

**XXIV КОНФЕРЕНЦИЯ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**Москва, НИЯУ МИФИ, 4-5 февраля 2021 г.**

**Сборник научных трудов**

**Москва  
2021**

Министерство образования и науки РФ  
Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

---

**МАТЕРИАЛЫ  
XXIV КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 4-5 февраля 2021 г.

Москва  
2021

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

Материалы XXIV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 4-5 января 2021г.  
М.: НИЯУ МИФИ, 2021 г., 106 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 24-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза. Материалы докладов, входящих в сборник, опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

*Редакционная коллегия:*

*Ю.М. Гаспарян,  
Д.Н. Синельников  
Д.Г. Булгадарян*

**ISBN 978-5-7262-2741-2**

Программа 24-ой конференции  
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Четверг, 4 февраля

начало в 10.00

Председатель – Ю.М. Гаспарян

9.45 – 10.00	Открытие
10.00 – 10.20	С.В. Суслин, С.С. Ананьев, Д.Н. Демидов <i>Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва</i> <b>Численное моделирование диффузии и накопления водорода в многослойных материалах ТЯР с учетом влияния комплексов вакансия-водород</b>
10.20 – 10.40	Р.И. Хуснутдинов <sup>1,2</sup> , А.Б. Кукушкин <sup>1,2</sup> , В.С. Неверов <sup>2</sup> <sup>1</sup> <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> <sup>2</sup> <i>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва</i> <b>Баллистическая модель VM1D2V для рециклинга водорода в пристеночной плазме основной камеры токамака</b>
10.40 – 11.00	З.Г. Люллин <sup>1,2</sup> , Н.А. Бабинов <sup>1,2</sup> , Л.А. Варшавчик <sup>1,2</sup> , П.А. Затылкин <sup>1</sup> , Е. Е. Мухин <sup>1</sup> , А. Г. Раздобарин <sup>1</sup> , А.М. Дмитриев <sup>1</sup> , Д.С. Самсонов <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург</i> <sup>2</sup> <i>ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург</i> <b>Моделирование процесса чистки ВЧ разрядом и транспорта распыленных загрязнений в узле первого зеркала ИТЭР</b>
11.00 – 11.20	Н.А. Пунтаков, Л.Б. Беграмбеков, А.В. Грунин <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> <b>Эмиссия атомов углерода из приповерхностных слоёв графита при интенсивном высокотемпературном ионном облучении</b>

11.20 – 11.40	<p>Н.П. Боббырь<sup>1</sup>, В.С. Ефимов<sup>2</sup>, Д.А. Козлов<sup>1</sup>, Д.С. Дугин<sup>1</sup>, С.С. Ананьев<sup>1</sup>  <sup>1</sup>НИЦ "Курчатовский институт", Москва, <i>Vobur_NP@ncski.ru</i>  <sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  <b>Влияние примеси тантала на захват дейтерия из газовой фазы в сплаве W-Ta</b></p>
11.20 - 11.40	<p>Е.Д. Федулаев<sup>1,2</sup>, И.М. Позняк<sup>1,2</sup>, Д.А. Топорков<sup>2</sup>, В.М. Сафронов<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. Цыбенко<sup>2</sup>, В.А. Костюшин<sup>2</sup>, Д.М. Кочнев<sup>2</sup>, З.И. Новоселова<sup>1,2</sup>, А.И. Румянцева<sup>1,2</sup>, С.В. Карелов<sup>2</sup>, Д.В. Коваленко<sup>2</sup>, А.Д. Ярошевская<sup>2</sup>  <sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  <sup>2</sup>Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,  <sup>3</sup>Проектный центр ИТЭР, Москва  <b>Исследование спектров излучения паровой плазмы вольфрама в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах</b></p>
11.40 – 12.00	<p>З.И. Новоселова<sup>1,2</sup>, И.М. Позняк<sup>1,2</sup>, Д.А. Топорков<sup>2</sup>, В.М. Сафронов<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. Цыбенко<sup>2</sup>, В.А. Костюшин<sup>2</sup>, Д.М. Кочнев<sup>2</sup>, Е.Д. Федулаев<sup>1,2</sup>, А.И. Румянцева<sup>1,2</sup>, С.В. Карелов<sup>2</sup>, Д.В. Коваленко<sup>2</sup>, А.Д. Ярошевская<sup>2</sup>  <sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  <sup>2</sup>Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,  <sup>3</sup>Проектный центр ИТЭР  <b>Спектральные исследования экранирующей плазмы вольфрама в оптическом диапазоне длин волн</b></p>
12.00 – 12.20	<p>М.А. Попова, Д.Г. Булгадарян, Д.Н. Синельников, В.С. Ефимов, С.А. Крат, Ю.М. Гаспарян, М.В. Гришаев  Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  <b>Моделирование десорбции дейтерия из вольфрама при воздействии наносекундного лазерного излучения</b></p>
12.20 – 12.40	<p>И.А. Сорокин<sup>1,2</sup>, Ф.С. Подоляко<sup>2</sup>  <sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл., Россия  <sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  <b>Линейная плазменная установка с пучково-плазменным разрядом</b></p>
12.40 –13.00	<p>В.В. Кулагин, Д.Н. Синельников, Д.Г. Булгадарян, М.М. Харьков  Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  <b>Оценка влияния примеси вольфрама в гелиевой плазме на рост вольфрамового нанопуха</b></p>
13.00 – 14.00	Обед

**Председатель – Л.Б. Беграмбеков**

14.00 – 14.20	<p>С.Д. Федорович<sup>1</sup>, А.В. Дедов<sup>1</sup>, И.Е. Люблинский<sup>2</sup>, В.П. Будаев<sup>1,3</sup>, А.В. Вертков<sup>2</sup>, Ю.В. Мартыненко<sup>1,3</sup>, А.В. Карпов<sup>1,3</sup>, А.В. Захаренков<sup>1</sup>, М.В. Лукашевский<sup>1</sup>, М.К. Губкин<sup>1</sup>, Д.И. Кавыршин<sup>1</sup>, Г.Б. Васильев<sup>1</sup>, В. Чан Куанг<sup>1</sup>, К.А. Рогозин<sup>1</sup>, А.А. Коньков<sup>1</sup>, А.И. Амелин<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва  <sup>2</sup>АО «Красная звезда»  <sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва</p> <p><b>Результаты испытания литиевой кпс в гелиевой плазме установки ПЛМ</b></p>
14.20-14.40	<p>С.Д. Федорович<sup>1</sup>, В.П. Будаев<sup>1,2</sup>, А.В. Карпов<sup>1,2</sup>, Е.В. Крылова<sup>1</sup>, М.В. Лукашевский<sup>1</sup>, М.К. Губкин<sup>1</sup>, Д.И. Кавыршин<sup>1</sup>, В.Ф. Чиннов<sup>1</sup>, А.Ю. Марченков<sup>1</sup>, Г.Б. Васильев<sup>1</sup>, В. Чан Куанг<sup>1</sup>, К.А. Рогозин<sup>1</sup>, А.А. Коньков<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва  <sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва</p> <p><b>Экспериментальное исследование вольфрамовых модулей для испытаний в ПЛМ при импульсном лазерном облучении</b></p>
14.40-15.00	<p>Ю.Г. Рукина, С.С. Довганюк, Л.Б. Беграмбеков</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p><b>Поверхностные слои, формируемые при напылении в плазме атомов алюминия на различные материалы, и захват в них газа</b></p>
15.00-15.20	<p>Г.К. Жанболатова, В.В. Бакланов, Т.Р. Туленбергенов, А.Ж. Миниязов, И.А. Соколов</p> <p><i>Филиал «Институт атомной энергии» РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов</i></p> <p><b>Карбидизация поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде</b></p>
15.20-15.40	<p>И.А. Соколов<sup>1</sup>, М.К. Скаков<sup>2</sup>, А.Ж. Миниязов<sup>1</sup>, Т.Р. Туленбергенов<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан  <sup>2</sup>РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов</p> <p><b>Взаимодействие плазмы с бериллием</b></p>
15.40-15.55	<p>Н.С. Сергеев<sup>1,2</sup>, И.А. Сорокин<sup>1,3</sup>, Ф.С. Подоляко<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31  <sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1  <sup>3</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им.</p>

	<p><i>В.А. Котельникова РАН, Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1</i></p> <p><b>Модификация поверхности вольфрама под действием гелиевой плазмы пучково-плазменного разряда</b></p>
15.55-16.10	<p>А.С. Умеренкова, З.Р. Арутюнян, Ю.М. Гаспарян, В.С. Ефимов, А.А. Писарев</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ</i></p> <p><b>Захват тепловых атомов и молекулярного дейтерия в титан</b></p>
16.10-16.25	<p>Н.Н. Андрианова<sup>1</sup>, А.М. Борисов<sup>1</sup>, А.В. Макунин<sup>2</sup>, Е.С. Машкова<sup>2</sup>, М.А. Овчинников<sup>2</sup></p> <p><i><sup>1</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия</i></p> <p><i><sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия</i></p> <p><b>Формирование поверхностных структур при облучении углеродных волокон из полиакрилонитрила ионами гелия и аргона</b></p>
16.25-16.40	<p>А.А. Резван<sup>1</sup>, В.С. Климин<sup>1,2</sup>, Т.С. Климина<sup>1</sup>, Р.В. Томинов<sup>1,2</sup>, Ю.В. Морозова<sup>1</sup>, Т.А. Зубова<sup>1</sup></p> <p><i><sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Южный федеральный университет, Таганрог</i></p> <p><i><sup>2</sup>Научный и образовательный центр «Нанотехнологии» Южный федеральный университет, Таганрог</i></p> <p><b>Плазменные технологии формирования графеноподобной наноструктурированной поверхности на карбиде кремния</b></p>
16.40-16.55	<p>В.П. Будаев<sup>1,2</sup>, С.Д.Федорович<sup>1</sup>, Ю.В. Мартыненко<sup>1</sup>, М.Н. Егорихина<sup>3</sup>, А.В. Карпов<sup>1,2</sup>, М.В.Лукашевский<sup>1</sup>, М.К.Губкин<sup>1</sup>, М.В. Будаева<sup>4</sup>, Д.Я.Алейник<sup>3</sup>, Д.И. Кавыршин<sup>1</sup>, Г.Б. Васильев<sup>1</sup>, К.А. Рогозин<sup>1</sup>, А.А. Коньков<sup>1</sup>, С. Белоусов<sup>1</sup></p> <p><i><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,</i></p> <p><i><sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва,</i></p> <p><i><sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России, Нижний Новгород</i></p> <p><i><sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «МФТИ», Москва</i></p> <p><b>Плазменная технология создания высокопористых титановых материалов для биомедицинских применений</b></p>

Заседание №2

Пятница, 5 февраля

начало в 10.00

**Председатель – А.П. Кузнецов**

9.50 –10.00	Открытие второго дня
10.00 –13.00	<b>Мемориальная секция памяти В.А. Курнаева</b>
13.00 –14.00	Перерыв на обед

**Председатель – А.А. Писарев**

14.00 –14.15	<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>, С.А. Грашин<sup>3</sup>, Г.Е. Ноткин<sup>3</sup></p> <p><sup>1</sup>АО «Красная звезда», Москва, РФ</p> <p><sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, РФ</p> <p><sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ</p> <p><b>Подготовка и основные задачи испытаний макета приемной пластины литиевого дивертора токамака Т-15МД</b></p>
14.15-14.30	<p>А.В. Вертков<sup>1</sup>, М.Ю. Жарков<sup>1</sup>, И.Е. Люблинский<sup>1,2</sup>, И.Л. Тажибаева<sup>3</sup>, Ю.В.Понкратов<sup>3</sup>, Ю.Н. Гордиенко<sup>3</sup></p> <p><sup>1</sup>АО «Красная звезда», Москва, РФ</p> <p><sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, РФ</p> <p><sup>3</sup>Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан</p> <p><b>Первые результаты испытаний макета литиевого дивертора токамака КТМ</b></p>

14.30 –14.50	<p>А.А. Васильев<sup>3</sup>, А.С. Аракчеев<sup>1,2,3</sup>, А.В. Бурдаков<sup>1,3</sup>, Л.Н. Вячеславов<sup>1,2,3</sup>, И.В. Кандауров<sup>1,2,3</sup>, А.А. Касатов<sup>1,2,3</sup>, В.В. Куркучев<sup>1,2</sup>, Г.Г. Лазарева<sup>2,3,4</sup>, А.Г. Максимова<sup>1,2,4</sup>, В.А. Попов<sup>1,2</sup>, А.А. Руктуев<sup>1,3</sup>, А.А. Шошин<sup>1,2</sup></p> <p><sup>1</sup>ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН</p> <p><sup>2</sup> ФГБУН «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»</p> <p><sup>3</sup> ФГБУН «Новосибирский государственный технический университет»</p> <p><sup>4</sup> ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН</p> <p><b>In-situ исследования воздействия импульсных тепловых нагрузок на вольфрамы на установке ВЕТА в ИЯФ СО РАН</b></p>
14.50 –15.10	<p>О. V. Ogorodnikova<sup>1</sup>, N.S. Klimov<sup>2</sup>, Yu.M. Gasparyan<sup>1</sup>, V.S. Efimov<sup>1</sup>, D. Kovalenko<sup>2</sup>, K. Gutorov<sup>1,2</sup>, A.G. Poskagalov<sup>1</sup>, M. M. Kharkov<sup>1</sup>, A.V. Kaziev<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</p> <p><sup>2</sup> АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ</p> <p><b>Deuterium and helium retention and corresponding modifications of W-based materials under stationary operation regime and transients</b></p>
15.10 –15.30	<p>Я.А. Васина, А.С. Пришвицын, А.С. Джурик, В.Г. Отрощенко, В.Б. Лазарев, С.В. Мирнов</p> <p><sup>1</sup>АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва</p> <p><b>Исследование захвата лития многослойным коллектором на основе капиллярно-пористых систем на токамаке Т-11М</b></p>
15.30 – 15.50	<p>А.В. Дедов<sup>1</sup>, А.Т. Комов<sup>1</sup>, А.В. Захаренков<sup>1</sup>, В.П. Будаев<sup>1,2</sup>, С.Д. Федорович<sup>1</sup>, А.Н. Варавва<sup>1</sup>, А.В. Карпов<sup>1,2</sup>, А.С. Демидов<sup>1</sup>, К.В. Журавлев<sup>1</sup>, В.С. Штелинг<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия</p> <p><sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия</p> <p><b>Испытания мощной тепловой нагрузкой опытных макетов вольфрамовых диверторных модулей с водо-дисперсной системой охлаждения</b></p>

15.50 – 16.10	<p>В.П. Будаев<sup>1,2</sup>, С.Д. Федорович<sup>1</sup>, Ю.В.Мартыненко<sup>2,1</sup>, А.В. Карпов<sup>1,2</sup>, А.П. Слива<sup>1</sup>, А.Ю. Марченков<sup>1</sup>, М.В.Лукашевский<sup>1</sup>, М.К. Губкин<sup>1</sup>, Д.И. Кавыршин<sup>1</sup>, Г.Б. Васильев<sup>1</sup>, В. Чан Куанг<sup>1</sup>, К.А. Рогозин<sup>1</sup>, А.А. Коньков<sup>1</sup>, С.В. Белоусов<sup>1</sup></p> <p><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва <sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва</p> <p><b>Испытания пучковыми и стационарными плазменными нагрузками вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора токамака-реактора</b></p>
16.10 – 16.30	<p>С.А. Крат, А.С. Пришвицын, Я.А. Васина, А.К. Хомяков, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p><b>Способы очистки осаждённых из плазмы литиевых слоёв от тяжёлых изотопов водорода при низких температурах</b></p>
16.30 – 16.50	<p>Н.Н. Дегтяренко, А.А. Писарев</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p><b>Энергетические характеристики водорода вблизи поверхности вольфрама</b></p>
16.50 – 17.10	<p>М.М. Tsventoukh</p> <p><i>Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow</i></p> <p><b>Estimation of ions charge in plasma of vacuum arc cathode spot</b></p>

С.В. СУСЛИН, С.С. АНАНЬЕВ, Д.Н. ДЕМИДОВ

*Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФFUЗИИ И НАКОПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ ТЯР С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСОВ ВАКАНСИЯ-ВОДОРОД**

Для безопасной работы будущих электростанций, использующих ДТ ( ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17,6 \text{ МэВ}$ ) реакцию термоядерного синтеза, необходимо свести к минимуму количество радиоактивного трития (тритий – тяжёлый радиоактивный изотоп водорода), накапливаемого в материалах этих установок и его утечки за пределы установок. Проникая через кристаллическую решётку конструкционных материалов, он будет попадать в каналы с охлаждающим веществом - теплоносителем.

Для предотвращения радиоактивного загрязнения тракта охлаждения необходимо выделять и удалять тритий из теплоносителя. Также тритий накапливается в конструкционных материалах вакуумной камеры, обращённых к плазме, приводя к некоторому сокращению количества термоядерного топлива в топливном цикле установки. При резком нагреве тритий может в значительных количествах выделиться из материала обратно в вакуумную камеру, приводя к потере устойчивости плазмы. Если резкий нагрев будет сопровождаться развакуумированием установки, летучие соединения трития попадут в окружающую среду — поэтому на количество трития, которое может содержаться в конструкционных материалах термоядерных установок, накладывают жёсткие ограничения (700г для установки ИТЭР [1]).

Облучение обращённых к плазме и конструкционных материалов нейтронами различных энергий влияет на материалы — в них образуется радиогенный гелий и водород [2], что может приводить к ухудшению механических свойств материалов, например за счет эффекта высокотемпературного радиационного охрупчивания. Также под воздействием повреждающего нейтронного облучения, в кристаллических решётках конструкционных материалов образуются собственные точечные дефекты (СТД) и вакансионные поры, которые могут захватывать и накапливать тритий.

В данной работе представлено развитие предложенной ранее модели [2], описывающей влияние радиационной повреждаемости металлов (а именно образования радиационных вакансий) на кинетические характеристики водорода — коэффициент диффузии, поток через стенку вакуумной камеры

и его накопление в материале. Предложены дополнения для учета температурных зависимостей коэффициентов диффузии изотопов водорода, учета наличия границ зерен в металлической мембране и учета границ между материалами в случае многослойных металлических мембран. Рассмотрено влияние дополнительных эффектов на транспорт водорода и его накопление в материалах. Проведен расчет проникающего потока водорода через модель стенки вакуумной камеры, представленной комбинацией слоев металлов W, Cu, Fe, и его накопления в материалах.

Представляемая модель решает стационарную задачу диффузии водорода в металле согласованно с задачей определения плотности дефектов при воздействии термоядерных нейтронов и взаимодействия дефектов с растворенным водородом. Она позволяет оценивать поток изотопов водорода через элементы конструкции термоядерных реакторов (ТЯР), а также количество накапливаемого в них водорода, в условиях непрерывного воздействия повреждающего нейтронного излучения. Модель учитывает взаимодействие водорода с точечными радиационными дефектами. С одной стороны, это приводит к изменению эффективного коэффициента диффузии, и количества накапливаемого водорода. С другой стороны, учет взаимодействия водорода с дефектами, влияет и на кинетику самих дефектов.

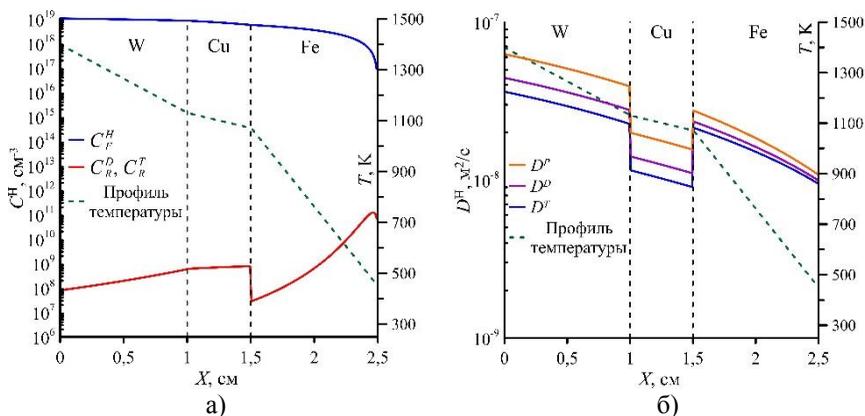


Рис 1. Концентрации свободного и удерживаемого в ловушках дейтерия и трития (а); Коэффициенты диффузии изотопов водорода многослойной мембране с учётом наличия ловушек водорода (б);  $T_W = 1400$  К,  $T_{Fe} = 450$  К

Выполнено моделирование для трехслойной структуры — W-Cu-Fe. При этом предполагается, что со стороны вольфрама находится горячая плазма, а

со стороны железа – теплоноситель. В рамках моделирования рассчитаны распределения свободного (растворенного) и захваченного дефектами водорода в образце (рис. 1а), и профиль эффективного коэффициента диффузии (рис. 1б) при характерных для ТЯР температурах и нейтронных потоках. Моделирование выполнено для изотопов  $P$ ,  $D$ ,  $T$  (протий, дейтерий и тритий, соответственно). Проведенное для температурного диапазона вольфрама 1300—1500 К, численное моделирование, позволило сделать оценки для массы дейтерия ( $M^D$ ) и трития ( $M^T$ ), удерживаемых в ловушках, приходящуюся на  $1 \text{ см}^2$  мембраны.  $M^D = 1,0\text{—}2,5 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2$  и  $M^T = 1,1\text{—}3,6 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2$  в зависимости от температуры  $W$

Слои с наименьшим эффективным коэффициентом диффузии, выступают в роли барьера, препятствующего дальнейшему проникновению водорода. Если такой слой расположен вплотную к теплоносителю, то он уменьшает только общий поток через мембрану. При этом проницаемость мембраны слабо зависит от температуры обращенной к плазме поверхности. Если же слой с низким эффективным коэффициентом диффузии окажется в середине мембраны, то его наличие уменьшит так же и количество накапливаемого в мембране водорода. В отличие от однородных, многослойные мембраны имеют коэффициент диффузии, зависящий не только от температуры, но и от материала. В результате наименьшее значение коэффициента диффузии может оказаться не в участке мембраны, расположенном вплотную к теплоносителю. В этом случае, температура слоя, лимитирующего проницаемость, зависит не только от температуры теплоносителя, но и от температуры обращенной к плазме поверхности.

На рис. 2 изображены, построенные для моделируемой мембраны W-Cu-Fe, зависимости проникающего через мембрану потока водорода от температуры обращенной к плазме поверхности (рис. 2а) и температуры охлаждаемой поверхности (рис. 2б). Немонотонность зависимости от температуры обращенной к плазме поверхности (рис. 2а) объясняется наличием двух конкурирующих явлений. С одной стороны, повышение температуры обращенной к плазме поверхности приводит к повышению температуры медной прослойки. Благодаря этому, увеличивается коэффициент диффузии в ней, и, как следствие, проницаемость мембраны. С другой стороны, повышение температуры обращенной к плазме поверхности приводит к более интенсивной десорбции с этой поверхности. Поэтому концентрация растворенного водорода на границе с плазмой уменьшается. Соответственно, уменьшается и поток водорода.

Зависимость потока водорода через мембрану от температуры теплоносителя монотонна. Однако на рис. 2б эта зависимость при  $T = 1200$

К, имеет ярко выраженный перегиб. На рис. 1б можно видеть, что эффективные коэффициенты диффузии в слое меди и в слое железа, довольно близки в выбранном диапазоне параметров. Поэтому поток до перегиба на графике 2б ( $T_{\text{охл}} < 500$  К) определяется эффективным коэффициентом диффузии в меди, а после перегиба ( $T_{\text{охл}} > 500$  К) – эффективным коэффициентом диффузии в железе.

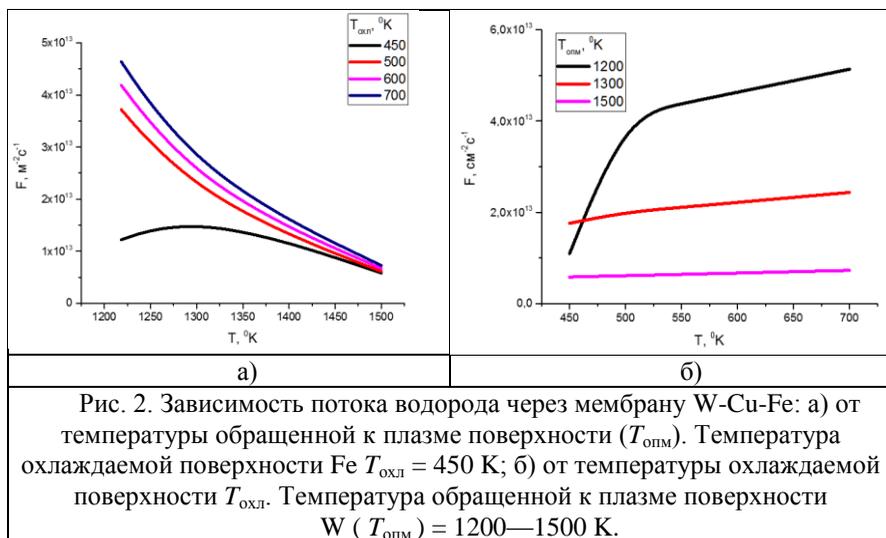


Рис. 2. Зависимость потока водорода через мембрану W-Cu-Fe: а) от температуры обращенной к плазме поверхности ( $T_{\text{опл}}$ ). Температура охлаждаемой поверхности Fe  $T_{\text{охл}} = 450$  К; б) от температуры охлаждаемой поверхности  $T_{\text{охл}}$ . Температура обращенной к плазме поверхности W ( $T_{\text{опл}} = 1200—1500$  К).

Работа частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

1. Technical Basis for the ITER-FEAT Outline Design- ITER EDA Documentation Series, No. 19, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2000.

2. Ананьев С.С., Демидов Д.Н., Суслин С.В. Транспорт водорода и его накопление в вакансиях в процессе повреждающего нейтронного облучения в ОЦК-металлах Fe и W // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020.— Т. 43, вып. 2, С. 13—24 DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-13-24

Р.И. ХУСНУТДИНОВ<sup>1,2</sup>, А.Б. КУКУШКИН<sup>1,2</sup>, В.С. НЕВЕРОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

## **БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ VM1D2V ДЛЯ РЕЦИКЛИНГА ВОДОРОДА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ОСНОВНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА**

Разработано обобщение баллистической модели (БМ) [1-3] для функции распределения по скоростям (ФРС) нейтральных атомов водорода, одномерной по скорости и координате, на случай двумерного распределения по скорости (такая модель названа VM1D2V, а модели [1-3] соответствует название VM1D1V). Такое обобщение необходимо для использования БМ при интерпретации наблюдений излучения плазмы токамака в спектральных линиях атомов изотопов водорода на хордах наблюдения, направленных под косым углом (не перпендикулярно) относительно первой стенки вакуумной камеры, и развития синтетической диагностики H-альфа в ИТЭР.

