

## МАТЕРИАЛЫ XXIX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Москва  
2026

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

---

МАТЕРИАЛЫ  
XXIX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Сборник научных трудов

Москва, НИЯУ МИФИ, 5-6 февраля 2026 г.

Москва  
2026

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

Материалы XXIX Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью»: Сборник научных трудов. Москва, 5-6 февраля 2026 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2026. – 92 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 29-ю международную конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза.

Материалы сборника могут быть полезны научным работникам, аспирантам и студентам в научно-исследовательской, учебно-методической и практической работе.

Аннотации докладов, входящих в сборник, опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Материалы получены до 28 января 2026 г.

*Редакционная коллегия:*

*Ю.М. Гаспарян*  
*Д.Н. Синельников*  
*М.В. Гришаев*

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
2026

**ISBN 978-5-7262-3227-0**

Ю.М. ГАСПАРЯН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ВРЕМЯ ЖИЗНИ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК**

Ресурс обращенных к плазме элементов (ОПЭ) будет существенно влиять на эффективность работы энергетических установок на основе управляемого термоядерного синтеза, так как их замена является очень затратной по времени и дорогостоящей процедурой. Среди ключевых факторов, ограничивающих ресурс ОПЭ, можно выделить распыление ионами и нейтральными частицами плазмы, деградация механических и теплофизических свойств под действием нейтронного облучения, а также макроскопические повреждения в ходе локальных повышенных тепловых нагрузок.

Наилучшие характеристики удержания плазмы в токамаках получены при использовании материалов облицовки и покрытий на основе элементов с низким атомным номером (В, Ве, С, Li). При этом скорость физического распыления этих материалов достаточно велика. По оценкам [1] для ИТЭР при использовании бериллия скорость распыления ОПЭ может достигать 0,4 – 4 нм/сек в зависимости от равномерности эрозии по площади поверхности. При толщине облицовки менее 1 см, ее полное распыление можно ожидать после нескольких месяцев непрерывной работы токамака.

Для вольфрама скорость распыления стенки значительно меньше, что в совокупности с высокими теплофизическими характеристиками определяет интерес к этому материалу и сплавам на его основе. При этом предельно допустимая концентрация примесей вольфрама в плазме также очень мала, что требует особого контроля распыления ОПЭ. Вольфрам имеет высокий порог распыления для изотопов водорода, однако порог значительно ниже для примесей в плазме, которые неизбежны в плазме. Помимо естественных примесей (О,С), уровень которых стараются уменьшить, в базовом сценарии ИТЭР предполагается напуск примесей неона (или аналогов) для перераспределения тепловых нагрузок в диверторной области. Дополнительные сложности могут вызывать униполярные дуги и другие нестационарные процессы, приводящие к повышенной скорости эрозии.

Альтернативным подходом к увеличению ресурса ОПЭ являются различные концепции возобновления поверхности ОПЭ на основе материалов с низким атомным номером, в первую очередь, бора или лития. Наиболее

перспективными являются методы, допускающие возобновление поверхности непосредственно в ходе разряда. Это может быть сделано путем инъекции микрос частиц или газа в пристеночную область [2,3], при этом предполагается, что напыление покрытия будет происходить в зоне максимальной эрозии, т.к. составляющие элементы покрытия приносятся потоком плазмы. Самовозобновление поверхности обеспечивает также использование ОПЭ на основе жидких металлов, таких как литий. Рассматриваются возможности реализации ОПЭ на основе капиллярно-пористых систем [4] или медленно текущего слоя жидкого металла [5].

Другим следствием интенсивной эрозии поверхности ОПЭ является непрерывный рост пленок в областях преимущественного осаждения. Перенапыленные слои могут накапливать значительные количества изотопов водорода, а также могут отслаиваться по мере увеличения толщины, что негативно сказывается на стабильности протекания плазменных разрядов. Потенциально более простой кажется реализация сбора легкоплавкого лития в жидком виде или путем конденсации в наиболее холодных областях.

Нестационарные нагрузки на ОПЭ в ходе переходных процессов представляют дополнительную сложность, так как они обычно сильно неравномерны по поверхности стенки.

Учитывая возможность различных повреждений ОПЭ и возможность регулярного возобновления поверхности, стоит отметить важность развития методов дистанционного контроля состояния поверхности ОПЭ.

## **Литература**

- [1] J. Roth et al. *Journal of Nuclear Materials* 390–391 (2009) 1–9.
- [2] A. Bortolon, et al. *Nuclear Materials and Energy* 19 (2019) 384–389.
- [3] Л.Б. Беграмбеков и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1.
- [4] S.V. Mirnov. *Nuclear Fusion*, 59 (2019) 015001.
- [5] L. Zakharov. *Nuclear Fusion*, 59 (2019) 096008.

## **ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА, ВКЛЮЧАЯ ВОЛЬФРАМОВЫЕ И ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ**

Испытания внутрикамерных конструкционных материалов высокими плазменными нагрузками в современных токамаках (вольфрама в JET, WEST, EAST, KSTAR, AUG, T-10 и других, графита в JET, T-10, TFTR, TEXTOR и других, бериллия в JET, молибдена в EAST, жидко-металлических конструкций с использованием лития в T-11M, T-10) выявили их деградацию под действием плазмы: эрозию, плавление и даже разрушение, см. [1]. Эрозия материалов в таких экспериментах приводила к поступлению примесей в разряд, ухудшая эффективность магнитной термоизоляции плазмы. В токамаках и других термоядерных установках (ТУ) критическое воздействие на обращённые к плазме компоненты (ОПК) связано как с высокими плазменно-тепловыми нагрузками, так и с коллективными эффектами в центральной и периферийной зоне плазменного разряда (см. [1,2]). Взаимодействие плазма-стенка (ВПС) в ТУ характеризуется множественными эффектами, включая такие процессы как интенсивная эрозия поверхности под действием мощных потоков частиц и тепла, переосаждение эродированного материала на поверхность, длительная динамика исходного и осаждённого материала на поверхности под действием электрических и магнитных полей в приповерхностной плазме. Особенности взаимодействия плазма-стенка в ТУ – движение частиц плазмы в сильном магнитном поле под действием сильной турбулентности плазмы [3], неамбиполярность потоков плазменных частиц, униполярные дуги, неоднородные токи из плазмы на поверхность разрядной камеры. Эти эффекты взаимосвязаны, действуют одновременно, в результате воздействие плазмы на обращённые к плазме материалы регулируется не отдельными процессами, а приобретает синергетический характер коллективного влияния многих процессов взаимодействия плазма-стенка. На границе плазменного разряда в ТУ в зоне контакта плазмы с материалами разрядной камеры наблюдается сильная турбулентность [3], которая влияет на параметры ВПС, в том числе, формируя мощные нестационарные турбулентные потоки частиц и тепла на материалы обращённые к плазме, формируя локальные зоны

перегрева поверхности стенки.

Вышеперечисленные эффекты имеют значительную неоднородность в пространстве и нестационарность, действуя на обширном временном диапазоне (от десятков наносекунд до часов) и пространственных масштабах от нанометров до миллиметров. В крупном токамаке и термоядерном реакторе (в том числе, в ИТЭР) такие процессы, действуя одновременно, создают риски деградации и разрушения ОПК первой стенки и дивертора, приводят к снижению эффективности термоизоляции из-за поступления примесей в разряд.

Несмотря на многочисленные экспериментальные данные испытаний материалов в токамаках, их ещё не достаточно для обоснования выбора материалов и конструкций ОПК термоядерного реактора: длительность разрядов в предыдущих экспериментах на токамаках была несколько секунд, флюенс был на порядки меньше реакторного, не проводились в достаточной подробности исследования взаимовлияния процессов ВПС (дуговые процессы, эффекты экранирования поверхности плотной плазмы испарённых материалов и др.). Предпринимаемые попытки расчетно-теоретического рассмотрения проблемы (удаётся описать лишь отдельные механизмы в узком диапазоне пространственно-временных масштабов) не обеспечивают нужной детальности описания ВПС в ТУ ввиду сильной нелинейности и вовлечения множества эффектов. Поэтому в современных условиях следует проводить испытания материалов термоядерного реактора в специальных стационарных плазменных установках (т.н. симуляторах дивертора) [4], в мощных плазменных ускорителях (следует особо отметить, что тепловых испытаний в мощных электронно-лучевых установках недостаточно из-за доминирующего влияния на стойкость ОПК эффектов ВПС в сравнении с эффектами локального перегрева). Внимание следует уделить экспериментальным исследованиям стойкости материалов ОПК под действием ожидаемых в реакторе плазменных нагрузок многочасовой длительности, которые недоступны в современных токамаках, что и обусловило актуальность испытаний в плазменных симуляторах дивертора. Такие работы на крупномасштабных симуляторах дивертора начинаются в Китае (SWORD в комплексе CRAFT), в США (MPEX), в ЕС (MAGNUM-PSI). В России работы проводятся на симуляторах дивертора ПР-8, ПЛИМ-М.

В последние годы эксперименты в токамаках с ОПК на основе вольфрама при критически высоких стационарных нагрузках до десяти МВт/м<sup>2</sup> и на порядки больше импульсных нагрузках (см. [1]), а также плазменно-тепловые испытания вольфрамовых материалов и теплозащитной облицовки в

плазменных установках (симуляторах дивертора и КСПУ) показали, что ожидаемое преимущество металлической стенки из вольфрама не оправдывается из-за негативного влияния большого поступления атомов расплывленного металла в плазменный разряд, приводя к радиационному охлаждению, и формирования под действием плазмы поверхностных пористых слоев, поглощающих большое количество рабочего газа. Для постановки корректных задач испытаний следует учесть полученные в последние годы экспериментальные результаты, которые указывают на универсальный характер модификации материалов (вольфрама, молибдена, графита, стали и др.) под действием длительных плазменных нагрузок: доминирующим фактором модификации материалов (в том числе, формирование пористости) являются коллективные эффекты в системе плазма-стенка, в меньшей степени влияет химический элементный состав и индивидуальные физические характеристики материала. Поэтому на данном этапе нет необходимости разрабатывать новые материалы и следует обоснованно использовать вольфрам марки ВМП промышленного производства (W-ITER Grade), с достаточно хорошими металлофизическими свойствами и применяемый для изготовления облицовки дивертора ИТЭР. Отработка технологии защитного покрытия вольфрама, в том числе борсодержащими материалами, должна проводиться на основе физики ВПС.

При испытании жидкометаллических компонентов (ЖМК) на основе лития, олова, галлия в токамаках и других ТУ выявили не только их преимущества в качестве КОП, но и негативные эффекты, которые требуют дальнейшего исследования для выработки технологии применения ЖМК в термоядерном реакторе (ТЯР) и крупномасштабном токамаке, в том числе в ТРТ. Применение капиллярно-пористых систем с литием (в Т-10, ПЛМ и др.) приводило к формированию карбонатов лития при пересадке на стенки камеры испаренного с КПС лития. Такой материал (карбонат лития) является непроводящей керамикой с пористой структурой, последствия её образования на стенках камеры токамака приводит к изменению ВПС, ухудшая характеристики удержания плазмы. Малое число проведенных экспериментов с оловом и галлием в ЖМК не позволяет оценить их преимущества для реактора. Требуется провести обширные исследования и испытания ЖМК в симуляторах дивертора.

В целом, актуальность исследований и испытаний перспективных ОПК состоит в необходимости подробного изучения механизмов ВПС при длительном многочасовом плазменном облучении и выявлении универсальных закономерностей для разработки ОПК. Критически важной

остается задача разработки эффективных систем охлаждения ОПК.

План испытаний и исследований перспективных материалов и конструкций первой стенки и дивертора термоядерного реактора, включая вольфрамовые и жидкометаллические, должен содержать:

- плазменные испытания вольфрамовых охлаждаемых модулей в симуляторах дивертора с мощностью стационарной нагрузки от 1 МВт/м<sup>2</sup> до 10 МВт/м<sup>2</sup> с комбинированным испытанием импульсными нагрузками, соответствующих ЭЛМам в токамаке-реакторе;

- исследование дуговых процессов и плазменного экранирования в приповерхностном слое испаренного материала вольфрамовых и жидкометаллических модулей при мощных плазменно-тепловых нагрузках в симуляторах дивертора;

- испытания в симуляторах дивертора вольфрамовых модулей с защитным покрытием борсодержащими материалами;

- испытания лимитерных систем с жидкометаллическим капельным потоком с использованием лития, олова, галлия в плазменных установках;

- исследование роста под плазменной нагрузкой пористых вольфрамовых и других материалов и испытание их мощными плазменными нагрузками;

- испытания схем интенсивного охлаждения, в том числе двухфазного с газо-жидкостным теплоносителем, с термостабилизацией при тепловой нагрузке мощностью до 10 — 15 МВт/м<sup>2</sup> на поверхность вольфрамовых и жидкометаллических охлаждаемых модулей.

Такие испытания необходимо провести на плазменных стационарных симуляторах дивертора и импульсных плазменных установках в России: ПР-8, ПФ-3, ПЛМ-М, ПР-2, КСПУ-Т, КСПУ-Ве.

Работа выполнена по теме 15П НИЦ «Курчатовский институт».

### **Литература**

- [1]. Будаев В.П. ВАНТ. Термоядерный синтез. 2015, 38, 4, 5.
- [2]. Budaev V. P. JETP Letters. 2017, 105 (5), 307.
- [3]. Будаев В. П. и др. УФН. 2011, 181, 905.
- [4]. Budaev V. P. et al. Fusion Science Technology. 2022, 79, 407.

Е.Ю. ТУЛУБАЕВ<sup>1\*</sup>, И.Л. ТАЖИБАЕВА<sup>1</sup>, Ю.Н. ГОРДИЕНКО<sup>1</sup>,  
Е.А. МАРТЫНЕНКО<sup>1</sup> Ю.В. ПОНКРАТОВ<sup>1</sup>, А.Н. СЛЮЯНОВ<sup>1</sup>,  
А.В. ВЕРТКОВ<sup>2</sup>, М.Ю. ЖАРКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт атомной энергии Национального ядерного центра РК, Курчатов,  
Республика Казахстан*

<sup>2</sup>*АО «НИКИЭТ», Москва, Российская Федерация*

*\*tulubaev@nnc.kz*

## **СОЗДАНИЕ ПОДВИЖНОГО ЛИТИЕВОГО МОДУЛЯ НА ПРИЕМНОМ ДИВЕРТОРНОМ УСТРОЙСТВЕ ТОКАМАКА КТМ**

Опыт применения литиевых технологий в термоядерных установках показывает, что использование лития в качестве плазмообращенного материала ОПМ позволяет снизить энергетические нагрузки на первую стенку и дивертор, облегчая тем самым проблему отвода тепла от внутрикамерных элементов. Кроме того, применение лития способствует улучшению плазменных параметров за счет снижения эффективного зарядового числа плазмы до значений, близких к единице. Способность жидкого лития к самообновлению поверхности, взаимодействующей с плазмой, открывает перспективы для разработки новых внутрикамерных устройств с практически неограниченным ресурсом работы. [1].

В Национальном ядерном центре Республики Казахстан также ведутся исследования по использованию литиевых капиллярно-пористых структур (КПС) в качестве внутрикамерных элементов термоядерных реакторов. В рамках этих работ были реализованы ряд уникальных разработок, впервые предложенных для литиевых систем термоядерных реакторов и, в частности, непосредственно для Казахстанского материаловедческого токамака КТМ [2].

На сегодняшний день большинство исследований проводилось с литиевыми внутрикамерными элементами (диверторами, лимитерами), находящимися в стационарном состоянии. Следующим этапом являются эксперименты с подвижным модулем дивертора на основе литиевой КПС. Внедрение подвижного модуля позволит, во-первых, выводить модуль из диверторной области при проведении экспериментов на токамаке КТМ в тех случаях, когда его присутствие в зоне дивертора не желательно по условиям испытаний. Во-вторых, это даст возможность оценить влияние лития на плазменные параметры токамака КТМ.

Для проведения исследований на первом этапе были определены ключевые параметры подвижного модуля. На основании конфигурации плазмы (рисунок 1) и распределения максимальной плазменной нагрузки на диверторное приемное устройство (рисунок 2) было установлено

оптимальное расположение подвижного модуля на диверторной пластине, а также определены его геометрические характеристики.

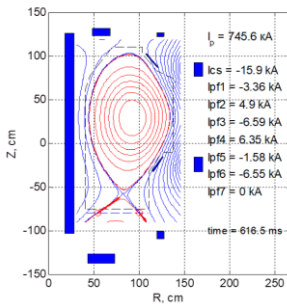


Рисунок 1 – Конфигурации плазмы в моменты сценария ввода тока плазмы  $I_p$  до 750 кА

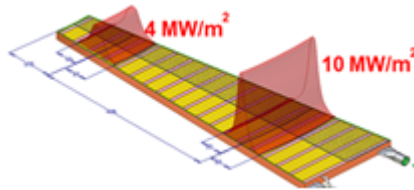


Рисунок 2 – Распределение тепловой нагрузки по приемной поверхности литиевого модуля

Как показывают эксперименты с литиевым модулем, проведённые на токамаке COMPASS и описанные в работе [3], применение криволинейной поверхности (в форме конуса или полуконуса) позволяет регулировать величину теплового потока в зависимости от степени выдвижения модуля в диверторную область. На основании этих результатов была выбрана форма диверторного модуля в виде полукруга (рисунок 3).

