актуальными становятся испытания «в процессе» нейтронного облучения. Нужны обоснованные количественные физико-химические модели радиационной деградации структуры и функциональных свойств КМ (изделий) и определение критических уровней такой деградации, запрещающих эксплуатацию реакторов.

Требуются дальнейшие исследования физико-химических механизмов формирования структур, структурно-фазовых состояний и функциональных свойств МАКМ в их синергетической связи с условиями нейтронного облучения и эксплуатации – прочности, пластичности (ползучести), разрушения, распухания, теплопроводности, теплового расширения, упругих свойств (упругих модулей), упрочнения, охрупчивания, хрупкого (низкотемпературного и высокотемпературного) и усталостного разрушений, коррозии, масштабных эффектов. Такие исследования должны иметь целью сделать обоснованное и понятное прогнозируемое поведение МАКМ (изделий) в радиационных (реакторных) условиях, которые имеющимися экспериментальными данными не перекрываются.

Требуются комплексные ориентированные теоретические, расчетные и экспериментальные материаловедческие исследования и реакторные испытания МАКМ, включающие высокодозные (более 100 сна-Fe) и «в процессе» облучения в разных нейтронных спектрах быстрых реакторов (БОР-60, БН-600-800, МБИР) и мощных источников термоядерных нейтронов типа IFMIF/EVEDA (ЕС, Япония), ДЕМО-ТИН (Россия). Целью таких исследований должно быть получение нового (уточненного) знания о закономерностях и механизмах формирования исходных и радиационных структур, структурно-фазовых состояний, физико-механических, теплофизических, коррозионных и ядерно-физических свойств и их обобщение в базах оцененных данных для своевременного промышленного создания МАКМ нового поколения и их безальтернативного применения в инновационных ядерных энергетических реакторах деления и синтеза.

## АВ-INITIO ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛОВУШЕК ВОДОРОДА В МАССИВЕ ВОЛЬФРАМА

В данной работе с помощью теории функционала плотности исследовались свойства ловушек разного типа для атомов водорода в вольфраме, включая такие ловушки, как атомы Y и Cr в позиции замещения.

Вольфрам и материалы на его основе рассматриваются в качестве обращенных к плазме материалов будущих термоядерных установок. Для предотвращения катастрофических потерь вольфрама за счет окисления в случае аварии с большим выбросом воды разрабатываются самопассивируемые (“умные”) сплавы вольфрама с добавлением легирующих элементов Y и Cr [1]. Исследование влияния добавок Y и Cr на поведение водорода в вольфраме – также актуальная задача физики взаимодействия плазмы с поверхностью обращенных к ней материалов.

В ходе работы были получены следующие важные результаты.

1. Энергия образования одиночной вакансии в массиве вольфрама составляет 3,35 эВ, а объем ее образования  $\sim 0,62 \Omega_0$ , где  $\Omega_0$  – атомный объем. Скопление атомов водорода в ближайших тетраэдрических междоузлиях к незаполненной одиночной вакансии энергетически невыгодно. Наиболее вероятно заполнение одиночной вакансии атомами водорода [2], причем атомы водорода располагаются в искаженных октаэдрических позициях внутри вакансионной полости. В этом случае отрицательная дилатация, вызванная образованием одиночной вакансии и положительная, вызванная внедрением в тетраэдрическое междоузлие вольфрама атома водорода ( $+0,13 \Omega_0$ ), компенсируются, что понижает общую дилатацию системы. Заполненная шестью атомами водорода вакансия не может далее служить эффективной ловушкой для дополнительных атомов водорода, поскольку энергия связи водорода с комплексом  $V_1H_6$  составляет всего  $\sim 0,1$  эВ. Это значение меньше, чем барьер миграции для атомов водорода в W, который по пути  $tetr \rightarrow tetr$  составляет  $\sim 0,2$  эВ, а по пути  $tetr \rightarrow oct \rightarrow tetr$  0,37 эВ [3].

2. Дилатация, вызываемая внедрением атома гелия в тетраэдрическую междоузельную позицию вольфрама, больше дилатации, вызванной внедрением в эту позицию атома водорода, но, как и последняя, положительна и составляет  $+0,25 \Omega_0$ . Дилатация, вызванная образованием комплекса  $V_1He_1$ , то есть атома гелия в позиции замещения,

отрицательная и составляет  $-0,56 \Omega_0$ . Энергия связи атома гелия с вакансией в комплексе  $V_1He_1$  составляет 4,44 эВ. Атом гелия в позиции замещения является хорошей ловушкой для атомов водорода в вольфраме. При этом энергия связи первого атома с комплексом  $V_1He_1$  равна энергии связи второго атома водорода с образовавшимся комплексом  $V_1He_1H_1$  и составляет 1,0 эВ. Можно предположить, что атом гелия в позиции замещения может захватить и более двух атомов водорода.