БМ [1-3] была разработана как простая, вычислительно эффективная модель, позволяющая рассчитывать ФРС атомов и молекул изотопов водорода в пристеночной плазме токамака путем итеративного решения кинетического уравнения для ФРС атомов и упрощенного решения кинетического уравнения для ФРС молекул. БМ учитывает проникновение медленных нейтралов со стенки в плазму с учетом следующих процессов: диссоциации молекул на атомы; ионизации атомов и молекул; перезарядки медленных нейтральных атомов на быстрых ионах плазмы; упругого и неупругого отражения атомов от стенки; отражения ионов от стенки с их нейтрализацией; поступления молекул со стенки. Используя в качестве входных данных профили плотности и температуры ионов и электронов в пристеночном слое плазмы и температуру стенки, БМ в приближении плоского слоя позволяет в пристеночном слое получить ФРС нейтральных молекул и атомов. БМ верифицирована в [1, 3] путем сравнения с результатами численного моделирования методом Монте-Карло кодом EIRENE [4] для условий периферийной плазмы в ИТЭР, смоделированных кодом SOLPS4.3 [5].

Использование БМ позволит заменить моделирование кодом EIRENE [4] в диагностике H-альфа в основной камере (но не в диверторе, где одномерная по координате модель неприменима), что намного ускорит решение обратной задачи восстановления плотности потока атомов и молекул со стенки путем подгонки спектров высокого разрешения линий бальмер-альфа в синтетической H-альфа диагностике для токамака ИТЭР [6]

и интерпретации экспериментов, например, при усовершенствовании методики, использованной в [7] для токамака JET. Однако БМ [1-3] применима только для хорд наблюдения, направленных ортогонально первой стенке.

Для описания кинетики нейтрального водорода в BM1D2V использовано следующее уравнение для  $f^{(j)}(v_x, v_\perp, x)$  – функции распределения атомов  $j$ -го изотопа водорода по координате, ортогональной первой стенке, и по скорости, обобщающее уравнение (1) для BM1D1V в [3] на случай, двумерный по скорости:

$$\begin{aligned}
 v_x \frac{\partial f^{(j)}(v_x, v_\perp, x)}{\partial x} = & q(v_x, v_\perp, x) - f^{(j)}(v_x, v_\perp, x) n_e(x) \langle \sigma_{ai} v_e \rangle(x) \\
 & - f^{(j)}(v_x, v_\perp, x) \sum_{k=H,D,T} n_i^{(k+)}(x) \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) \\
 & \quad \times |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| F_M^{(k+)}(v', x) \\
 & + n_i^{(j+)}(x) F_M^{(j+)}(v, x) \sum_{k=H,D,T} \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) \\
 & \quad \times |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| f^{(k)}(v'_x, v'_\perp, x)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$|\mathbf{v} - \mathbf{v}'| = \sqrt{(v_x - v'_x)^2 + v_\perp^2 + v'_\perp^2 - 2v_\perp v'_\perp \cos \phi}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_\perp^2},$$

$$\int d\mathbf{v}' = \int_{-\infty}^{+\infty} dv'_x \int_0^{+\infty} v'_\perp dv'_\perp \int_0^{2\pi} d\phi.$$

В модели BM1D2V ФРС предполагается симметричной по полярному углу и зависит от проекции скорости на перпендикулярное стенке направление,  $v_x$ , и модуля проекции скорости на параллельное стенке направление,  $v_\perp$ .

Как показано в [1-3] интегро-дифференциальное уравнение типа (1) можно успешно решить итеративным методом благодаря тому, что основной вклад в ФРС в пристеночной плазме дает небольшое число актов перезарядки на траекториях нейтральных атомов от точки их рождения на стенке (вследствие процесса рекомбинации поступающих на стенку из плазмы ионов с их нейтрализацией, см. (10) в [3]) или в объеме (вследствие процессов диссоциации молекул и молекулярных ионов под действием электронных ударов, см. (3) в [3]).

Распределение источника нейтральных атомов по скоростям  $q(v_x, v_\perp, x)$  можно вычислить, зная ФРС молекулярной компоненты, которую можно рассчитать, решив кинетическое уравнение для молекул:

$$v_x \frac{\partial f^{(jk)}(v_x, v_\perp, x)}{\partial x} = -f^{(jk)}(v_x, v_\perp, x) n_e(x) [\langle \sigma_{mi} v_e \rangle(x) + \langle \sigma_d v_e \rangle(x) + \langle \sigma_{di} v_e \rangle(x)], \quad (2)$$

где  $f^{(jk)}(v_x, v_\perp, x)$  – функция распределения молекул водорода, состоящих из  $j$ -го и  $k$ -го изотопов, по координате, ортогональной первой стенке, и по скорости,  $\langle \sigma_{mi} v_e \rangle$ ,  $\langle \sigma_d v_e \rangle$ ,  $\langle \sigma_{di} v_e \rangle$  – скорости ионизации, диссоциации, диссоциации с ионизацией молекул, соответственно. Уравнение (2) легко интегрируется, поскольку относится к ОДУ с разделяющимися переменными.

Существенным усложнением расчетов при решении уравнения (1) по сравнению с одномерной по скорости моделью [1-3] является появление трехмерного интеграла в третьей строке, поскольку интеграл во второй строке можно аппроксимировать двойным логарифмическим полиномом как функцией температуры и кинетической энергии налетающего атома в лабораторной системе отсчета (такая параметризация дана в базе атомных данных кода EIRENE [4]):

$$\int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| F_M^{(k+)}(v', T(x)) = \exp\left(\sum_{m,n} \alpha_{mn} (\ln E)^n (\ln T)^m\right) \quad (3)$$

Однако несмотря на увеличение сложности расчетов, скорость расчетов ФРС кодом VM1D2V намного выше, чем кодом EIRENE. Данная модель позволит для наклонных хорд наблюдения решать общую многопараметрическую обратную задачу в синтетической H-альфа диагностике [6] для спектроскопии высокого разрешения водородных линий в токамаке-реакторе. Это даст возможность восстанавливать плотность потока атомов и молекул изотопов водорода с вакуумной стенки в плазму как с максимально достижимой точностью с помощью пост-процессинга экспериментальных данных, так – при определенных условиях – и с точностью до порядка величины в режиме реального времени с помощью метода [8], модифицирующего на случай измерения только линий атомов водорода (без привлечения трудно интерпретируемых данных спектроскопии молекул) известный метод SXB [9-11] для определения плотности потока примеси со стенки в плазму по интенсивности излучения в спектральной линии.

## Литература.

1. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S. and Shurygin V.A. 2012 *Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012)* p P4.093 (<http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/pdf/P4.093.pdf>)
2. Lisitsa V.S., Kadomtsev M.B., Kotov V., Neverov V.S. and Shurygin V.A. 2014 *Atoms* **2** 195 (<https://doi.org/10.3390/atoms2020195>)
3. Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Shurygin V.A. *Plasma Phys. Contr. Fusion* 2021 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/abd97f/pdf>)
4. Reiter D., Baelmans M. and Börner P. 2005 *Fusion Sci. Tech.* **47** 172 (<https://doi.org/10.13182/FST47-172>), [www.eirene.de](http://www.eirene.de)
5. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W. and Reiter D. 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 2865 (<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.06.009>)
6. Kukushkin A.B., Neverov V.S., Alekseev A.G., Lisgo S.W., Kukushkin A.S. 2016 *Fusion Sci. Tech.* **69** 628 (<https://doi.org/10.13182/FST15-186>)
7. Neverov V.S., Kukushkin A.B., Stamp M.F. et al. 2017 *Nucl. Fusion* **57** 016031 (<https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016031>)
8. Khusnutdinov R.I. and Kukushkin A.B. 2019 *Physics of Atomic Nuclei* **82** (10) 1392 (<https://doi.org/10.1134/S1063778819100119>)
9. Behringer K.H. 1987 *J. Nucl. Mater.* **145–147** 145 ([https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90319-9](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90319-9))
10. Pospieszczyk A. et al 2010 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** 144017 (<https://doi.org/10.1088/0953-4075/43/14/144017>)
11. Summers H.P. et al 2006 *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** 263 (<https://doi.org/10.1088/0741-3335/48/2/007>)

З.Г. ЛЮЛЛИН<sup>1,2</sup>, Н.А. БАБИНОВ<sup>1,2</sup>, Л.А. ВАРШАВЧИК<sup>1,2</sup>,  
П.А. ЗАТЫЛКИН<sup>1</sup>, Е. Е. МУХИН<sup>1</sup>, А. Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>,  
А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Д.С. САМСОНОВ<sup>1</sup>

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

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЧИСТКИ ВЧ РАЗРЯДОМ И ТРАНСПОРТА РАСПЫЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В УЗЛЕ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ИТЭР**

Для контроля работы и получения научной информации в ходе эксплуатации токамака ИТЭР будут широко использоваться различные системы оптической диагностики. Одной из проблем, возникающих при разработке таких систем, является наличие внутривакуумных оптических элементов, подвергающихся загрязнению в процессе эксплуатации.

Для продления срока службы внутривакуумных оптических систем планируется использовать периодическую чистку оптических поверхностей ВЧ разрядом. Данный тип разряда подходит для очистки поверхности как от металлических загрязнений, так и от диэлектрических пленок, появление которых ожидается на поверхности оптических элементов вследствие окисления (например, при прорыве одной из трубок охлаждения).

Моделирование физических процессов, определяющих эффективность чистки ВЧ разрядом, таких как пространственное распределение параметров плазмы, формирование потоков высокоэнергичных ионов на поверхность, а также распыление, транспорт и осаждение распыленного материала поверхности, позволяет выявить недостатки в конструкции и оценить эффективность работы системы до проведения макетирования.

В ходе работы было проведено численное исследование работы системы ВЧ-чистки в узле первого зеркала диагностики ИК термографии ИТЭР (55.G6). Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе был проведен расчет ВЧ-разряда, получены объемные распределения параметров плазмы и распределения потоков ионов на поверхности, заземленные и находящиеся под ВЧ потенциалом. На втором этапе было проведено моделирование транспорта и осаждения распыленной примеси с использованием результатов первого этапа в качестве входных данных.

Для расчета ВЧ разряда был использован код Fraunhofer-IST, реализующий метод частиц-в-ячейках. Расчеты были проведены в атмосфере гелия для двух случаев подачи питания (к различным зеркалам) при разных давлениях газа и мощностях разряда. В результате расчетов ВЧ разряда были получены данные о плотности и температуре плазмы, а также распределении

пространственном и энергетическом распределениях потоков ионов гелия на поверхности зеркал и вспомогательных конструкций.

Трехмерный расчет потоков частиц на поверхности был реализован посредством кода KITE. Данный код подходит для моделирования процесса распыления поверхности и последующего транспорта распыленных загрязнений в разреженном газе и слабоионизованной плазме методом Монте-Карло.

Используя полученные в результате работы кода Fraunhofer-IST данные о потоках гелия были заданы соответствующие потоки на поверхности камеры. Это позволило связать расчет ВЧ разряда внутри камеры с процессом распыления и последующего осаждения материала на внутренних поверхностях конструкции узла первого зеркала. Были получены пространственные распределения эффективной скорости распыления, определяемой как разность скорости распыления и осаждения материала. При этом, положительное значение эффективной скорости говорит о преимущественном распылении, в то время как отрицательное – о преимущественном осаждении.

Результаты моделирования показывают сильную неравномерность скорости распыления оптической поверхности с уменьшением эффективности чистки к краям зеркала. Кроме того, на одном из зеркал выявлена область с преимущественным осаждением, вызванная особенностью конструкции (вблизи расположен выступ опорных конструкций).

На завершающем этапе было проведено моделирование оптической эмиссии распыленной примеси (бериллия) в плазме ВЧ-разряда. Полученные результаты позволят проанализировать возможность использования спектроскопии разряда для определения состояния оптических поверхностей (чистое/загрязненное).

На основании полученных результатов были сделаны выводы об эффективности чистки ВЧ разрядом, оценены скорость и равномерность чистки. Полученные данные позволяют сделать предложения по оптимизации конструкции узла первого зеркала с целью повышения эффективности работы системы.

Н.А. ПУНТАКОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.В. ГРУНИН

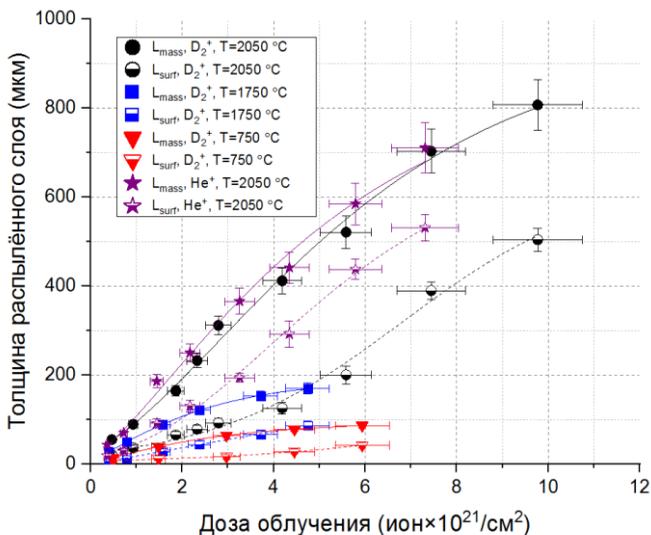
*Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ЭМИССИЯ АТОМОВ УГЛЕРОДА ИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ГРАФИТА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ**

В работе представлены результаты экспериментов по облучению мелкозернистого графита марки R6510D100P01, который будет использоваться в качестве материала первой стенки токамака Т-15МД, интенсивными потоками ионов водорода, гелия и дейтерия в диапазоне температур от 750 до 2050°С. Изучалась зависимость эрозии графита от температуры образца, плотности тока ионов, дозы облучения и толщины облучаемого образца. Анализируются изменения коэффициента распыления графита и закономерности модификации его поверхности и приповерхностных слоёв при использованных параметрах плазменного облучения.

Установлено, что облучение графита диатомными ионами водорода и дейтерия с энергией 14 кэВ/ион и плотностью потока примерно  $1,4 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>с, а также ионами гелия с энергией 14 кэВ/ион. и плотностью потока  $1,2 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>с, стимулирует транспорт вакансий из зоны столкновения ионов в глубинные слои образца и, соответственно, диффузию атомов углерода на поверхность. В свою очередь, это приводит к образованию пористого слоя, толщина которого многократно превышает глубину проникновения ионов в графит. При облучении образцов ионами водорода с энергией 14 кэВ/ион и плотностью потока  $1,4 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>с развитие пористого слоя было пренебрежимо малым.

Образование пористого слоя фиксировалось уже на начальных этапах эксперимента, где графит облучался ионами дейтерия при температуре 2050°С (Рис. 1). При дозе облучения  $4,2 \times 10^{20}$  ион/см<sup>2</sup> была заметна разница между глубиной распылённого участка образца, измеренного профилометрией относительно нераспылённого ( $L_{\text{surf}}$ ), и глубиной, полученной в результате расчёта по убыли массы образца, определённой взвешиванием до и после эксперимента ( $L_{\text{mass}}$ ).

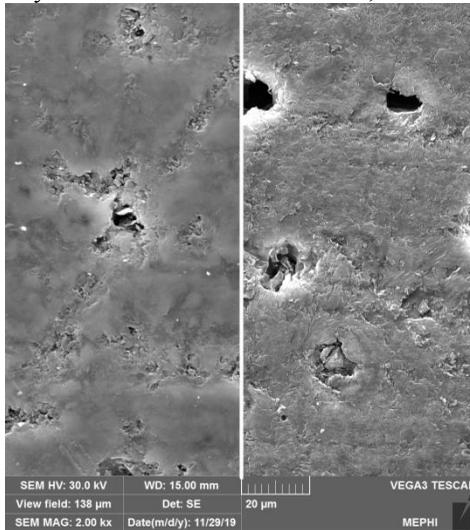


**Рис. 1.** Дозовая зависимость толщины распылённого слоя образцов облучённых ионами дейтерия с энергией 7 кэВ/ат. и плотностью потока  $1,4 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>с при температурах 750, 1700 и 2050°C и гелия с энергией 14 кэВ/ат. с плотностью потока  $1,2 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>с при температуре 2050°C.

С ростом дозы облучения разница между параметрами росла, пока не достигла примерно 300 мкм при дозе облучения  $4,2 \times 10^{21}$  ион/см<sup>2</sup>. Дальнейший рост дозы облучения не приводил к изменениям в разнице между  $L_{\text{mass}}$  и  $L_{\text{surf}}$ ; она оставалась постоянной, что говорило о достижении равновесия между распылением атомов с поверхности графита и их диффузией на поверхность и, соответственно, остановкой роста пористого слоя в толщину.

Увеличение температуры в диапазоне от 750 до 2050°C приводило к тому, что размер пористого слоя, а также доза, при которой достигается равновесие, увеличивались. Для образцов разной толщины, облучённых ионами водорода с дозой облучения  $2,7 \times 10^{20}$  ион/см<sup>2</sup>с при температуре 2050°C, образование пористого слоя наблюдалось с обратной стороны при толщине 1,5 мм, что позволяет заключить, что толщина пористого слоя при

этих параметрах облучения составляет не менее 1,5 мм.



**Рис. 2.** Изображение обратной стороны образца мелкозернистого графита марки R6510D100P01 до (слева) и после (справа) облучения образца ионами водорода с дозой облучения  $2,7 \times 10^{20}$  ион/см<sup>2</sup>с при температуре 2050°C

**Список литературы:**

- [1] Begrambekov L. B., Grunin A. V., Dolganov G.D., Puntakov N. A., Titkova K.M: Dose dependence of the erosion of graphite under high temperature ion irradiation (Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1121(1), 012006)

Н.П. БОБЫРЬ<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>2</sup>, Д.А. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, Д.С. ДУГИН<sup>1</sup>,  
С.С. АНАНЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ "Курчатовский институт", Москва, *Bobyr\_NP@nrcki.ru*

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

## **ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ТАНТАЛА НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В СПЛАВЕ W-Ta**

В настоящее время вольфрам рассматривается как один из материалов, обращенных к плазме, для будущих термоядерных реакторов. В качестве материала, обращенного к плазме, W будет подвергаться интенсивным потокам дейтерия, трития, частиц гелия, а также нейтронов с энергией 14 МэВ от реакции D – T-синтеза. Облучение нейтронами вызовет изменение микроструктуры W за счет смещения в объеме и образования Re и Os [1]. Было показано, что добавление 5 ат.% Re к W сильно снижает удерживание изотопов водорода после облучения тяжелыми ионами [2]. Интересно изучить влияние других легирующих элементов, таких как Mo и Ta, на удерживание изотопов водорода.

В данном исследовании в качестве экспериментальных образцов использовались пластины из монокристаллических сплавов W, W-xTa (x = 1; 3; 5 концентрация в ат.%). Все образцы были отполированы до зеркальной поверхности и дегазированы в вакууме при 1100 К в течение 2 часов. Наборы образцов W, W-1Ta, W-3Ta, W-5Ta экспонировались в газе D в диапазоне температур 400-600 К при давлении 10<sup>3</sup> Па. Удержание D в сплавах W и W-Ta измеряли методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС).

Показано существенное влияние примеси Ta на удержание дейтерия в монокристаллах W после газового воздействия. Наблюдается зависимость уменьшения количества дейтерия с ростом концентрации примеси Ta.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (No. 18-72-10162).

### Литература

[1]. H. Bolt et al., J. Nucl. Mater., 307–311 (2002) 43–52

[2]. Y. Natano et al., Nucl. Mater. Energy, 9(2016)93-97.

Е.Д. ФЕДУЛАЕВ<sup>1,2</sup>, И.М. ПОЗНЯК<sup>1,2</sup>, Д.А. ТОПОРКОВ<sup>2</sup>,  
В.М. САФРОНОВ<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. ЦЫБЕНКО<sup>2</sup>, В.А. КОСТЮШИН<sup>2</sup>,  
Д.М. КОЧНЕВ<sup>2</sup>, З.И. НОВОСЕЛОВА<sup>1,2</sup>, А.И. РУМЯНЦЕВА<sup>1,2</sup>,  
С.В. КАРЕЛОВ<sup>2</sup>, Д.В. КОВАЛЕНКО<sup>2</sup>, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup>Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,

<sup>3</sup>Проектный центр ИТЭР, Москва

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРОВОЙ ПЛАЗМЫ ВОЛЬФРАМА В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ

При работе токамаков на защитные покрытия вакуумной камеры могут воздействовать мощные плазменно-тепловые потоки, возникающие в результате периферийной локальной неустойчивости и срывов тока. Это повлечет быструю эрозию материалов и значительное сокращение срока их службы. Исследование данных процессов проводится в лабораториях с применением плазменных ускорителей, лазеров, электронных и ионных пучков.

Особый интерес вызывает эффект паровой экранировки вольфрама, заключающийся в возникновении экранирующего парового слоя при мощном плазменно-тепловом воздействии на защитные покрытия. Исследование данного эффекта проводится на плазменной установке МК-200UG. В ходе предшествующих этапов работы были определены параметры плазменного потока ускорителя и измерена динамика формирования и развития экранирующего слоя.

Цель данной работы – определить параметры излучения экранирующего плазменного слоя в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах. Вольфрамовая мишень облучалась интенсивными потоками водородной плазмы на установке МК-200UG в условиях, характерных для переходных процессов в ИТЭР.

Излучение примышенной плазмы в диапазоне 5 – 70 нм исследовалось с помощью спектрографа на основе пропускающей дифракционной решетки – рисунок 1. Спектрограф состоит из двух коллимирующих (В, G) и изображающей щели (I), дифракционной решетки и фоторегистратора – высокоскоростной МКП-камеры. На входе камеры формируется спектрограмма с пространственным разрешением вдоль направления движения плазменного потока. Спектрометр откалиброван по спектру азота.

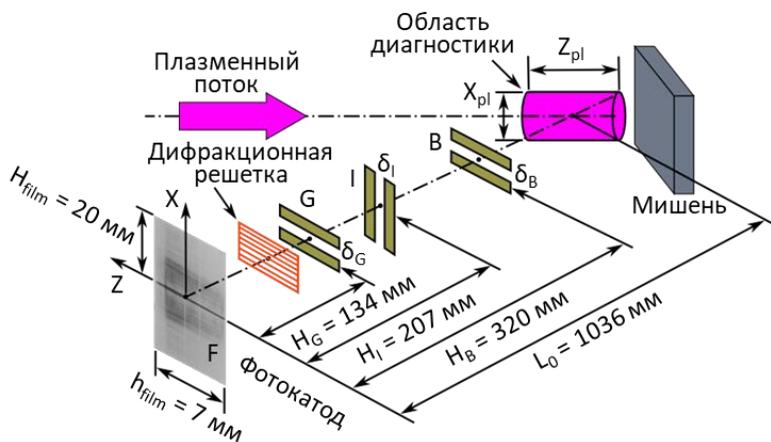


Рисунок 1 – Спектрометр на основе пропускающей дифракционной решетки

Для обработки полученных результатов была написана специальная программа, которая при помощи итерационного метода вычитает из дифракционной картины вторые и более высокие порядки дифракции. Ионный состав плазмы определялся путем сопоставления экспериментальных спектров со спектральными данными из базы ADAS.

Тепловая нагрузка на мишень в ходе эксперимента варьировалась от  $q = 3,5 \text{ МДж/м}^2$  до  $q = 9 \text{ МДж/м}^2$ , при характерной длительности воздействия 15 мкс. Спектрограммы регистрировались на различных расстояниях до мишени  $z$  ( $z \leq 220 \text{ мм}$ ). В ходе анализа полученных данных установлено:

1. При плотности потока энергии  $q = 3,5 \text{ МДж/м}^2$  на спектре виден лишь нулевой порядок дифракции. Свечение мишенной плазмы появляется при  $q = 5,3 \text{ МДж/м}^2$ , а интенсивное испарение вольфрама происходит при  $q \geq 8 \text{ МДж/м}^2$ .

2. Скорость расширения вольфрамовой плазмы от поверхности, вдоль силовых линий магнитного поля, равна  $V_w = 9 \text{ км/с}$ , что в пересчете на энергию ионов вольфрама составляет  $E_w \approx 75 \text{ эВ}$ .

3. Яркость излучения  $I$  мишенной плазмы максимальна в диапазоне  $z = 0 - 15 \text{ мм}$  и быстро убывает с увеличением расстояния до мишени. При  $z = 50 - 60 \text{ мм}$  величина  $I$  падает до 20% от своего максимального значения. Несмотря на это, спектральные линии вольфрама удастся зарегистрировать вплоть до  $z = 220 \text{ мм}$ .

4. Интенсивность излучения примесей максимальна во время воздействия на мишень «основной» части плазменного потока:  $t = 17 - 20$  мкс. Наблюдаемые в эксперименте спектры по форме повторяют друг друга и наилучшим образом описываются суперпозицией спектральных линий двух групп ионов:  $W+6 - W+12$  и  $W+15 - W+20$ . Для ионов вольфрама со степенями ионизации  $+13, +14$  излучение отсутствует (рис. 2).

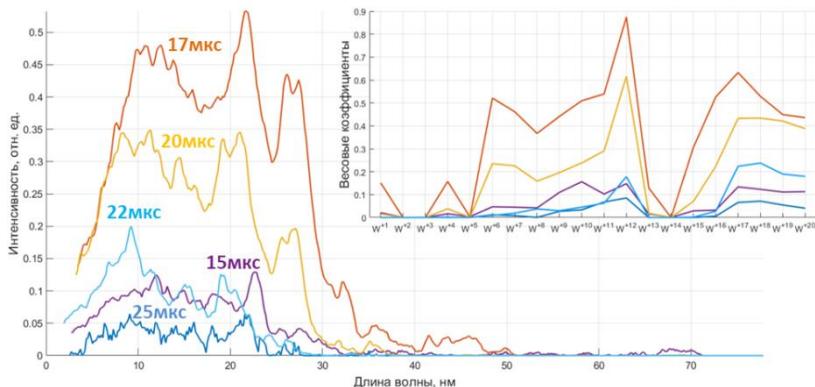


Рисунок 2 – Спектры и ионный состав вольфрамовой плазмы на расстоянии 5 мм до мишени в различные моменты времени

5. С увеличением расстояния до мишени ионный баланс плазмы смещается от низких степеней ионизации ( $W+6 - W+12$ ) к более высоким ( $W+15 - W+20$ ). Вероятно, это связано с тем, что ионы с высокими энергиями уходят на большие расстояния быстрее, чем ионы с низкими энергиями.