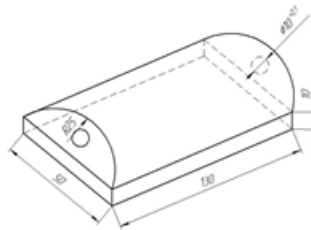


Рисунок 3 – Литиевый модуль

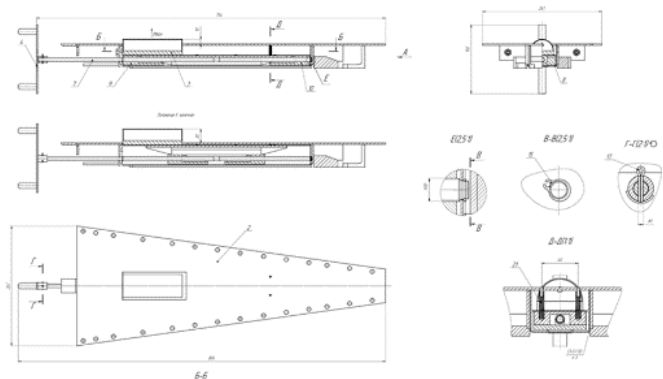


Рисунок 4 – Сборочный чертеж приемного диверторного устройства с подвижным модулем

После определения основных параметров литиевого модуля дивертора была разработана конструкция подъемного устройства, рисунок 4. На её основе выполнен расчет теплового поля модуля сегмента дивертора при плазменном облучении на токамаке КТМ с использованием программного комплекса ANSYS Fluent.

Тепловой расчет показал следующее:

- при плотности теплового потока на поверхность литиевой КПС  $5 \text{ МВт/м}^2$ , через 1 секунду максимальная температура модели составит  $403 \text{ }^\circ\text{C}$ , а средняя температура КПС около  $\sim 275^\circ\text{C}$ ,
- при плотности теплового потока  $10 \text{ МВт/м}^2$ , через 2 секунды максимальная температура достигнет  $711^\circ\text{C}$ , а средняя  $\sim 378^\circ\text{C}$ ,
- при плотности потока на поверхность КПС  $20 \text{ МВт/м}^2$  через 5 секунд максимальная расчетная температура составит  $1900^\circ\text{C}$ , при этом средняя температура КПС не превысит  $917^\circ\text{C}$ .

Температура плавления молибдена составляет  $2623^\circ\text{C}$ . С учетом эффекта переизлучения на нейтральных атомах лития [4] можно сделать заключение, что фактическая температура литиевой КПС будет ниже расчётной. Следовательно, при указанных режимах облучения сегмент дивертора не подвергнется разрушению и сохранит свою форму.

Проведенные тепловые расчёты подтвердили обоснованность выбора конструкционных материалов для подвижного модуля дивертора. На следующем этапе, на основе разработанной конструкторской документации, был реализован процесс изготовления подвижного модуля дивертора МСД. По результатам постсборочных испытаний установлено, что подвижный

модуль функционирует в соответствии с проектными требованиями, обеспечивая надёжное управление и контроль рабочих режимов рисунк 5.



Рисунок 5 – Приемное диверторное устройство с подвижным модулем в сборе

Полученные результаты подтверждают целесообразность и техническую возможность проведения дальнейших стендовых испытаний подвижного литиевого модуля.

Работа выполняется при поддержке Агентства по атомной энергии Республики Казахстан (ИРН – BR23891779 НТП «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).

### **Литература**

[1] Lei Han. Enhanced erosion of lithium surface with capillary porous system / Han Lei, Gou Fujun, Cao Xiaogang, Ma Xiaochun, He Pingni, Cao Zhi, Xia Wenxing, Shu Lei, Wei Jianjun // Fusion Eng. Des. – 2017. – Vol. 121. – P. 308–312.

[2] Е.Ю. Тулубаев, В.Н. Кудияров, Н.Н. Никитенков, И.Л. Тажибаева, А.В. Вертков, М.Ю. Жарков, Ю.В. Понкратов, Ю.Н. Гордиенко, В.С. Бочков, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МАКЕТА МОДУЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА (МЛД) В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК // ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2024, том 15, № 3, с. 291–299.

[3] R. Dejarnac, J. Horacek, M. Hron, M. Jerab, J. Adamek, S. Atikukke, P. Barton, J. Cavalier, J. Cecrdle, M. Dimitrova, E. Gauthier, M. Iafrazi, M. Imrisek, A. Marin Roldan, G. Mazzitelli, D. Naydenkova, A. Prishvitcyn, M. Tomes, D. Tskhakaya, G. Van Oostf, J. Varju, P. Veis, A. Vertkov, P. Vondracek, V. Weinzettl Overview of power exhaust experiments in the COMPASS divertor with liquid metals, Journal of Nuclear Materials and Energy 25 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100801>.

[4] Vadim Bochkov, et. al. 2022 Development of a methodology for conducting experiments with a sample of tin-lithium eutectic at a plasma-beam installation. Materials today: Proceedings, Vol. 81, P. 1198-1203, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.431>.

Голубева А.В.<sup>1\*</sup>, Литовченко И.Ю.<sup>2</sup>, Чернов В.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> - НИЦ «Курчатовский институт», Москва

<sup>2</sup> - Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>3</sup> - АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, Москва

\*Golubeva\_av@nrcki.ru

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЯЖ

В качестве конструкционных материалов термоядерных реакторов традиционно рассматривают аустенитные никелевые стали, малоактивируемые ферритно-мартенситные стали (МФМС), сплавы ванадия. Альтернативой перечисленным материалам могут послужить малоактивируемые аустенитные хромомарганцевые стали (МАОХМС). В России недавно разработана малоактивируемая аустенитная хромомарганцевая сталь (МАОХМС), исследован ряд её свойств [1].

В докладе сравниваются характеристики отечественных материалов перечисленных четырех классов:

- аустенитные никелевые стали (12Х18Н10Т, ЭК-164);
- МФМС;
- сплав V-4Cr-4Ti;
- МАОХМС Fe11Cr23MnWVTi.

Приводятся термомеханические характеристики, данные по микроструктуре, параметры взаимодействия с изотопами водорода, обсуждается степень их промышленного освоения.

### Литература

[1] A.V. Golubeva, T.A. Shishkova, N.O. Stepanov, A.E. Aleshin, A.P. Persianova, D.A. Kozlov, D.I. Cherkez, I.Yu. Litovchenko, V.M. Chernov, Deuterium interaction with low-activated chromium-manganese austenitic steel with increased content of carbide particles, Manuscript of Fusion energy conference (FEC), 2025, 8 pages,

[https://conferences.iaea.org/event/392/papers/36234/files/13399-Manuscript\\_FEC%202025%20Golubeva%20A.pdf](https://conferences.iaea.org/event/392/papers/36234/files/13399-Manuscript_FEC%202025%20Golubeva%20A.pdf)

Г.М. ТАРАСЮК, Н.А. СУВОРОВ, В.А. СТЕПАНОВ, А.А. ПИСАРЕВ.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

## **ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ МОЛИБДЕНА ЛИТИЕМ**

Одна из концепций диверторов и лимитеров токамака основана на использовании тонкого текущего по поверхности слоя жидкого лития, как материала, обращенного к плазме. Для обеспечения полного покрытия поверхности литием без возникновения «сухих» зон необходимо хорошее смачивание поверхности литием. Плазменная обработка, которая широко применяется в промышленности для улучшения смачиваемости материалов и изделий из них, могла бы также улучшить смачиваемость металлов и жидким литием.

В литературе описано несколько экспериментов по смачиванию стали, молибдена и вольфрама после плазменной обработки, но они продемонстрировали качественно противоположные результаты. В одних случаях смачиваемость улучшалась, в других ухудшалась. При этом наилучший результат соответствовал углу смачивания нержавеющей стали около  $10^\circ$  при температуре поверхности около  $400^\circ\text{C}$ .

В нашей работе исследовалось смачивание молибдена температурах  $200\text{--}300^\circ\text{C}$ , более предпочтительных с точки зрения уменьшения испарения лития.

Угол смачивания исходной поверхности при  $300^\circ\text{C}$  был не меньше  $110^\circ$ . После плазменной обработки он уменьшался лишь до  $60^\circ$ . Предполагалось, что неудовлетворительное смачивание может быть связано с наличием поверхностного слоя, устойчивого к обработке в плазме. После механической шлифовки и без плазменной обработки образца угол смачивания также составил примерно  $60^\circ$  при  $300^\circ$ . Однако при комбинации шлифовки и последующей плазменной обработки капля лития полностью растеклась по поверхности. Такой же результат был получен и при меньшей температуре порядка  $250^\circ\text{C}$ . При еще меньшей температуре  $200^\circ\text{C}$ , наблюдалось либо полное растекание капли по всей поверхности образца, либо формирование капли с малым углом смачивания около  $15^\circ$ . То есть отличное смачивание или даже полное растекание лития по поверхности молибдена можно обеспечить даже при температурах лишь незначительно превышающих температуру плавления.

В.П. АФАНАСЬЕВ<sup>2</sup>, Л.Г. ЛОБАНОВА<sup>1,2\*</sup>, М.А. СЕМЕНОВ-ШЕФОВ<sup>2</sup>, П. А.  
ЕДЕЛЬБЕКОВА<sup>3</sup>, Л.С. ВОЛКОВА<sup>3</sup>, L. ZHANG<sup>1</sup>, H. LIU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China*

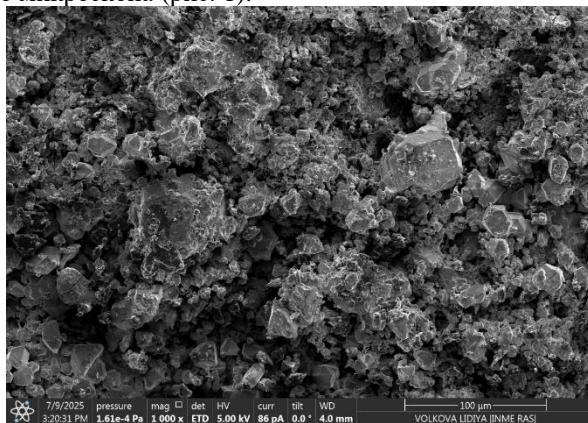
<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

<sup>3</sup>*ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва, Россия*

*\*lidiia@ipp.ac.cn*

## **ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПРОЧНОГО ГРАФИТА МАРКИ АТJ, ОБРАЩЕННОГО К ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА EAST**

Исследование мелкозернистого прочного графита марки АТJ типа графита марки МПГ-8, длительное время используемого в качестве обращенного к плазме защитного материала токамака EAST, показало, что поверхность графита покрыта сверкающими кристаллами алмазоподобных покрытий (АПП). Поверхность алмазоподобного покрытия представляет весьма неровную структуру, поскольку исходный материал – графит марки типа МПГ-8 – материал, степень пористости которого составляет 17–18%. Однако, как отмечено в работе [1], в результате плазменного воздействия степень пористости возрастает до 20%. Рассматриваемый тип АПП своей структурой, представляющей россыпь кристаллов, заметно отличается от имеющихся в литературе АПП, что отчетливо наблюдается на фото, полученном с помощью электронного микроскопа (рис. 1).



«Рисунок 1 – Электронная микроскопия графитового образца»

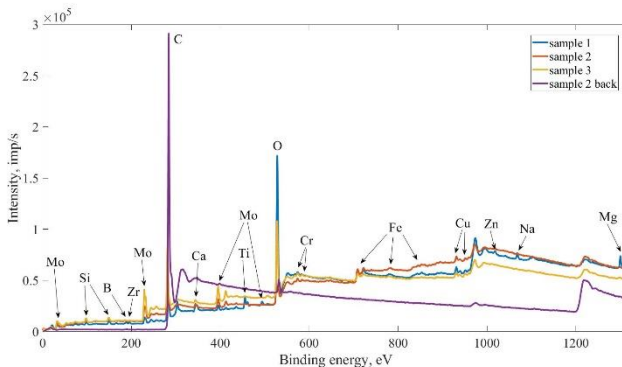
Рис. 1 демонстрирует, что размер кристаллов меняется в пределах от 5 до

30 мкм. В работе [2] отмечалось, что размер зерен графита марки МПГ-8 составляет 30–90 мкм; в работе [3] – 8–10 мкм. Рис. 1 показывает, что размер кристаллов АПП соответствует размеру зерен в мелкозернистых графитах. В алмазоподобности (высочайшей прочности) данного покрытия авторы убедились, когда, нарезаая из массива образцы размером 10x10x3 мм для проведения исследований, затупили несколько полотен ножовки по металлу.

Исследование компонентного состава поверхности графита, обращенной к плазме, выполнено с помощью рентгеноспектрального анализа, который показал содержание следующих элементов: С, О, Si, S, Fe, Cu, N, Na, Ca, W и Мо. Подчеркнем, что рентгеноспектральный анализ дает информацию о компонентном составе мишени в слое толщиной, примерно равной транспортному пробегу  $l_{tr}$  зондирующих электронов. В нашем случае, для начальной энергии электронного пучка  $E_0 = 5$  кэВ,  $l_{tr} = 0.6$  мкм.

Наличие конструкционных элементов токамака на обращенной к плазме поверхности графита связано с зарядкой графитового образца и, как следствие, возникновением электрических дуг, следы которых присутствуют на торцах графитовых защитных плит.

Измерены РФЭС спектры на установке Kratos Axis Ultra DLD с использованием K $\alpha$  линии Al с монохроматором в геометрии «magic angle». Заметим, что информационная глубина РФЭС анализа, определяемая средней длиной свободного неупругого пробега электронов, на три порядка меньше информационной глубины рентгеноспектрального анализа и составляет несколько нанометров.



«Рисунок 2 – Обзорные РФЭС спектры»

РФЭС спектры измерены для трех различных областей поверхности образца (sample 1, 2, 3), в глубине образца (sample 2 back) и для обратной

стороны образца графита. При проведении РФЭС измерений зарядка образца наблюдалась только при анализе областей поверхностного слоя с алмазоподобным покрытием, что указывает на его диэлектрические свойства. Обратная сторона образца № 2 – слой, расположенный на глубине 3 мм от поверхности, взаимодействующей с плазмой, при РФЭС анализе не заряжался. Не заряжались и более глубокие слои образца (толщина образца 21 мм).

Традиционный Peak Shape Analysis РФЭС спектров показал наличие в обращенной к плазме поверхности кроме углерода, следующих элементов: O, Si, B, Zr, Mo, Ca, Ti, Cr, Fe, Cu, Zn, Mg и Na, что находится в соответствии с рентгеноспектральным анализом.

О наличии в поверхностях, обращенных к плазме, алмазоподобных структур говорит увеличенная ширина 1s пика C, состоящая из суперпозиции 1s пика C в  $sp^2$  и  $sp^3$  гибридизации. Эта особенность отмечалась в работе [4]. К уширению 1s пика приводит и наличие в поверхностных слоях углеводов [5].

Уникальные свойства АПП представляют интерес для их использования в устройствах микро- и оптоэлектроники. Такие качества АПП как твердость, износостойкость и гладкость (коэффициент трения АПП плёнки против полированной стали варьируется в пределах от 0.05 до 0.20) очень важны при создании механических устройств. Широкие возможности свойства АПП открывают при использовании графита в качестве материала первой стенки термоядерных реакторов.

Однако АПП обладают рядом свойств, которые необходимо устранить для их эффективного использования в конкретной ситуации. Так диэлектрические свойства недопустимы при работе АПП в качестве материала, обращенного к плазме, т.к. происходит зарядка поверхности, вследствие чего возникают разряды, разрушающие поверхность. Общим недостатком является процесс графитизации АПП при температурах, превышающих 300°C. Не стоит забывать, что алмаз – метастабильная фаза углерода. У ряда АПП (как не содержащих водород, так и гидрогенизированных) имеется низкая адгезия к подложке и высокий уровень сжимающих остаточных напряжений.

Чтобы устранить или уменьшить эффект от этих недостатков, при формировании АПП проводят их легирование различными элементами. Так, введение атомов металла в алмазоподобную углеродную матрицу может существенно снизить внутренние напряжения и, в целом, улучшить механические и трибологические свойства покрытий за счет того, что АПП обладают высокой твердостью и низким коэффициентом трения, металлы же

характеризуются высокой пластичностью. Одним из перспективных способов улучшения функциональных характеристик АПП является их легирование карбидообразующими металлами за счет образования в их матрице ультрадисперсных карбидных включений. Добавка кремния в углеродную матрицу приводит к значительному повышению температуры графитизации. Легирование графита титаном приводит к повышению электропроводности на восемь порядков. Добавление бора в графит снижает коэффициент химического распыления в несколько раз [6].