3. Атом Y в позиции замещения вызывает серьезные искажения в решетке вольфрама. Дилатация, вызванная атомом Y в позиции замещения, положительная и составляет  $+1,37 \Omega_0$ . Атом Y в позиции замещения может служить ловушкой для атомов водорода, при этом энергия связи первого атома водорода с комплексом  $V_1Y_1$  составляет 0,25 эВ, а энергия связи второго атома водорода с образовавшимся комплексом  $V_1Y_1H_1$  составляет 0,3 эВ.

4. В отличие от атома Y, атом Cr в позиции замещения не вызывает серьезных искажений в решетке вольфрама. Объем образования Cr в позиции замещения равен  $+1,00 \Omega_0$ . Атом Cr в позиции замещения может служить ловушкой для атомов водорода, при этом энергия связи атома водорода с комплексом  $V_1Cr_1$  составляет 0,33 эВ. Эта ловушка, однако, не может захватить более одного атома водорода, поскольку энергия связи второго атома водорода с образовавшимся комплексом составляет всего 0,05 эВ.

### **Список литературы**

- [1] A. Litnovsky et al., ‘Smart first wall materials for intrinsic safety of a fusion power plant’, Fusion Eng. Des., vol. 136, pp. 878–882, Nov. 2018.
- [2] N. Degtyarenko and A. Pisarev, ‘Ab-initio Simulation of Hydrogen Atom Interaction with Tungsten’, Phys. Procedia, vol. 71, pp. 30–34, Jan. 2015.
- [3] N. N. Degtyarenko and A. A. Pisarev, ‘Simulation of diffusion of hydrogen atoms in the lattice of tungsten’, J. Phys. Conf. Ser., vol. 748, no. 1, p. 012010, 2016.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ	3
<i>V.KH. Alimov, M. Yajima, S. Masuzaki, M. Tokitani, LHD EXPERIMENT GROUP</i> <b>MIXED-MATERIAL LAYERS DEPOSITED ONTO SILICON PROBES DURING THE YEAR 2012 LHD PLASMA CAMPAIGN</b>	11
<i>Н.Н. Андрианова, В.А. Аникин, А.М. Борисов, Е.С. Машкова, М.А. Овчинников</i> <b>ОСОБЕННОСТИ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПОТОКОМ ИОНОВ ГЕЛИЯ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ</b>	15
<i>А.С. Аракчеев, А.В. Бурдаков, И.В. Кандауров, В.В. Куркучеков, В.А. Попов, Л.И. Шехтман, М.Р. Шарафутдинов, Б.П. Толочко, Ю.А. Трунев, А.А. Васильев, Л.Н. Вячеславов</i> <b>СТАТУС ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЛЬФРАМ В ИЯФ СО РАН</b>	17
<i>Н.А. Бабинов, Л.А. Варшавчик, П.А. Затылкин, А.М. Дмитриев, А.Н. Баженов, И.М. Букреев, Д.И. Елец, А.Н. Коваль, Г.С. Курские, А.Е. Литвинов, С.В. Масюкевич, Е.Е. Мухин, А.Г. Раздобарин, Д.С. Самсонов, В.А. Соловей, С.Ю. Толстяков, И.А. Ходунов, И.Б. Терещенко, Ал.П. Чернаков, Ан.П. Чернаков, П.В. Чернаков, Н.С. Жильцов</i> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА И ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЧИСТЯЩЕМ ВЧЕ-РАЗРЯДЕ ИТЭР</b>	20
<i>Д.М. Бачурина, А.Н. Сучков, О.Н. Севрюков, М.А. Пенязь, Б.А. Калинин</i> <b>РАЗРАБОТКА СПЛАВОВ-ПРИПОЕВ ДЛЯ ВЫСОКО–ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ СТАЛИ С ВОЛЬФРАМОМ ДИВЕРТОРА И ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЕМО</b>	23
<i>Л.Б. Безграмбеков, О.И. Бужинский, А.А. Айрапетов, А.В. Грунин, А.М. Захаров, Я.А. Садовский, А.С. Каплевский, С.С. Довганюк</i> <b>ВОЗОБНОВЛЯЕМОЕ ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ КАРБИДА БОРА ДЛЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК</b>	24
<i>В.П. Будаев, С.Д. Федорович, И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, Г. Ван Оост, Ю.В. Мартыненко, М.В. Лукашевский, А.В. Карпов, А.В. Лазукин, А.Ю. Марченков, Д.Н. Герасимов, М.К. Губкин, Е.А. Шестаков, Д.С. Гвоздевская, З. А. Заклецкий, К.А. Рогозин, А.С. Рыжов</i> <b>ИСПЫТАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ С ОЛОВОМ ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКЕ В ПЛМ</b>	27
<i>В.П. Будаев</i> <b>О ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ В ДИВЕРТОРЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА-ТОКАМАКА</b>	31