Работа выполнена при поддержке Международной организации ИТЭР (Кадараш, Франция), контракт № IO/18/СТ/4300001763.

З.И. НОВОСЕЛОВА<sup>1,2</sup>, И.М. ПОЗНЯК<sup>1,2</sup>, Д.А. ТОПОРКОВ<sup>2</sup>,  
В.М. САФРОНОВ<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. ЦЫБЕНКО<sup>2</sup>, В.А. КОСТЮШИН<sup>2</sup>,  
Д.М. КОЧНЕВ<sup>2</sup>, Е.Д. ФЕДУЛАЕВ<sup>1,2</sup>, А.И. РУМЯНЦЕВА<sup>1,2</sup>, С.В. КАРЕЛОВ<sup>2</sup>,  
Д.В. КОВАЛЕНКО<sup>2</sup>, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup>Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,

<sup>3</sup>Проектный центр ИТЭР

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ ВОЛЬФРАМА В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

Защитные покрытия дивертора и первой стенки ИТЭР могут разрушаться под действием мощных плазменных потоков. Экспериментально доказано, что в условиях, характерных для переходных процессов (срывов, ELM-событий, убегающих электронов и вертикальных перемещений плазменного шнура), эрозии материалов препятствует эффект паровой экранировки. Суть этого эффекта в том, что при воздействии интенсивного потока плазмы вблизи облучаемой поверхности возникает экранирующий паровой слой, который преобразует энергию налетающего потока в излучение и, тем самым, уменьшает тепловую нагрузку на поверхность [1].

Для построения физических моделей, описывающих эффект паровой экранировки, необходимы экспериментальные данные, которые невозможно получить ни на одном из существующих токамаков. Поэтому лабораторные испытания защитных покрытий проводят на электронных и ионных пучках, лазерах, импульсных и квазистационарных плазменных ускорителях.

Цель данной работы – получить экспериментальные данные о спектральных характеристиках излучения экранирующего парового слоя вольфрама в оптическом диапазоне. Эксперименты проводились при облучении вольфрамовых мишеней интенсивными потоками водородной плазмы на установке МК-200UG. Поле в мишенной камере установки регулируется в диапазоне 1 – 2 Тл. В зависимости от условий эксперимента фактор теплового воздействия на образец может составлять 1 – 8,9 МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0,5</sup>, а направленная энергия ионов в налетающей плазме 0,2 – 1,6 кэВ. Во всех экспериментах длительность взаимодействия налетающей плазмы с образцом равнялась  $t = 15$  мкс.

Спектральные характеристики излучения примишенной плазмы в оптическом диапазоне исследовались с помощью спектрометра CS100M фирмы Thorlabs. Для обработки зарегистрированных в эксперименте

спектров был написан комплекс программ, использующих базу данных Национального института стандартов и технологий (Мэриленд, США) [2].

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты:

1) Энергетический порог испарения вольфрама составляет  $q = 1,3 \text{ МДж/м}^2$ , о чем свидетельствует появление большого количества спектральных линий атомов и однократно ионизованных ионов вольфрама.

2) Исследование химического состава экранирующей плазмы в присутствии сильного магнитного поля  $B = 2 \text{ Тл}$  показало, что вблизи мишени наблюдается интенсивный континуум свечения, а при удалении от неё на  $z = 4 \text{ см}$  спектр становится линейчатым. В интервале длин волн  $350 - 470 \text{ нм}$  помимо спектральных линий водорода и конструкционных материалов мишенной камеры, зарегистрировано большое количество спектральных линий атомов W I и однократно ионизованных ионов вольфрама W II. При переходе в область длин волн  $\lambda \geq 500 \text{ нм}$  можно наблюдать группы линий, принадлежащие нейтралам W I.

3) Эффективная толщина излучающего плазменного слоя составляет  $h_{\text{rad}} \approx 50 - 60 \text{ мм}$ , что хорошо согласуется с результатами измерений, выполненными ранее при помощи камеры обскуры и абсолютно калиброванных фотодиодов.

4) Несмотря на то, что яркость излучения вольфрамовой плазмы быстро спадает с расстоянием  $z$  до мишени, спектральные переходы W I и W II удастся регистрировать вплоть до  $z = 220 \text{ мм}$ .

В ходе дальнейшей работы предполагается измерить скорость расширения вольфрамовой плазмы, а также – исследовать изменение ее ионного состава во времени.

Работа выполнена при поддержке Международной организации ИТЭР (Кадараш, Франция), контракт № IO/18/СТ/4300001763.

### Литература

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

2. База данных спектральных линий элементов Национального института стандартов и технологий США. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.

М.А. ПОПОВА, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.С. ЕФИМОВ,  
С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, М.В. ГРИШАЕВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСОРБЦИИ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ВОЛЬФРАМА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Контроль содержания трития в термоядерных установках является важной задачей с точки зрения обеспечения радиационной безопасности. Одним из доминирующих механизмов захвата изотопов водорода является так называемое соосаждение, т.е. захват в постепенно растущие из продуктов эрозии плёнки. Таким образом, значительная часть захваченного рабочего газа часто сконцентрирована в приповерхностной области. В связи с этим активно изучается возможность использования лазерного излучения для контроля содержания изотопов водорода на поверхности обращенных к плазме элементов термоядерных установок. Использование лазерного излучения позволяет осуществлять контроль дистанционно, а также проводить локальные измерения и получать распределение концентрации по поверхности [1].

В зависимости от параметров лазерного излучения может происходить либо простой нагрев поверхностного слоя и десорбция захваченного газа, либо абляция материала вместе с захваченным газом. Глубина прогреваемого слоя и глубина абляции также определяются параметрами лазера.

В данной работе проводилось моделирование для сравнения с полученными ранее на установке «Большой масс-монокроматор МИФИ» экспериментальными данными по десорбции дейтерия из вольфрамовых слоев при воздействии Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 20 нс. Измерения проводились при плотности энергии излучения в диапазоне 5 – 200 МВт/см<sup>2</sup>, что покрывает как область десорбции, так и область абляции.

Моделирование проводилось с помощью кода TMAP7, позволяющего одновременно решать задачи диффузии и теплопроводности с различными граничными условиями. Параметры вольфрамового слоя брались стандартными для поликристаллического вольфрама. Дополнительно предполагалось наличие нескольких типов ловушек для водорода, равномерно распределенных по толщине пленки. Исследуемая в экспериментах вольфрамовая пленка осаждалась в магнетронном разряде в смеси аргона и дейтерия аналогично процедуре, описанной в [2]. Поэтому параметры ловушек выбирались на основе данных, полученных в данной

работе: 1)  $E_{dt1} = 0,74$  эВ,  $c_{t1} = 2,3$  ат.%; 2)  $E_{dt2} = 1,18$  эВ,  $c_{t2} = 1,8$  ат.%; 3)  $E_{dt3} = 1,56$  эВ,  $c_{t3} = 1,0$  ат.%

На рис.1 приведено сравнение экспериментальных значений количества десорбированного дейтерия при разной плотности энергии лазерного излучения и результатов моделирования с различными вариантами начального заполнения ловушек, а также максимальная температура образца, полученная при расчетах в TMAP и COMSOL Multiphysics для одномерной и трехмерной с гауссовым профилем пучка постановок. При рассмотрении полностью (100%) заполненных сначала ловушек (пометка (1) на графике) можно видеть, что расчетные значения оказываются несколько выше экспериментальных, что может быть связано с частичным выходом дейтерия за время между осаждением пленки и проведением экспериментов. Поэтому были проведены дополнительные расчеты, где ловушки предполагались сначала частично пустыми (пометка (2) на графике), а именно: полностью пустые наиболее слабые ловушки 1 типа (0%), ловушки 2 и 3 типов заполнены соответственно наполовину (50%) и почти полностью (95%). Также были проведены расчёты с частично заполненными сначала ловушками, где приповерхностный слой (толщиной 10, 50 нм) предполагался пустым. Это позволило более точно описать экспериментальные данные.

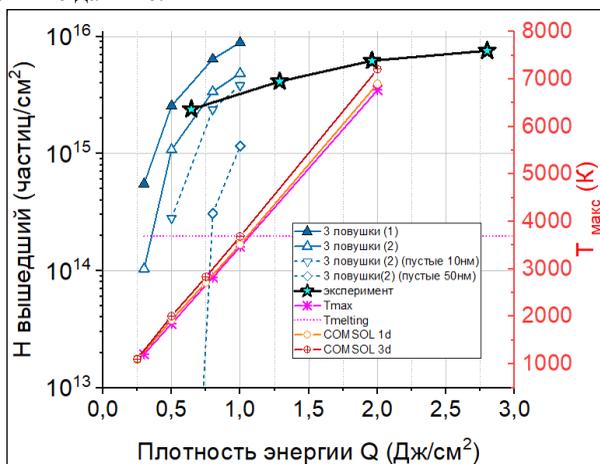


Рис.1. Зависимость количества десорбированного водорода от плотности энергии лазерного импульса для разных вариантов начального заполнения ловушек: (1) – полное заполнение ловушек, (2) – частичное заполнение (см. в тексте)

Резкое снижение количества десорбированного дейтерия с увеличением толщины опустошенного слоя говорит о чувствительности измерений с помощью наносекундного лазера к узкому поверхностному слою толщиной 10-100 нм (в зависимости от энергии импульса).

По результатам данных расчетов и лабораторных экспериментов в ближайшее время планируется разработка диагностической систем для токамака Глобус-М2 в ФТИ им.А.Ф.Иоффе.

Литература:

[1] E.E. Mukhin et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 036017.

[2] S. Krat et al., Vacuum, 149 (2018) 23-28.

И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, Ф.С. ПОДОЛЯКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл., Россия

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

## ЛИНЕЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА С ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫМ РАЗРЯДОМ

В работе представлен реализованный проект компактной линейной установки для исследования физико-химических процессов в стенках термоядерных установок (рисунок 1), разработанный на базе плазмохимического реактора с пучково-плазменным разрядом (ППР) [1-3].

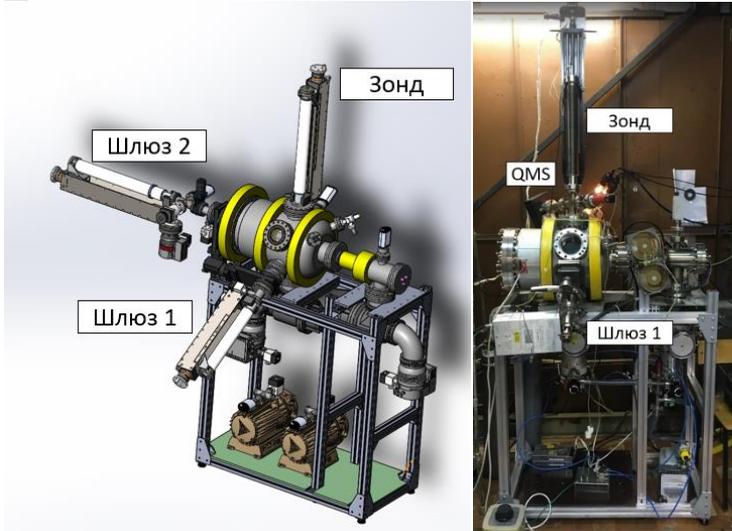


Рисунок 1. Проект модернизированного плазмохимического реактора с ППР и фотография собранного стенда.

Использование ППР в качестве достаточно эффективного источника плазмы позволяет реализовывать широкий спектр режимов работы от транспортировки электронного пучка в вакуумном режиме (например, для нагрева, термоциклирования или плавления материалов) и режима пучковой плазмы низкой плотности (ионизация электронным ударом; коллективные процессы вносят незначительный вклад) до ППР и отражательного разряда, когда основной вклад в процесс ионизации рабочего газа вносят коллективные процессы (развитие двухпоточковой неустойчивости

генерирующей локальные высокочастотные поля, вносящие основной вклад в степень ионизации в разряде).

На установке предусмотрен ряд диагностических систем для контроля параметров плазмы, ионного потока, остаточного газа и состояния поверхности (таблица 1).

Таблица 1. Средства диагностики установки с ППР.

Наименование	Предназначение
Подвижный зонд Ленгмюра	Измерение профилей основных параметров плазмы ППР
Цилиндрический энерго-анализатор	Измерение энерго-спектра ионного потока из плазмы
Квадрупольный масс-спектрометр (Extorr 100M)	Анализ массового состава остаточного и рабочего газов
ИК-камера + окно ZnSe	Термография поверхности
Обзорный оптический спектрометр (AvaSpec-2048x14)	Оптическая диагностика плазмы и поверхности
Монохроматор (МДР-206)	

Апробированы режимы ППР пригодные для моделирования физико-химических процессов в стенках термоядерных установок в рамках исследования механизмов возникновения «пуха» на поверхности вольфрама под действием гелиевой плазмы. Проведенные эксперименты позволили определить как диапазон ионного потока, так и температурные режимы, реализующиеся под действием плазмы ППР в рассматриваемой установке, поскольку условия возникновения вольфрамового пуха имеют достаточно строгие границы и хорошо освещены в литературе [4-6].

Показано, что наличие электронного пучка в плазме ППР значительно влияет на результаты ионно-плазменной обработки. При этом в периферийной области разряда влиянием электронного пучка на поверхность можно пренебречь. На рисунке 2 представлен результат облучения вольфрамовой фольги 50 мкм ионным потоком гелия (в среднем -  $5 \times 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) из плазмы ППР в течение 3 часов (доза составляла  $\sim 10^{25} \text{ м}^{-2}$ ), помещенной поперек (а) и вдоль первичного электронного пучка (б).

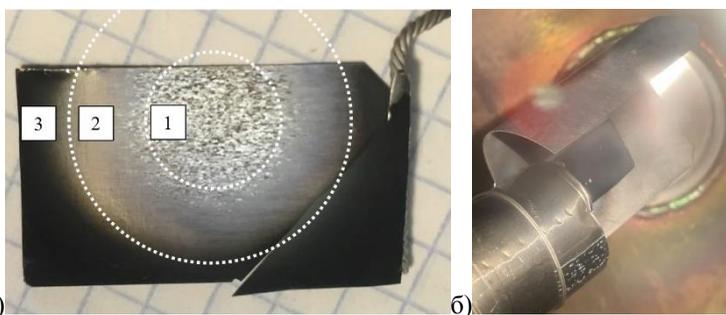


Рисунок 2. Результат облучения вольфрама гелиевой плазмой ППР: а – образец располагался на пути следования электронного пучка (1 – область рекристаллизации, 2 – переходная область, 3 – вольфрамовый пух), б – образец устанавливался в периферийной плазме ППР.

Отдельно апробирована возможность реализации in-situ термодесорбционной спектроскопии с помощью электронного пучка после ионно-плазменной обработки. Для этого разработан блок управления мощностью электронной пушки, реализующий как постоянный режим работы со стабилизацией по току эмиссии (варьированием мощности косвенного накала), так и импульсно-периодический (до 1 кГц с возможностью изменения коэффициента заполнения). Последний режим может быть использован как для модулирования мощности пучка при термоциклировании образца или ТДС, а также для уменьшения влияния нагрева поверхности в процессах ионно-плазменной обработки.

[1] N.V. Isaev, I.L. Klykov, V.V. Peskov, E.G. Shustin, I.V. Vizgalov, V.A. Kurnaev // *Instrum. Exp. Tech.* 2014. V. 57. N 1. P. 82-85.

[2] N.V. Isaev, A.I. Chmil', E.G. Shustin // *Plasma Phys. Rep.* 2004. V. 30. N 3. P. 292-297.

[3] E.G. Shustin, N.V. Isaev, M.P. Temiryazeva, Yu. V. Fedorov // *Vaccum.* 2009. V. 83. N 11. P. 1350-1354.

[4] M. Miyamoto, T. Watanabe, H. Nagashima, D. Nishijima, R.P. Doerner, S.I. Krashenninnikov, A. Sagara, N. Yoshida // *Physica Scripta.* 2014. T159. 014028.

[5] K.B. Woller, D.G. Whyte, G.M. Wright // *Journal of Nuclear Materials.* 2015. V. 463. P. 289-293.

[6] M. Miyamoto, S. Mikami, H. Nagashima, N. Iijima, D. Nishijima, R.P. Doerner, N. Yoshida, Watanabe H., Y. Ueda, A. Sagara. // *Journal of Nuclear Materials.* 2015. V. 463. P. 333-336.

В.В. КУЛАГИН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН,  
М.М. ХАРЬКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ВОЛЬФРАМА В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ НА РОСТ ВОЛЬФРАМОВОГО НАНОПУХА**

Представлен обзор и анализ опубликованных экспериментальных данных по облучению поверхности вольфрама ионами гелиевой плазмы при добавлении потока перепыленного вольфрама (W). Показано, что включение W в поток облучения ведет к значительному повышению скорости роста вольфрамового пуха по сравнению со случаем чистого гелиевого облучения. Ускоренный рост проявляется при достижении значительной пористости сформированных структур. В данном случае формирование наноструктур на поверхности вольфрама перестает быть ограниченным диффузией. На основе опубликованных литературных данных получена оценка потока вольфрама, при которой эффект ускорения роста может проявиться.

Описана экспериментальная схема по изучению влияния металлической примеси при значениях потока вольфрама  $\Gamma_W \sim 6 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . В качестве источника гелиевой плазмы использовался ВЧИ-разряд, позволивший получить поток гелия  $\Gamma_{He} \sim 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ , при температуре образца  $T_s \sim 1100 \text{ К}$  и потенциале смещения на образец  $V_b \sim -150 \text{ В}$ . В качестве источника W использовалась вольфрамовая нить накала. Описана методика калибровки нити накала в вакуумной установке “Кактус”. Проведена оценка высоты полученного в ВЧИ-разряде слоя вольфрамового пуха на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Для получения качественной оценки высоты пуха была измерена зависимость плотности нанопуха от высоты при помощи энерго-дисперсионного анализа. Представлено сравнение оценки высоты вольфрамового пуха с измеренным значением на СЭМе. Полученные результаты планируется использовать в дальнейшем для уточнения выражения для оценки высоты вольфрамового пуха при наличии примеси W в гелиевой плазме.

С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, А.В. ДЕДОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>2</sup> В.П. БУДАЕВ<sup>1,3</sup>,  
А.В. ВЕРТКОВ<sup>2</sup>, Ю.В.МАРТЫНЕНКО<sup>3,1</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,3</sup>,  
А.В. ЗАХАРЕНКОВ<sup>1</sup>, М.В.ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>,  
Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. ЧАН КУАНГ<sup>1</sup>, К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>,  
А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>, А.И. АМЕЛИН<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>АО «Красная звезда»

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

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВОЙ КПС В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ ПЛМ**

Для термоядерного реактора необходимо разработать внутрикамерные элементы, способные выдерживать воздействие стационарных тепловых потоков более 10 МВт/м<sup>2</sup>. Одним из решений этой проблемы является использование капиллярно-пористых структур, насыщенных жидкими металлами с низким (литий Li) или с высоким числом Z, но низким давлением пара (олово). Это позволит создать долгоживущую, самообновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов [1].

В работе испытание литиевых КПС проводились на плазменной установке ПЛМ [2] стационарными плазменными потоками, моделируя условия, ожидаемые в термоядерном реакторе. Принципиальная блок-схема подключения модуля литевой КПС к измерительной схеме представлена на Рис.1. Модули литиевых капиллярно-пористых систем (КПС) выполнены в виде цилиндрических молибденовых контейнеров диаметром 40 мм с молибденовыми сетками для крепления металлического лития (до ~100 граммов). В контейнерах установлены хромель-алюмелевые термодпары в области под поверхностью сеток на глубине 1 мм, проведена калибровочная градуировка термодпар для определения температуры поверхности сетки в эксперименте.

Транспортировка модуля КПС с предустановленной защитной крышкой, предохраняющей контакт лития с атмосферой, от места заправки литием (в АО «Красная Звезда») до установки в камере ПЛМ (НИУ «МЭИ») выполнялась в специальном вакуумном контейнере, время контакта лития с атмосферой было минимальным, лишь несколько минут в моменты перемещения между вакуумными модулями. Модуль КПС с литием устанавливался за анодом в разрядной камере ПЛМ, Рис.1, поверхность сетки с литием обращена перпендикулярно плазменному столбу.

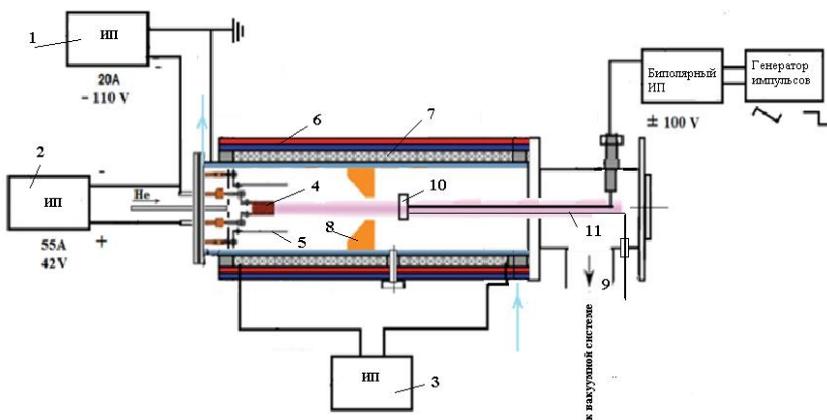
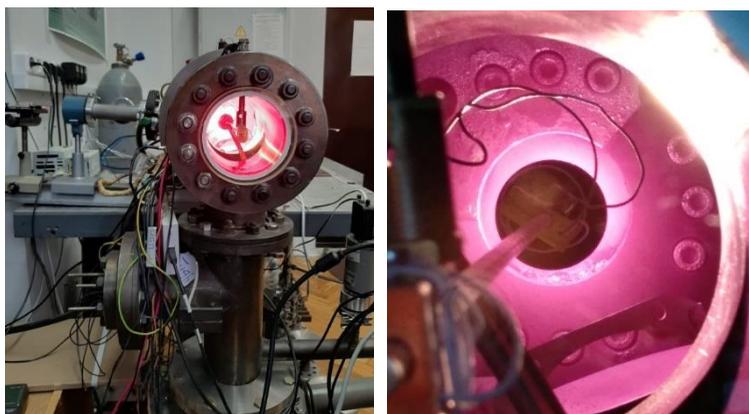


Рисунок 1 – Схема испытания литевой КПС в ПЛМ: 1 - источник питания ИП -120А обеспечивает ток разряда до 12 А при напряжении катода до - 240 В; 2 - источник питания нагревателя катода обеспечивает нагрев катода до температуры 2950 К; 3 - источник питания АКПП – 1143-32-110 соленоида обеспечивает ток до 110 А; 4 - катод из танталовой проволоки; 5 - цилиндрический экран (Ta); 6 - постоянные неодимовые магниты; 7- соленоид; 8 - анод (Си); 9 - высоковакуумная система; 10 - модуль с литевой КПС; 11 – термонпара ТХА в стальной защитной оболочке

После установки КПС камера ПЛМ откачивалась, достигалось давление остаточного газа  $2 \times 10^{-6}$  Торр. Плазменный эксперимент в гелиевой плазме, Рис.2, проводился в течение одного дня. При достижении рабочих параметров плазменного разряда защитная крышка снималась с модуля КПС с помощью удаленного манипулятора путем механического натяжения тросика, соединенного с крышкой с помощью высоковакуумного ввода движения. Под действием плазменного потока (диаметр плазменного столба был более 35 мм, покрывая всю поверхность литовой КПС) литий в КПС нагревался до температуры выше  $250^{\circ}\text{C}$ , что приводило к плавлению лития. Жидкометаллический литий удерживался в сетке КПС капиллярными силами, создавая условия обращенного к плазме жидкометаллического компонента. Под действием плазменного потока литий испарялся и поступал в плазму, что наблюдалось в виде характерного цвета видимого излучения из плазмы, Рис. 1а,б. На поверхности анода наблюдалось переосаждение испаренного в плазму лития в виде капель, Рис. 1б.

При испытаниях литевой КПС проведены измерения параметров плазмы. Температура электронов в гелиевой плазме ПЛМ, измеренная

спектроскопическим методом была в интервале 1,0 – 1,2 эВ. Температура фракции горячих электронов в ПЛИМ измерялась по методике, описанной в работе [3]. Оцененная температура фракции горячих электронов была до 10 эВ. Измерения концентрации плазмы проводилось путем регистрации ионного тока насыщения на модуль литиевой капиллярно-пористой системы при экспонировании в плазме. На модуль подавалось отрицательное напряжение смещения -100 В от биполярного источника постоянного тока. Вычисленная на основании этой оценки плотность плазмы была в диапазоне  $n = (0,7 - 1,1) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Плотность плазменно-теплового потока на приемную поверхность модуля оценена в диапазоне от 0,2 МВт/м<sup>2</sup> до 1 МВт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности модулей литиевых КПС определялась с помощью хромель-алюмелевых термопар в защитной оболочке из нержавеющей стали. Максимальная температура поверхности модулей литиевых капиллярно-пористых систем достигала 576°С в результате нагрева потоком плазмы, приходящим на поверхность КПС.

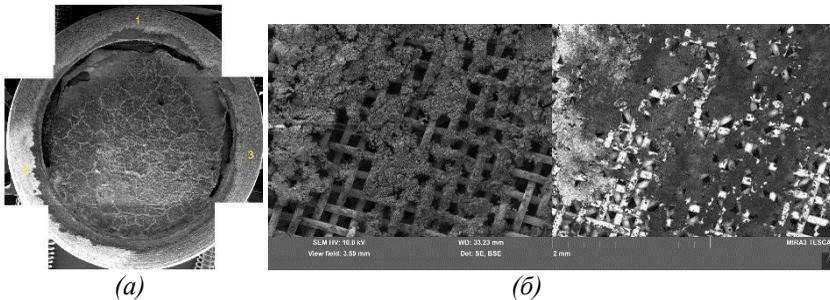


(а)

(б)

Рисунок 2 – (а) Плазменная установка ПЛИМ, (б) модуль литиевой КПС в плазменном разряде

Под модулем КПС была установлена ванна для сбора жидкого лития при его истечении из КПС. Модуль и ванна взвешивались до и после испытаний для оценки потерь лития из КПС. Анализ состояния поверхности КПС выполнялся с использованием методов оптической и сканирующей электронной микроскопии.