Наиболее соответствующим всем предъявленным выше требованиям является графит марки GBST1308 (1% B, 2.5% Si, 7.5% Ti) [7]. Создать же АПП на графите марки GBST1308 можно, используя хорошо известные технологии [8].

### **Литература**

- [1] А.А. Сковорода, А.В. Спицын, В.С. Петров, А.А. Полунина // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, № 3, С. 61-67.
- [2] Л.Б. Беграмбеков, Н.А. Пунтаков, А.А. Айрапетов, А.В. Грунин, С.С. Довганюк, А.М. Захаров, Н.О. Саввин, С.А. Грашин, И.И. Архипов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2023, № 12, С. 101-112.
- [3] А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, А.Н. Жуков // Журнал технической физики, 2025, Т. 95, № 4, С. 771-778.
- [4] P. Merel, M. Tabbal, M. Chaker, S. Moisa, J. Margot // Applied Surface Science, 1998, V. 136, № 1-2, P. 105-110.
- [5] D. Briggs, N. Fairley // Surf. Interface Anal., 2002, V. 33, P. 283-290.
- [6] Б.А. Калин и др. // Атомная энергия, 1992, Т. 73, № 4, С. 285.
- [7] G-N. Luo, X.D. Zhang, D.M. Yao, X.Z. Gong, J.L. Chen, Z.S. Yang, Q. Li, B. Shi, J.G. Li // Phys. Scr., 2007, V. T128, P. 1-5.
- [8] А.И. Попов, А.Д. Баринов, В.М. Емец, Д.А. Зезин, Т.С. Чуканова, В.П. Афанасьев, М.А. Семенов-Шефов, В.А. Терехов, Э.П. Домашевская, М.Ю. Пресняков, М.А. Шапетина // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2023, № 11, С. 24-32.

И.И. АРХИПОВ\*, С.А. ГРАШИН, Ю.В. КАПУСТИН,  
Н.Ю. СВЕЧНИКОВ, Р.Г. ЧУМАКОВ  
НИИЦ «Курчатовский Институт», Москва  
[igor\\_arkhipov\\_54@mail.ru](mailto:igor_arkhipov_54@mail.ru)

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ ТОКАМАКА Т-15МД

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на станции НАНОФЭС модуля ЭСХА (НИЦ КИ) проведено исследование электронной структуры углеродных пленок, которые образуются в результате эрозии графитовой первой стенки токамака Т-15МД. Особое внимание уделено тонким ( $\leq 10$  нм) пленкам, полученным во время второй кампании, проведенной в октябре–декабре 2024 года в рабочих разрядах в водороде. Проведено более 1500 рабочих импульсов длительностью 1.5–2 секунды при  $B_T = 1.5$  Тл, токе разряда  $I_p = 400$ –500 кА и плотности плазмы до  $n_e = 2 \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup> [1].

Для сбора распыленного материала использованы зонды-подложки из нержавеющей стали (НС), W и Si размером 7×7 мм<sup>2</sup>. Вдоль тороидального направления, а также в двух противоположных секторах токамака 5 и 13 по полоидальному обходу было размещено более двадцати держателей, каждый из которых содержал три таких образца.

Изучены особенности РФЭС спектров тонких углеродных пленок, обнаруженных на внутренней стороне камеры токамака по сравнению со спектрами пленок, полученных во время первой кампании по подготовке камеры к рабочим импульсам (в основном использовались тлеющие разряды в Ar и H<sub>2</sub>), а также пленок из токамака Т-10 (НИЦ КИ) [1, 2], образовавшихся в результате пересадки углерода вне прямого воздействия плазмы.

По результатам анализа спектров C1s, полученных методом РФЭС, для всех трех типов зондов-подложек, получены относительные доли Csp<sup>2</sup> и Csp<sup>3</sup> состояний углерода. Большая ( $\approx 0.9$ ) доля sp<sup>3</sup> состояний указывает на значительное (Н/С=0.2-0.8) количество связанного водорода в этих аморфных алмазоподобных а-С:Н пленках. Сходные результаты были получены на токамаке Т-10, где углеродные пленки из рабочих разрядов имели значения D/C от 0.3 до 0.5 [4].

В пленках на W подложках обнаружено уменьшение концентрации примесей железа с фазами чистого металла и оксидов (спектр дублета Fe2p с пиками Fe<sup>0</sup> и Fe<sup>3+</sup>) до 6.4 ат.% (относительно C1s) и хрома в виде оксидов

(спектр Cr2p) до 1.5 ат.%. Эти элементы с большим атомным номером (Z) входят в состав нержавеющей стали, из которой сделаны держатель и стенки вакуумной камеры токамака. При этом обнаружен рост концентрации W (по спектрам W4f) до 14 ат.% по отношению к 9.5 ат.% в первой кампании, что, по-видимому, связано с повышенной эрозией подложки из W при воздействии высокотемпературной плазмы. Там же по спектрам K2p и Na1s наблюдались сопутствующие примеси калия (2.7 ат.%) и натрия (6.7 ат.%), которые обладают большим давлением насыщенных паров и могут появляться на поверхности W подложки в результате радиационно-стимулированной диффузии. Кроме того, спектры валентной зоны тонких пленок имели ненулевую плотность электронных состояний на уровне Ферми ( $DOS E_F > 0$ ), что указывает на примесную проводимость пленок прыжкового типа. Таким образом, эрозия материалов с большим Z может приводить не только к охлаждению плазмы, но и локальным пробоям тонких а-C:H пленок во время рабочих разрядов.

Образование тонких углеродных пленок на поверхности HC можно объяснить слабой адсорбцией углеводородов с высокой долей  $Csp^3$  состояний на таких поверхностях, что является типичным для нержавеющей стали [3]. Напротив, подложки из Si и W на внешней стороне камеры токамака показали заметную углеводородную адсорбцию, приводящую к образованию пленок, достаточно толстых ( $>10$  нм), чтобы спектры от их подложек, Si2p и W4f, не регистрировались на фоне шумов. Эти пленки оказались диэлектриками с шириной запрещенной зоны 2.1 и 2.7 эВ, соответственно, и имели низкую долю примесей железа по спектрам Fe2p (0.7 ат.%), а также меди по спектрам Cu2p (0.2 ат.%).

На границе тонкая пленка-подложка из HC, W или Si, по спектрам C1s, W4f и Si2p были обнаружены фазы карбидов FeC, WC и SiC, соответственно, что создает проводимость, а также увеличивает адгезию между а-C:H пленкой и подложкой, препятствуя удалению пленок в режиме кондиционирования. При этом на W подложке в спектре W4f, доля карбида WC превышала долю оксида  $WO_3$ , в отличие от первой кампании.

Полученные результаты указывают на существенное изменение физико-химических свойств углеродных пленок в присутствии тяжелых примесей, состав и количество которых во многом определяются как их положением в камере токамака, так и параметрами плазменного разряда. Таким образом, спектроскопические исследования позволяют детально изучить взаимодействие плазмы с поверхностью, что особенно необходимо при тестировании новых внутрикамерных материалов.

## Литература

- [1] И.И. Архипов, С.А. Грашин, Ю.В. Капустин, Н.Ю. Свечников, Р.Г. Чумаков, А.В. Лукашевич. //Материалы XXI Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 23.09-03.10.2025 г.: Сборник тезисов докладов. «ИТЭР-Центр» Москва, 2025. Стр. 342–345
- [2] Грашин С.А., Архипов И.И., Пересажение углерода в рабочих и тренировочных разрядах токамака Т-10 //ХЛП Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2015 г., Сборник аннотаций, Стр. 117
- [3] Ming Xu, Xun Cai, Qiulong Chen, et al., *Diamond & Related Materials* 16(2007)1304–1311. doi:10.1016/j.diamond.2006.11.060
- [4]. V.G. Stankevich, N.Y. Svechnikov, B.N. Kolbasov, *Symmetry*, **15** 623(2023)

Н.Н. АНДРИАНОВА<sup>1,2</sup>, А.М. БОРИСОВ<sup>1,2,3</sup>, Р.Р. МУЛЮКОВ<sup>5,6</sup>,  
М.А. ОВЧИННИКОВ<sup>1</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>4\*</sup>, Р.Х. ХИСАМОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ  
имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский  
университет), Москва

<sup>3</sup>Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва

<sup>4</sup>Московский энергетический институт (Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»), Москва

<sup>5</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

<sup>6</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

\*E-mail: [fedorovichsd@mail.ru](mailto:fedorovichsd@mail.ru)

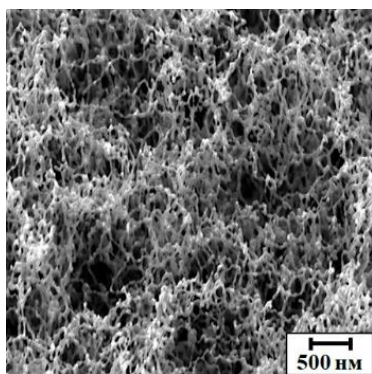
## **ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ И РАЗМЕРА ЗЁРЕН ВОЛЬФРАМА НА РОСТ ПУХА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ**

В установках термоядерного синтеза поверхности обращённых к плазме элементов конструкций подвергаются воздействию потоков энергичных ионов и нейтронов, испускаемых изотопным водородным топливом, гелиевой плазмы и различных примесей в вакуумной камере [1]. Распылённый при этом материал может оседать или переноситься и оседать в других частях установки в виде пуха. Для вольфрама при отсутствии осаждения толщина слоя W-пуха увеличивается с ростом флюенса ионов гелия от  $\Phi \sim 10^{24} \text{ м}^{-2}$  и достигает насыщения при толщине  $\sim 5 \text{ мкм}$  для  $\Phi \sim 10^{26} \text{ м}^{-2}$  [2, 3, 4]. Однако толщина слоя W-пуха увеличивается без насыщения, если облучение проводится в присутствии источника осаждения W [5]. Для ИТЭР и других устройств с плотностью потока гелия в плазме  $10^{21} - 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и отношением потоков вольфрама и гелия на стенку  $W/\text{He} \lesssim 10^{-4}$  пух толщиной 1 мкм может образоваться за 7 часов [1]. Образующаяся при эрозии поверхности наноразмерная пыль является негативным фактором, вызывающий радиационное охлаждение плазмы.

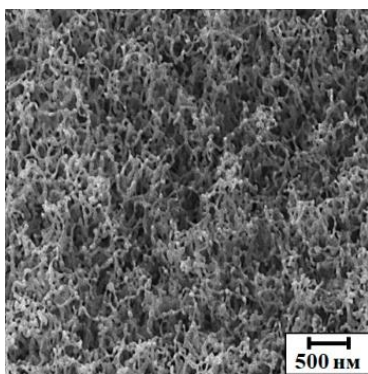
В данной работе продолжено начатое в [6] изучение влияния ультрамелкозернистой структуры и конусного рельефа на эрозию вольфрама при высокодозном низкоэнергетическом плазменном гелиевом воздействии. Материалом в эксперименте служил вольфрам марки ВМ-П (99.98 вес.%). Ультрамелкозернистую структуру в образцах вольфрама со средним размером зерен 300 нм получали с помощью интенсивной пластической

деформации [7]. Конусный рельеф на поверхности ультрамелкозернистого вольфрама формировали путем облучения на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ ионами аргона с энергией 30 кэВ и с флюенсом  $6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$  [7]. Для сравнения использовали также образцы вольфрама с мелкозернистой структурой с размером зерен единицы мкм.

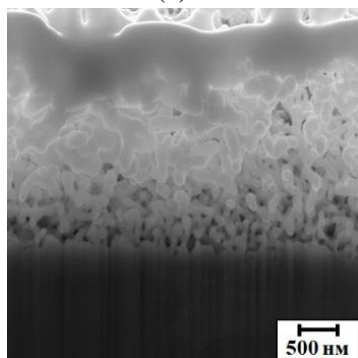
Образцы вольфрама с ультрамелкозернистой и мелкозернистой структурой с гладкой поверхностью и с конусным рельефом подвергали высокодозному плазменному гелиевому воздействию в линейной плазменной установке ПЛМ-М [8] при температуре 900 °С и энергии ионов 76 эВ. В результате воздействия гелиевой плазмы на изначально гладкой поверхности как мелкозернистого, так и ультрамелкозернистого образца сформировалась волокнистая структура пуха (Рис.1).



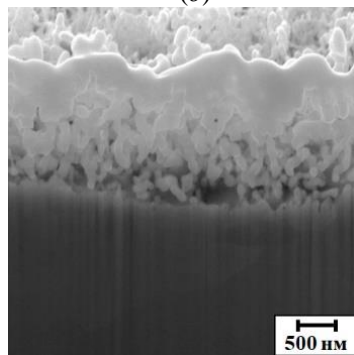
(a)



(б)



(с)



(д)

Рисунок 1 - РЭМ-изображение поверхности мелкозернистого (а) и ультрамелкозернистого вольфрама (б) после плазменного гелиевого воздействия при углах съемки 45°, (в) и (г) поперечные срезы соответствующих образцов

Толщину пуха оценивали на поперечном срезе образцов, изготовленных с помощью фокусированного пучка ионами галлия. Для предотвращения завалов на краях среза на поверхности предварительно наносили тонкий слой вольфрама. Толщина пуха на поверхности мелкозернистого образца составила около 2 мкм, в то время как толщина пуха на ультрамелкозернистом образце – около 1.4 мкм, что коррелирует с ранее полученными данными в работе [9].

Существенно иная картина наблюдается при плазменном воздействии на ультрамелкозернистый вольфрам с конусным рельефом поверхности (Рис.2).

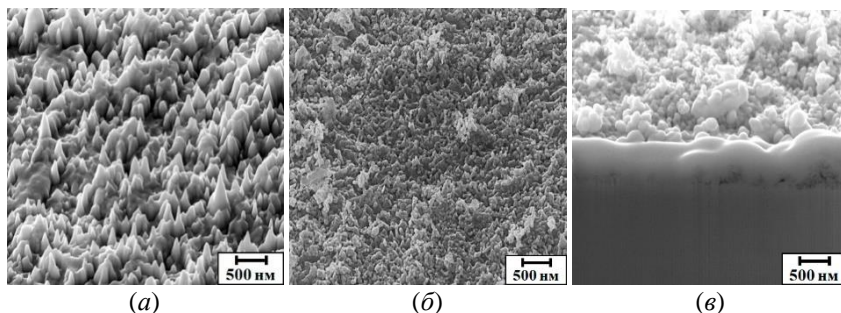


Рисунок 2 - РЭМ-изображение поверхности ультрамелкозернистого образца: (а) конусный рельеф после облучения ионами аргона с энергией 30 кэВ, (б) конусный рельеф после плазменного гелиевого воздействия при углах съемки 45°, (в) поперечный срез

Плазменное воздействие привело к трансформации конусного рельефа (Рис.2а) в рельеф, состоящий из выступов меньшей высоты по сравнению с исходными конусами. При этом видно, что характерный пух, развивающийся на гладкой поверхности (Рис.1), на конусном рельефе отсутствует (Рис.2б). На рисунке 2в представлен поперечный срез ультрамелкозернистого образца, на поверхности которого вначале был сформирован конусный рельеф, а затем эта поверхность была подвергнута воздействию гелиевой плазмы. Видно, что между нанесенным вольфрамовым слоем и образцом пуха практически нет.

Таким образом: 1) формирование ультрамелкозернистой структуры в

вольфраме уменьшает толщину пуха, 2) конусный рельеф поверхности на ультрамелкозернистом вольфраме предотвращает образование пуха.

Работа Н.Н. Андриановой, А.М. Борисова, М.А. Овчинникова выполнена в рамках государственных заданий МГУ им. М.В. Ломоносова и FSFS-2025-0006. Работа Р.Р. Мулюкова, Р.Х. Хисамова выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН. Работа С.Д. Федоровича выполнена в рамках государственного задания FSWF-2025-0001. Исследования выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН “Структурные и физико-механические исследования материалов” и “Ускорительного комплекса МГУ”.

### **Литература**

- [1] M.I. Patino, D. Nishijima, M.J. Baldwin and G.R. Tynan. // Nucl. Fusion. 64. (2024). 016011 (10pp)
- [2] Petty T., Baldwin M., Hasan M., Doerner R. and Bradley J. // Nucl. Fusion. (2015). 55. 093033
- [3] Patino M., Doerner R., Baldwin M. and Tynan G. Nucl. Mater. Energy (2023).34.101384
- [4] Fedorovich, S. D., Martynenko, Yu. V., Budaev, V. P. et.al. // Fusion Science and Technology. (2024). 80 (7), 833–842.
- [5] Kajita S., Morgan T., Tanaka H., Hayashi Y., Yoshida N., Nagata D., Vernimmen J., Feng S., Zhang R. and Ohno N.// J. Nucl. Mater. (2021).548 152844
- [6] N.N. Andrianova, A.M. Borisov, A.V. Dedov, R.R. Mulyukov, M.A. Ovchinnikov, S.D. Fedorovich, R.Kh. Khisamov. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. (2025). Vol. 89, No. 11, pp. 2216–2220
- [7] R.Kh. Khisamov, N.N. Andrianova, A.M. Borisov, M.A. Ovchinnikov, R.R. Mulyukov. // Journal of Surface Investigation. (2025). 19 (1), 179.
- [8] Будаев В.П., Федорович С.Д., Дедов А.В. и др.// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. (2024). Т. 47. Вып. 2. С. 49.
- [9] O. El-Atwani S. Gonderman, M. Efe, G. De Temmerman, T. Morgan, K. Bystrov, D. Klenosky, T. Qiu, J.P. Allain. // Nucl. Fusion. (2014). 54. 083013 (9pp).