<p><i>В.П. Будаев, С.Д. Федорович, Ю.В. Мартыненко, А.В. Карпов, М.В. Лукашевский, А.П. Слива, А.В. Лазукин, Г. Ван Оост, А.Ю. Марченков, Д.Н. Герасимов, М.К. Губкин, И.В. Воинкова, Е.А. Шестаков, Д.С. Гвоздевская, З.А. Заклецкий, К.А. Рогозин</i></p> <p><b>ИСПЫТАНИЕ ВОЛЬФРАМА СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ И ПУЧКОВЫМИ НАГРУЗКАМИ</b></p>	34
<p><i>Я.А. Васина, А.Н. Щербак, А.С. Пришвицын, С.В. Мирнов</i></p> <p><b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-11М С ПОМОЩЬЮ ЗОНДА МАХА</b></p>	38
<p><i>В. Вершков, И. Е. Люблинский, А. В. Вертков, М. Ю. Жарков и группа Т-10</i></p> <p><b>ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЛИТИЕВОЙ ПОРИСТОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ В ТОКАМАКЕ Т-10 С ВОЛЬФРАМОВЫМИ ДИАФРАГМАМИ</b></p>	40
<p><i>А.Е. Городецкий, В.Л. Буховец, А.В. Маркин, В.И. Золотаревский, Р.Х. Залавутдинов, А.П. Захаров, В.Л. Войтицкий, А.М. Дмитриев, А.Г. Раздобарин, Е.Е. Мухин</i></p> <p><b>ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ И СВЕТОПРОПУСКАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ОКОН В ЧИСТЯЩЕМ ВЧ РАЗРЯДЕ В СМЕСИ D<sub>2</sub>/N<sub>2</sub></b></p>	43
<p><i>А.В. Дедов, С.В. Мирнов, В.П. Будаев, А.Т. Комов, С.Д. Федорович, А.Н. Варава, А.В. Захаренков, П.Г. Фрик, В.Г. Свиридов, Д.Н. Герасимов, А.В. Вертков, И.Е. Люблинский, А.П. Слива</i></p> <p><b>СТАТУС РАБОТ В НИУ «МЭИ» ПО ПЛАЗМЕННЫМ, ПУЧКОВЫМ И ТЕПЛОВЫМ ИСПЫТАНИЯМ КОМПОНЕНТОВ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА</b></p>	47
<p><i>А.М. Дмитриев, Н.А. Бабинов, А.Н. Баженов, И.М. Букреев, Л.А. Варшавчик, Д.И. Елец, Н.С. Жильцов, П.А. Затылкин, А.Н. Коваль, Г.С. Курскиев, С.В. Масюкевич, Е.Е. Мухин, А.Г. Раздобарин, В.А. Сениченков, Д.С. Самсонов, В.А. Соловей, С.Ю. Толстяков, И.Б. Терещенко, А.Е. Городецкий, В.Л. Буховец, А.В. Маркин, Р.Х. Залавутдинов, Ал.П. Чернаков, Ан.П. Чернаков, П.В. Чернаков, П.А. Шигин</i></p> <p><b>ПЛАЗМЕННАЯ ЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ С СИСТЕМОЙ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОГО ФИЛЬТРА</b></p>	51
<p><i>М.Ю. Жарков, А.В. Вертков, И.Е. Люблинский, В.А. Вершков, Г.Е. Ноткин, С.В. Мирнов</i></p> <p><b>РАЗРАБОТКА ЛИТИЕВЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД</b></p>	55
<p><i>З.А. Заклецкий, В.П. Будаев, С.Д. Федорович</i></p> <p><b>РАСЧЕТЫ КРИТИЧЕСКИХ ТОКОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИИ И ФОРМИРОВАНИЮ ДУГИ НА ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ</b></p>	59