*Рисунок 3 – Литиевая КПС после испытаний в гелиевой плазме ПЛМ: (а) длительность плазменной нагрузки 195 минут, температура КПС 364 °С ; (б) длительность плазменной нагрузки 312 минут, температура КПС 576°С*

Проведенная после испытаний инспекция модуля, который нагревался не более 364 °С, не выявила значительных потерь лития из сетки КПС (~25%) (Рис.3а). Даже при значительных испарениях лития в модуле молибденовая сетка не подверглась разрушению, Рис. 3б. Результаты экспериментальных испытаний свидетельствует о стойкости литиевой КПС под действием стационарных плазменных нагрузок в модельных условиях реактора.

Плазменные испытания проводились при поддержке проекта ГК "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, литиевая КПС изготовлена в АО «Красная Звезда» договор № 17706413348200001180/2020/РД/211/12167, анализ поверхности-при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

1. I. E. Lyublinskiet al. , Nuclear Fusion 57 (6) 066006 (2017)
- 2.V.P. Budaev et al., Journal of Physics: Conference Series 891 012304 (2017)
3. Будаев В.П. и др. Ядерная Физика и Инжиниринг, том 9, № 3, 130 (2018)

С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, Е.В. КРЫЛОВА<sup>1</sup>,  
М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>,  
В.Ф. ЧИННОВ<sup>1</sup>, А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. ЧАН КУАНГ<sup>1</sup>,  
К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>, А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ В ПЛМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ**

Механизмы экстремально больших переносов тепла и потоков частиц из плазмы на поверхность включают эктонный механизм, который вызван явлением взрывной электронной эмиссии при последовательном зажигании униполярных дуг (см. [1,2]). В отличие от стандартной термоэмиссии, такой механизм может значительно увеличить эмиссию электронов из дуговых катодных пятен на поверхности, что, в результате, увеличивает токи и вызывает перегрев и плавление поверхности – возникает положительная обратная связь, благоприятная для последовательного развития множественных дуговых процессов. Процесс имеет пороговый характер. Такие условия могут возникать при мощных нагрузках на материал при ЭЛМах и в зонах контакта сепаратрисы с диверторными пластинами в крупномасштабном токамаке, когда превышает пороговое значение локальной тепловой нагрузки на материал (температура поверхности значительно повышается). Подробные исследования этих процессов можно будет проводить лишь в крупномасштабном стационарном токамаке (WEST, ИТЭР и др.), что потребует значительных усилий. С меньшими затратами экспериментальные исследования таких процессов можно провести на плазменной установке ПЛМ– симуляторе диверторной плазмы [2] с использованием прогрева поверхности мощным импульсным лазерным облучением. В настоящей работе приведены описание конструкции мощного лазерного стенда для испытаний в ПЛМ и результаты исследования лазерного факела на поверхности вольфрама.

Конструкция мощного лазерного стенда, Рис.1, обеспечивает ввод импульсного лазерного излучения в вакуумную камеру усовершенствованной установки ПЛМ (Рис.2а) для испытания в ней опытных образцов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора. Используется импульсный лазер Nd:YAG LQ529A с длиной

волны 1064 нм, энергией импульса излучения 500 мДж, длительность импульса  $10 \div 12$  нс, частота повторения импульсов  $1 \div 10$  Гц, диаметр пучка 8 мм. Кварцевая линза с фокусным расстоянием 240 мм позволяет уменьшить диаметр пучка на поверхности вольфрамовой мишени до 3 мм. Ввод лазерного излучения в вакуумную камеру после отражения от зеркала осуществляется через боросиликатное стекло. Для измерения оптического спектра излучения плазменного факела вблизи поверхности вольфрамовой мишени использовался автоматизированный трехканальный оптоволоконный спектрометр AvaSpec-ULS2048×16–USB2-RM, снабженный оптоволоконным кабелем.

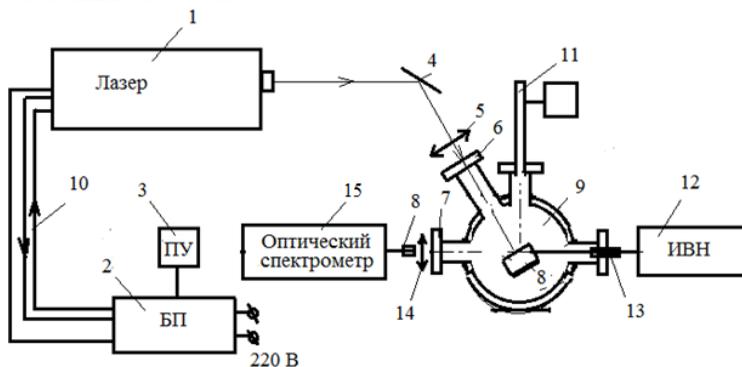
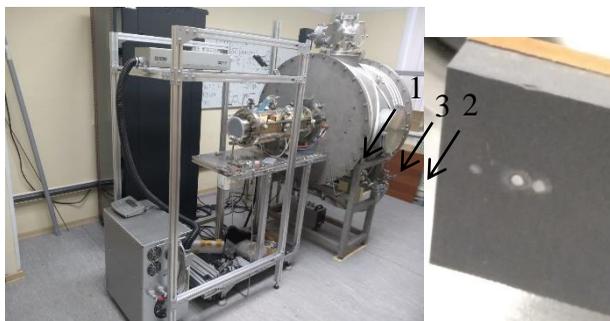


Рисунок 1 – Схема системы генерации дуг в усовершенствованной плазменной установке ПЛМ: 1 – импульсный лазер; 2 – блок питания лазера; 3 – пульт управления лазером; 4 – зеркало; 5 – кварцевая линза; 6, 7 – боросиликатные окна; 8 – оптоволоконный кабель; 9 – высоковакуумная охлаждаемая камера плазменной установки ПЛМ; 10 – замкнутый контур охлаждения лазера; 11 – квадрупольный масс-спектрометр; 12 – источник высокого напряжения; 13 – токоввод; 14 – кварцевая линза, 15 – спектрометр AvaSpec-ULS2048×16.

Вольфрамовый модуль теплозащитной облицовки (Рис. 2б) облучался 1, 10, 100 импульсами лазерной нагрузки диаметром 2,5-3 мм

В результате проведенных экспериментов были получены оптические спектры излучения приповерхностного плазменного факела, содержащего спектральные линии излучения возбужденных атомов вольфрама в диапазоне длин волн 250 – 1000 нм. На Рис.3 представлен участок спектра, содержащий линии возбужденных атомов вольфрама.



(a)

(б)

Рисунок 2 – (а) усовершенствованная плазменная установка ПЛМ с лазерным стендом, (б) поверхность вольфрамового модуля теплозащитной облицовки после облучения лазерными импульсами: 1- один импульс, 2- 10 импульсов, 3- 100 импульсов

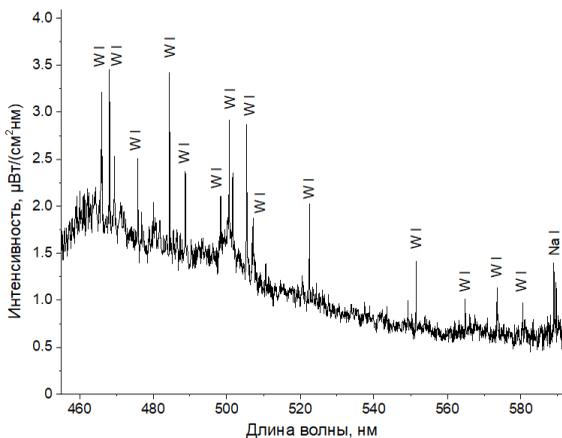
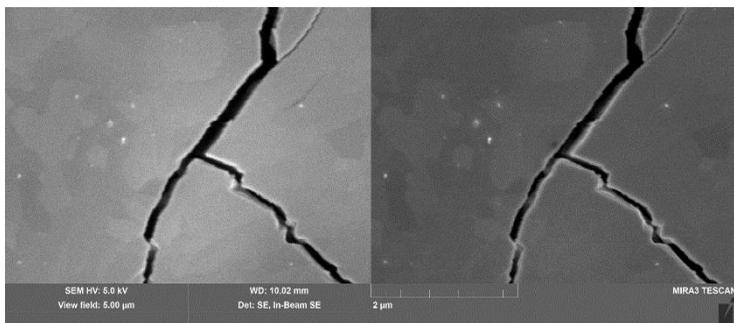


Рисунок 3 – Спектр излучения из лазерного факела при воздействии лазерных импульсов на поверхность вольфрамового модуля

После испытаний лазерными импульсами поверхность вольфрамового модуля исследовалась на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 TESCAN. На поверхности видна сеть трещин с раскрытием  $\sim 200$  нм (Рис.4). Размер областей, ограниченных трещинами, составляет 10-20 мкм, что меньше, чем размер зерен начальной структуры. Образование этих трещин

связано с уменьшением объема при кристаллизации из расплава. В результате анализа элементного состава поверхности для четырех участков из зоны обработки 100 импульсами лазерного излучения установлено, что в области максимальной температуры поверхности концентрация кислорода снижается. Это подтверждает вывод о газовыделении и испарении оксидов вольфрама при сильном нагреве поверхности под воздействием мощных потоков лазерного излучения.



*Рисунок 4 – СЭМ-микрофотография вольфрамовой поверхности в зоне максимальной нагрузки после воздействия 100 импульсов лазерного излучения.*

Плазменные, лазерные и электронно-лучевые испытания проводились при поддержке проекта ГК "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, анализ структуры поверхности- гранта РФФ 17-19-01469, радиационных эффектов – гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

1. Г.А. Месяц, УФН, 165:6 (1995), 601–626;
2. В.П.Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, 42, 1, 51.
3. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез. 2017. 40. 3. 23.
4. V.P. Budaev et al., Journal of Physics: Conference Series 891 012304 (2017)

## **ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРИ НАПЫЛЕНИИ В ПЛАЗМЕ АТОМОВ АЛЮМИНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, И ЗАХВАТ В НИХ ГАЗА**

В работе [1] проводилось измерение термодесорбции водорода и аргона из поверхностных слоёв, образованных осаждёнными на поверхности вольфрама атомами бериллия и алюминия, распылёнными ионами аргоновой плазмы с поверхности соответствующих мишеней. Анализ ТДС спектров водорода и аргона позволил заключить, что на поверхности вольфрама формировались алюминий-вольфрамовые и бериллий-вольфрамовые слои, которые претерпевали кристаллизацию с эмиссией аргона при нагреве. Образующиеся слои захватывали большие количества водорода, десорбирующегося одновременно с разложением соединений и эмиссией напылённых атомов при температурах, значительно больших температуры десорбции атомов водорода из соответствующих металлов.

В представленной работе проводилось напыление атомов алюминия в аргоновой плазме на поверхность молибдена, титана, никеля, кремния и нержавеющей стали при температуре 500 К. Выполнено термодесорбционное исследование особенностей формирования и модификации при повышении температуры слоёв, образуемых при напылении атомов алюминия на поверхность этих металлов, а также изучение особенностей захвата, удержания и десорбции водорода и аргона при повышении температуры.

Совместный анализ спектров термодесорбции водорода и аргона из слоёв, образованных на перечисленных выше материалах и на вольфраме, позволяет сделать следующие выводы.

Во всех исследованных случаях напыляемые атомы алюминия проникали в материал подложек и образовывали соответствующие двухкомпонентные слои. В слоях, создававшихся на всех подложках, удерживалась большая часть захваченного водорода.

При повышении температуры из поверхностных слоёв в течении короткого времени происходила интенсивная десорбция аргона, которая интерпретировалась как указание на кристаллизацию слоёв с образованием интерметаллидов с эмиссией аргона из образующихся кристаллитов. Во всех случаях, кроме кремния и никеля, выброс аргона отмечался при температурах, близких к температуре плавления алюминия (933,5 К). Высказано предположение о том, что в процессе образования поверхностных слоёв происходило образование nano размерных кристаллов

алюминия, возможно с примесью атомов подложки. Диффузия атомов алюминия, активирующаяся после плавления нано кристаллов, имела следствием образование кристаллитов соответствующих соединений. Сложная форма спектров темодесорбции водорода и аргона при кристаллизации алюминий-титанового слоя позволяет предположить образование в процессе кристаллизации, как кристаллов интерметаллида алюминий-титан, так и кристаллов гидрида титана. Интенсивные выбросы аргона и водорода, которые можно было интерпретировать как указание на фазовые превращения в слое на кремнии, происходили при температуре около 1250 К, а в никеле при температуре 850 К..

При дальнейшем прогреве сформировавшиеся соединения разлагались с испарением большей части алюминия и полным освобождением от водорода и аргона. В большинстве случаев это происходило в диапазоне температур 1400-1600 К. Вместе с тем, условия десорбции водорода и аргона из каждого из рассмотренных соединений имели свои особенности. Из соединений вольфрама, кремния и нержавеющей стали основная часть удерживаемого водорода и оставшийся аргон выделялись в районе температур 1400-1500 К при удалении их соединений алюминия. Из слоя на молибдене до кристаллизации удалялась большая часть захваченного водорода. Из слоя на никеле, десорбция примерно половины удерживаемого водорода предшествовала его кристаллизации при температуре 850 К. Десорбция большей части водорода из слоя на титане, также, как и оставшейся части водорода из слоя на никеле, происходила с равной интенсивностью в течении нагрева от температуры кристаллизации до разложения соединения.

Список литературы:

[1] – С.С. Довганюк, А.С. Каплевский, Н.Н. Касимова, Л.Б. Беграмбеков. Сборник тезисов 13-ой Международной Школы молодых ученых и специалистов имени А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами», 1-5 июля 2019 г., СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров.

Г.К. ЖАНБОЛАТОВА, В.В. БАКЛАНОВ, Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ,  
А.Ж. МИНИЯЗОВ, И.А. СОКОЛОВ  
Филиал «Институт атомной энергии» РГП Национальный ядерный центр  
Республики Казахстан, Курчатов,

## КАРБИДИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ

Образование соединений вольфрама и углерода, а также взаимодействие их с плазмой изначально изучалось, поскольку предполагалось использовать графит и вольфрам в качестве кандидатных материалов для дивертора термоядерного реактора [1-3]. Поскольку, на сегодняшний день существуют исследовательские термоядерные реакторы, в которых используются оба элемента, вольфрам и углерод, процесс карбидизирования поверхности вольфрама все еще имеет большое значение.

В данной работе рассматривается метод карбидизации поверхности вольфрама с применением пучково-плазменного разряда (ППР), который был осуществлен на плазменно-пучковой установке (ППУ) [4, 5]. ППУ предназначен для тестирования методик измерения параметров ППР при исследовании взаимодействия плазмы Казахстанского материаловедческого токамака (КТМ) [6] с кандидатными материалами, для проведения испытаний диагностического оборудования и материалов КТМ, а также для развития существующих и разработки новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы, изучения свойств и поведения материалов после взаимодействия с плазмой.

Основными узлами ППУ являются: электронная пушка, газоразрядная камера ППР, электромагнитная система для создания продольного магнитного поля, вакуумная камера взаимодействия ППР с материалом и диагностическая система плазмы. Общая схема установки приведена на рисунке 1.

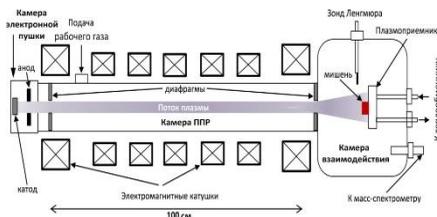


Рис. 1. Принципиальная схема ППУ

Для проведения исследований были подготовлены образцы из вольфрама марки ВЧ. Из вольфрамового прутка  $\varnothing 10$  мм были вырезаны идентичные заготовки в форме дисков толщиной  $2 \pm 0,1$  мм, со средней массой  $\sim 2,5 \pm 0,1$  г. Торцевая сторона (одна) всех заготовок подвергалась механической шлифовке и полировке на полуавтоматической шлифовально-полировальной станции Fogstrip до степени шероховатости  $R_a = 0,012$  мкм.

Рекристаллизационный отжиг образцов вольфрама осуществляли на ППУ в режиме электронного пучка в соответствии [5]. Температура образцов при отжиге составляла  $1350 \pm 20^\circ\text{C}$ . Образцы отжигались в течение 3600 с. После проведения отжига в рабочую камеру ППУ подавался плазмообразующий газ – метан ( $\text{CH}_4$ ) – для получения на подготовленной поверхности образцов вольфрама карбидизированного слоя по ранее разработанному способу [7]. Эксперименты по формированию слоев в виде  $\text{W}_2\text{C}$  и  $\text{WC}$  осуществлялись при различной длительности экспозиции, выбор которых основан на данных, приведенных в работах [8, 9]. При проведении экспериментов температура поверхности образца составляла  $1500 \pm 10^\circ\text{C}$ , давление в камере взаимодействия -  $1 \cdot 10^{-3}$  Торр.

Рентгенофазовый анализ показал, что основой фазового состава после облучения длительностью 600 секунд является  $\text{W}_2\text{C}$  с процентным содержанием более 90 масс. %. Увеличение времени облучения приводит к увеличению процентного содержания кристаллической фазы  $\text{WC}$  и достигает более 90 масс. % при облучении с длительностью 3600 секунд. Согласно данным литературного анализа, образование монокарбида  $\text{WC}$  происходит на поверхности вольфрама, из которого внутрь частицы диффундирует углерод и образует нижележащий слой полукарбида вольфрама  $\text{W}_2\text{C}$ . С увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения диффузия  $\text{C}$  в  $\text{W}$  ускоряется, содержание  $\text{W}_2\text{C}$  уменьшается, и  $\text{WC}$  становится доминирующим карбидным соединением.

Данная работа выполнена в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № AP08955992 «Исследование формирования карбидизированного слоя на поверхности вольфрама при плазменном облучении».

#### Список использованной литературы

- [1] H. Bolt, V. Barabash, G. Federici, J. Linke, A. Loarte, J. Roth, K. Sato. Plasma facing and high heat flux materials-needs for ITER and beyond // J. Nucl. Mater. – 2002. – V.307. – P.43-52.
- [2] Youchison, D., Gehrig, M., Lumsdaine, A., Klett, J., Greuner, H., & Böswirth, B. High heat-flux response of high-conductivity graphitic foam monoblocks //

- Fusion Engineering and Design. – 2019. – V.146. – P.417-420.  
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.081>
- [3] Humphry-Baker, S. A., Smith, G. D. W., & Pintsuk, G. Thermal shock of tungsten carbide in plasma-facing conditions // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 524. – P.239-246. <https://doi:10.1016/j.jnucmat.2019.06.041>
- [4] Патент РК на полезную модель № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленбергенов Т.Р. и др. – опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5.
- [5] V. Kurnaev, I. Vizgalov, K. Gutorov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, A. Kolodeshnikov, V. Ignashev, V. Zuev, I. Bogomolova, N. Klimov. Investigation of plasma–surface interaction at plasma beam facilities. - Journal of Nuclear Materials, 2015, vol.463, p.228-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076>
- [6] I. L. Tazhibayeva, et al., “КТМ Experimental Complex Project Status”, Fusion Science and Technology, vol.47, April 2005, p.746 – 750.
- [7] Соколов И.А., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленбергенов Т.Р. Изучение процессов образования карбидов на поверхности дивертора термоядерного реактора. – Вестник КазНАЕН.– 2019.– Вып. 1.– С. 44-49.
- [8] А.С. Курлов, А.И. Гусев. Карбиды вольфрама: структура, свойства и применение в твердых сплавах. – Springer, 2013.
- [9] Г.В. Самсонов. Физическое материаловедение карбидов. – Наукова думка, 1974.– С. 79-397.– 454 с.

И.А. СОКОЛОВ<sup>1</sup>, М.К. СКАКОВ<sup>2</sup>, А.Ж. МИНИЯЗОВ<sup>1</sup>,  
Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>2</sup>РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С БЕРИЛЛИЕМ

Одним из самых важных технических решений в программе ИТЭР являются бериллиевые модули, которые полностью покрывают внутренние стенки вакуумной камеры, защищают несущую стальную конструкцию и сверхпроводящие электромагнитные катушки тороидального поля от тепловых нагрузок и воздействия высокоэнергетических нейтронов, образующихся в результате реакций термоядерного синтеза.

В зависимости от расположения внутри вакуумного сосуда бериллиевые панели подвергаются различным тепловым нагрузкам, которые приводят к усталости и ухудшению соединения между бериллием и охлаждаемым модулем, а также к плавлению поверхности и разрыву охлаждающих каналов. Существует два значения тепловой нагрузки для FWP в зависимости от расположения на плоскости сечения камеры [1]: «нормальный» тепловой поток с нагрузкой  $2 \text{ MW/m}^2$  и «повышенный» тепловой поток с нагрузкой  $4,7 \text{ MW/m}^2$  (Рис. 1).

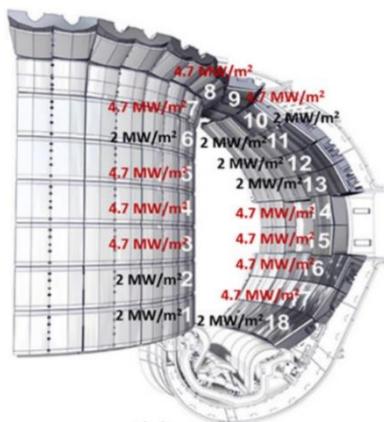


Рисунок 1 – Полоидальное поперечное сечение токамака ИТЭР с расчетными пределами теплового потока

Целью работы является экспериментальная оценка рабочего ресурса покрытия из бериллия после облучения электронным пучком, водородной и гелиевой плазмой, как облицовочного материала первой стенки реактора ИТЭР в условиях эксплуатации термоядерного реактора.

В работе представлены результаты исследований бериллия марки ТГП-56, которые проводились на плазменно-пучковой установке [2] (Рис. 2), а также приведены предварительные тепловые расчеты для предстоящих исследований, которые основаны на литературных источниках и проектных характеристиках, при которых эксплуатируется первая стенка ИТЭР.

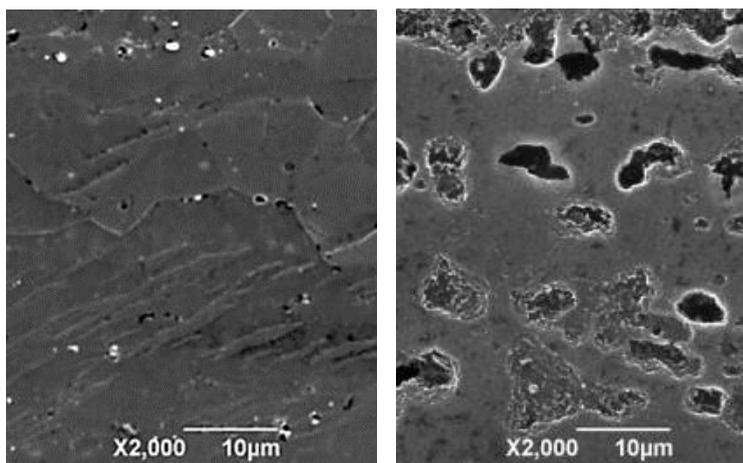


Рисунок 2 – Результаты микроструктурных исследований полученных методом сканирующей электронной микроскопии

Полученные результаты позволяют подробнее изучить изменение свойств бериллия в процессе взаимодействия плазмы с поверхностью первой стенки термоядерного реактора. Для реализации данной задачи использованы различные методы материаловедческих исследований. В предварительных экспериментах обнаружено, что в микроструктуре бериллия после облучения плазмой возрастает диаметр пор и их объемная плотность в зависимости от параметров плазмы.

Работа выполнена в рамках реализации проекта грантового финансирования «Комитета науки МОН РК» АР08856026 «Экспериментальное исследование влияния критических тепловых нагрузок

и плазменно-пучковых воздействий на облицовочный материал первой стенки ИТЭР»

**Список литературы:**

1. Raffray A.R., Calcagno B., Chappuis P., Zhang Fu, Furmanek A., Jiming Chen [et al.] The ITER blanket system design challenge // Nuclear Fusion.– 2014.– Vol. 54, No. 3.

2. Sokolov I.A., Skakov M.K., Zuev V.A., Ganovichev D.A., Tulenbergenov T.R., Miniyazov A.Z. Study of the Interaction of Plasma with Beryllium That Is a Candidate Material for the First Wall of a Fusion Reactor // Technical Physics.– 2018.– Vol. 63, No. 4.– P. 506-510.

Н.С. СЕРГЕЕВ<sup>1,2</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,3</sup>, Ф.С. ПОДОЛЯКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>3</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

## **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА**

Интенсивное плазменное воздействие на поверхность тугоплавких металлов, таких как вольфрам, позволяет создавать развитые высокопористые структуры на поверхности. Предлагаются различные способы применения подобных структур, в частности, в качестве облицовочных материалов для нужд термоядерной энергетики [1].

Как правило исследование условий формирования подобных структур на поверхности металлов под действием плазмы проводится в линейных плазменных симуляторах типа PIECES-B, PILOT-PSI [2] или ВЧ генераторах плазмы [3]. Указанные источники плазмы имеют ряд недостатков, таких как низкая энергоэффективность (в случае дуговых источников в линейных симуляторах) или относительно высокое рабочее давление (в случае ВЧ). Использование пучково-плазменного разряда (ППР) с ионизацией рабочего газа с помощью мощного электронного пучка [4] и развитием двухпотоковой неустойчивости, значительно увеличивает энергоэффективность ионизации рабочего газа. Это позволяет изучать процессы происходящие при взаимодействии плазмы с поверхностью в широком диапазоне параметров плазмы. Также, наличие электронной пушки дает возможность имитировать мощные тепловые нагрузки на поверхность. Однако наличие высокоэнергетичных электронов в плазме ППР приводит к ограничениям по применимости данного типа разряда.