А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, З.А. АГАБЕКОВА<sup>1</sup>, И.А. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>,  
А.А. БЕЛОКУР<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1</sup>, О.С. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>,  
А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, Л.А. СНИГИРЕВ<sup>1</sup>, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ<sup>1</sup>,  
А.Н. МОКЕЕВ<sup>2</sup>, В.Л. БУХОВЕЦ<sup>3</sup>, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>3</sup>,  
Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ<sup>3</sup>, А.В. МАРКИН<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Институт «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Россия

\*artem.dmitriev@mail.ioffe.ru

## НАКОПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В БОРСОДЕРЖАЩИХ ОСАЖДЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАГНЕТРОННОГО И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Процессы взаимодействия плазма-стенка являются одной из важнейших задач в области исследований управляемого термоядерного синтеза [1]. Одним из ключевых вопросов при этом является подбор оптимальных материалов обращенных к плазме элементов (ОПЭ), которые будут способны выдерживать нагрузки, ожидаемые в термоядерных установках следующего поколения. ОПЭ будут подвергаться целому ряду экстремальных нагрузок, таких как эрозия и переосаждение, термическое циклирование, импульсные тепловые нагрузки, накопление термоядерного топлива и проч. При этом взаимодействие красовой плазмы с ОПЭ оказывает значительное влияние на параметры центральной плазмы, а также может приводить к повреждению ОПЭ, что может повлиять на работу всей термоядерной установки в целом. Ввиду вышеперечисленного для реализации коммерчески эффективной термоядерной электростанции требуется использование надежных материалов ОПЭ.

До недавнего момента в термоядерных установках следующего поколения, таких как ИТЭР, в качестве материалов ОПЭ предполагалось использование бериллия (Be) и вольфрама (W) для изготовления облицовки первой стенки и диверторных пластин соответственно. Be является легким материалом, что уменьшает эффект повышения эффективного заряда термоядерной плазмы вследствие эрозии ОПЭ. Кроме того, Be имеет достаточно высокую температуру плавления, приемлемые механические характеристики, а также является материалом-геттером, способным захватывать и удерживать кислород и другие газы, что приводит к уменьшению эффективного заряда термоядерной плазмы и положительно влияет на её удержание.

Тем не менее, в 2023 году Советом ИТЭР было принято стратегическое решение о замене материала ОПЭ первой стенки с Ве на W. Обновленные тепловые расчеты показали, что ОПЭ, выполненные из Ве, не выдерживают тепловых нагрузок, ожидаемых в ИТЭР в случае аварийных срывов плазмы [2]. При этом ожидается образование большого количества токсичной бериллиевой пыли (до 250 кг к концу эксплуатации ИТЭР), которая усугубляет проблему накопления топлива в вакуумной камере токамака. Наконец, при взаимодействии Ве с нейтронным потоком происходит выделение газов, вызванное ядерными реакциями на примеси урана в бериллии [3]. Вольфрам имеет лучшие по сравнению с бериллием тепловые характеристики, имеет более высокую радиационную стойкость, хуже захватывает изотопы водорода [4], а также не является токсичным материалом. Для защиты от эрозии и переосаждения атомов W, а также компенсации того, что W не является эффективным кислородным геттером, предлагается периодическое покрытие стенки возобновляемой пленой бора.

Для прогнозирования ресурса и исследования свойств возобновляемых борсодержащих покрытий необходимо проведение лабораторных исследований по осаждению пленок бора и его соединений. Для этих целей в ФТИ им. А.Ф. Иоффе была создана установка BORIS (Boron Research Integrated System). В данной установке имеется возможность магнетронного осаждения чистого В и карбида бора ( $B_4C$ ), а также имеется возможность соосаждения этих материалов с дейтерием (D). Дополнительно к этому, установка BORIS оснащена плазменным источником типа «Сурфатрон» [5], позволяющий осуществлять насыщение пленок В и  $B_4C$  изотопами водорода в дейтериевой газоразрядной плазме. Кроме того, на базе плазменного источника реализована возможность плазмохимического осаждения боруглеродных (В:С) пленок из паровой фазы 1,2-дифенил-орто-карборана  $(C_6H_5)_2C_2B_{10}H_{10}$ .

В докладе обсуждаются морфология, химический и фазовый состав получаемых борсодержащих покрытий, полученные при помощи сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской дифракции соответственно. При помощи термодесорбционной спектроскопии был проведен анализ механизмов накопления изотопов водорода в В,  $B_4C$  и В:С. Дейтерий, запасенный в борсодержащих покрытиях, формирует связи с бором (В-D-В, В-D), кислородом (В-O-D), и углеродом (В-C-D), что совпадает с литературными данными [6]. Химические связи с бором формируют низкотемпературную часть ТДС-спектра в области 400-700 К, в то время как

связи дейтерия с примесями (кислородом и углеродом) находятся в высокотемпературной области. Со-осаждение бора с дейтерием приводит к преимущественному накоплению дейтерия в связях В-D (~600 К) и В-O-D (800-850 К), что говорит о заметном содержании кислорода, что соответствует результатам элементного анализа. Запасенный дейтерий в пленках бор-углерод, насыщенных в D газоразрядной плазме, в основном содержится в связях В-D (~600 К) и В-C-D (900-1000 К). При осаждении покрытия В:С в разряде в смеси паров карборана, гелия и дейтерия наблюдалось повышенное накопление дейтерия. При этом поверхностная плотность атомов дейтерия достигла значения  $\sim 1\text{E}21$  ат/м<sup>2</sup>, что с учетом толщины соответствует данным по имплантации быстрых ионов дейтерия в В:С пленки, приведенные в [7].

Работа частично выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания 124031800036-2 (Соглашение FFUG-2024-0034), частично за счет средств ГК Росатом № Н.4а.241.19.25.

## Литература

- [1] Pitts R. et al., Physics basis and design of the ITER plasma-facing components, *Journal of Nuclear Materials* 415 (2011) 957-964
- [2] Merola M., Memo on Armour Material for the Blanket First Wall, ITER IO report, IDM UID 9CC5GC
- [3] Kolbasov B.N. et al., On use of beryllium in fusion reactors: Resources, impurities and necessity of detritiation after irradiation, *Fusion Engineering and Design* 109–111 (2016) 480–484
- [4] J. Roth et al., Hydrogen isotope exchange in tungsten: Discussion as removal method for tritium, *Journal of Nuclear Materials* 432 (2013) 341–**347**
- [5] S Boivin et al, Analysis of the high-energy electron population in surface-wave plasma columns in presence of collisionless resonant absorption, *Plasma Sources Sci. Technol.* (2018) 27 095011
- [6] K. Okuno et al, Retention behavior of hydrogen isotopes in boron film deposited on SS-316 for LHD first wall, *Fus. Eng. Des.* 85 (2010) 2328–2330
- [7] Бекрамбеков и др., Карбид бора как защитный материал контактирующих с плазмой элементов плазменных и термоядерных установок, *ВАНТ т47, вып. 1, 2024)*

А.С. УМЕРЕНКОВА<sup>1\*</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, В.С. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, Н. ОСТОЙИЧ<sup>1</sup>,  
Т. СОЛАРЕВИЧ<sup>1</sup>, В.А. ЛУЗАНОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Фрязино

\**asumerenkova@mephi.ru*

## **СТАБИЛЬНОСТЬ ПЛЕНОК БОРА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ**

В связи с заменой материала первой стенки в ИТЭР на вольфрам, предполагается регулярное проведение боронизации: нанесение борсодержащих покрытий на обращенные к плазме элементы [1]. Боронизация успешно применяется в термоядерных установках, и показала положительное влияние на основные параметры разряда [2,3,4]. Однако процессы взаимодействия водородной плазмы с пленками бора на вольфраме остаются недостаточно изученными. Одним из наиболее критичных вопросов является влияние пленок бора на накопление изотопов водорода в вольфраме.

В работе исследовались стабильность пленок бора на вольфраме при нагреве, а также влияние бора на захват дейтерия. Пленки бора были изготовлены в ФИРЭ РАН с помощью магнетронного напыления, скорость осаждения составляла 75 нм/ч, а толщина пленки варьировалась от 50 до 500 нм. При температуре подложки 300 К (во время нанесения пленки) наблюдается отшелушивание пленок и изменение цвета пленки на атмосфере. При 500 К - пленки визуально однородны и стабильны, цвет не меняется.

Исследовалось поведение борного покрытия при термическом нагреве до 1500 К. При нагреве тонких пленок (50 нм), начиная с ~1000 К, наблюдается постепенное изменение поверхности, при  $T > 1400$  К пленка визуально полностью исчезает. Толстые пленки (500 нм) при нагреве до высоких температур нестабильны, наблюдаются трещины и вздутия пленки (рис. 1) различного масштаба в зависимости, в том числе, от вакуумных условий.

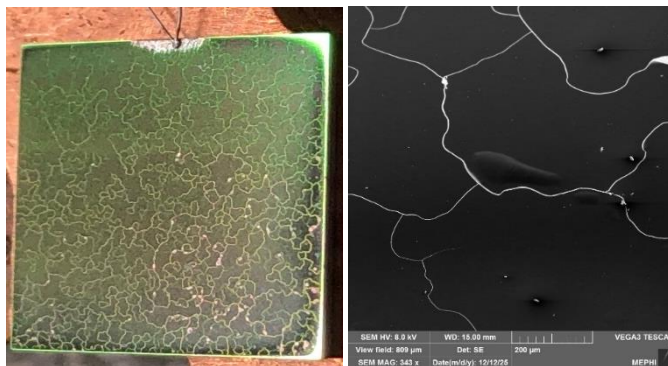


Рисунок 1 – фото и СЭМ-изображение пленки бора на вольфраме после нагрева до 950 С.

Облучение образцов проводилось низким потоком масс-сепарированных ионов на установке МЕДИОН (энергия ионов 670 эВ/D, доза облучения –  $10^{21}$  D/m<sup>2</sup>). Накопление дейтерия в пленках исследовалось методом термодесорбционной спектроскопии. Продемонстрировано существенное увеличение накопления дейтерия и температуры обратной термодесорбции при наличии пленки бора на поверхности вольфрама. Выход дейтерия наблюдался в диапазоне 300–1200 К.

### Литература

- [1]. T. Wauters, G.J.M. Hagelaar, R.A. Pitts, Modeling input to the ITER glow discharge boronization system design, Nuclear Materials and Energy 42 (2025) 101891.
- [2]. Dibon, M., et al. New boronization system at ASDEX Upgrade. Fusion Engineering and Design 165 (2021): 112233
- [3]. Cheng Y. et al. Experimental study on metallic impurity behavior with boronization wall conditioning in EAST tokamak, Nuclear Materials and Energy T. 41 (2024) 101744.
- [4]. Шаратов В. М. Плазмохимическая обработка разрядных камер термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез Т. 43 №. 2 (2020) С. 5-12

Д.Е. ЧЕРЕПАНОВ<sup>1,2,3,4\*</sup>, Г.А. РЫЖКОВ<sup>1</sup>, И.В. КАНДАУРОВ<sup>1</sup>,  
А.А. ЖДАНOK<sup>2</sup>, М.А. ГОЛОСОВ<sup>2</sup>, А.А. КАСАТОВ<sup>1,3,4</sup>, В.А. ПОПОВ<sup>1,3,4</sup>,  
Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>4</sup>Российский университет дружбы народов, Москва

\*D.E.Cherepanov@inp.nsk.su

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ДИБОРИДА ТИТАНА НА РОЛЬ ОБРАЩЕННОГО К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛА: УСТОЙЧИВОСТЬ К ИМПУЛЬСНОМУ НАГРЕВУ**

Прогресс в области управляемого термоядерного синтеза требует использования оптимальных материалов для изготовления обращенных к плазме компонентов. Переход от графита к металлической первой стенке обусловлен компромиссами: графит снижает энергопотери плазмы, но приводит к неприемлемо высокому удержанию трития. Бериллий токсичен и имеет низкую термостойкость, а вольфрам вызывает радиационное охлаждение плазмы.

В качестве альтернативы рассматриваются высокотемпературные керамики, однако соответствующие исследования проводятся менее активно. Основное внимание уделяется карбидам бора ( $B_4C$ ) и кремния ( $SiC$ ), но их применение сдерживается присутствием углерода в составе, риском высокого коэффициента удержания трития, а также сравнительно низкой электро- и теплопроводностью. Для обоснованного выбора альтернативного материала требуется расширить список изучаемых вариантов. Перспективными безуглеродными кандидатами являются дибориды титана ( $TiB_2$ ) и циркония ( $ZrB_2$ ), сочетающие высокую температуру плавления, хорошую теплопроводность и умеренный атомный номер составных компонентов.

В данной работе рассматриваются керамические составы на основе  $TiB_2$ . Одной из проблем  $TiB_2$  является сложность производства образцов с низкой пористостью, от которой зависят механические и теплофизические свойства, влияющие на устойчивость к импульсному нагреву, а также на процессы захвата газов (в том числе изотопов водорода). Для решения проблемы высокой пористости керамики возможна модификация процесса производства. Одним из распространенных подходов является добавление в состав материала связующей добавки. Вариантом создания материала на основе  $TiB_2$  может служить метод самораспространяющегося

высокотемпературного синтеза (СВС) при производстве композиционной керамики Al-AlN-TiB<sub>2</sub>. В рамках данной работы были проведены испытания Al-AlN-TiB<sub>2</sub> многократной импульсной тепловой нагрузкой, ожидаемой в ходе появления ЭЛМ (ЭЛМ, ELM – Edge Localized Mode) в токамаках.

Для проведения испытаний ЭЛМ-подобной тепловой нагрузкой создан комплекс специализированных стендов на основе источников электронных и лазерных пучков [1-3]. Стенды оснащены системами диагностики для мониторинга состояния поверхности и измерения температуры поверхности [4, 5]. Источники позволяют моделировать нагрев, характерный нагреву, ожидаемому в ходе протекания переходных процессов в плазме токамака (плотность мощности ~ 1 ГВт / м<sup>2</sup>, длительность ~ 0.1 – 1 мс).

Испытания композиционной керамики Al-AlN-TiB<sub>2</sub> проводились на базе лазерного стенда экспериментального комплекса [2, 3]. Результаты показали, что данная композиционная керамика обладает достаточно низкой устойчивостью к импульсному нагреву. Причем, как правило, эрозия поверхности связана с повреждением алюминий-содержащей составляющей. В то время как входящий в состав TiB<sub>2</sub> показал более высокую устойчивость к нагреву: его эрозия происходила в случае значительного повреждения алюминий-содержащей компоненты. В связи с этим было решено начать исследования стойкости к ЭЛМ-подобному нагреву чистого TiB<sub>2</sub>. Подобные исследования не проводились ранее, однако результаты могут помочь в поиске оптимального подхода к производству керамических материалов на основе TiB<sub>2</sub>.

В качестве метода производства был выбран метод горячего прессования (ГП), как один из наиболее распространенных. Образцы были изготовлены компанией Вириал и ИХТТМ СО РАН. Исследования образцов проводились на установке БЕТА [1]. В ходе экспериментов было установлено, что горячепрессованный диборид титана сравним с карбидами бора и кремния с точки зрения устойчивости к импульсному нагреву [2, 6]. Сравнение пороговых параметров потоков тепла  $F_{hf}$  представлены на рисунке 1. В то же время, образцы из TiB<sub>2</sub> от компании «Вириал» и ИХТТМ СО РАН, где сырье и условия производства различались, демонстрируют практически двукратную разницу в пороговых  $F_{hf}$  (для образца от компании «Вириал» –  $F_{hf} \approx 12 \pm 3 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0.5}$ , а для образца от ИХТТМ СО РАН –  $F_{hf} \geq 20 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0.5}$ ). Это показывает, что разные условия производства и сырье позволяют существенно влиять на характеристики материала в случае применения одинакового метода производства.