<i>В.А. Иванов, А.С. Сахаров, М.Е. Кобышев, А.А. Дорофеев, Т.И. Камолова</i> <b>МИКРОПЛАЗМЕННЫЕ РАЗРЯДЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТ, ТЕОРИЯ, ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	63
<i>Б.А. Калинин, М.С. Стальцов, И.И. Чернов</i> <b>ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ПОРИСТОСТИ ПО ГЛУБИНЕ ОБРАЗЦОВ ВАНАДИЕВЫХ СПЛАВОВ МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА</b>	67
<i>С.А. Крат, А.С. Пришвицын, А.П. Харина</i> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЕРОСТИ ЛИТИЯ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА Т-11М</b>	69
<i>С.А. Крат, Ю.М. Гаспарян, Я.А. Васина, А.С. Пришвицын, А.А. Писарев</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СООБРАЗНЫХ С ЛИТИЕМ СЛОЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ ВО ВРЕМЯ ОСАЖДЕНИЯ</b>	71
<i>А.С. Кукушкин</i> <b>ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	75
<i>Б.В. Кутеев</i> <b>ИСТОЧНИКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ МАТЕРИАЛОВ И ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	77
<i>М.А. Ларченко, И.М. Позняк</i> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМА ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ</b>	79
<i>А.Я. Лейви, А.П. Яловец</i> <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НАБЛЮДАЕМЫХ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ</b>	82
<i>А.Б. Ляшенко, Ю. Полви, Э. Сафи, Ф. Джурабекова, К. Нордгунд</i> <b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА АЗОТОМ</b>	86
<i>Ю.В. Мартыненко, В.П. Будаев</i> <b>ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИПА «ПУХ» ИЗ РУТИЛИ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДОВ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ</b>	90

<p><i>С.В. Мирное, А.Т. Комов, А.Н. Варава, И.Е. Люблинский, А.В. Дедов, А.В. Захаренков, А.В. Вертков, Ю.В. Сморгкова</i></p> <p><b>ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЯДЕННОГО РЕАКТОРА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ</b></p>	94
<p><i>O.V. Ogorodnikova, N.S. Klimov, Yu.M. Gasparyan, V.S. Efimov, A.G. Poskakov, A.V. Kaziev, M. M. Kharkov, N.V. Volkov and other colleagues involved in the project from Russia and International collaborations</i></p> <p><b>PERSPECTIVE FUNCTIONAL MATERIALS UNDER EXTREME CONDITIONS: HIGH HEAT AND PARTICLE FLUXES AND NEUTRON IRRADIATION</b></p>	98
<p><i>А.А. Писарев, Н.М. Михайлицина</i></p> <p><b>НАКОПЛЕНИЕ ТРИТИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР</b></p>	100
<p><i>А.А. Писарев, И.И. Архипов, Я.А. Бабич, М.М. Бердникова, Ю.М. Гаспарян, С.А. Грашин, В.Е. Дробинин, В.С. Ефимов, М.Г. Исаенкова, О.А. Крымская, Ю.А. Перлович, Т.М. Степанова, В.А. Фесенко</i></p> <p><b>АНАЛИЗ ВОЛЬФРАМОВЫХ ПЛАСТИН ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-10 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ</b></p>	104
<p><i>А.Г. Посакалов, Н.С. Климов, Ю.М. Гаспарян, О.В. Огородникова, В.С. Ефимов, М.С. Зибров</i></p> <p><b>НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ</b></p>	108
<p><i>С.А. Рябцев, Ю.М. Гаспарян, В.С. Ефимов, З.Р. Арутюнян, А.А. Писарев, С.Л. Канашенко, Ю.Д. Иванов</i></p> <p><b>ЗАХВАТ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМ ПРИ ИОННОМ ВНЕДРЕНИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ И НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА</b></p>	111
<p><i>А.И. Рязанов</i></p> <p><b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БУДУЩИХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ</b></p>	115
<p><i>В.М. Сафронов</i></p> <p><b>ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ ИТЭР: ЧТО ИССЛЕДОВАНО И ЧТО НЕОБХОДИМО ИЗУЧИТЬ</b></p>	117
<p><i>В.Ю. Сергеев, В.Г. Скоков</i></p> <p><b>ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ПЫЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА</b></p>	120
<p><i>М.М. Tsventoukh</i></p> <p><b>DYNAMICS OF HIGH-DENSITY VACUUM-ARC CATHODE-SPOT PLASMA IN A MAGNETIC FIELD</b></p>	122

<p><i>Н.Н. Черенда, В.И. Шиманский, В.В. Углов, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий</i></p> <p><b>СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЦИРКОНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ</b></p>	125
<p><i>В.М. Чернов, М.В. Леонтьева-Смирнова, М.М. Потапенко, А.Н. Тюменцев, А.И. Блохин</i></p> <p><b>МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА – ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ</b></p>	129
<p><i>М.И. Шутикова, Н.Н. Дегтяренко, А.А. Писарев</i></p> <p><b>AB-INITIO ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛОВУШЕК ВОДОРОДА В МАССИВЕ ВОЛЬФРАМА</b></p>	133

**МАТЕРИАЛЫ  
XXII КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2019 г.

Подписано в печать 21.01.2019. Формат 60x84 1/16.

Печ.л. 8,75. Тираж 150 экз. Заказ № 6.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Типография НИЯУ МИФИ  
115409, Москва, Каширское ш., 31*