В работе проводилось исследование режимов ионно-плазменной обработки поверхности. Исследуются условия формирования развитой поверхности вольфрама под действием гелиевой плазмы ППР. На рисунке 1 представлена фотография и пример изображения поперечного сечения облученной вольфрамовой фольги (50 мкм) полученного с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

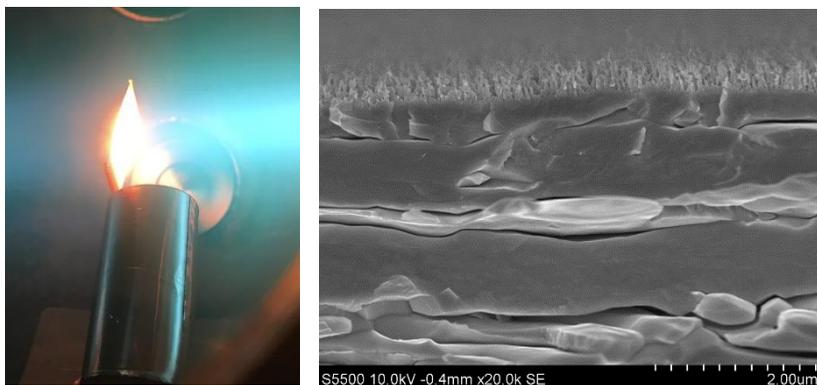


Рисунок 1. Фотография образца из W в процессе экспонирования в плазме ППР (слева), СЭМ-изображение модифицированной поверхности (справа).

Определены параметры для достижения требуемых условий возникновения исследуемого типа модификации поверхности [5-6]. Необходимые температурные условия достигались изменением положения образца относительно области максимальной плотности плазмы ППР. Основные параметры плазмы контролировались с помощью подвижного одиночного зонда Ленгмюра. Плотность ионного потока на поверхность образца оценивалась по показаниям ионного тока насыщения на зонд в соответствующем ему положении образца.

Отработаны режимы ППР, обеспечивающие ионный поток гелия до  $10^{21} \text{ м}^{-2}$  при вкладываемой мощности разряда – 300 Вт. Показано значительное влияние наличия высокоэнергетичной электронной компоненты на характер поверхностной модификации.

- [1] Pablo Díaz-Rodríguez et al. Highly porous tungsten for plasma-facing applications in nuclear fusion power plants: a computational analysis of hollow nanoparticles // 2020 Nucl. Fusion 60 096017
- [2] L. Buzi et al. Response of tungsten surfaces to helium and hydrogen plasma exposure under ITER relevant steady state and repetitive transient conditions // 2017 Nucl. Fusion 57 126009
- [3] Kharkov M.M et al. Effects of Ar ion irradiation in an ICP discharge on the titanium surface topology // Applied Surface Science, 2020, 527, 146902
- [4] Isaev N.V. et al. A plasmachemical reactor based on a beam-plasma discharge // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Т. 57. № 1. С. 82
- [5] M. Miyamoto et al. In situ transmission electron microscope observation of the

formation of fuzzy structures on tungsten // *Physica Scripta*. 2014. T159. – 014028.

[6] K.B. Woller et al. Dynamic measurement of the helium concentration of evolving tungsten nanostructures using Elastic Recoil Detection during plasma exposure // *Journal of Nuclear Materials*. 2015. Vol. 463. pp. 289-293.

[7] M. Miyamoto et al. Systematic investigation of the formation behavior of helium bubbles in tungsten // *Journal of Nuclear Materials*. 2015. Vol. 463. - pp. 333-336.

А.С. УМЕРЕНКОВА, З.Р. АРУТЮНЯН, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ,  
А.А. ПИСАРЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## ЗАХВАТ ТЕПЛОВЫХ АТОМОВ И МОЛЕКУЛЯРНОГО ДЕЙТЕРИЯ В ТИТАН

В работе проводится сравнение эффективности захвата тепловых атомов и молекулярного дейтерия в титан. Данное исследование представляет интерес как с фундаментальной точки зрения, так и в качестве обоснования конструкции элементов диагностических систем, позволяющих разделять потоки атомарного и молекулярного водорода.

Исследование проводилось на экспериментальной установке «Медион», источником нейтралов дейтерия служил атомизатор НАВС. Основным элементом атомизатора является длинный вольфрамовый капилляр, нагреваемый вольфрамовой нитью до температуры 2000 С°, на вход которого подается газообразный дейтерий. При этой температуре 100% молекул, прошедших через капилляр, диссоциируют на атомы. Прохождение через капилляр обеспечивает также высокую направленность потока атомов [1]. На пути к образцу устанавливались две диафрагмы для предотвращения облучения потоком атомов окружающих конструктивных элементов (рис.1). Используя образец с углеводородной пленкой (а:С-Н) можно было определить область облучения на образце по изменению цвета поверхности.

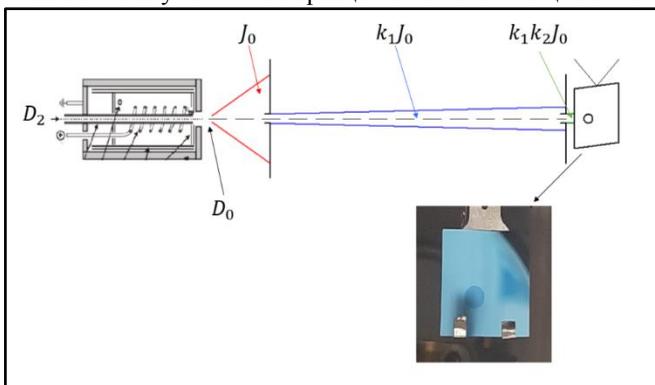


Рис. 1. Схема облучения образца пучком дейтерия.

Использовались образцы размером  $10 \times 15 \text{ мм}^2$ , отрезанные от титанового листа марки ВТ 1-0 толщиной 0,5 мм. Было проведено две серии экспериментов - выдержка в газе и облучение атомами дейтерия при различной температуре. Время экспозиции в обоих случаях составляло 30

минут, температура образца варьировалась от комнатной до 1200 К, давление дейтерия в камере составляло  $10^{-5}$  мбар. После экспозиции проводился ТДС-анализ образца с нагревом до температуры 1360 К in-situ без переноса образца по атмосфере. Скорость нагрева 0,2 К/с.

На рис. 2 приведены спектры термодесорбции дейтерия после атомарного облучения, полученные при различных температурах во время облучения дейтонами. Основное количество захваченного дейтерия выделяется в диапазоне от 800 К и выше. Однако, небольшое количество дейтерия выходит при меньшей температуре 300-800 К. Можно видеть, что с увеличением температуры экспозиции увеличивается выход дейтерия в ходе ТДС (то есть увеличивается количество захваченного в мишень дейтерия). Также происходит постепенное смещение основного пика газовой выделению в область более низких температур. При экспозиции в газе, в целом, наблюдается схожая тенденция, но количество захваченного дейтерия при низких температурах экспозиции намного меньше.

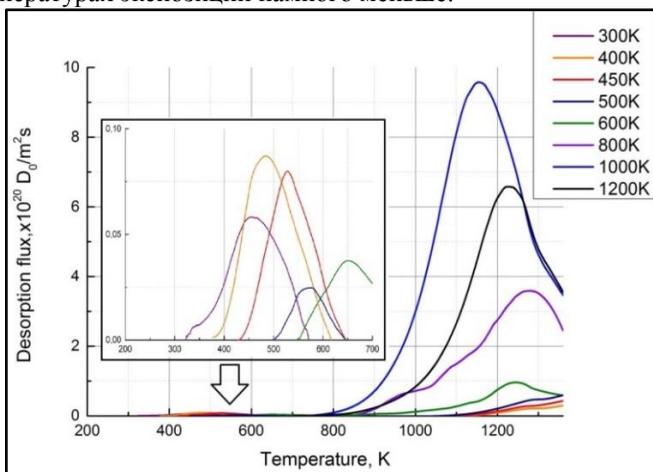


Рис. 2. ТДС спектры выхода дейтерия из титана после облучения атомарным потоком при разной температуре мишени

На рис.3 приведена зависимость интегрального вышедшего количества дейтерия от температуры титана во время насыщения. Здесь не учитывается дейтерий, который мог оставаться в образце при температурах свыше 1350 К. В обоих случаях количество захваченного дейтерия возрастает при увеличении температуры до 1000 К, после чего несколько уменьшается. Атомы дейтерия, обладая надтепловой энергией более легко проникают через поверхность и термализуются в металле. Для абсорбции

молекулярного газа в водород-активных металлах (к которым принадлежит и титан) требуется преодоление активационного барьера для диссоциации молекулы на атомы вблизи поверхности и последующего перехода через поверхность в металл. Поэтому количество дейтерия, абсорбированного из газа, крайне мало при низких температурах, и увеличивается почти экспоненциально с температурой в диапазоне до примерно 800 К. Увеличение количества захваченного дейтерия при температурах ниже 600-800 К связано также с увеличением коэффициента диффузии дейтерия и, соответственно, с большей длиной его проникновения в металл в процессе накопления. Это является основной причиной роста накопления при атомарном облучении и дает также некий вклад в экспериментах с газом. Как видно, из термодесорбционных спектров, существенный выход дейтерия из металла в данных экспериментах становится возможным, начиная примерно с 1000-1200 К. Причем с увеличением температуры облучения выход в ТДС после облучения облегчается. Это приводит к тому, что с увеличением температуры облучения накопление замедляется и после 1000 К начинает уменьшаться, поскольку увеличение температуры эффективно активирует десорбцию из металла в вакуум.

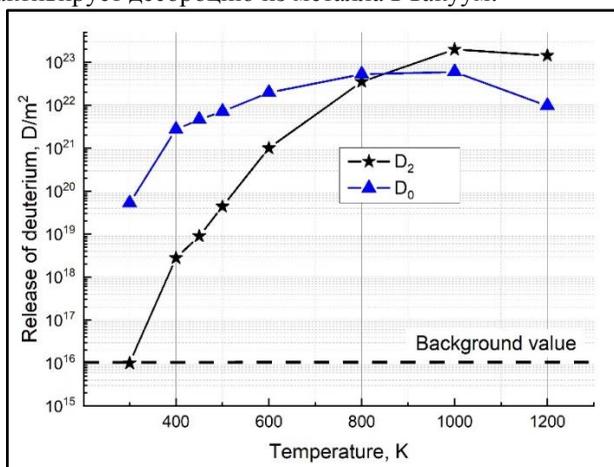


Рис. 3. Зависимость захвата атомарного и молекулярного от температуры образца

### Список литературы

- [1] Tschersich K.G. Design and characterization of a thermal hydrogen atom source. / K.G. Tschersich, J.P. Fleischhauer and H.Schuler // J.Appl.Phys. – 2008. – 104. – 034908.

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

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ИЗ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА ИОНАМИ ГЕЛИЯ И АРГОНА**

Формированию на поверхности материалов микро- и наноразмерных структур при ионном облучении уделяется значительное внимание как в фундаментальных исследованиях закономерностей и механизмов взаимодействия ионов с поверхностью, так и в прикладных задачах создания поверхностей с заданным рельефом [1-2]. Ионная бомбардировка углеродных материалов с высокими флуенсами облучения ( $\sim 10^{19}$  см<sup>-2</sup>) приводит к развитию на их поверхности различных типов топографии. Например, для широкого сортамента графитоподобных материалов, имеющих существенные различия в кристаллической структуре и свойствах, воздействие на поверхность интенсивными ионными пучками при температурах выше температуры динамического отжига радиационных нарушений  $T_a$  может приводить к микро- и наноразмерным стеночным, столбчатым и коническим структурам в зависимости от параметров облучения [3]. С другой стороны, в отличие от других графитоподобных материалов, для углеродных волокон из полиакрилонитрила (ПАН) наблюдается особый тип периодических поверхностных структур расположенных перпендикулярно оси волокна - гофров [4]. Анализ закономерностей формирования топографии поверхности в работе [4] показал, что механизмы нестабильности, связанные с физическим распылением, недостаточны для объяснения явления гофрирования. Причиной гофрирования поверхности углеродных волокон из ПАН может служить пластическая деформация графита двойникованием при релаксации механических напряжений, возникающих в модифицированном слое из-за присущих графиту радиационных размерных изменений при облучении [5]. В работе [6] показано, что для волокна ВМН-4 при увеличении флуенса облучения ионами аргона с энергией 30 кэВ от  $\sim 10^{17}$  до  $\sim 10^{18}$  см<sup>-2</sup> при температуре  $\sim 200^\circ\text{C}$  происходит трансформация структуры от параллельной оси волокна наноразмерной гребневидной структуры, до перпендикулярных оси волокна гофров. Учитывая, что при облучении тяжелыми ионами аргона

влияние флуенса облучения может оказывать существенное воздействие на дефектообразование и нестабильность границы поверхности, отдельный интерес при формировании топографии поверхности может представлять рассмотрение случаев облучения легкими ионами, в частности, гелия, для которых распыление поверхности значительно менее выражено.

В работе проводилось облучение углеродного волокна «Кулон» ионами  $\text{Ar}^+$  и  $\text{He}^+$  с энергией 30 кэВ при температуре  $T > 200^\circ\text{C}$ , на масс-монокроматоре НИИЯФ МГУ [7] по методике аналогичной [5]. Плотность ионного тока достигала  $0.3 \text{ mA/cm}^2$  при поперечном сечении пучка  $0.3 \text{ cm}^2$ . Для оценки влияния энергии на топографию поверхности при облучении ионами гелия углеродное волокно «Кулон» было облучено на плазменном ускорителе с анодным слоем со средней энергией ионов не более 3 кэВ. Напряжение разряда в источнике ионов составляло 3.5-4.5 кВ, разрядный ток - 0.2 А при давлении при напуске гелия  $2 \cdot 10^{-1}$  Па. Исследования морфологии образцов до и после облучения проводили с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Облучение углеродного волокна «Кулон» ионами аргона и гелия также приводит к двум типам морфологии поверхности (Рис. 1). При облучении ионами аргона с энергией 30 кэВ при уменьшении флуенса облучения, как и при облучении углеродного волокна ВМН-4 в работе [6], наблюдали переход к параллельной оси волокна гребневидной морфологии (Рисунок 1, слева).

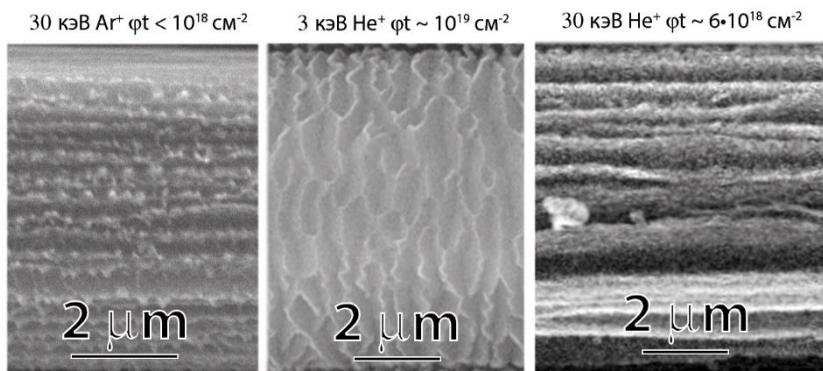


Рисунок 1. Морфология углеродного волокна «Кулон» после облучения ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 30 кэВ при температуре  $\sim 200^\circ\text{C}$  и  $\text{He}^+$  при температуре 200 и  $400^\circ\text{C}$  для энергий ионов 3 и 30 кэВ, соответственно

Облучение углеродного волокна «Кулон» ионами гелия с энергией 30 кэВ не приводит к гофрированию и сохраняет параллельную оси волокна

структуру (Рисунок 1 справа). Образование гофрированной структуры при облучении ионами гелия было найдено при уменьшении энергии ионов (Рисунок 1 по центру), тогда как на периферии падения пучка, где плотность тока существенно падает, также как для облучения ионами аргона с энергией 30 кэВ на периферии [6], наблюдались параллельные оси волокна гребневидные структуры.

Найденные закономерности развития морфологии поверхности на углеродных волокнах, а именно образование как субмикронной гофрированной структуры, так и наноразмерной гребневидной структуры вдоль волокна позволяют подтвердить определяющую роль происходящих на поверхности волокна процессов ионно-стимулированной рекристаллизации с образованием и ростом двойников кристаллов в модифицированном слое. При этом тип ионно-индуцированной морфологии углеродных волокон из ПАН зависит от глубины образования двойников. При образовании двойников вблизи поверхности происходит гофрирование волокон. Увеличение глубины образования двойников, например, при уменьшении массы иона и увеличении его энергии (ср. [8]), приводит к переходу к наноразмерной продольной гребневидной структуре.

### **Список литературы**

1. Carter G. // J.Phys.D: Appl. Phys. 2001. V.34. pp. R1-R22.
2. Chan W.L., Chason E. // J. Appl. Phys. 2007. V.101. P.12301.
3. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С. // Поверхность. Рентг., синхротр. и нейтр. исследования. 2008. № 1. С. 58 – 74.
4. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., et. al.. Horizons in World Physics. 2013. V. 280 P. 171-190.
5. Аникин В.А., Борисов А.М., Макунин А.В., и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9, № 2. С. 122–129.
6. Andrianova N.N., Borisov A.M., Makunin A.V., et.al. // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. V. 1396. Art.no 012003
7. Mashkova E.C., Molchanov V.A., Medium-Energy Ion Reflection from Solids. Amsterdam: North-Holland, 1985. 444 p.
8. Bacon D.J., Rao A.S. // J. Nucl. Mater. 1980. V.91. P. 178–188.

А.А. РЕЗВАН<sup>1</sup>, В.С. КЛИМИН<sup>1,2</sup>, Т.С. КЛИМИНА<sup>1</sup>, Р.В. ТОМИНОВ<sup>1,2</sup>,  
Ю.В. МОРОЗОВА<sup>1</sup>, Т.А. ЗУБОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования Южный федеральный университет, Таганрог

<sup>2</sup>Научный и образовательный центр «Нанотехнологии» Южный федеральный  
университет, Таганрог

## **ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФЕНОПОДОБНОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ**

Основной задачей нанотехнологий является формирование трехмерных образований, структур и элементов на поверхности обрабатываемых материалов. Ученые выполняют поиск новых методик и технологий позволяющие модернизировать процесс получения углеродных наноструктур [1-5]. Данный процесс должен позволить повысить качество формируемых наноструктур, снизить энергозатратность, повысить временные показатели, тем самым позволив интегрировать исследуемую технологию в массовое производство устройств микро- и нанотехнологий. Одним из перспективных направлений получения углеродных наноразмерных материалов на поверхности образцов является модификация поверхности карбида кремния (SiC) при помощи плазменных технологий [6-9]. Карбид кремния обладает широким спектром возможного приборного применения в различных областях, например, высокопрочные композитные материалы, режущие и абразивные материалы и т.д., но наибольший интерес представляет собой монокристаллический карбид кремния 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, нашедший широкое применение в электронной промышленности. Благодаря своим физическим и электрическим свойствам карбид кремния является перспективным материалом для создания приборов силовой электроники. Однако, для использования подложек из карбида кремния необходимо соответствовать особым требованиям к применяемым технологическим процессам и оборудованию. На текущий момент наиболее перспективной технологией травления карбида кремния с целью формирования рельефа на его поверхности является плазмохимическое травление.

В основе проведенных исследований лежат подложки SiC, поверхность которых была подвержена стандартными процессами химической очистки. Первоначально, на поверхности подложек, при помощи наноразмерного профилирования на основе фокусированных ионных пучков, был сформирован каркас будущей наноразмерной структуры полевого эмиттера

на основе SiC. Для этого образцы помещались в вакуумную камеру модуля ФИП Nova NanoLab 600 и ориентировались таким образом, чтобы поток ускоренных ионов попадал на подложку в направлении нормали. Рабочий вакуум при проведении воздействия пучков поддерживался на уровне  $1\div 2 \times 10^{-4}$  Па.

Следующим шагом было формирование углеродного наноразмерного слоя на поверхности массива для снижения показателей работы выхода электронов и начала эмиссии электронов. Данный процесс выполнялся на основе методики атомного слоевого травления во фторидной плазме. В качестве фторсодержащего газа использовался SF<sub>6</sub>, благодаря применению которого была получена возможность травления приповерхностного слоя SiC. При этом их кристаллической решётки производилось удаление только кремния и образование на поверхности образцов тонкого углеродного слоя.

Топология формируемых элементов контролировалась при помощи метода растровой электронной микроскопии Nova NanoLab 600.

По окончании экспериментальной серии исследований был сформирован массив автоэмиссионных структур на поверхности подложки SiC. Были определены зависимости значения тока эмиссии от геометрических параметров формируемых структур: топологии острия и глубины его залегания. Также рассмотрена зависимость тока и плотности тока эмиссии от изменения подаваемого напряжения и формируемого электрического поля применяемого для исследования зонда.

Данная работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-29-11019 МК.

### **Список литературы**

- [1] Tok E S. et al. 1997 Surf. Sci. 374 397
- [2] Kley A. et al. 1997 Phys. Rev. Lett. 79 5278
- [3] Shiraishi K. and Ito T. 1998 Phys. Rev. B 57 6301
- [4] Klimin V.S. et al. 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1124 071019
- [5] Klimin V.S. et al. 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1124 022035
- [6] Naeemi A., Meindl J.D. 2008 IEEE Transactions on Electron Devices 55 10
- [7] Ahmed W., Jackson M.J. 2015 Emerging Nanotechnologies for Manufacturing (Oxford: Elsevier) 551
- [8] Grundmann M., Stier O. and Bimberg D. 1995 Phys. Rev. B 52 11969
- [9] Yamaguchi K., Yujobo K. and Kaizu T. 2000 Jpn. J. Appl. Phys. 39 L1245–L1248

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, Ю.В. МАРТЫНЕНКО<sup>1</sup>,  
М.Н. ЕГОРИХИНА<sup>3</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>,  
М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, М.В. БУДАЕВА<sup>4</sup>, Д.Я. АЛЕЙНИК<sup>3</sup>, Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>,  
Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>, А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>, С. БЕЛОУСОВ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> *НИЦ «Курчатовский институт», Москва,*

<sup>3</sup> *ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет»  
Минздрава России, Нижний Новгород*

<sup>4</sup> *Национальный исследовательский университет «МФТИ», Москва*

## **ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Плазменное облучение металлов (вольфрама, молибдена, тантала, железа, платины, титана и некоторых других) в современных плазменных установках при мощных плазменных нагрузках приводит к значительному изменению микро- и наноструктуры поверхности [1] и к росту высокопористой наноструктурированной поверхности. Такие материалы характеризуются новыми физическими и химическими свойствами. Металлические материалы широко используются для изготовления имплантатов, заменяющих твердые ткани человека или их функции, электрокардиостимуляторы и т. д. Материалы для биомедицинского применения должны соответствовать множеству требований, таких как биосовместимость, в том числе, отсутствие цитотоксичности, наличие поверхности, обеспечивающей адгезию клеток и позволяющей клеткам сохранять свою функциональную активность при взаимодействии с материалом и т.д. [2]. Развиваются плазменные технологии обработки имплантатов с шероховатой и пористой поверхностью, в том числе для изготовления электрокардиостимуляторов с улучшенными характеристиками, см. [3]. Высокопористые титановые материалы широко применяются в медицине и в ортопедии, могут быть использованы в качестве новых материалов для каркасов в тканевой инженерии и биомедицине.

Для развития плазменной технологии получения титана с высокопористой поверхностью в работе использованы подходы плазменной обработки металлов, развиваемые в НИУ «МЭИ» [4]. Четыре образца титана (Ti) диаметром 8 мм и толщиной 2 мм (Рис. 1а) с изначально гладкой поверхностью облучались гелиевой плазмой в установке ПЛМ [5]. Плазменная установка ПЛМ представляет собой мультикасповую линейную

ловушку со стационарным плазменным разрядом, обеспечивающую мощную плазменно-тепловую нагрузку на исследуемые материалы. В экспериментах параметры плазмы, измеренные с помощью диагностики электронов, были следующими: плотность плазмы до  $3 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , температура электронов до 4 эВ с долей горячих электронов с температурой до 50 эВ, ионный поток на образец до  $3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , ток разряда до 10 А, магнитное поле 0,01 Тесла на оси ловушки и до 0,1 Тесла в каспах. Образцы титана облучались гелиевой плазмой с длительностью разряда до 200 мин. Угол падения магнитного поля на образцы составлял  $90^\circ$ . Образцы не имели активного охлаждения, тепловая нагрузка плазмы на образцы составляла  $0,5 - 1 \text{ МВт} / \text{м}^2$ .

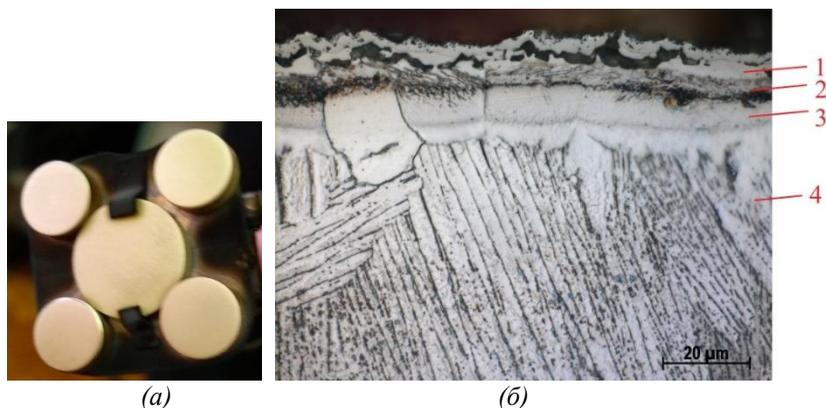
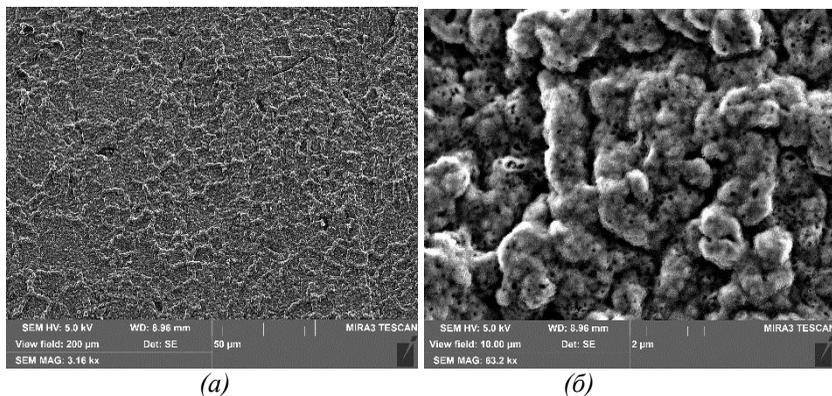


Рис. 1. (а) Образцы титана после плазменного облучения. (б) Металлографический срез образца титана после плазменной обработки в ПЛМ: 1 - высокопористый поверхностный слой, 2 - интерфейсный нерегулярный слой, 3 - рекристаллизованная структура, 4 - исходная кристаллическая структура

После плазменной обработки проведен анализ титановых образцов. Микрофотографии, полученные с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), рентгеноструктурного анализа показали, что морфология поверхности образцов значительно изменилась по сравнению с исходной структурой. На всех четырех образцах наблюдался рост микро- и наноструктурированной высокопористой поверхности. Проведено металлографическое исследование образца титана, облученного плазмой. Проведена полировка и химическое травление поверхности

металлографического среза для выявления микроструктуры и границ зерен. Микрофотография среза представлена на Рис. 1б. Толщина зоны термического влияния составляет 10-30 мкм. На поверхности наблюдается высокопористый слой толщиной 5-10 мкм (зона 1 на Рис. 1б). Для него характерно большое количество дефектов и пористый рельеф поверхности. Под границей раздела (зона 2 на Рис. 1б) находится слой термического воздействия (зона 3 на Рис. 1б), который представляет собой либо рекристаллизованные, либо расплавленные зерна титана, содержит дефекты в виде межзеренных трещин, простирающихся в основной металл с исходной крупнозернистой структурой (зона 4 на Рис.1б).