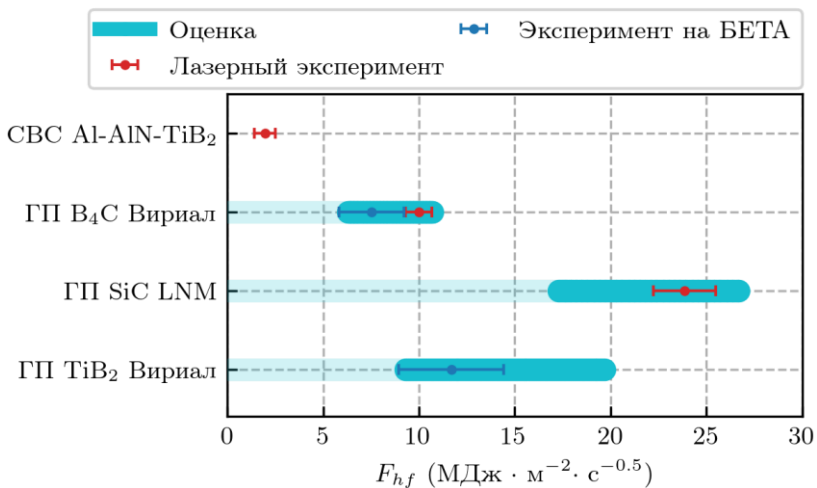


Рисунок 1 – Сравнение параметров потока тепла  $F_{hf}$ , достижение которых в ходе импульсного нагрева приводит к повреждению поверхности керамик.

### Благодарности

Работа была поддержана грантом РФФ (проект № 25-11-00154).

### Литература

- [1] L.N. Vyacheslavov et al., Phys. Scripta [93 \(2018\) 035602](#)
- [2] D.E. Cherepanov et al., Nucl. Mater. Energy [36 \(2023\) 1014951](#)
- [3] D. Cherepanov et al., Plasma Sci. Tech. [27 \(2025\) 115601](#)
- [4] A.A. Vasilyev et al., Fus. Eng. Design [146 \(2019\) 2366](#)
- [5] G.A. Ryzhkov et al., Fus. Eng. Design [222 \(2026\) 115545](#)
- [6] D. Cherepanov et al., Plasma Sci. Tech. [27 \(2025\) 125601](#)

К.А. РОГОЗИН<sup>1,2\*</sup>, В.П. БУДАЕВ<sup>1,2</sup>, С.Д. ФЕДОРОВИЧ<sup>1,2</sup>, Ю.В. ГОТТ<sup>1</sup>,  
Д.И. КАВЫРШИН<sup>1,2</sup>, Е.А. КИРИЛЛОВА<sup>1,2</sup>, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
М.А. СЕМЕНОВ-ШЕФОВ<sup>1,2</sup>, В.В. ПИТЕРСКИЙ<sup>1</sup>, В.Ю. ПОПОВ<sup>1,2</sup>,  
П.В. САВРУХИН<sup>1,2</sup>, М.Л. СУББОТИН<sup>1</sup>, Ю.С. ШПАНСКИЙ<sup>1,2</sup>, Я.А.  
ГОЛОВ<sup>1,2</sup>, Л.В. ЛЕБЕДИНСКИЙ<sup>1,2</sup>, А.А. КОНЬКОВ<sup>1,2</sup>, Н.А. ГРИГОРОВ<sup>1,2</sup>,  
И.О. ТРЕЙЕР<sup>1,2</sup>, В.М. МУТОВАЛОВ<sup>1,2</sup>, М.Г. МАРКАРОВ<sup>1,2</sup>, Д.Э.  
ЗАВАРНИЦЫН<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Rogozin\_KA@nrcki.ru

## **ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПР-8 ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ МАТЕРИАЛОВ И ВНУТРИКАМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Испытания внутрикамерных конструкционных материалов (вольфрама, графита, молибдена и других) высокими плазменными нагрузками в современных токамаках и плазменных установках выявили их деградацию под действием плазмы нагрузками, ожидаемыми в термоядерном реакторе (ТЯР): эрозию, плавление и даже разрушение [1, 2, 3]. Несмотря на многочисленные экспериментальные данные, их ещё недостаточно для обоснования выбора материалов и конструкций теплозащитной облицовки ТЯР и актуальной остаётся задача испытаний перспективных материалов ТЯР стационарными плазменными нагрузками.

Для этих целей проводятся эксперименты на плазменной установке ПР-8 (рис. 1, 2). Конструкция систем ПР-8, включая магнитную систему с линейной конфигурацией, обеспечивает поддержание плазменного разряда в стационарном многочасовом режиме.

Параметры установки ПР-8:

- Длина вакуумной разрядной камеры – 6,2 м,
  - Диаметр вакуумной разрядной камеры – 0,42 м.
  - Индукция магнитного поля в центральном соленоиде 0,05÷0,15 Т.
  - Индукция магнитного поля в кольцевых щелях каспов – до 0,2 Т.
  - Индукция магнитного поля в осевых катушках – до 0,4 Т.
  - Диаметр горячей зоны плазменного цилиндрического разряда - 0,25 м.
  - Длительность плазменного разряда - стационарная, до 8 часов и более.
- В горячей зоне цилиндрического плазменного разряда в ПР-8:

- концентрация электронов плазмы - до  $10^{19} \text{ м}^{-3}$  и более,
- температура электронов - до 10 эВ и более.

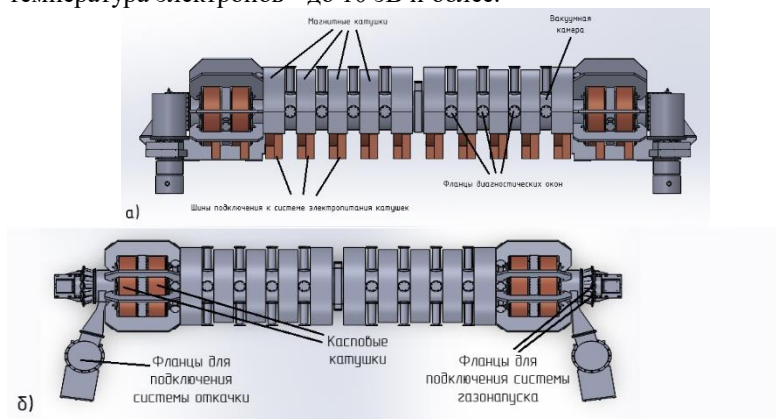


Рисунок 1 – Схема установки ПР-8: а) вид сбоку, б) вид сверху



(а)



(б)

Рисунок 2 – Установка ПР-8: а) общий вид, б) плазменный разряд

Вакуумная система обеспечивает откачку турбомолекулярными и

форвакуумными насосами до остаточного давления менее  $5 \times 10^{-6}$  торр и поддержания давления в рабочем разряде на уровне  $10^{-3} - 10^{-1}$  торр. Магнитная система ПР-8 состоит из 16 катушек, рис.1. Четыре из них могут использоваться для формирования касповых областей, две осевые катушки на торцах системы, остальные 10 формируют магнитное поле в центральной части установки. Каждая катушка намотана шиной квадратного сечения  $22 \times 22$  мм, внутри которой имеется канал диаметром 8 мм для протекания охлаждающей жидкости (воды). Сечение шины по меди -  $4,8 \text{ см}^2$ . Магнитное поле на оси катушки  $\sim 10^{-4}$  Т/А. Система охлаждения магнитных катушек водой под давлением 4 атмосферы с расходом 5-20 л/мин обеспечит стационарный многочасовой режим плазменного разряда в ПР-8. Магнитные катушки установлены в стальных бандажах, позволяющих достижение магнитных полей на оси - до 2 Тесла для центральных катушек, и до 4 Тесла для касповых катушек. Такие параметры достигнуты в период предыдущей эксплуатации ПР-8 [4].

Плазма генерируется катодным узлом в торце вакуумной камеры.

Система электропитания магнитных катушек и катодного узла:

- 5 источников питания, ток до 1000 А, напряжение до 11 В, мощность до 11 кВт, один источник на 2 катушки;

- 2 источника питания приосевой катушки, ток до 1500 А, напряжение до 11 В, мощность до 16,5 кВт;

- источник питания накала катода, ток до 100 А, напряжение до 50 В, мощность до 5 кВт;

- источник питания для поддержания тока разряда, ток до 100 А, напряжение до 100 В, мощность до 10 кВт;

- источник питания тлеющего разряда, ток до 2 А, напряжение до 1000 В, мощность до 2 кВт;

- источник питания тока разряда ионной пушки, ток до 100 А, напряжение до 100 В, мощность до 10 кВт.

Разработан диагностический комплекс ПР-8, который будет состоять из оптических и зондовых (ленгмюровские и магнитные зонды) диагностик плазмы. Оптическая диагностика включает в себя высокоскоростной высокочувствительный спектрометр с охлаждаемым детектором АТР6500СН (спектральный диапазон  $180 \div 1100$  нм, спектральное разрешение до 0,01 нм, время интегрирования сигнала 2 мс – 130 с, низкий уровень шумов), длиннофокусный монохроматор-спектрограф SOL MS750, рентгеновский спектрометр на основе сверхвысокопроизводительного кремниевого дрейфового детектора FAST SDD компании АМТЕК. Будет измеряться

ионный состав плазменного разряда в разных его областях, температура электронов методом относительных интенсивностей и концентрация примесей, поступающих с поверхности испытываемых образцов.

Эксперименты и испытания материалов на ПР-8 позволяют:

- проводить плазменно-тепловые испытания материалов и внутрикамерных конструкций термоядерного реактора, включая ТИН-1, путём облучения плазменными потоками в широком диапазоне значений концентрации и температуры плазмы;
- проводить испытания материалов и конструкций комбинированными стационарными и импульсными плазменными нагрузками;
- исследовать плазменное экранирование поверхности материалов при высоких плазменно-тепловых нагрузках;
- исследовать влияние дуговых процессов на термоэмиссию, эрозию поверхности;
- разработку и испытание диагностик плазмы для последующего применения на токамаках, в том числе на Т-15МД и ТИН-1;
- разрабатывать плазменные технологии для применения в термоядерном реакторе и токамаках;
- развивать и испытывать системы ионно-циклотронного нагрева плазмы;
- развивать и испытывать технологии управления взаимодействием плазма-стенка, в том числе для достижения контролируемого подавления локальных тепловых перегрузок плазмы на материалы в термоядерных установках.

По своим техническим параметрам установка ПР-8 аналогична (и по некоторым параметрам превышает, в т.ч. по диаметру горячей зоны плазменного разряда) самым крупным линейным плазменным установкам в мире (так называемым симуляторам дивертора токамака) для плазменных испытаний обращённых к плазме компонентов термоядерного реактора - SWORD (Китай), MAGNUM-PSI (Евросоюз, Нидерланды), NAGDIS-II (Япония), MPEX (США).

Работа выполнена по теме 15П НИЦ «Курчатовский институт».

## **Литература**

- [1]. Будаев В.П. ВАНТ. Термоядерный синтез. 2015, 38, 4, 5.
- [2]. Budaev V. P. JETP Letters. 2017, 105 (5), 307.
- [3]. Budaev V. P. et al. Fusion Science Technology. 2022, 79, 407.
- [4]. Готт Ю.В. и др. ВАНТ. Термоядерный синтез. 1990, 3, 59.

И.А. СОРОКИН<sup>1,2\*</sup>, Р.А. СЕЛИВАНОВ<sup>1,2</sup>, С.А. КРАТ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.

Котельникова РАН

\* sorokin@fireras.su

## СОЗДАНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕСЬЮ Li ДЛЯ ЭРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАНОВКЕ ПР-2

Формирование ионно-плазменных потоков из газового разряда с контролируемым количеством примеси лития (ионов и атомарного) представляется важной задачей для проведения эрозионных испытаний конструкционных материалов термоядерных установок с частично или полностью жидкометаллической стенкой. В докладе приводятся результаты глубокой модернизации линейной плазменной установки ПР-2 [1-3] для проведения подобных испытаний на примере  $H_2+Li$  плазмы, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

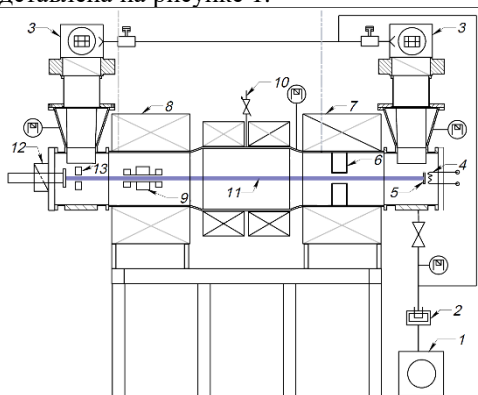


Рисунок 1. Принципиальная схема установки ПР-2: 1 - форнасос, 2 - криоловушка, 3 - ТМН, 4-5 - электронная пушка, 6 - масс анализатор, 7-8 - катушки магнитного поля, 9 - парогазовая мишень, 10 - газонапуск, 11 - ППР, 12 - коллектор пучка, 13 - держатель образцов.

Основой установки является открытая адиабатическая ловушка с пробочным отношением 1,55. Значение индукции магнитного поля было значительно увеличено благодаря внедренному источнику постоянного тока Yibenyuan YBN40-5000 (40 В, 5000 А, 200 кВт), который при существующем сопротивлении катушек магнитного поля позволяет создавать поле внутри

магнитных пробок до 0,4-0,65 Тл, что существенно увеличивает диапазон получаемых плотностей плазмы (до  $\sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ), а также качество масс-анализа ионного потока из плазмы с помощью встроенного анализатора [4-6]. На ПР-2 была внедрена безмасляная система вакуумной откачки камеры (длина – 2,5 м, диаметр – 0,36 м) установки на базе двух турбомолекулярных насосов Pfeiffer Vacuum TRH 2101 U P, поддерживающих вакуум на уровне менее  $10^{-4}$  Па; для защиты насосов от потоков паров лития и химической эрозии внутренних частей предусмотрены многоуровневые «жалюзи», незначительно влияющие на скорость откачки. Плазма в центральной части ПР-2 инициируется электронным пучком, инжектируемым вдоль оси установки электронной пушкой с прямым (Ta и W катоды) или косвенным накатом (LaB<sub>6</sub>). Выходная мощность электронной пушки может достигать 12 кВт благодаря источнику питания Spellman EVA10N12/400/10000, который позволяет создавать посредством электронного пучка и плазмы ППР поток тепловой мощности до 10 МВт/м<sup>2</sup> и ионного потока до 1 МВт/м<sup>2</sup>, соответственно.

Для создания смешанного ионного потока из плазмы ППР, состоящего из ионов рабочего газа и лития, была разработана и внедрена парогазовая испарительная протяженная мишень, обеспечивающая контролируруемую подачу паров лития в область горения разряда (см. рисунок 2).

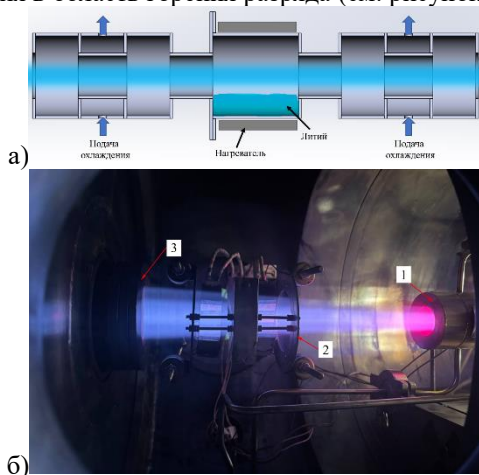


Рисунок 2. Литиевая парогазовая мишень: а – трехмерная модель, б – фотография со взаимным расположением мишени (1) и держателя образцов (2) внутри камеры ПР-2.

Мишень состоит из испарительной камеры, где происходит нагрев предварительно загруженного металлического лития, и двух торцевых водоохлаждаемых ловушек. При увеличении температуры испарительной камеры встроенным керамическим нагревателем (в пределах от 300 до 1000 С) локально увеличивается давление металлического пара, который ионизируется при взаимодействии с первичным электронным пучком и разрядом; полученная плазма далее диффундирует вдоль магнитного поля в камеру взаимодействия ПР-2, где смешанный ионно-плазменный поток можно использовать для эрозионных испытаний, а также анализа локальных параметров плазмы и состава ионного потока поперек ППР. При достаточном запасе лития мишень позволяет длительное время (до нескольких часов) обеспечивать контролируемое локальное поступление паров лития; при этом доля ионов металла в ионном потоке из плазмы может варьироваться от 0,1 (чувствительность масс-анализатора) до 100% (без напуска рабочего газа). Парогазовая мишень может использоваться как без дополнительной подпитки литием (нагрев металлического лития или КПС), так и, в перспективе, с дополнительным поступлением лития извне.

Проведенная модернизация линейной плазменной установки ПР-2, а также разработанная парогазовая мишень позволят проводить исследования по влиянию металлической примеси при ионно-плазменной обработке твердых тел.