Анализ образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) подтвердил образование пористой стохастической наноструктурированной поверхности, структура поверхности для первого образца показана на Рис.2. Шероховатая поверхность формируется на макроуровне, Рис. 2а. Наблюдается формирование пористой стохастической наноструктурированной поверхности с размером пор и элементов структуры менее 500 нм, Рис. 2б. Такая же структура наблюдалась и на других образцах после плазменной обработки в ПЛМ.



*Рис. 1. СЭМ-микрофотография поверхности титана после обработки плазмой в ПЛМ*

Химический анализ элементного состава поверхности, таблица 1, выявил титан и азот (который присоединился на поверхность при контакте с атмосферой в период после извлечения из ПЛМ) на поверхности полученных образцов.

Таблица 1. Химический элементный состав поверхности титановых образцов после плазменного облучения анализируемая площадь поверхности ~ 0,04 мкм<sup>2</sup>, для различных областей на поверхности; нормированные массы, в атомных%

	N	Al	Si	Ti
область 1	27.02	0.29	1.14	71.55
область 2	27.09	0.28	1.82	70.81
область 3	26.94	0.30	0.79	71.97

Титановые образцы после плазменной обработки будут протестированы на биосовместимость для оценки эффективности высокопористых титановых материалов для изготовления имплантатов. Будет проведено тестирование на цитотоксичность, выраженность адгезии поверхностно зависимых клеток с оценкой жизнеспособности и пролиферативной активности.

Работа поддержана грантом РФФ 17-19-01469, анализ материала выполнен при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FSWF-2020-0023.

1. Budaev V. P. Physics Letters A 381 3706–13 (2017 )
3. Egorikhina M. N. et al. Bioactive Materials 4 334–345 (2019 )
3. Martynenko Yu. V., Budaev V. P. Journal of Physics: Conference Series 1383 012027 (2019)
4. Budaev V. P. Fusion Engineering and Design, 155, 111694, (2020)
5. Будаев В.П. и др. Ядерная Физика и Инжиниринг, том 9, № 3, 130 (2018)

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

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

<sup>2</sup>НИИЯУ МИФИ, Москва, РФ

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

## **ПОДГОТОВКА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ПРИЕМНОЙ ПЛАСТИНЫ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА Т-15МД**

Российская концепция на основе использования неподвижного или медленно протекающего лития, заключенного в капиллярно-пористую систему (КПС) выглядит как наиболее перспективное решение для защиты поверхности внутрикамерных элементов (ВЭ) токамака от воздействия плазмы. Эта концепция интегрирует все преимущества лития с возможностью равномерного распределения его слоя на поверхности ВЭ независимо от ее ориентации в пространстве при высоком сопротивлении разбрызгиванию в магнитном поле.

Работоспособность ВЭ с неподвижным литием в КПС в качестве материала, обращенного к плазме, успешно подтверждена на отечественных (Т-10, Т-11М) и зарубежных (FTU, TJ-II, KTM) термоядерных установках [1]. Для разработки и подтверждения работоспособности ВЭ стационарного действия на основе текущего лития в КПС требуется создание и испытание макетов в стендовых условиях и условиях реального токамака. В работе [2] представлено конструктивное решение макета приемного элемента литиевого дивертора токамака Т-15МД на основе КПС с внешней системой подачи и возобновления лития (рисунок 1). Головная часть созданного и подготовленного к экспериментам макета показана на рисунке 2.

Эксперименты с макетом приемной пластины проводятся на специальном стенде, включающем в себя вакуумную камеру, оборудованную окнами для визуального контроля макета и перчатками для его обслуживания при работе в инертной атмосфере. В состав стенда входят системы электропитания нагревателей, контроля температуры, автоматики и управления стенда, газо-вакуумная система. Макет приёмной пластины литиевого дивертора токамака Т-15МД установленный в вакуумную камеру стенда и соединённый с внешней системой подпитки показан на рисунке 3.

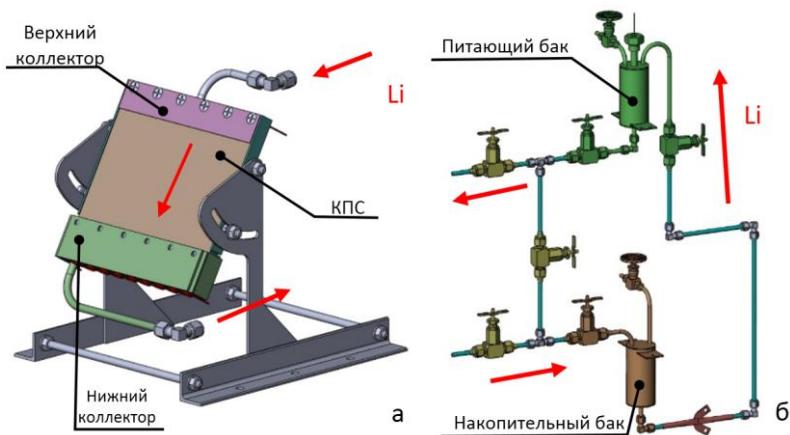


Рисунок 1 – Схема макета приемного элемента литиевого дивертора токамака Т-15МД

а – макет приёмного элемента; б – система подачи и смены лития

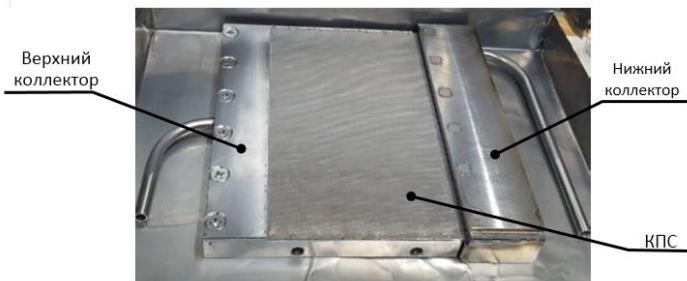


Рисунок 2 – Головная часть созданного макета литиевого дивертора токамака Т-15МД (не заправлена литием)

Основными задачами исследований являются:

- экспериментальная проверка в стендовых условиях работоспособности макета с внешней системой подачи и возобновления лития;
- экспериментальная отработка технологии подготовки макета приемной пластины литиевого дивертора токамака Т-15МД к работе;
- определение оптимальных параметров работы систем макета;
- исследование особенностей течения лития в объеме КПС или по её поверхности (равномерное течение по всей поверхности или формирование струй);

- отработка технологических вопросов очистки поверхности текущего лития от продуктов его взаимодействия с атмосферой остаточных газов.

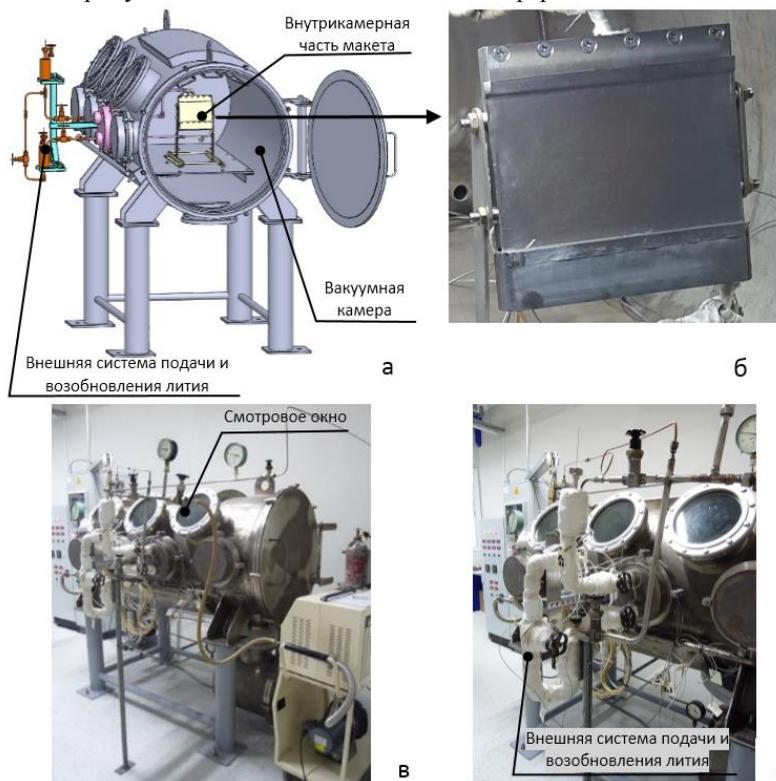


Рисунок 3 – Макет, установленный на испытательном стенде  
а – модель; б – внутрикамерная часть макета внутри вакуумной камеры;  
в – испытательный стенд в рабочем состоянии;  
г – внешняя система подачи и возобновления лития

Внешняя система макета может работать как в основном режиме создания потока лития через объем КПС и по ее поверхности, так и в режиме подпитки КПС из внешнего источника. В ходе основного режима работы литий из питающего бака внешней системы подается в верхний распределительный коллектор пластины макета. Расход подаваемого лития варьируется в интервале  $0,1 - 0,6 \text{ см}^3/\text{с}$  и обеспечивается за счет гидростатического давления лития и, дополнительно, давления инертного

газа (гелий). Литий из коллектора под действием силы тяжести просачивается с расчётной скоростью до 2 мм/с через пористый мат КПС (толщина 1 мм) на приемной поверхности к нижнему коллектору. Там он собирается и поступает в нижний накопительный бак, перекачивается в питающий бак, образуя замкнутую циркуляцию лития. Перекачка лития может осуществляться как за счет создания перепада давлений в баках, так и с помощью электромагнитного насоса. В режиме подпитки КПС литий периодически подаётся в один из коллекторов из соответствующего бака. Далее литий распределяется в КПС под действием капиллярных сил.

Скорость течения лития на приемной поверхности макета оценивается по скорости изменения уровня лития в баках измеряемой с помощью электроконтактных уровнемеров. Наблюдение за литиевой поверхностью через смотровое окно позволяет оценить скорости течения лития с помощью движущегося маркера, находящегося непосредственно на текущей литиевой поверхности, а также регистрировать характер течения и распределения лития.

Отработка технологических приёмов очистки рабочей поверхности от продуктов взаимодействия лития с остаточной атмосферой вакуумной камеры будет включать в себя кратковременную организацию потока лития по поверхности КПС с последующей его фильтрацией и возвратом в питающий бак.

Предварительные эксперименты с изготовленным макетом приёмной пластины литиевого дивертора токамака Т-15МД подтвердили работоспособность макета с внешней системой подачи и возобновления лития в стендовых условиях и полное соответствие характеристикам, заданным на этапе проектирования.

### **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. М.Ю Жарков, А.В. Вертков, И.Е. Люблинский и др. Прототипы литиевых квазистационарных внутрикамерных элементов токамака. – Материалы XXIII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, 23–24 января 2020 г.: Сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2020 г. – с. 44–47.

А.В. ВЕРТКОВ<sup>1</sup>, М.Ю. ЖАРКОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
И.Л. ТАЖИБАЕВА<sup>3</sup>, Ю.В. ПОНКРАТОВ<sup>3</sup>, Ю.Н. ГОРДИЕНКО<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, РФ

<sup>3</sup>Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан

## **ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА КТМ**

Отвод стационарных тепловых потоков удельной плотности  $10 - 20$  МВт/м<sup>2</sup>, которые ожидаются на приемных поверхностях внутрикамерных элементов (ВЭ) токамаков масштаба ИТЭР и ДЕМО, является критической проблемой. Кроме того, для перспективных жидкометаллических ВЭ с применением лития принципиально важным является поддержание температуры приемной поверхности на уровне не выше  $650 - 700^{\circ}\text{C}$ , что позволит ограничить поступление лития в плазму токамака на приемлемом уровне.

В инновационной концепции стационарного жидкометаллического литиевого ВЭ [1], решающей указанные задачи, тепло от приемной поверхности передается за счет теплопроводности через конструкцию ВЭ к теплоносителю системы охлаждения. В качестве теплоносителя предложено использовать мелкодисперсный водяной спрей в потоке газа [2]. Такой теплоноситель имеет ряд преимуществ по сравнению с однофазным потоком хладагента - высокая эффективность теплоотвода за счет теплоты испарения мелкодисперсной жидкой фазы, низкое давление, лучшая совместимость с жидким литием, меньшая склонность к возникновению кризиса теплоотдачи и т.д.

Для обоснования конструктивных решений рассматриваемого ВЭ и исследования процесса теплосъема был разработан экспериментальный макет модуля литиевого дивертора токамака КТМ [1]. Схема и внешний вид макета представлены на рисунках 1 и 2 соответственно. Приемная поверхность макета (медная пластина толщиной 12 мм) имеет термическое сопротивление эквивалентное приемной поверхности с литиевой КПС толщиной 1 мм, размещенной на стальной стенке толщиной 2 мм.

Экспериментальное исследование макета литиевого дивертора проводится в условиях специально разработанного стенда (рисунок 3), в состав которого входят: источник теплового потока плотностью до  $7$  МВт/м<sup>2</sup> и диаметром пятна нагрева 20 мм на основе газового электродугового плазматрона (1, 3); системы водяного охлаждения и подачи инертного газа плазматрона; система подачи и измерения параметров потока компонентов

газо-жидкостного теплоносителя (2, 6); система измерения и регистрации теплового состояния макета на основе персонального компьютера (4, 5).

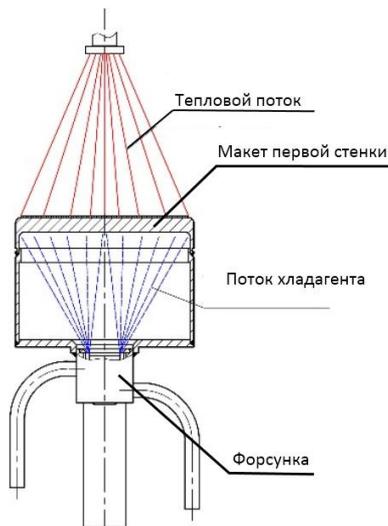


Рисунок 1 – Схема макета литиевого дивертора на основе КПС токамака КТМ.

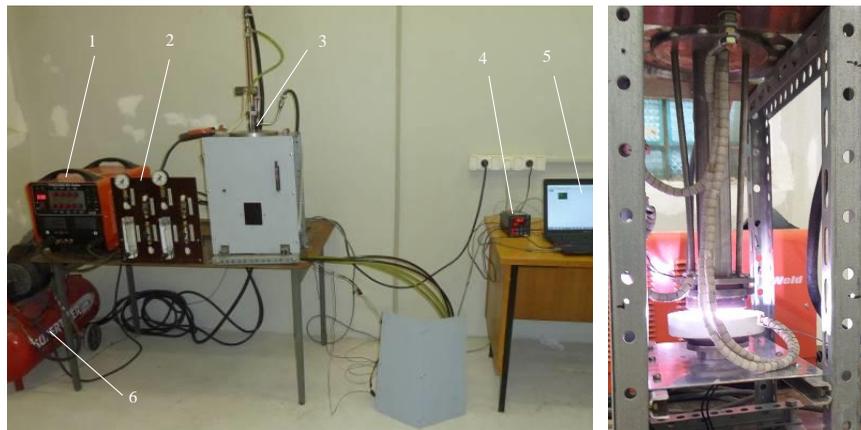


Рисунок 2 – Общий вид макета литиевого дивертора на основе КПС токамака КТМ

Задачей первого этапа исследований являлось изучение влияния параметров потока компонентов теплоносителя (величина расхода, величина и распределение по размерам капель диспергированной жидкости) на тепловое состояние макета при тепловом потоке до  $5 \text{ МВт/м}^2$ . Плотность теплового потока на поверхность макета в зависимости от параметров источника питания плазматрона определялась в калибровочных экспериментах с калориметром.

В первой серии экспериментов были определены оптимальные режимы работы системы подачи компонентов теплоносителя при плотностях теплового потока  $5$  и  $7 \text{ МВт/м}^2$ . При этом для каждой плотности теплового потока определялся минимум установившейся температуры приемной поверхности в зависимости параметров подачи компонентов. Полученные в эксперименте параметры теплоносителя, приведенные в таблице 1, хорошо

совпадают с расчетными величинами. В режиме с оптимальными параметрами размер каплей диспергированной жидкости не превышал 50 мкм.



а

б

Рисунок 3 – Испытательный стенд: а – общий вид, б – вид работающего плазматрона во время испытаний.

Таблица 1 – Оптимальные параметры теплоносителя

Компонент	Давление, атм.		Расход, л/час (*м <sup>3</sup> /час)	
	P=5 МВт/м <sup>2</sup>	P=7 МВт/м <sup>2</sup>	P=5 МВт/м <sup>2</sup>	P=7 МВт/м <sup>2</sup>
Вода	1,5	2,0	22	30
Воздух	3,2	3,3	7*	8*

Измерение установившегося распределения температуры в принимающей стенке макета позволило определить величину коэффициент теплоотдачи для оптимальных режимов подачи рассматриваемого теплоносителя, которая составила 10,4 кВт/(м<sup>2</sup>·К) и 11,6 кВт/(м<sup>2</sup>·К) для теплового потока 5 МВт/м<sup>2</sup> и 7 МВт/м<sup>2</sup> соответственно.

Как видно из полученных результатов, система охлаждения макета обеспечивает эффективный теплоотвод от поверхности нагрева. Полученные значения коэффициента теплоотдачи свидетельствуют о том, что при установившемся распределении температур теплоотвод в основном определяется теплопроводностью воды. Этот факт указывает на то, что данная система охлаждения имеет очень высокий потенциал по отводу тепла, поскольку переход к теплоотводу испарением будет происходить при

тепловых потоках гораздо выше  $7 \text{ МВт/м}^2$ . Рост коэффициента теплоотдачи при тепловой нагрузке  $7 \text{ МВт/м}^2$  указывает на рост доли тепла, отводимого испарением, по сравнению с теплоотводом при  $5 \text{ МВт/м}^2$ .

На последующем этапе исследований предполагается детально исследовать процесс теплоотвода при плотностях теплового потока равных и выше  $10 \text{ МВт/м}^2$ .

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58519X0007).

### **Список литературы:**

1. Люблинский И.Е., Вертков А.В., Жарков М.Ю и др. Стационарно работающие литиевые внутрикамерные элементы токамака. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2020. – Т. 43. – № 1. – С. 55-63.
2. Lyublinski I.E., Mirnov S.V., Komov A.T. et al. Innovative method of cool-ing and thermostabilization of tokamak elements with capillary-porous struc-tures. — J. of Physics: Conf. Series, 2017, vol. 891(1), p. 012152

А.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1,3</sup>, А.С. АРАКЧЕЕВ<sup>1,2,3</sup>, А.В. БУРДАКОВ<sup>1,3</sup>,  
Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ<sup>1,2,3</sup>, И.В. КАНДАУРОВ<sup>1</sup>, А.А. КАСАТОВ<sup>1,2,3</sup>,  
В.В. КУРКУЧЕКОВ<sup>1,2</sup>, Г.Г. ЛАЗАРЕВА<sup>2,3,4</sup>, А.Г. МАКСИМОВА<sup>1,2,4</sup>,  
В.А. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, А.А. РУКТУЕВ<sup>1,3</sup>, А.А. ШОШИН<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 вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

## IN-SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЛЬФРАМ НА УСТАНОВКЕ ВЕТА В ИЯФ СО РАН

Во время работы ИТЭР материалы, обращенные к плазме, должны выдерживать суровые условия эксплуатации: облучение высокоэнергичными нейтронами, интенсивные потоки плазмы и высокие тепловые нагрузки. Даже при частичном смягчении ЭЛМы типа 1 могут привести к быстрым тепловым ударам и последующей эрозии тонкого поверхностного слоя материала пластин дивертора. Для экспериментального моделирования подобных тепловых нагрузок на вольфрамовые пластины в ИЯФ СО РАН используется установка ВЕТА (Beam of Electrons for material Test Applications). Для создания импульсного нагрева с параметрами, соответствующими дивертору ИТЭР, используется многоапертурный ускоритель электронов диодного типа с дуговым плазменным катодом. Установка позволяет получать пучок электронов с энергией 50-100 кэВ, током 5-100 А и длительностью 100-1000 мкс. Создаваемая тепловая нагрузка на поверхность образцов может варьироваться в широких пределах, начиная от величины параметра потока тепла в  $6 \text{ МДж/м}^2\text{с}^{0.5}$  до  $300 \text{ МДж/м}^2\text{с}^{0.5}$  [1], что в шесть раз превышает порог плавления вольфрама. Пространственный профиль нагрева имеет куполообразную форму с шириной на полувысоте 10-20 мм в зависимости от величины ведущего магнитного поля, что позволяет получать область воздействия однородной нагрузкой с размером, превосходящим характерные размеры эрозии вольфрама. Одной из ключевых особенностей ВЕТА является применение

оптических диагностик для исследования эрозии образца непосредственно во время теплового удара и сразу после него: пирометрия с пространственным и временным разрешением [2], регистрация рассеяния лазерного излучения от облучаемой поверхности [3], быстрая съемка разлетающихся микрочастиц [4] и т.д. Также была разработана неконтактная невозмущающая *in-situ* диагностика для изучения создаваемых в материале напряжений для образцов толщиной до 4 мм, которая основана на измерении кривизны задней полированной поверхности [5]. Для верификации используемых диагностик применяются классические методы *post mortem* анализа материаловедения: сканирующая электронная микроскопия, оптическая профилометрия, поперечные микрошлифы, рентгеноструктурный анализ и т.д.



Рис. 1. Стадии деформации вольфрамового образца при импульсном нагреве. а) Образец до воздействия, б) состояние в максимуме температуры, в) остаточная деформация, г) появление сети трещин. Голубая стрелка показывает направление падения пучка электронов.

На установке ВЕТА проводились эксперименты по изучению повреждения вольфрамовых пластин под действием импульсной тепловой нагрузки с интенсивностью ниже порога плавления. Во время нагрева температура тонкого слоя материала повышается, что приводит к его тепловому расширению (Рис. 1(б)). При этом основной объем образца остается при начальной температуре, что приводит к возникновению сжимающих напряжений в поверхностном слое. Происходит деформация материала и при превышении температуры хрупко-вязкого перехода часть ее становится пластической, при этом увеличивается шероховатость поверхности, что регистрируется как рост интенсивности рассеянного на поверхности лазерного излучения (Рис. 2). В то же время создаваемые напряжения приводят к изгибу образца, таким образом, что нагреваемая сторона становится выпуклой, а задняя – вогнутой. После окончания нагрева происходит выравнивание температуры по всему объему образца, но пластические деформации поверхностного слоя и связанная с ними шероховатость не возвращаются к исходному уровню. В результате этого на поверхности возникают растягивающие напряжения, а образец изгибается в обратную сторону (Рис. 1(в)). В случае, если эти остаточные напряжения превышают порог прочности вольфрама, происходит растрескивание его

поверхности (Рис. 1(г)). При появлении сети трещин происходит снятие напряжений вдоль поверхности около трещин, но появляются напряжения перпендикулярные поверхности. Описанное явление приводит к поднятию краев трещин, которое также может быть зарегистрировано экспериментально, по резкому увеличению интенсивности рассеянного поверхностью излучения диагностического лазера.

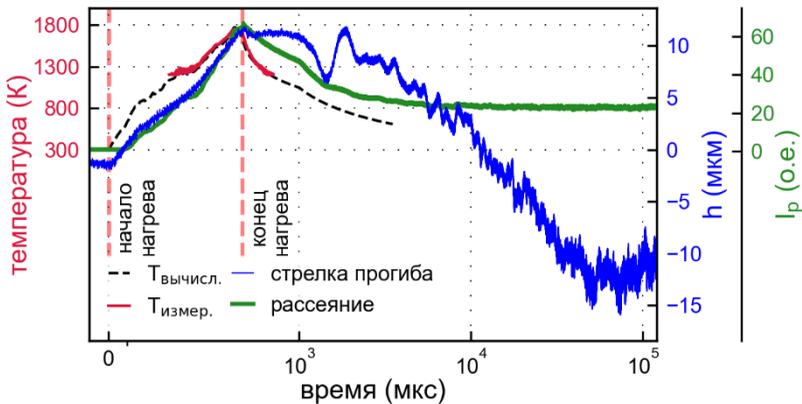


Рис. 2. Типичная динамика параметров образца при тепловом ударе. Красная линия – измеренная температура поверхности, пунктирная линия – вычисленная температура поверхности, зеленая линия – интенсивность рассеянного лазерного излучения от поверхности, синяя линия – величина стрелки прогиба задней стороны образца. Временная шкала до  $10^3$  мкс – линейная, после – логарифмическая.