### **Литература**

- [1] Gutorov, K.M., Vizgalov, I.V., Sorokin, I.A. Study of the interaction of plasma with fusion reactor materials in linear simulators with beam-plasma discharge // J. Surf. Investig. 10, 612–616 (2016).
- [2] Sorokin I.A., Gutorov K.M., Bolotov M.D. Measurement of Temperature and Density Profiles of the Plasma at PR-2 Facility // Phys. At. Nucl. 2017. Vol. 80, № 11. P. 1656–1661.
- [3] Kurnaev V. et al. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // J. Nucl. Mater. Elsevier B.V., 2015. Vol. 463. P. 228–232.
- [4] I.A. Sorokin, I.V. Vizgalov, V.A. Kurnaev, C. Brandt, A. Kreter, Ch. Linsmeier In-situ mass-spectrometer of magnetized plasmas // Nuclear Materials and Energy, V. 12, 2017, P. 1243-1247.
- [5] I. Sorokin, I. Vizgalov, D. Kolodko; Stationary diagnostics of magnetized plasmas. // AIP Conf. Proc. 11 October 2016; 1771 (1): 050010.
- [6] Sorokin, I.A., Vizgalov, I.V., Gutorov, K.M. et al. Effect of water vapor on the ionic composition of the hydrogen beam-plasma discharge // Bull. Lebedev Phys. Inst. 42, 350–355 (2015).

М.М. Цвентух, В.В. Кулагин  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),  
Москва  
Национальный ядерный университет МИФИ, Москва  
elley@list.ru, mmtsv@lebedev.ru

## ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ НАНОВОЛОКОН ВОЛЬФРАМА

Взаимодействие плазмы с поверхностью может приводить к росту наноструктуры волокон вольфрама, содержащих большое количество гелия в виде нанопузырей [1-4]. Развитая наноструктура на поверхности, взаимодействующей с плазмой, облегчает электронную эмиссию с поверхности и электрический взрыв протекающим током крупных – микронных участков поверхности. Импульсно-периодическое зажигание таких взрывов обеспечивает протекание тока самостоятельного (в т.ч. униполярного) дугового разряда.

Нами было показано, что Джоулев нагрев наноструктуры превышает тепловые потери на теплопроводность при плотностях протекающего (эмитируемого) тока выше уровня порядка 1-10 МА/см<sup>2</sup> [5]. При этом было учтено, полученное нами ранее, значение электрического сопротивления наноструктуры, существенно возросшего из-за рассеяния электронов на нанопузырях, внедренного в вольфрам гелия [6], а именно

$$\rho_{1nw} = \frac{m_e}{ne^2} v_2 + \rho_0 \frac{T}{300 \text{ K}} \approx \rho_2 \times \left( 1 + \frac{T}{15 \text{ kK}} \right)$$

$$\rho_{wfl} = \eta^{-\frac{2}{3}} \rho_{1nw}$$

где  $\rho_0 = 5.28 \mu\Omega \text{ cm}$ ,  $\rho_2 = 0.265 \text{ m}\Omega \text{ cm}$  – вычисленное сопротивление единичного нановолокна,  $\eta$  – средняя плотность нановолокон. Величины  $\eta = 1/20$  для «толстых» - микронных слоев нановолокон,  $\eta = 1/2$  для наших новых экспериментов в чистой гелиевой плазме [8]. Зависимость величины  $\eta$  от высоты слоя нановолокон может быть аппроксимирована как  $\eta \approx \left( 1 + \frac{7x}{2 \mu\text{m}} \right)^{-5/4}$  [2,7].

Для роста температуры в пренебрежении тепловыми потерями

$$C\eta^{5/3} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_{1nw} j^2$$

можно получить зависимость

$$T(t) = -15 \text{ kK} + (15 \text{ kK} + 300 \text{ K}) \exp\left(\frac{\rho_0 j^2}{C\eta^{5/3} 300 \text{ K}} t\right)$$

Величина «интеграла действия электрического тока» для наноструктуры волокон

$$C\eta^{\frac{5}{3}} \frac{300 \text{ K}}{\rho_0} \ln \frac{T_{cr} + 15 \text{ kK}}{15 \text{ kK} + 300 \text{ K}} = j^2 \tau \equiv h$$

которая для  $\eta = \frac{1}{2}$  составляет  $3.78 \times 10^7 \text{ A}^2 \text{ см}^4 \text{ с}$ . Для плотности тока в эксперименте [8]  $80 \text{ MA/см}^2$  время образования плазмы можно оценить, как  $\tau = h/j^2 = 5.9 \text{ нс}$ , и соответствующая скорость «движения» ячеек катодного пятна  $d/\tau = 340 \text{ м/с}$ .

Методами молекулярной динамики был промоделирован нагрев нановолокон, соответствующий Джоулеву энерговыделению с учетом вычисленного электрического сопротивления.

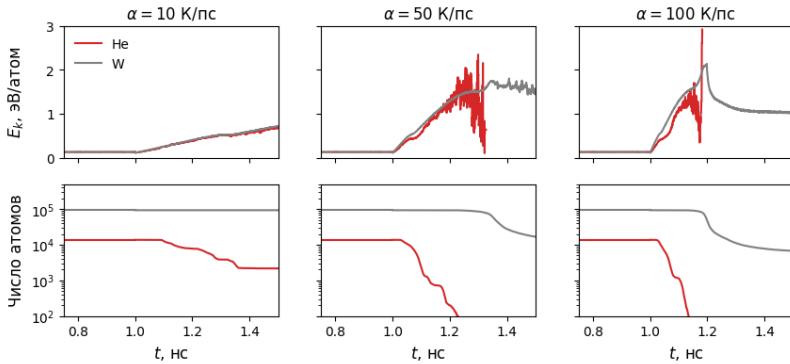


Рисунок 1. Временные зависимости средней кинетической энергии атомов вольфрама и гелия (вверху) и их количества в наноструктуре вольфрама при различных значениях скорости нагрева структуры

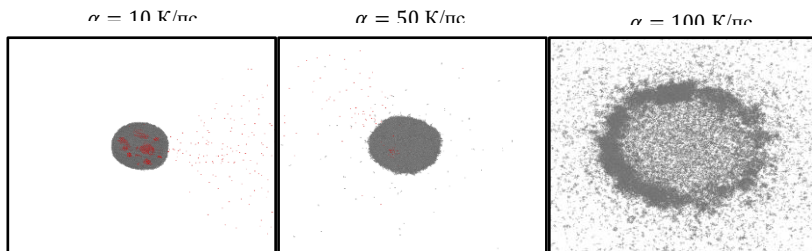


Рисунок 2. Вид сверху на наноструктуру вольфрама при  $t = 1.17$  нс и различных значениях скорости нагрева

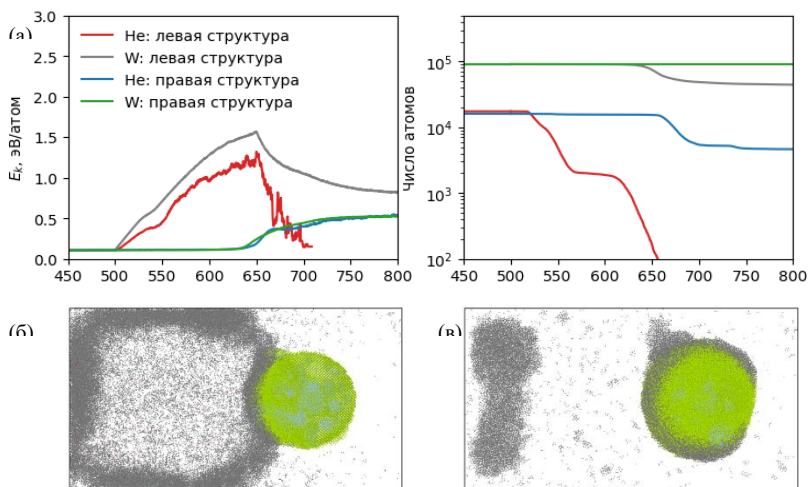


Рисунок 3. (а) временные зависимости средней кинетической энергии и числа атомов вольфрама и гелия в обеих наноструктурах. (б) и (в) – вид сверху на систему в моменты времени  $t = 650$  пс и  $t = 750$  пс

Для формулы Зельдовича-Райзера [9] для среднего заряда ионов вольфрама можно записать приближенную аппроксимацию (см. рис. 4)

$$Z = T \times [1 - (\lg n - 20)/5] / \text{эВ}$$

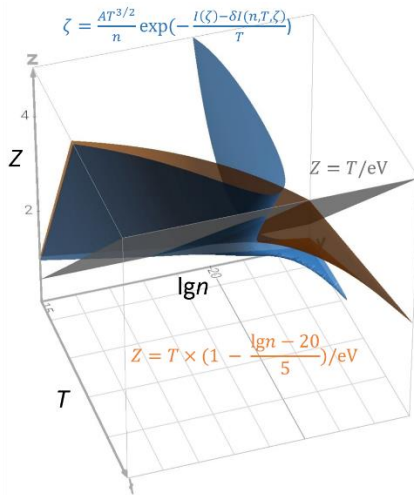


Рисунок 4. Формула Зельдовича-Райзера для среднего заряда ионов в слабейдеальной плазме, и приближенные аппроксимации

Работа поддержана РФФ, грант № 22-12-00274-П.

- [1] Shin Kajita *et al* 2009 *Nucl. Fusion* **49** 095005
- [2] D. Nishijima, M. Baldwin, R. Doerner, J. Yu, 2011 *J. Nucl. Mater.* **415(1)** S96
- [3] Yu. Gasparyan, V. Efimov, and K. Bystrov, 2016 *Nucl. Fusion* **56**, 054002.
- [4] Shin Kajita, Shuichi Takamura and Noriyasu Ohno 2009 *Nucl. Fusion* **49** 032002
- [5] Tsventoukh 2025 *Physics of Plasmas* **32**, 052502
- [6] Tsventoukh M.M., Kulagin V.V. 2024 *Phys. Plasmas* **31** 092509  
<https://pubs.aip.org/aip/pop/article/31/9/092509/3313710/Impact-of-helium-nanobubbles-on-tungsten-fuzz>
- [7] M. M. Tsventoukh, 2023 *Phys. Plasmas* **30**, 092511
- [8] A. V. Kaziev *et al* 2025 *Physics of Plasmas* **32** 043503
- [9] Y. B. Zeldovich and Y. P. Rayzer, *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena*. New York: Academic, 1967

С.А. КРАТ<sup>1\*</sup>, Д.А. БУТНЯКОВ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>,  
Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

\*sokrat@mephi.ru

## **ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В СООСАЖДЁННЫХ ЛИТИЕВЫХ СЛОЯХ ОТ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ ПОДЛОЖКИ ВО ВРЕМЯ ОСАЖДЕНИЯ**

Накопление водорода в осаждённых из плазмы слоях лития – потенциальная угроза для реализации концепции жидкометаллических обращённых к плазме элементов в термоядерных установках, так как в результате такого накопления может происходить выпадение твёрдых фаз, например гидридов, в жидком литии, а также будет осуществляться накопление радиоактивного трития.

Как известно, содержание, механизмы удержания водорода в соосаждённых слоях, свойства получаемых слоёв сильно зависят от условий осаждения, таких как температура подложки и характерная энергия частиц водорода, внедряемых в растущую плёнку.

В ходе работы было проведено исследование влияния напряжения смещения подложки, иными словами характерных энергий имплантируемого в растущую плёнку ионов дейтерия, на содержание и характер накопления дейтерия в литий-дейтериевых соосаждённых плёнках. Для этого плёнки были получены в установке МР-2 [1] методом магнетронного распыления капиллярно-пористой мишени дейтериевой плазмой при рабочем давлении ~5 Па. Температура подложки (поликристаллического отожжённого вольфрама) варьировалась от ~ 350 К до ~ 700 К с шагом ~100 К. К подложке прикладывались потенциалы -500 В, -250 В, +5 В (для экранировки положительных ионов). Толщина осаждённых плёнок колебалась от ~ 100 нм до ~ 1 мкм. Анализ содержания дейтерия в плёнках производится при помощи in-vacuo термодесорбционной спектрометрии (ТДС) с нагревом образца до 1200 К. Во время процедуры ТДС также измерялась скорость испарения материала с поверхности образца [1] для того, а по завершении анализа определялось полное количество испарённого материала для контроля эффективности осаждения плёнки (сбора лития) на подложке в заданных условиях.

Было установлено (рисунок 1), что эффективность сбора лития на вольфрамовую подложку при положительном смещении подложки и при

плавающим потенциале определялись скоростью испарения металлического лития, а при подаче смещения -500 В эффективность осаждения лития была существенно ниже, ~ 50 %. Такое снижение эффективности не может быть объяснено механизмами физического распыления или отражения ионов лития от поверхности, исходя из литературных данных о коэффициентах распыления  $\text{Li} \rightarrow \text{Li}$ ,  $\text{D} \rightarrow \text{Li}$  и о коэффициенте отражения ионов лития от литиевой или вольфрамовой поверхности [2].

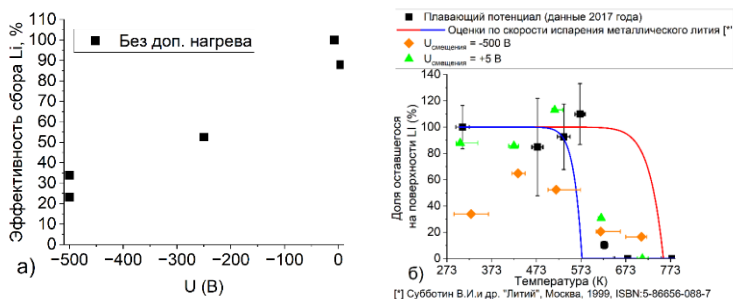


Рисунок 1 - Зависимости эффективности сбора лития на подложку от а) напряжения смещения подложки во время осаждения при экспериментах без доп. подогрева подложки, б) от температуры подложки для серий экспериментов с плавающим потенциалом подложки (чёрные квадраты [3]), смещением подложки -500 В (оранжевые ромбы) и смещением подложки +5 В (зелёные квадраты). Красная и синяя кривые на рисунке б – оценки эффективности сбора лития на подложку, предполагая, что плёнка испаряется так же, как испаряется металлический литий в вакуум

В части вопроса содержания дейтерия в соосаждённых слоях, было установлено (рисунок 2а), что как при температуре подложки близкой к комнатной содержание дейтерия в плёнке растёт с падением потенциала подложки, а при подаче положительного потенциала резко падает до уровня ~ 1 ат.%. Это может говорить о доминирующей роли ионов в накоплении водорода в литий-дейтериевых соосаждённых плёнках. При этом, при увеличении температуры подложки (рисунок 2б), содержание дейтерия как в плёнках с большим по абсолютной величине потенциалом смещения (-500 В), так и с положительным потенциалом смещения, оказывается существенно меньше, чем таковое для плавающего потенциала (~ - 8 В). Несмотря на схожий эффект, механизмы, объясняющие уменьшение содержания дейтерия для этих двух условий осаждения вероятно различны. Для положительного потенциала смещения наиболее важной, скорее всего, является экранировка

ионов от подложки. Для большого отрицательного смещения возможно, что распыление дейтерия с поверхности растущей плёнки при температурах близких или превышающих температуру плавления лития, в том числе по механизмам химического распыления, может объяснять уменьшение содержания дейтерия. Стоит отметить, что ранее результаты, схожие с полученными для большого потенциала смещения, были получены на токамаке T-11M, для которого можно ожидать более высоких энергий частиц дейтерия, имплантирующегося в поверхность во время роста соосаждённой плёнки [4,5].

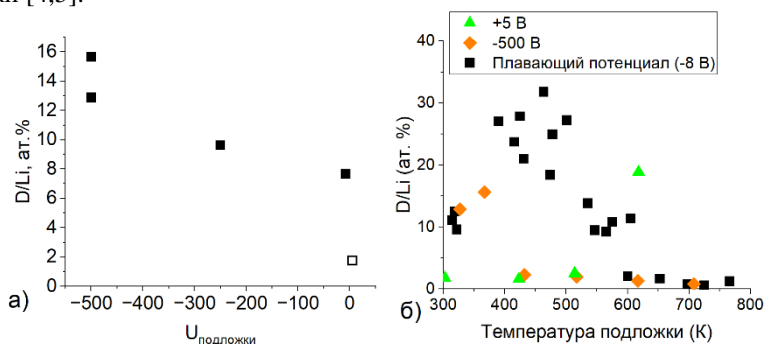


Рисунок 2 - Зависимость содержания дейтерия в литий-дейтериевой соосаждённой плёнке от а) потенциала смещения подложки при близкой к комнатной температуре осаждения; б) от температуры для трёх серий экспериментов: чёрные квадраты – плавающий потенциал подложки, оранжевые ромбы – потенциал смещения – 500 В, зелёные треугольники – потенциал смещения + 5 В. Пустотелая точка на рисунке а – потенциал смещения +5 В

Качественно, как можно видеть на спектрах десорбции дейтерия из плёнок (рисунок 3), изменение потенциала подложки влияет в первую очередь на низкотемпературную (от температуры плавления лития до температуры ~ 700 К наиболее характерного пика десорбции) составляющую. Можно предположить, что дейтерий с высокой энергией имплантации накапливается в литиевой плёнке в виде твёрдого раствора и легко покидает плёнки после её плавления. Не было обнаружено каких-либо существенных дополнительных пиков десорбции при подаче смещения, то есть, вероятно, не образуется новых типов центров захвата в плёнке или новых видов химических соединений.

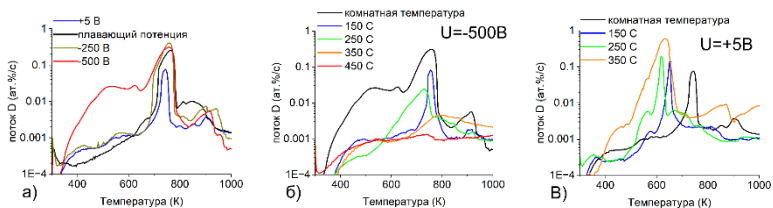


Рисунок 4.19 - Спектры десорбции дейтерия из плёнок лития для трёх серий экспериментов: а – для экспериментов без подогрева подложки с варьируемым потенциалом мишени, б – для экспериментов с потенциалом подложки  $-500$  В, в – для экспериментов с потенциалом подложки  $+5$  В

## Литература

- [1] Krat S. A. и др. A setup for study of co-deposited films // J. Inst. 2020. Т. 15, № 01. С. P01011–P01011.
- [2] ALADDIN, A Labelled Atomic Data INterface [Электронный ресурс]. URL: <https://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>.
- [3] Krat S. A. и др. Lithium-deuterium co-deposition // Journal of Nuclear Materials. Netherlands: Elsevier BV, 2023. Т. 584. С. 154598–154598.
- [4] Shcherbak A. N. и др. INVESTIGATION OF DEPENDENCE OF LITHIUM AND HYDROGEN COLLECTION BY COLLECTOR TARGET ON TEMPERATURE OF TARGET SURFACE IN EMITTER-COLLECTOR SYSTEM ON T-11M TOKAMAK // The book of abstracts and scientific programme of the 5th International Symposium on Liquid Metal Applications for Fusion / под ред. Kurnaev V. A., Gasparyan Yu. M., Krat S. A. Moscow: NRNU MEPhI, 2017. С. 29.
- [5] Shcherbak A. N. и др. Experiments on the Capture of Li, H, and D by Lithium Collectors at Different Surface Temperatures at the T-11M Tokamak // Plasma Physics Reports. 2018. Т. 44, № 11. С. 1001–1008.

Д.А. БУТНЯКОВ<sup>1</sup>\*, С.А. КРАТ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, Ф.С. ПОДОЛЯКО<sup>1</sup>, И.И. ПАШКОВ<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
\*butnyakovda@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЛИТИИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА МИФИСТ-0

Покрытие первой стенки токамака литием активно исследуется как способ улучшения характеристик плазмы и управления взаимодействием плазмы со стенками. Литий эффективно снижает рециркуляцию топлива, приводя к уменьшению концентрации примесей и улучшению контроля плотности плазмы, что облегчает переход в H-моду, подавление ELM, повышение времени удержания плазмы и увеличение температуры [1,2].

Для учебно-исследовательского токамака МИФИСТ-0 [3] разрабатывается система для литиизации первой стенки, основанная на испарении жидкого лития внутри вакуумной камеры. Для обеспечения покрытия литием всей вакуумной камеры с максимально возможной однородностью по толщине были проведены моделирования транспорта с помощью метода Монте-Карло и диффузионной моделью, аналогичной описанной в [4]. Оптимизировалось положение ванночек с жидким литием, их размер, температура испаряемой поверхности, давление окружающего газа. Проведена оценка влияния на однородность толщин получаемых покрытий при одновременном с испарением зажигания тлеющего разряда.

current\_position(7)=0.1669 мСкорость осаждения, нм/ч

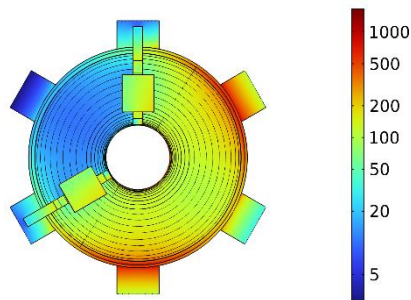


Рисунок 1 - Скорость осаждения лития на поверхности первой стенки токамака МИФИСТ-0 и лимитеры в тороидальном сечении при

оптимальных параметрах.

Оптимальные параметры для системы литиизации поверхности первой стенки токамака МИФИСТ-0: две испарительные ванночки на линейном вводе на расстоянии 167мм от конца фланца при давлении гелия в вакуумной камере 0.4 Па, нагрев лития до 700К, отсутствие параллельного тлеющего разряда.

## Литература

- [1] Z. Sun, J.S. Hu, G.Z. Zuo, J. Ren, B. Cao, J.G. Li, D.K. Mansfield, Influence of lithium coatings with large-area coverage on EAST plasma performance, 89 (2014) 2886–2893. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.06.016>.
- [2] R. Majeski, T. Abrams, D. Boyle, E. Granstedt, J. Hare, C.M. Jacobson, R. Kaita, T. Kozub, B. LeBlanc, D.P. Lundberg, M. Lucia, E. Merino, J. Schmitt, D. Stotler, T.M. Biewer, J.M. Canik, T.K. Gray, R. Maingi, A.G. McLean, S. Kubota, W.A. Peebles, P. Beiersdorfer, J.H.T. Clementson, K. Tritz, Particle control and plasma performance in the Lithium Tokamak eXperiment, *Phys. Plasmas* 20 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4802195>.
- [3] S. Krat, A. Prishvitsyn, A. Alieva, N. Efimov, E. Vinititskiy, D. Ulasevich, A. Izarova, F. Podolyako, A. Belov, A. Meshcheryakov, J. Ongena, N. Kharchev, A. Chernenko, R. Khayrutdinov, V. Lukash, D. Sinelnikov, D. Bulgadaryan, I. Sorokin, K. Gubskiy, A. Kaziev, D. Kolodko, V. Tumarkin, A. Isakova, A. Grunin, L. Begrambekov, R. Voskoboinikov, A. Melnikov, MEPhIST-0 Tokamak for Education and Research, *Fusion Sci. Technol.* 79 (2023) 446–464. <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2149033>.
- [4] D.A. Butnyakov, I.A. Sorokin, D. V. Kolodko, Diffusion Transport of Target Material for a Planar Asymmetrical Hollow Cathode Sputtering System, *Plasma Chem. Plasma Process.* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11090-025-10550-7>.

Д.А. ГАБАРАЕВ, С.А. КРАТ, М.Ю. ГАСПАРЯН, Е.А. АНАНЬЕВА  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  
david.gabarayev2006@email.com

## **ФЛУОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ**

Испытание и использование литиевых компонентов в камере токамака приводит к образованию насыщенных паров лития вблизи поверхности стенки, вследствие чего возникает миграция в пределах камеры и осаждение лития на различных участках поверхности. С точки зрения развития литиевых технологий обращённых к плазме элементов термоядерных установок большую важность приобретает задача измерения абсолютного количества лития в литийсодержащих плёнках. [1] Существует множество принципиально разных способов количественного определения содержания лития в плёнках, среди которых на практике себя в большей степени зарекомендовали спектрофотометрические (фотометрия пламени, спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и т.д.). Стоит иметь в виду, что измерение содержания лития в значительной степени осложнено его химической активностью. При этом различные методы могут давать плохо согласующиеся результаты при анализе идентичных проб, что вызвано в том числе большой чувствительностью к наличию в пробах примесей (компоненты стали, воздуха и их соединения).[2]

В работе рассматривается возможность применения нового метода анализа для определения содержания лития в смывах образцов. Метод основывается на анализе спектральных флуоресцентных образов (SFS). Процедура измерения состоит в составлении матрицы, отображающей распределение интенсивностей волн эмиссии (в диапазоне 250-615 нм) при возбуждении волнами в диапазоне 230-400 нм и последующем построении градуировочной кривой на наборе стандартизованных проб.

Сам по себе литий в указанном диапазоне не флуоресцирует. Однако для фотометрического определения лития и схожих по химическим свойствам элементов применимы различные органические вещества (в частности, 8-оксихинолин), которые в силу более сложной структуры обладают широким спектром поглощения.[3, 4] На рис. 1, а изображен SFS раствора 8-оксихинолина в этаноле (ректификат). Чтобы 8-оксихинолин мог служить в качестве маркера лития, спектр продукта их реакции должен заметно отличаться от спектра самого 8-оксихинолина.[5] Только в этом случае становится возможным добавлять в оригинальную пробу 8-оксихинолин в

количестве, заведомо превышающем содержание лития в пробе, не опасаясь завышения показаний.

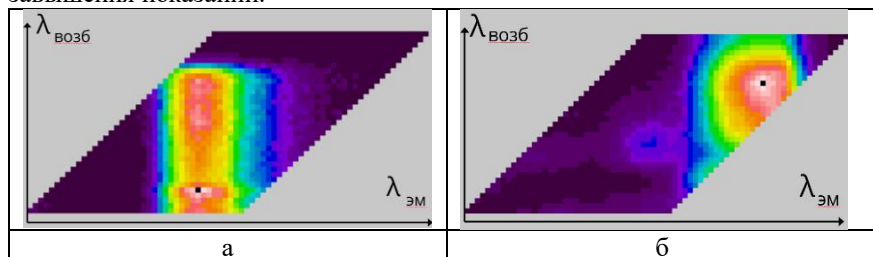
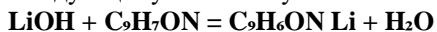


Рисунок 1, а – спектральный флуоресцентный образ 8-оксихинолина, растворенного в этаноле, без каких-либо добавок; б – спектральный флуоресцентный образ образующегося комплексного соединения - 8-оксихинолята лития (реагенты смешаны в пропорции 1:1)

Как видно из сравнения рис.1 а, б, спектр флуоресценции 8-оксихинолята смещен относительно спектра чистого 8-оксихинолина в сторону увеличения длины волны на величину порядка 100 нм.

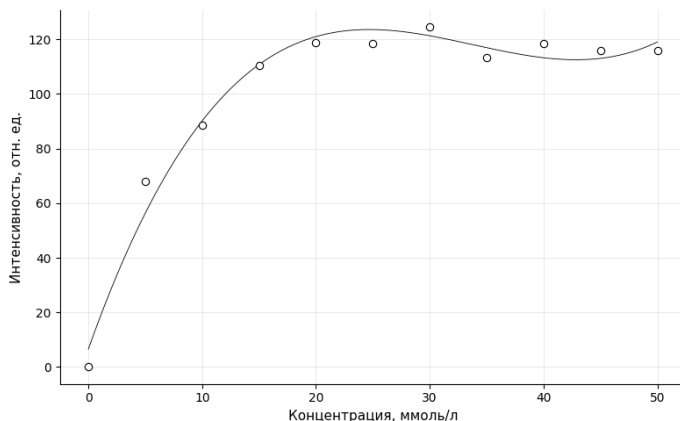
8-оксихинолин (8-г) образует и литием (Li) комплексное соединение 8-оксихинолята лития по следующему механизму:



Таким образом, предлагается определять не количество лития напрямую, но содержание 8-оксихинолята. При этом количество прореагировавшего лития в соответствии с уравнением реакции равно количеству продукта.

На рис. 2 показан градуировочный график. Набор проб подготавливался таким образом, чтобы концентрация изменялась линейно, и соответствующий характер зависимости ожидался для значений интенсивности. Однако график изменяется немонотонно. Это говорит о наличии нелинейных эффектов, возникающих в среде раствора в момент измерения. Поэтому на данный момент нельзя говорить о достоверности градуировки.

Тем не менее, предложенный способ в силу того, что все вещества в силу своей уникальной структуры имеют свой уникальный флуоресцентный образ, может оказаться более избирательным, чем альтернативные методы. Потенциальная возможность исключить источники систематической погрешности делает перспективными дальнейшую разработку предлагаемого метода.



*Рисунок 2 – градуировочный график, показывающий влияние нелинейных эффектов в растворах результаты измерений.*

## Литература

- [1] Мирнов С.В., Джигайло Н.Т., Щербак А.Н. Физико-химический метод определения абсолютного количества лития в плёнках на диагностических мишенях в камерах токамаков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, № 1. – С. 53-56.
- [2] Джигайло Н.Т., Кравчук С.И., Лазарев В.Б., Петрова Н.П. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами исследования состава литийсодержащих плёнок на диагностических мишенях в камере токамака Т-11М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2022. – Т. 45, вып. 1. – С. 79–90.
- [3] Полуэктов Н. С. Аналитическая химия лития / Н. С. Полуэктов, С. В. Мешкова, Е. Н. Полуэктов. — М. : Наука, 1955. — 202 с. — (Аналитическая химия элементов).
- [4] Аккузина А. А. Высокочистые координационные соединения 8-оксихинолина с металлами S- и P-элементов для органических светоизлучающих диодных структур: дис. ... канд. хим. наук. — М., 2018.
- [5] Абдирахманова А. Ф. Определение иона лития с 8-оксихинолином спектрофлуориметрическим методом / А. Ф. Абдирахманова, Н. Х. Куплимуротова // Химические науки. — 2025. — № 8 (134). — 7 С.

М.В. ГРИШАЕВ<sup>1,2\*</sup>, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1,3</sup>,  
А.С. МОСЯКОВА<sup>1</sup>, Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1,4</sup>, И.А. НИКИТИН<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), Москва

<sup>4</sup> Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР", Москва

\*MVGrishaev@mephi.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПЭ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО ЛИТИЯ

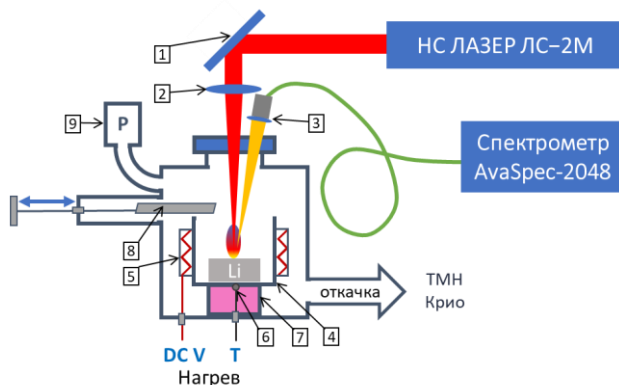
Выбор оптимальных материалов для обращённых к плазме элементов (ОПЭ) первой стенки остаётся ключевой задачей в проектировании термоядерных установок (ТЯУ). Наряду с разработкой новых материалов, значительное внимание уделяется технологиям защитных и возобновляемых покрытий. Одним из наиболее перспективных подходов является применение систем на основе жидкого лития [1].

Химическая активность лития, как щелочного металла, приводит к его интенсивному взаимодействию как с газами-примесями ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO/CO_2$ ), так и с загрязнениями контактирующих с литиевой поверхностью. Ключевой проблемой, возникающей в результате этого, является образование тугоплавких соединений (оксидов, нитридов, гидридов) с выделением твердой фазы [2].

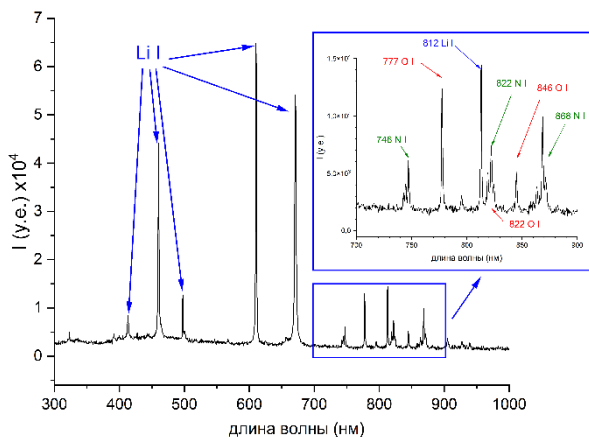
Данная работа посвящена исследованию влияния термического воздействия на состав поверхности лития. Анализ производился *in situ* методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС, LIBS), реализованной на установке для Лазерного Анализа Поверхности при Термических Испытаниях (ЛАПТИ). Схема установки представлена на рисунке 1. Экспериментальные параметры лазерного воздействия: энергия импульса – 56 мДж, радиус пятна на мишени - 0.75-3 мм, длительность импульса - 12 нс. Это обеспечивало энергетическую плотность (флюенс)  $F = 0.1-2.4$  Дж/см<sup>2</sup> ( $P = 10^{11}-10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>).

Для корректной интерпретации результатов был проанализирован оптический спектр. Из-за высокой интенсивности лития по сравнению с примесными атомами и склонности части интенсивных линий к самопоглощению в контексте контроля содержания кислорода и азота

наиболее перспективным представляется анализ спектрального диапазона 740–870 нм (рис.2). В качестве аналитических выбраны линии лития 812.6 нм и кислорода 777.2–777.5 нм.



- 1 – лазерное зеркало; 2 – фокусирующая линза ( $f = 20$  см);  
 3 – коллиматорная линза; 4 – тигель; 5 – нагреватель;  
 6 – термопара ХА; 7 – керамическая подставка; 8 – заслонка;  
 9 – вакуумметр (Pfeiffer PKR 251)  
 Рисунок 1 – Схема установки ЛАПТИ



синий – литий; красный – кислород; зеленый – азот

## Рисунок 2 – Идентификация линий элементов в обзорном спектре лития при атмосферном давлении

Исследовались образцы, предварительно окисленные в ходе переноса по атмосфере (кратковременное (3–5 мин) воздействие атмосферного воздуха 1атм). Для работы с чистым литием предусмотрена процедура вакуумной очистки.