В результате проведенных экспериментов было показано, что шероховатость поверхности увеличивается в случае, если максимальная температура поверхности превышает температуру хрупко-вязкого перехода. Используемая диагностика позволяет регистрировать увеличение остаточной шероховатости изначально зеркальной поверхности, начиная с уровня  $\sim 10^{-8}$  м. Помимо этого продемонстрировано, что шероховатость поверхности и величина остаточной кривизны достигают постоянного значения после нескольких импульсов нагрева и перестают изменяться при последующих тепловых ударах. При увеличении интенсивности нагрева также растут и остаточная шероховатость поверхности, и величина остаточной кривизны. Экспериментально измеренная остаточная кривизна образца совпала с численно смоделированной величиной. Также было проведено сравнение

температурного профиля в конце импульса нагрева на мишени из катанного неотожжённого вольфрама с распределением остаточных напряжений на её поверхности. При растрескивании на стадии остывания сеть трещин распространяется по поверхности со скоростью звука в металле. Однако, различные трещины могут появляться на образце независимо друг от друга, при этом промежуток времени от окончания импульсного нагрева до растрескивания может превышать время до перехода вольфрама в хрупкое состояние в  $10^2$  и больше раз.

#### **Список литературы**

- [1] Trunев Yu.A. et al. 2016 AIP Conf. Proc., 1771, 060016
- [2] Vasilyev A.A. et al. 2017 Nucl. Mater. and Energy, 12, 553-558
- [3] Vasilyev A.A. et al. 2019 Fus. Eng. and Design, 146, 2366-2370
- [4] Kasatov A.A. et al. 2016 AIP Conf. Proc., 1771, 06007
- [5] Vyacheslavov L.N. et al. 2021 J. Nuclear Materials, 544, 152669

O. V. OGORODNIKOVA<sup>1</sup>, N.S. KLIMOV<sup>2</sup>, YU.M. GASPARYAN<sup>1</sup>,  
V.S. EFIMOV<sup>1</sup>, D. KOVALENKO<sup>2</sup>, K. GUTAROV<sup>1,2</sup>, A.G. POSKAKALOV<sup>1</sup>,  
M. M. KHARKOV<sup>1</sup>, A.V. KAZIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University 'MEPhI'*

<sup>2</sup>*State Research Centre of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion  
Research*

## **DEUTERIUM AND HELIUM RETENTION AND CORRESPONDING MODIFICATIONS OF W-BASED MATERIALS UNDER STATIONARY OPERATION REGIME AND TRANSIENTS**

Tungsten and dense nano-structured tungsten (W) coatings are used as plasma-facing materials in current tokamaks and suggested to be used for future fusion devices. In this regard, a study of accumulation of deuterium (D) and helium (He) in W materials and corresponding material modifications under normal operation conditions and transient events appears necessary for assessment of safety of fusion reactor due to the radioactivity of tritium and material performance and for the plasma fuel balance. Therefore, sequential and simultaneous (with 10% of He seeding) D/He plasma exposure of W-based samples (polycrystalline W, nano-structured W coating and W with He-induced W 'fuzz') in quasi-stationary high-current plasma gun QSPA-T below and above the melting threshold with a pulse duration of 1 ms and number of pulses from one to thirty was performed and compared with stationary plasma loads. Material modification was investigated using an electron microscope equipped with a focused ion beam for in-situ cross sectioning and an x-ray diffractometer. The D and He retention in irradiated samples was measured by a method of thermal desorption spectroscopy using high resolution quadrupole mass-spectrometer to separate signals of He and D<sub>2</sub>. The D retention already after 10 pulses of the D plasma gun exposure was higher than that after stationary plasma exposure even at sample temperature of 600 K indicating the dominate influence of ELM's-like events on the D retention compared to normal operation regime. This effect occurs for both pure D and mixed D/He plasma exposure. As experimental and modelling data show, the increased D diffusion into the bulk due to high temperature gradient during the ELMs is one of the reasons of the enhanced D retention after ELMs. A formation of a layer of a thickness of ~10–30 μm with columnar crystal structure oriented perpendicular to the irradiated surface was observed for all W grades after the exposure of samples to both pure D and mixed D/He plasmas with the heat flux exceeded the melting threshold. After irradiation with D/He plasma in QSPA-T above the W melting threshold, spherical cavities in a layer of columnar crystals,

containing a lot of D, were observed. It is shown that the synergetic effect of D, He and high heat flux leads to completely different particle retention and material modification compared to separate/sequential irradiation. The results obtained give possibility to assess the particle retention in divertor areas subjected to high thermal loads at different operation regimes and to compare advanced W-based materials with respect to the D and He retention and material modifications.

Я.А. ВАСИНА<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, А.С. ДЖУРИК<sup>1</sup>, В.Г. ОТРОЩЕНКО<sup>1</sup>,  
В.Б. ЛАЗАРЕВ<sup>1</sup>, С.В. МИРНОВ<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ЛИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ НА ТОКАМАКЕ Т-11М

Анализ данных, полученных на различных токамаках [1], показал, что одним из основных препятствий на пути к созданию квазистационарного токамака – прототипа промышленного реактора - является ограничение длительности его рабочего импульса из-за накопления внутри камеры токамака продуктов эрозии ее элементов, обращённых к плазме. С целью преодоления этого препятствия ранее была предложена концепция замкнутого литиевого контура, основными элементами которого являются эмиттеры и коллекторы лития [1]. В рамках этой концепции литий, как продукт эрозии первой стенки токамака, должен собираться коллекторами с последующим удалением из камеры токамака.

На токамаке Т-11М ведутся эксперименты по исследованию характера взаимодействия потоков частиц и энергии, приходящих на внутрикамерные элементы токамака. В работе представлены результаты исследования эффективности захвата лития коллектором продольного типа (под углом к тороидальному магнитному полю), изготовленным на основе капиллярной пористой системы (КПС), образованной разным количеством захватывающих слоев нержавеющей сетки (0, 2) с ячейкой 30 мкм [2].

Коллектор экспонировался в серии разрядов токамака. Основным источником лития являлся вертикальный КПС литиевый лимитер. После окончания серии коллектор вынимался из камеры токамака, сетка разрезалась на отдельные элементы для получения распределения лития вдоль и по глубине поверхности коллектора. Количество лития на каждой из частей сетки определялось методом пламенного анализа [3]. Главным проектом современной России в сфере УТС является создаваемый в НИЦ КИ токамак Т-15МД. Эксперименты проведены в поддержку этого проекта в рамках договора на выполнение НИОКР № 313/1694-Д с АО "Наука и инновации".

[1] S. Mirnov, Tokamak evolution and view to future, Nucl. Fusion. 59 (2018). doi:10.1088/1741-4326/aace92.

[2] V.A. Evtikhin., et al., Plasma Phys. Control. Fus. 44 (2002) 95

[3] Мирнов С.В., Джигайло Н.Т., Щербак А.Н. Физико - химический метод определения абсолютного количества лития в плёнках на диагностических мишенях // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез. 2018. Libk. 41, № 1. Стр. 53–56.

А.В. ДЕДОВ<sup>1</sup>, А.Т. КОМОВ<sup>1</sup>, А.В. ЗАХАРЕНКОВ<sup>1</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>,  
С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, А.Н. ВАРАВА<sup>1</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, А.С. ДЕМИДОВ<sup>1</sup>,  
К.В. ЖУРАВЛЕВ<sup>1</sup>, В.С. ШТЕЛИНГ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия  
<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## **ИСПЫТАНИЯ МОЩНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ ОПЫТНЫХ МАКЕТОВ ВОЛЬФРАМОВЫХ ДИВЕРТОРНЫХ МОДУЛЕЙ С ВОДО- ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ**

В качестве теплоносителя системы охлаждения внутрикамерных элементов термоядерного реактора, как один из перспективных вариантов, рассматривается мелкодисперсная газо-водяная смесь, генерируемая форсунками. Эта концепция применяется в исследованиях и испытаниях внутрикамерных элементов для термоядерного реактора-токамака [1].

Среди многообразия существующих схем форсунок для распыления жидкостей предъявляемым требованиям в наибольшей степени отвечают струйные пневматические форсунки [2]. Выбор пневматических форсунок связан с необходимостью получения, мелкодисперсного факела распыла. Пневматические форсунки по характеру движения потоков перед дроблением (что сильно влияет на форму факела распыла) можно разделить на прямоструйные и вихревые. Наиболее значительное влияние на характеристики газожидкостного факела распыла оказывают скорость истечения газожидкостной смеси и удельный расход распиливающего агента (газа). Наибольшая скорость достигается в прямоструйных форсунках высокого давления. Однако основными недостатками таких форсунок является создание ими узкого факела с большой дальностью. Этого недостатка можно избежать в форсунках низкого давления, но в них для достижения высокой дисперсности приходится увеличивать удельный расход газа. При использовании форсунок низкого давления газожидкостный поток после выхода из сопла форсунки под действием перепада давления ( $p_{\text{см}} < p_{\text{рам}}$ ) и лобового сопротивления разбивается на фрагменты-капли различного размера, которые под действием сил поверхностного натяжения и в соответствии с принципом минимального уровня энергии принимают сферическую форму. В данной работе представлены результаты исследования процессов охлаждения высокотемпературной поверхности рабочего участка газожидкостным потоком теплоносителя. Показана возможность эффективного отвода тепла указанным методом. Результаты работы будут использованы для

обоснования применения данного способа охлаждения внутрикамерных компонентов для термоядерных реакторов.

В качестве рабочего участка для проведения исследований в работе использовался макет охлаждаемого вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора, конструкция которого была разработана по аналогии с диверторными модулями для ИТЭР. Для проведения экспериментальных исследований такого модуля была создана система охлаждения с возможностью охлаждения двухкомпонентным диспергированным потоком теплоносителя. Для создания диспергированного газожидкостного потока использовалась форсунка. Предварительно авторами были проведены исследования по определению параметров факела распыла таких как угол раскрытия струи, скорость потока, а также проведены оценки эффективности охлаждения высокотемпературных элементов двухкомпонентным диспергированным потоком теплоносителя. Система охлаждения (Рис. 1) состоит из стандартного теплотехнического оборудования, датчиков для измерения режимных параметров компонентов теплоносителя, трубопроводной арматуры и соединительных шлангов. Гидравлический контур замыкается с макетом вольфрамового модуля соединительными трубками. Для нагрева вольфрамового модуля индукционным методом использовался ВЧ-генератор ИНС-20 с мощностью до 20 кВт с частотой 60 кГц.



*Рисунок 1 – Общий вид системы охлаждения в сборе*

Испытания макета вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора проводились с использованием вышеуказанной системы охлаждения. Такие макеты будут в дальнейшем использоваться для

испытаний в плазменной установке ПЛМ стационарными плазменными нагрузкам  $1 \text{ МВт/м}^2$  и более. Экспериментальные исследования проводились в следующем диапазоне режимных параметров теплоносителя: объемный расход воздуха  $(0 \div 6) \text{ м}^3/\text{час}$ ; объемный расход дистиллированной воды  $(0 \div 150) \text{ л/час}$ ; давление дистиллированной воды  $(1 \div 6) \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; давление воздуха  $(1 \div 10) \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; температура теплоносителя на входе в рабочий участок  $(10 \div 30)^\circ\text{C}$ .

Фотография рабочего участка (макета вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора), установленного в контуре охлаждения, представлена на Рис. 2. Плотность теплового потока  $q$  через рабочий участок определялась с помощью закона Фурье  $q = -\lambda \text{ grad}T$ . Оценка градиента температуры  $T$  на подложке, на которой закреплена вольфрамовая облицовка, была проведена по результатам измерения температуры. Измерение температуры проводилось с помощью трех термопар с диаметром кабеля  $1,0 \text{ мм}$ , установленных на разной глубине под одним из вольфрамовых кубиков в отверстиях диаметром  $1,2 \text{ мм}$ . Показания этих термопар регистрировались автоматизированной системой сбора и обработки информации. Температура нагрева вольфрамового модуля достигала  $380^\circ\text{C}$  при мощности нагрева  $18 \text{ кВт}$ , Рис. 3,4. Продемонстрирована эффективность системы охлаждения вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора.



*Рисунок 2 – Макет вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора, установленный в контур системы охлаждения, с индукционным нагревателем*

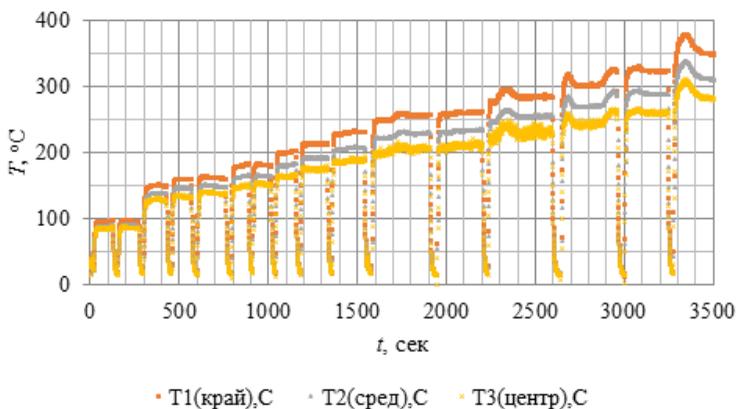


Рисунок 3 – Зависимость температуры опытного макета вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора от времени испытаний

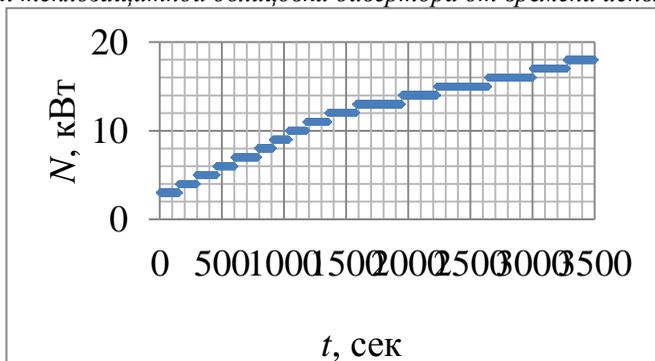


Рисунок 4 – Зависимость от времени мощности ВЧ-генератора, выделяемой на опытном макете вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора

Испытания макета вольфрамового модуля теплозащитной облицовки дивертора проводились при поддержке проекта Госкорпорации "Росатом" № 223 ЕОП-УТП 774/158-Д, разработка метода охлаждения при поддержке гранта РФФИ 16-19-10457, анализ радиационных эффектов - при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

- [1] А.В. Вертков и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 41 1 51-59 (2018)
- [2] Д.Г. Пажи, В.С. Галустов, Основы техники распыливания жидкостей, М. Химия (1984)

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, Ю.В.МАРТЫНЕНКО<sup>2,1</sup>,  
А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, А.П. СЛИВА<sup>1</sup>, А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>,  
М.В.ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>,  
Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. ЧАН КУАНГ<sup>1</sup>, К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>, А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>,  
С.В. БЕЛОУСОВ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

## ИСПЫТАНИЯ ПУЧКОВЫМИ И СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА- РЕАКТОРА

Для безопасной эксплуатации гибридного термоядерного токамака-реактора необходимы испытания обращенных к плазме внутрикамерных компонентов соответствующей нагрузкой, ожидаемой в реакторе, и разработка систем охлаждения внутрикамерных компонентов при мощном тепловом потоке до 20 мВт/м<sup>2</sup> и более. При взаимодействии плазмы с поверхностью дивертора в токамаке может действовать несколько одновременных механизмов, приводящих к деградации поверхности: эрозия и переосаждение материалов поверхности, плавление и отверждение, испарение, распыление, рекристаллизация, изменение поверхностных слоев (см., например, [1]). В результате ожидается интегральный синергетический эффект многих процессов, рассматриваемый в теоретических моделях (см. [2]).

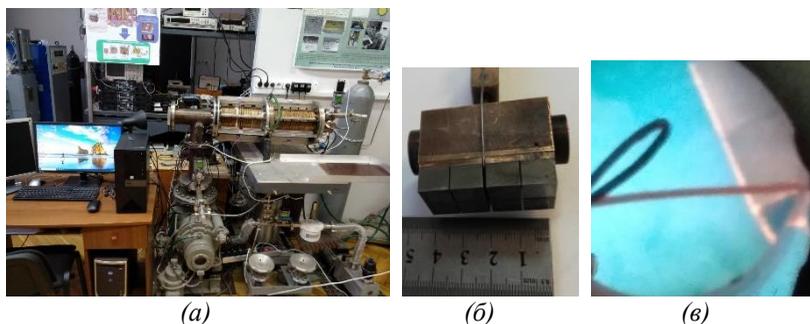
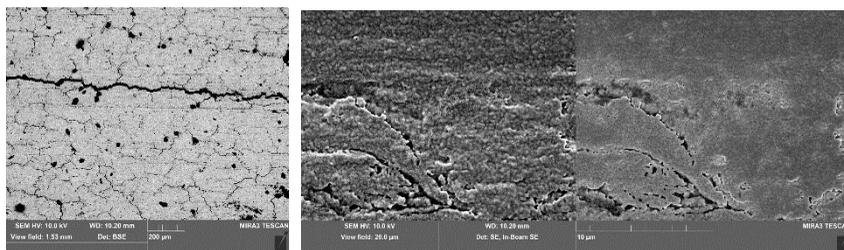


Рисунок 1 – (а) Плазменная установка ПЛМ, (б) макет вольфрамового диверторного модуля, (в) испытание макета в гелиевой плазме ПЛМ

Для моделирования нарузок на внутрикамерные компоненты в реакторе были проведены комбинированные пучково-плазменные испытания теплозащитных диверторных облицовочных модулей, изготовленных по технологии ИТЭР.

Вольфрамовый теплозащитный диверторный модуль был изготовлен из вольфрама марки ВМ-П ИТЭР - восемь вольфрамовых пластин размером  $10 \times 10 \times 8$  мм, припаянных к медной подложке размером  $20 \times 20 \times 42$  мм с трубкой диаметром 14 мм для подключения системы охлаждения, Рис. 1б. Вольфрамовый диверторный модуль (без охлаждения) испытывался в электронно-лучевой установке термоциклическими нагрузками мощностью до  $20 \text{ мВт/м}^2$  и более. Затем облучался в стационарной гелиевой плазме в плазменной установке ПЛМ [3], Рис. 1а, с параметрами разряда: ток разряда 0,55 А, потенциал образца -60 В, давление гелия в разрядной камере  $8 \cdot 10^{-3}$  Торр, время плазменного облучения - до 200 минут.



(а)

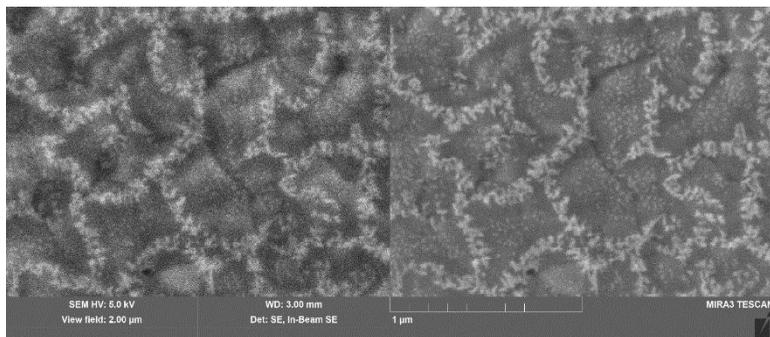
(б)

*Рисунок 2 – СЭМ микрофотографии вольфрамовой поверхности диверторного модуля (а) после термоциклических нагрузок при испытаниях в электронно-лучевой установке. (б) после комбинированных испытаний в электронно-лучевой установке и последующих плазменных испытаний в ПЛМ*

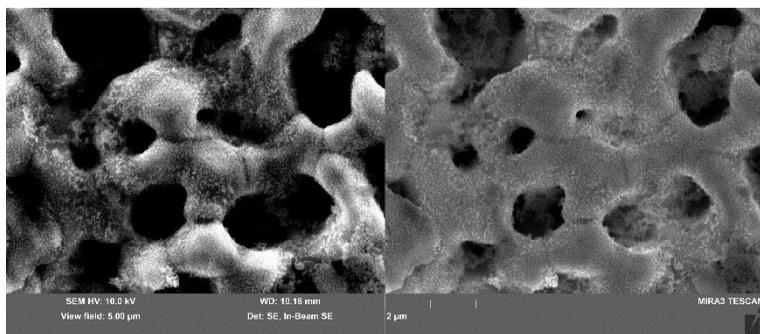
После пучковых и плазменных испытаний поверхность вольфрамового диверторного модуля исследовалась на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 TESCAN. Разрешение детектора вторичных электронов (SE-детектор) составляет 200 нм, детектора обратнорассеянных электронов (BSE-детектор) - 200нм, IN-BEAM SE детектора - 20нм.

Исследования структуры вольфрамовой поверхности проводились (1) после термоциклических нагрузок при испытаниях в электронно-лучевой установке, и (2) после последующего облучения в гелиевой плазме ПЛМ. Термоциклические тепловые нагрузки при испытаниях в электронно-

лучевой установке, вызывающие нагрев поверхности до  $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ , приводили к растрескиванию и рекристаллизации поверхности. Наблюдалась сеть трещин шириной от 100 нм до 20 мкм (Рис. 2). Толщина слоя рекристаллизации достигала 1-3 мкм.



*Рисунок 3 – СЭМ микрофотография вольфрамовой поверхности диверторного модуля после пучково-плазменных испытаний*

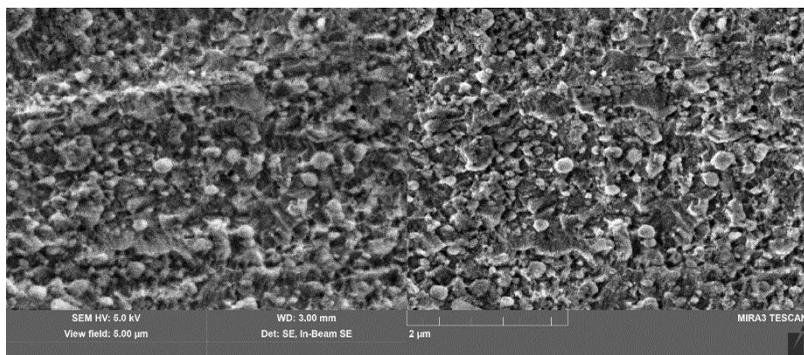


*Рисунок 4 – СЭМ-микрофотография вольфрамовой поверхности диверторного модуля в зоне максимальной нагрузки после комбинированных электронно-лучевых и плазменных испытаний*

После последующего облучения гелиевой плазмой в ПЛМ на поверхности вольфрамового модуля сформировались наноструктурированные слои (Рис. 2б). Межкристаллитные трещины шириной в сотни нанометров не имеют большой глубины и являются результатом перераспределения материала по поверхности в результате процессов рекристаллизации. После комбинированных пучково-плазменных испытаний обнаружены

наноразмерные слои, покрывающие всю поверхность, формируя высокопористый поверхностный слой (Рис. 3). Размер наноструктур и пор на поверхности – менее 50 нм (Рис. 4), что значительно меньше размера зерен 200-500 нм исходной структуры вольфрама до облучения.

Для сравнения проведены исследования поверхности образца, подвергнувшегося облучению только в гелиевой плазме ПЛМ в течение 200 минут (Рис. 5), после такого облучения трещины на поверхности не образовались. На поверхности сформировались наноразмерные высокопористые структуры с большой удельной площадью поверхности. На масштабах микрометров и более рельеф вольфрамовой поверхности не изменился.



*Рисунок 5 - СЭМ микрофотография вольфрамовой поверхности диверторного модуля после плазменных испытаний в ПЛМ*

Плазменные и электронно-лучевые испытания проводились при поддержке проекта Госкорпорации "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, анализ структуры поверхности-при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

1.V. P. Budaev, Physics of Atomic Nuclei 79 1137–1162 (2016)

2.V. P. Budaev, Physics Letters A 381 3706–3713 (2017)

3.V.P. Budaev et al., Journal of Physics: Conference Series 891 012304 (2017)

С.А. КРАТ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, Я.А. ВАСИНА<sup>1</sup>, А.К. ХОМЯКОВ<sup>1</sup>,  
Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>

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

## **СПОСОБЫ ОЧИСТКИ ОСАЖДЁННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ ЛИТИЕВЫХ СЛОЁВ ОТ ТЯЖЁЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Одним из основных каналов накопления трития в термоядерных установках является со-осаждение трития с распылённым плазмой материалом стенки. В токамаках, в которых планируется использование жидкого лития в качестве обращённого к плазме материала проблема накопления изотопов водорода в литиевых слоях стоит особенно остро, так как образование твёрдой гидридной фазы способно привести к выходу из строя систем использующих жидколитиевые элементы.

В установке МР-2 [1] путём распыления жидкого литиевого катода дейтериевой плазмой магнетронного разряда были получены соосаждённые литий-дейтериевые слои толщинами порядка 500 нм. Содержание дейтерия в них измерялось при помощи термодесорбционной спектроскопии (ТДС), проводившейся без промежуточного контакта литий-дейтериевого слоя с атмосферным воздухом. Максимальная температура нагрева в процессе ТДС анализа составляла 1300 К. Одновременно с измерением потоков десорбции газов из плёнки, измерялась скорость испарения самой плёнки при помощи кварцевых микровесов. Основной пик десорбции наблюдался при температуре ~ 700 К, общее содержание дейтерия составляло ~ 15 ат. % [2].

Для полученных слоёв были рассмотрены методы удаления тяжёлых изотопов водорода. Было рассмотрено три основных метода воздействия: выдержка в течение длительного времени при повышенной температуре в вакууме, выдержка в течение длительного времени при повышенной температуре в атмосфере протия [3] и обработка поверхности литиевого слоя ультрафиолетовым излучением.

При выдержке в вакууме, температура литиевого слоя составляла 600 К, время выдержки – 1 час. Было установлено, что при данной температуре происходит удаление ~ 90 % всего содержащегося в литиевом слое дейтерия, а также частичное испарение самого литиевого слоя.

При выдержке в атмосфере протия (1 атмосфера) температура, достаточная для удаления более 95% всего дейтерия из плёнки, составляла ~ 470 К. При этом наблюдалось существенное накопление протия.

После воздействия ультрафиолетового излучения, часть дейтерия десорбировалась при температурах значительно ниже основного пика

десорбции, начиная от температуры плавления лития. В ТДС спектре дейтерия для слоя, подвергнутого воздействию ультрафиолетового излучения в течение 15 минут, не наблюдалось пиков десорбции с температурой выше температуры основного пика десорбции ~ 700 К.

#### Использованная литература

1. Krat S.A. et al. A setup for study of co-deposited films // J. Instrum. 2020. Vol. 15, № 01. P. P01011–P01011.
2. Krat S.A. et al. Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge // Vacuum. 2014. Vol. 105. P. 111–114.
3. Krat S. et al. Isotope exchange in Li-D co-deposited layers at temperatures below 200 °C // J. Nucl. Mater. 2020. P. 152064.

Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, А.А. ПИСАРЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОРОДА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА**

Для анализа кинетики взаимодействия плазмы с поверхностями реакторов термоядерного синтеза, обращенными к плазме, важно понимание энергетики элементарных процессов, протекающих при адсорбции, абсорбции и десорбции водорода [1÷11].

В данной работе выполнено численное исследование поведения молекул и атомов водорода вблизи поверхности вольфрама, как со стороны газа, так и в приповерхностных слоях металла. Численные расчеты выполнены методом теории функционала плотности (DFT), которая оперирует с электронной плотностью системы, что исключает необходимость параметризации взаимодействия частиц. Используя DFT, рассчитывается энергия системы «атомы металла – атомы водорода» при произвольном расположении атомов относительно друг друга и ищется оптимальное расположение, характеризуемое минимумом потенциальной энергии системы.

### **Результаты**

В случае анализа хемосорбции, молекула  $H_2$  помещалась на некотором расстоянии над поверхностью W. После этого молекула смещалась к поверхности, и рассчитывалась конфигурация и энергия системы в этом состоянии. На расстояниях более  $4 \text{ \AA}$  молекула не изменяла свое положение при оптимизации конфигурации системы. При расстоянии от поверхности менее  $4 \text{ \AA}$  межатомное расстояние Н-Н увеличивалось, и молекула притягивалась к поверхности. По мере адиабатического погружения молекулы в электронное облако вблизи поверхности вольфрама она распадается на два атома [15] и адсорбируется в устойчивом состоянии на поверхности, которое обычно называют хемосорбированным состоянием. В оптимизированной конфигурации атомы водорода находятся на расстоянии  $2.46 \text{ \AA}$  друг от друга и занимают положения над соседними перпендикулярными ребрами поверхностной ячейки вольфрама на расстоянии порядка  $1.35 \text{ \AA}$  от поверхностных атомов вольфрама.

Детальный анализ показывает, что барьер для распада молекулы  $H_2$  при хемосорбции отсутствует, и распад происходит спонтанно и безактивационно на расстоянии примерно  $2 \text{ \AA}$  от поверхности. Расчеты,

выполненные при различной ориентации молекул в исходном положении относительно поверхности, показали, что безактивационный разрыв молекулы  $H_2$  происходит вне зависимости от первоначальной ориентации.

Потенциальная энергия системы молекула водорода-вольфрам плавно уменьшается по мере приближения молекулы к поверхности. За ноль условно принята минимально возможная энергия (в хемосорбированном положении). Энергия системы начинает уменьшаться на расстоянии порядка  $4 \text{ \AA}$  от поверхности. К началу распада молекулы на расстоянии примерно  $2 \text{ \AA}$  она уменьшается вдвое. Разница между энергией двух атомов на поверхности и энергией двух атомов в молекуле в газе (теплота хемосорбции) составляет  $\epsilon_2 \approx 2 \text{ эВ}$ .

Если вблизи поверхности появляется Франк-Кондоновский атом водорода, образовавшийся в результате диссоциации молекулы под действием внешних факторов, то он также адсорбируется на поверхности. Расчетное значение энергии связи атомов  $H$  в молекуле вдали от поверхности  $W$  составило  $\epsilon_4 \approx 4,2 \text{ эВ/мол}$ .

Обратный процесс десорбции возможен только в виде молекулы (так называемая ассоциативная десорбция). Два атома  $H-H$ , близко расположенные на поверхности вольфрама образуют молекулу  $H_2$  в процессе одновременного удаления из хемосорбированного состояния в сторону вакуума на расстояние не менее  $4 \text{ \AA}$ . Это возможно при преодолении барьера  $\epsilon_2 \approx 2 \text{ эВ}$ . Выход в вакуум в атомарном виде требует существенно больших энергетических затрат при переходе из хемосорбированного состояния, и поэтому такой процесс маловероятен.

Расчеты энергии системы с атомами водорода под поверхностью вольфрама показали, что на большом расстоянии от поверхности энергия системы выше, нежели энергия системы при нахождении молекулы в газе, то есть растворение водорода в вольфраме требует активации и идет с поглощением тепла, то есть эндотермически. Разница энергий  $\epsilon_5 \approx 1.1 \text{ эВ/мол}$ , что соответствует теплоте растворения водорода в вольфраме из газовой фазы.

Рассматривалась релаксация положения атомов водорода под поверхностью вольфрама. Устойчивыми начальными положениями являются положения глубже второго слоя атомов вольфрама (расстояния от поверхности более  $1.5 \text{ \AA}$ ). Атомы, которые оказались между первым и вторым слоем атомов вольфрама (расстояния менее  $1 \text{ \AA}$ ) спонтанно выходили из металла на поверхность. То есть выход на поверхность является безактивационным.

Атомы, оказавшиеся на поверхности, могут легко перемещаться вдоль поверхности, поскольку энергия активации диффузии по поверхности мала  $\epsilon_{\text{adiab}} \approx 0,22$  эВ [10]. Проведено моделирование различных конфигураций 4 атомов водорода, которые могут предположительно образоваться при встрече атомов водорода адсорбированных на поверхности (100) вольфрама. Энергия всех компактных конфигураций атомов H на поверхности оказалось выгоднее энергии их случайного расположения примерно на 0.1 эВ.

### **Выводы**

Из проведенных методом DFT расчетов взаимодействия атомов и молекул водорода с вольфрамом вблизи поверхности (100) можно сделать следующие заключения:

Распад молекулы начинается на расстоянии порядка  $2 \text{ \AA}$  от поверхности

Диссоциация происходит безактивационно.

После диссоциации молекулы атомы оказываются в хемосорбированном состоянии на поверхности в положениях над соседними перпендикулярными друг другу ребрами ячейки металла на расстоянии порядка  $1.35 \text{ \AA}$  от атомов вольфрама.

Теплота хемосорбции двух атомов составляет порядка  $\epsilon_2 \approx 2$  эВ

Абсорбция двух атомов водорода из молекулярной фазы происходит эндотермически с теплотой растворения порядка  $\epsilon_5 \approx 1$  эВ.

Величины теплоты адсорбции и абсорбции (растворения) молекулярного водорода в вольфраме удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными значениями.

При перемещении атома водорода вглубь металла энергия системы в равновесных положениях атома постепенно возрастает и уже во втором межплоскостном пространстве становится близкой к значениям, характерным для больших глубин.

Атом водорода, находящийся между первой и второй плоскостью решетки вольфрама, спонтанно и безактивационно выходит на поверхность в хемосорбированное состояние, а атомы водорода, расположенные глубже, нуждаются в активации для перехода в первое межплоскостное пространство для выхода на поверхность.

Упорядоченное расположение атомов водорода на поверхности энергетически более выгодно ( $\sim 0.1$  эВ), нежели случайное расположение.

### **Благодарность**

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального Исследовательского Ядерного

Университета "МИФИ" при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Грант № 0723-2020-0043).

### Литература

- [1] Shi-Yao Qin, et al. 2015 Journal of Nuclear Materials 465 135-141
- [2] Temmerman G D, Hirai T, Pitts R A, 2018 Plasma Phys. Control. Fusion 60 (4) 044018
- [3] Lu G H, Zhou H B and Becquart C S, 2014 Nucl. Fusion 54 (8) 086001
- [4] Qin S Y, et al. 2017 Sci. China-Phys. Mech. Astron. 60 (6) 067021
- [5] Schmid K et al., 2017 Phys. Scr. 170 014037
- [6] Giannozzi P, et al. 2009 J.Phys.:Condens.Matter 21 395502
- [7] Biget M P, Rizk R, Bessis A 1975 Solid State Com. 16 (7) 949-952
- [8] Degtyarenko N, Pisarev A // 2015 Physics Procedia 71 30
- [9] Degtyarenko N, Pisarev A //2016 Journal of Physics: Conf. Series 748 012010
- [10] Degtyarenko N, Pisarev A //2017 Journal of Physics: Conf. Series 941 012023
- [11] Boda A, Ali Sk M, Shenoy K T, Mohan S //2020 Inter. Journal of Hydrogen Physics 45 29095
- [12] Giannozzi P, Andreussi O, Brumme T et al. // 2017 J. Phys.: Condens. Matter 29 465901
- [13] Van Setten M J, Giantomassi M et al // 2018 Comput. Phys. Commun. 226 39
- [14] Grimvall G, Magyarikópe B, Ozolin's B and Persson K A // 2012 Rev. Mod. Phys. 84 945.
- [15] Burmistrov S N, Dubovskii L B // 2017 Low Temperature Physics 43 1152

M.M. TSVENOUKH

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

## **ESTIMATION OF IONS CHARGE IN PLASMA OF VACUUM ARC CATHODE SPOT**

Intense plasma-surface interactions provide self-sustaining electrical discharge at plasma – wall interface. Fast (ns) operation of multiple microexplosions – explosive electron emission bursts (ectons) provide electron and plasma emission from the cathode and form the cathode spot of the arc discharge.

It is of interest to find estimation for the erosion rate and average ions charge at the first wall of fusion devices conditions and the plasma composition for electric arcs with complicated multicomponent cathodes.

A model has been proposed for estimation of the parameters of the cathode spot plasma produced by explosive electron emission pulses from the critical state properties for various materials [1]. It is based on

- (i) a Saha-like equation for the average charge of a weakly nonideal plasma,
- (ii) two-temperature calculations with finite  $e-i$  relaxation rate, and
- (iii) the current density evolution derived from a liquid-jet tearing model

For a weakly nonideal plasma, the average ion charge state  $\zeta$  dependence from the temperature  $T$  can be estimated as [2]

$$\zeta \approx T/\text{eV}.$$

Two-temperature calculations of liquid-metal tearing jet electrical explosion predicts that the maximum electron temperature depends approximately on the critical one ( $T_{cr}$ ) as

$$T_{e,\text{max}} \approx 1 \text{ eV} + T_{cr}.$$

Thence the average charge of the ions in the plasma  $Z_{av}$  can be estimated as

$$Z_{av} \approx 1 + T_{cr} / \text{eV}.$$

Table and Figure 1 demonstrate a good agreement of the proposed formula and the measurements [1]. Note that despite the simplicity our model correctly describes both the order of magnitude and global trend of average ion charge.

	$Z$	$T_{crs}$ , eV	$Z_i$ , measured	$Z_{av} = 1 + T_{cr}/eV$
Li	3	0.28	1	1.28
Al	13	0.69	1.7	1.69
Ti	22	1.02	2.1	2.02
Fe	26	0.83	1.82	1.83
Co	27	0.90	1.7	1.90
Cu	29	0.72	2.06	1.72
Zr	40	1.40	2.58	2.40
Cd	48	0.24	1.32	1.24
In	49	0.53	1.34	1.53
Sn	50	0.71	1.53	1.71
Sm	62	0.46	2.13	1.46
Ta	73	1.77	2.93	2.77
W	74	1.81	3.07	2.81
Pt	78	1.24	2.08	2.24
Pb	82	0.43	1.64	1.43
Bi	83	0.36	1.17	1.36

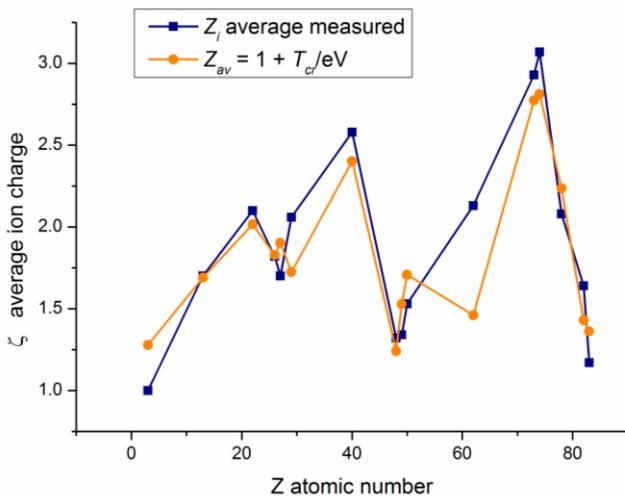


Figure 1. Average ion charge measurements and estimates

An important feature of the EEE plasma is its mechanical momentum that characterizes the acceleration rate. The momentum per transferred charge,  $\mu$ , has been estimated to be about  $(M_i T_{cr})^{1/2} / (Z_i e)$  [3]. This estimate can be improved by using the above estimate of the average charge to obtain the formula

$$\mu = (M_i T_{cr})^{1/2} / e(1 + T_{cr}/eV)$$

that (with  $T_{cr} \sim 1$  eV) can be further simplified to  $\mu \approx 5 (M_i / M_p)^{1/2}$  g cm/(s C)

The data presented in Figure 2 indicate that our estimating formulas fit to the known measured values of the product of ion velocity and erosion rate  $v_i \gamma_i$  and predict the EEE plasma momentum per transferred charge equal to about tens of g cm/(s C).

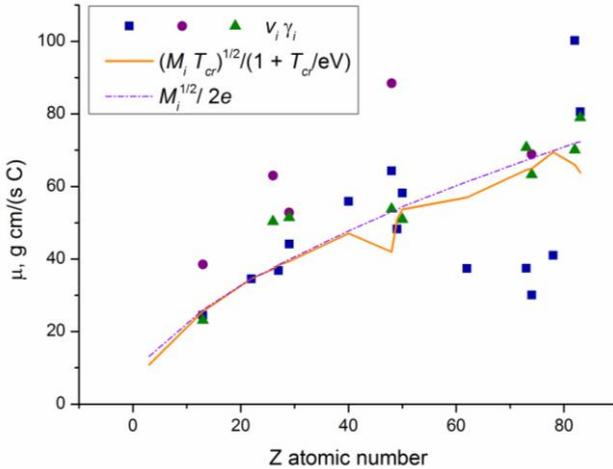


Figure 2. EEE plasma momentum per transferred charge: experimental values of  $v_i \gamma_i$  and estimates by formulas  $\mu = (M_i T_{cr})^{1/2} / e(1 + T_{cr}/eV)$  and  $\mu = M_i^{1/2} / 2e$ .

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

1. Tsventoukh M.M. 2021 A critical state model for estimating the parameters of explosive emission plasmas *Phys. Plasmas* **28** 024501 <https://dx.doi.org/10.1063/5.0034814>,
2. S.A. Barenholts D. Hwangbo, S. Kajita, N. Ohno, V.P. Frolova, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, D.L. Shmelev, M.M. Tsventoukh and G. Yu Yushkov 2020 *Nucl. Fusion* **60** 044001

## СОДЕРЖАНИЕ

С.В. СУСЛИН, С.С. АНАНЬЕВ, Д.Н. ДЕМИДОВ

*ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ И НАКОПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ ТЯЖ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСОВ ВАКАНСИЯ-ВОДОРОД .....10*

Р.И. ХУСНУТДИНОВ<sup>1,2</sup>, А.Б. КУКУШКИН<sup>1,2</sup>, В.С. НЕВЕРОВ<sup>2</sup>

*БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ VM1D2V ДЛЯ РЕЦИКЛИНГА ВОДОРОДА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ОСНОВНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА.....14*

З.Г. ЛЮЛЛИН<sup>1,2</sup>, Н.А. БАБИНОВ<sup>1,2</sup>, Л.А. ВАРШАВЧИК<sup>1,2</sup>, П.А. ЗАТЫЛКИН<sup>1</sup>, Е. Е. МУХИН<sup>1</sup>, А. Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Д.С. САМСОНОВ<sup>1</sup>

*МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЧИСТКИ ВЧ РАЗРЯДОМ И ТРАНСПОРТА РАСПЫЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В УЗЛЕ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ИТЭР.....18*

Н.А. ПУНТАКОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.В. ГРУНИН

*ЭМИССИЯ АТОМОВ УГЛЕРОДА ИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ГРАФИТА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ....20*

Н.П. БОБЫРЬ<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>2</sup>, Д.А. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, Д.С. ДУГИН<sup>1</sup>, С.С. АНАНЬЕВ<sup>1</sup>

*ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ТАНТАЛА НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В СПЛАВЕ W-Ta .....23*

Е.Д. ФЕДУЛАЕВ<sup>1,2</sup>, И.М. ПОЗНЯК<sup>1,2</sup>, Д.А. ТОПОРКОВ<sup>2</sup>, В.М. САФРОНОВ<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. ЦЫБЕНКО<sup>2</sup>, В.А. КОСТЮШИН<sup>2</sup>, Д.М. КОЧНЕВ<sup>2</sup>, З.И. НОВОСЕЛОВА<sup>1,2</sup>, А.И. РУМЯНЦЕВА<sup>1,2</sup>, С.В. КАРЕЛОВ<sup>2</sup>, Д.В. КОВАЛЕНКО<sup>2</sup>, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ<sup>2</sup>

*ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРОВОЙ ПЛАЗМЫ ВОЛЬФРАМА В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ.....24*

З.И. НОВОСЕЛОВА<sup>1,2</sup>, И.М. ПОЗНЯК<sup>1,2</sup>, Д.А. ТОПОРКОВ<sup>2</sup>,

В.М. САФРОНОВ<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. ЦЫБЕНКО<sup>2</sup>, В.А. КОСТЮШИН<sup>2</sup>,  
Д.М. КОЧНЕВ<sup>2</sup>, Е.Д. ФЕДУЛАЕВ<sup>1,2</sup>, А.И. РУМЯНЦЕВА<sup>1,2</sup>, С.В. КАРЕЛОВ<sup>2</sup>,  
Д.В. КОВАЛЕНКО<sup>2</sup>, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ<sup>2</sup>

*СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ ВОЛЬФРАМА  
В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН.....27*

М.А. ПОПОВА, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.С. ЕФИМОВ,  
С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, М.В. ГРИШАЕВ

*МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСОРБЦИИ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ВОЛЬФРАМА ПРИ  
ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....29*

И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, Ф.С. ПОДОЛЯКО<sup>2</sup>

*ЛИНЕЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА С ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫМ  
РАЗРЯДОМ.....32*

В.В. КУЛАГИН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН,  
М.М. ХАРЬКОВ

*ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ВОЛЬФРАМА В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ НА РОСТ  
ВОЛЬФРАМОВОГО НАНОПУХА.....35*

С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, А.В. ДЕДОВ<sup>1</sup>, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>2</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,3</sup>,  
А.В. ВЕРТКОВ<sup>2</sup>, Ю.В.МАРТЫНЕНКО<sup>3,1</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,3</sup>,  
А.В. ЗАХАРЕНКОВ<sup>1</sup>, М.В.ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>,  
Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. ЧАН КУАНГ<sup>1</sup>, К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>,  
А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>, А.И. АМЕЛИН<sup>1</sup>

*РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВОЙ КПС В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ  
УСТАНОВКИ ПЛМ .....36*

С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, Е.В. КРЫЛОВА<sup>1</sup>,  
М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>,  
В.Ф. ЧИННОВ<sup>1</sup>, А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. ЧАН КУАНГ<sup>1</sup>,  
К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>, А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>

*ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ  
ИСПЫТАНИЙ В ПЛМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ.....40*

Ю.Г. РУКИНА, С.С. ДОВГАНЮК, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

*ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРИ НАПЫЛЕНИИ В ПЛАЗМЕ АТОМОВ АЛЮМИНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, И ЗАХВАТ В НИХ ГАЗА*  
.....44

Г.К. ЖАНБОЛАТОВА, В.В. БАКЛАНОВ, Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ,  
А.Ж. МИНИЯЗОВ, И.А. СОКОЛОВ

*КАРБИДИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ*.....46

И.А. СОКОЛОВ<sup>1</sup>, М.К. СКАКОВ<sup>2</sup>, А.Ж. МИНИЯЗОВ<sup>1</sup>,  
Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ<sup>1</sup>

*ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С БЕРИЛЛИЕМ*.....49

Н.С. СЕРГЕЕВ<sup>1,2</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,3</sup>, Ф.С. ПОДОЛЯКО<sup>1</sup>

*МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА*.....52

А.С. УМЕРЕНКОВА, З.Р. АРУТЮНЯН, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ,  
А.А. ПИСАРЕВ

*ЗАХВАТ ТЕПЛОВЫХ АТОМОВ И МОЛЕКУЛЯРНОГО ДЕЙТЕРИЯ В ТИТАН* .....55

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

*ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ИЗ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА ИОНАМИ ГЕЛИЯ И АРГОНА*.....58

А.А. РЕЗВАН<sup>1</sup>, В.С. КЛИМИН<sup>1,2</sup>, Т.С. КЛИМИНА<sup>1</sup>, Р.В. ТОМИНОВ<sup>1,2</sup>,  
Ю.В. МОРОЗОВА<sup>1</sup>, Т.А. ЗУБОВА<sup>1</sup>

*ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФЕНОПОДОБНОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ* .....61

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, Ю.В. МАРТЫНЕНКО<sup>1</sup>,  
М.Н. ЕГОРИХИНА<sup>3</sup>, А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>,  
М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, М.В. БУДАЕВА<sup>4</sup>, Д.Я. АЛЕЙНИК<sup>3</sup>, Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>,

Г.Б. ВАСИЛЬЕВ <sup>1</sup> , К.А. РОГОЗИН <sup>1</sup> , А.А. КОНЬКОВ <sup>1</sup> , С. БЕЛОУСОВ <sup>1</sup> <i>ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ</i> .....	63
М.Ю. ЖАРКОВ <sup>1</sup> , А.В. ВЕРТКОВ <sup>1</sup> , И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ <sup>1,2</sup> , Г.Е. НОТКИН <sup>3</sup> , С.А. ГРАШИН <sup>3</sup> , В.А. ВЕРШКОВ <sup>3</sup> <i>ПОДГОТОВКА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ПРИЕМНОЙ ПЛАСТИНЫ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА Т-15МД</i> .....	67
А.В. ВЕРТКОВ <sup>1</sup> , М.Ю. ЖАРКОВ <sup>1</sup> , И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ <sup>1,2</sup> , И.Л. ТАЖИБАЕВА <sup>3</sup> , Ю.В. ПОНКРАТОВ <sup>3</sup> , Ю.Н. ГОРДИЕНКО <sup>3</sup> <i>ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА КТМ</i> .....	71
А.А. ВАСИЛЬЕВ <sup>1,3</sup> , А.С. АРАКЧЕЕВ <sup>1,2,3</sup> , А.В. БУРДАКОВ <sup>1,3</sup> , Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ <sup>1,2,3</sup> , И.В. КАНДАУРОВ <sup>1</sup> , А.А. КАСАТОВ <sup>1,2,3</sup> , В.В. КУРКУЧЕКОВ <sup>1,2</sup> , Г.Г. ЛАЗАРЕВА <sup>2,3,4</sup> , А.Г. МАКСИМОВА <sup>1,2,4</sup> , В.А. ПОПОВ <sup>1,2</sup> , А.А. РУКТУЕВ <sup>1,3</sup> , А.А. ШОШИН <sup>1,2</sup> <i>IN-SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЛЬФРАМ НА УСТАНОВКЕ ВЕТА В ИЯФ СО РАН</i> .....	75
О. V. OGORODNIKOVA <sup>1</sup> , N.S. KLIMOV <sup>2</sup> , YU.M. GASPARYAN <sup>1</sup> , V.S. EFIMOV <sup>1</sup> , D. KOVALENKO <sup>2</sup> , K. GUTAROV <sup>1,2</sup> , A.G. POSKAKALOV <sup>1</sup> , М. М. КНАРКОВ <sup>1</sup> , А. V. KAZIEV <sup>1</sup> <i>DEUTERIUM AND HELIUM RETENTION AND CORRESPONDING MODIFICATIONS OF W-BASED MATERIALS UNDER STATIONARY OPERATION REGIME AND TRANSIENTS</i> .....	79
Я.А. ВАСИНА <sup>1</sup> , А.С. ПРИШВИЦЫН <sup>1</sup> , А.С. ДЖУРИК <sup>1</sup> , В.Г. ОТРОЩЕНКО <sup>1</sup> , В.Б. ЛАЗАРЕВ <sup>1</sup> , С.В. МИРНОВ <sup>1</sup> <i>ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ЛИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ НА ТОКАМАКЕ Т-11М</i> .....	81
А.В. ДЕДОВ <sup>1</sup> , А.Т. КОМОВ <sup>1</sup> , А.В. ЗАХАРЕНКОВ <sup>1</sup> , В.П. БУДАЕВ <sup>1,2</sup> , С.Д. ФЕДОРОВИЧ <sup>1</sup> , А.Н. ВАРАВА <sup>1</sup> , А.В. КАРПОВ <sup>1,2</sup> , А.С. ДЕМИДОВ <sup>1</sup>	

К.В. ЖУРАВЛЕВ<sup>1</sup>, В.С. ШТЕЛИНГ<sup>1</sup>

*ИСПЫТАНИЯ МОЩНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ ОПЫТНЫХ МАКЕТОВ  
ВОЛЬФРАМОВЫХ ДИВЕРТОРНЫХ МОДУЛЕЙ С ВОДО-ДИСПЕРСНОЙ  
СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ.....82*

В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1</sup>, Ю.В.МАРТЫНЕНКО<sup>2,1</sup>,  
А.В. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, А.П. СЛИВА<sup>1</sup>, А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>,  
М.В.ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, М.К. ГУБКИН<sup>1</sup>, Д.И. КАВЫРШИН<sup>1</sup>,  
Г.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. ЧАН КУАНГ<sup>1</sup>, К.А. РОГОЗИН<sup>1</sup>, А.А. КОНЬКОВ<sup>1</sup>,  
С.В. БЕЛОУСОВ<sup>1</sup>

*ИСПЫТАНИЯ ПУЧКОВЫМИ И СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ  
НАГРУЗКАМИ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ  
ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА-РЕАКТОРА .....86*

С.А. КРАТ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, Я.А. ВАСИНА<sup>1</sup>, А.К. ХОМЯКОВ<sup>1</sup>,  
Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>

*СПОСОБЫ ОЧИСТКИ ОСАЖДЁННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ ЛИТИЕВЫХ СЛОЁВ ОТ  
ТЯЖЁЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ .....90*

Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, А.А. ПИСАРЕВ

*ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОРОДА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ  
ВОЛЬФРАМА .....92*

М.М. TSVENTOUKH

*ESTIMATION OF IONS CHARGE IN PLASMA OF VACUUM ARC CATHODE SPOT 96*

**МАТЕРИАЛЫ  
XXIV КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 4-5 января 2021 г.