Было обнаружено, что нагрев до максимальной для данных экспериментальных условий температуры 420 °С не приводил к полному исчезновению сигнала кислорода с поверхности, подвергнутой атмосферному воздействию. Это свидетельствует о формировании термически стабильных при такой температуре лития оксидных плёнок, не удаляемых путём испарения или растворения в объёме в данных условиях.

На очищенной поверхности (прогрев + механическая очистка), остывающей в вакууме  $\sim 4 \times 10^{-6}$  мбар, сигнал кислорода фиксируется только после полной кристаллизации (рис 3 - б). Толщина кислородсодержащего слоя, оценённая по порогу его обнаружения при последовательных лазерных импульсах, не превышает глубину кратера от одиночного импульса ( $\sim 350$  нм, согласно моделированию). Для удаления таких тонких плёнок эффективно воздействие, приводящее к фрагментации и перемешиванию.

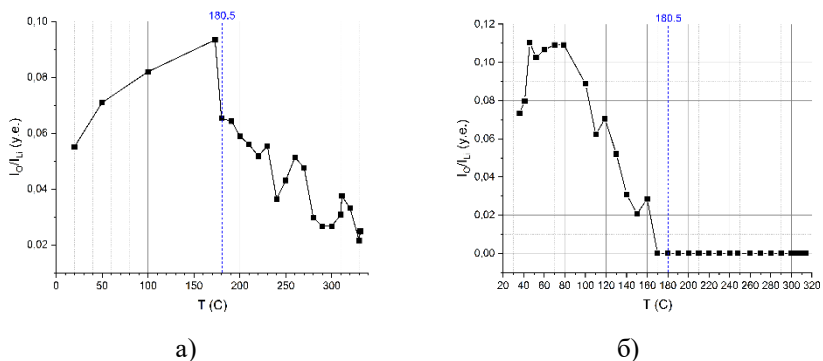


Рисунок 3 Изменение отношения сигналов линии кислорода (777,5 нм) к линии лития (812,6 нм) в ходе нагрева а) и остывания б) чистой поверхности лития при давлении  $4 \times 10^{-6}$  мбар

Полученные данные показывают, что для очистки поверхности лития

недостаточно одной вакуумной термообработки. Требуется прямое физическое удаление оксидной фазы (механическое, лазерное) или её диспергирование в объёме. При этом в условиях экспериментального вакуума ( $\sim 10^{-6}$  мбар) неизбежно происходит быстрое (минуты) формирование тонких ( $\leq 1$  мкм) оксидных плёнок на очищенной поверхности в процессе её остывания, что необходимо учитывать при планировании операций с активным литием.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSWU-2024-0001)

## **Литература**

[1] Nygren R.E., Tabarés F.L. Liquid surfaces for fusion plasma facing components—A critical review. Part I: Physics and PSI // Nuclear Materials and Energy, 2016, Т. 9, Liquid surfaces for fusion plasma facing components—A critical review. Part I, С. 6-21.

[2] Люблинский И.Е., Вертков А.В., Евтихин В.А. Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора: Термоядерный синтез // Вопросы атомной науки и техники, 2007, № 4, С. 13-44.

О.С. МЕДВЕДЕВ<sup>1,2,3\*</sup>, А.А. БЕЛОКУР<sup>1</sup>, И.А. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>,  
А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1,2,3</sup>, В.Р. МЕЛЬНИКОВА<sup>1</sup>,  
А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, Л.А. СНИГИРЕВ<sup>1</sup>, И.Е. ГАБИС<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

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

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

\* o.medvedev@mail.ioffe.ru

## **IN-SITU И EX-SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЯХ.**

Замена бериллиевой первой стенки в токамаке ITER на вольфрамую в значительной степени актуализировало работы по исследованию борсодержащих покрытий, которые необходимо наносить и возобновлять для минимизации попадания примеси вольфрама в рабочую плазму. Борирование первой стенки – это стандартный метод кондиционирования стенок токамака, который был предложен в 1980-х годах для снижения излучения кислорода в случае графитовой облицовки [1]. На токамаке AUG с полностью вольфрамовой первой стенкой было показано, что борирование эффективно снижает излучение W в плазменных разрядах [2]. Борсодержащие покрытия активно вовлечены в процессы эрозии элементов первой стенки, в частности, в процессы накопления и рециклинга топлива [3]. Поэтому одной из задач перед научным сообществом стоит исследование особенностей накопления изотопов водорода в борсодержащих покрытиях in-vacuo методами для получения релевантных данных для токамаков.

В настоящей работе рассмотрено применение термодесорбционной спектроскопии с лазерным нагревом (Laser Heating Thermal Desorption Spectroscopy) для выявления особенностей накопления дейтерия в борсодержащих покрытиях без контакта (in-situ) и при контакте (ex-situ) покрытий с атмосферным воздухом. Данный метод диагностики накопления изотопов водорода интегрирован в вакуумный стенд BORIS (BORon Research Integrated System) в ФТИ им. Иоффе. В данном стенде реализовано магнетронное напыление борсодержащих плёнок, возможность их экспозиции в дейтериевой плазме, а также осаждение боруглеродных плёнок в гелиевом разряде в парах карборана. Стенд оснащен системой манипуляторов, позволяющих осуществлять перемещение образцов без контакта с атмосферным воздухом между камерами напыления, экспозиции и диагностики.

В качестве исследуемых образцов использовались 100 нм плёнки

напылённые магнетроном из чистой мишени бора и карбида бора на подложку из нержавеющей стали. Насыщение плёнок дейтерием проводилось в сурфатроне при давлении дейтерия 2 Па в течении 15 минут. После чего образцы для *in-situ* измерений переносились в диагностическую камеру системой манипуляторов. В случае образцов *ex-situ*, плёнки бора и боруглерода после насыщения дейтерием выносились на атмосферу на 15 минут, после чего манипуляторами помещались в диагностическую камеру.

Метод LH-TDS включает в себя три ключевых компонента: источник нагрева, анализатор остаточных газов и измеритель температуры. Нагрев исследуемого образца осуществлялся лазером (IPG YLR-2000-U-R, 1070 нм, 2000 кВт) с постепенным увеличением длительности импульса от 70 мс до 700 мс для сохранения скорости нагрева  $\approx 1$  К/с. В качестве анализатора остаточных газов использовался квадрупольный масс-спектрометр (QMS, Extorr XT300M) для фиксации временной зависимости 2, 3, 4, 18 и 40 масс. Контроль температуры осуществлялся дистанционно двух длинноволновым пирометром (3,3 мкм и 4,2 мкм) через вакуумное окно  $\text{BaF}_2$ .

На рис. 1 представлены LH-TDS спектры 4-ой и 18-ой масс для плёнок бора и бор-углерода. Левая ось ординат соответствует QMS сигналу, правая ось ординат – измеряемой температуре, по оси абсцисс отложено время. *In-situ* спектры представлены черной сплошной линией, *ex-situ* – красной пунктирной линией, светло серая кривая – температура. В случае плёнок бора (рис. 1 (а)) для 4-ой массы наблюдаются пики 500-600 К, 750 К и 850 К, 1000 К. Химические связи дейтерия с бором (B-D-B, B-D) формируют низкотемпературную часть ТДС-спектра в области 400-700 К, в то время как связи дейтерия с примесями (кислородом и углеродом) находятся в высокотемпературной области B-O-D (800-850 К), B-C-D (900-1000 К). Для *in-situ* измерений (см. рис. 1. (а)) можно отметить, что амплитуда пиков ТДС спектра 4-ой массы значительно выше амплитуды *ex-situ* измерений во всём диапазоне температур, но все особенности спектра сохраняются. Результат демонстрирует активный выход дейтерия из плёнок бора при взаимодействии с атмосферным воздухом, и интегральное снижение содержания дейтерия составляет  $\sim 35\%$  от общего накопленного дейтерия в плёнках бора. Также стоит отметить значительный рост 18-ой массы, соответствующий воде из атмосферного воздуха, (рис. 1 (а) нижний график) при контакте плёнки бора с воздухом.

Аналогичный эксперимент был проведён для бор-углеродных плёнок (см. рис. 1 (б)). В случае *in-situ* измерений наблюдается небольшое преобладание дейтерия в низкотемпературной области 500 К, пика на 700 К и

высокотемпературного пика около 1000 К. Однако основной пик десорбции дейтерия в области 800-900 К остается аналогичным по амплитуде сигнала. В случае плёнок бор-углерода снижение интегрального количества дейтерия при контакте с атмосферным воздухом составляет ~5%. Сигнал 18-ой массы ведет себя аналогично чистым плёнкам бора, что свидетельствует о высоких геттерных свойствах борсодержащих покрытий. Более детальное описание эксперимента и результатов будет представлено в докладе.

Полученные результаты демонстрируют, что анализ результатов, полученных *ex-situ* методами, для борсодержащих плёнок требует определённых допущений с точки зрения захвата изотопов водорода и прочих примесей, так как значительная часть из может десорбироваться или быть подвержена изотопному обмену при контакте с атмосферным воздухом. Геттерные свойства борсодержащих плёнок применительно к термоядерным установкам побуждают использовать *in-vacuo* и *in-situ* методы для анализа механизмов захвата и количественных оценок содержания изотопов водорода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00360-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00360/>.

## **Литература**

- [1] J. Winter, et. al., J. Nucl. Mater. 162, (1989) 713–723
- [2] V. Rohde, et. al., Nuclear Materials and Energy 45, (2025) 102036
- [3] N.N. Bakharev, et. al., Phys. Plasmas 32, (2025) 112506

В.Р. МЕЛЬНИКОВА<sup>1\*</sup>, О.С. МЕДВЕДЕВ<sup>1,2,3</sup>, И.А. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, А.А. БЕЛОКУР<sup>1,3</sup>, А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1,2,3</sup>, А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1,3</sup>, Л.А. СНИГИРЕВ<sup>1,3</sup>, И.Е. ГАБИС<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

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

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург  
\*v.r.melnikova@mail.ioffe.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ

Боронизация применяется в токамаках для снижения концентрации примесей в плазме и улучшения условий её запуска. В установках с вольфрамовой первой стенкой и дивертором роль боронизации особенно важна, поскольку формируемые борсодержащие покрытия способны эффективно связывать кислород и другие примеси, приводящие к интенсивному распылению вольфрама и росту радиационных потерь [1,2].

Эффективность борных покрытий определяется их текущим состоянием: в процессе работы токамака борсодержащие слои подвержены эрозии, могут участвовать в процессах соосаждения, рециклинга и захватывать изотопы водорода. В связи с этим актуальной является разработка in-situ методов диагностики, позволяющих исследовать состояние борсодержащих покрытий непосредственно в вакуумных условиях, без влияния внешней среды [3, 4].

В настоящей работе рассмотрено применение лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy – LIBS), работающей в дополнении с лазерно-индуцированной абляцией и квадрупольной масс-спектрометрией (Laser-Induced Ablation – Quadrupole mass-spectrometry – LIA-QMS) для идентификации и характеристики борсодержащих покрытий. Для реализации метода использовалась установка с коаксиальной оптической схемой, в которой оптические пути лазерного воздействия и регистрации излучения лазерной искры совмещены. Такая схема обеспечивает пространственное совмещение зоны абляции и зоны регистрации, что позволяет исследовать различные области образца не перестраивая схему регистрации LIBS.

Система ввода лазерного излучения включала импульсный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 12 нс (FWHM), фокусирующую телескопическую систему и автоматизированное сканирующее зеркало. Плотность энергии на поверхности образца

варьировалась с помощью аттенуатора в диапазоне 5-12 Дж/см<sup>2</sup>.

Система регистрации излучения лазерно-индуцированной плазмы включала металлическое сканирующее зеркало, плоское зеркало с центральной апертурой и сферическое зеркало, обеспечивавшие эффективный сбор излучения с области  $\approx 10 \times 10$  мм<sup>2</sup> и его передачу в оптоволокно. Регистрация спектров осуществлялась с использованием обзорного спектрометра Optosky ATP 3034 и спектрометра высокого разрешения Spectral-Tech SPT-DDHR4 для анализа линии H $\alpha$ .

В качестве исследуемых образцов использовались борсодержащие плёнки толщиной от 30 до 500 нм, осаждённые на кремниевые подложки методом магнетронного напыления. Измерения проводились как *in-situ* – непосредственно после осаждения плёнок в вакуумной камере, так и *ex-situ* – после контакта образцов с атмосферой.

В ходе экспериментов были отработаны режимы лазерного воздействия в условиях вакуума и при различных давлениях аргона, обеспечивающие устойчивое формирование лазерной искры и воспроизводимую регистрацию спектров. При плотности энергии лазерного пучка 5 Дж/см<sup>2</sup> чувствительности системы недостаточно для регистрации характеристических эмиссионных линий бора и кремния. При увеличении плотности энергии до 7,5-10 Дж/см<sup>2</sup> интенсивности лазерной искры достаточно для регистрации линий бора 345 нм и 412 нм (рис. 1, а). Дальнейшее увеличение плотности энергии до 12 Дж/см<sup>2</sup> приводит к появлению дополнительных спектральных линий бора 332 нм, 447,3 нм, 494,1 и 703,1 нм и росту общей интенсивности сигнала.

Для борных плёнок на кремнии стабильная регистрация бора методом LIBS становится возможной, начиная с толщины порядка 30 нм. Это указывает на высокую чувствительность ns-LIBS к ультратонким борным слоям и позволяет рассматривать данный метод как перспективный инструмент для анализа борсодержащих покрытий в токамаках при характерных толщинах  $\approx 50$ -500 нм. Однако при увеличении толщины покрытия снижается интенсивность спектральных линий (рис. 1, б). Соответственно, для тонких плёнок наблюдается более высокая интенсивность борных линий, что, предположительно, связано с активным выбросом атомов кремния в лазерную искру, которые приводят к изменению параметров лазерной искры и увеличению интенсивности свечения линий бора при измерениях тонких покрытий.

LIBS-измерения при различных давлениях аргона в камере показали, что в используемой оптической конфигурации насыщение интенсивности основных линий бора достигается при давлении аргона 250 Па (рис. 1, в).

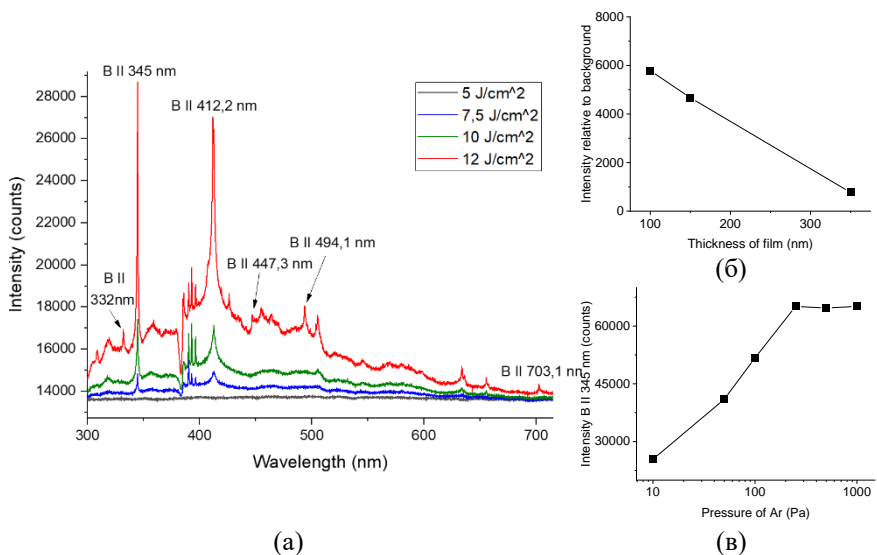


Рисунок 1 – Спектры, полученные при LIBS измерениях борсодержащих покрытий на кремнии при плотностях энергии 5-12 Дж/см<sup>2</sup> в вакууме (а); Зависимость интенсивности линии В II 345 нм от толщины покрытия (б); Зависимость интенсивности линии В II 345 нм от давления аргона в камере (в)

Существенные различия выявлены при сравнении in-situ и ex-situ LIBS-измерений в спектрометре высокого разрешения (рис. 2). При in-situ анализе борных плёнок, осаждённых и измеренных без контакта с атмосферой, водород не обнаруживается. В то же время при ex-situ измерениях в спектрах регистрируется эмиссионная линия водорода  $H_{\alpha}$  (656,28 нм), проявляющаяся при первом лазерном импульсе и исчезающая при последующих воздействиях. Наблюдаемое различие связано с геттерными свойствами бора: сформированные покрытия практически не содержат водорода и водородсодержащих соединений, однако при контакте с атмосферой происходит адсорбция молекул воды и, как следствие, высвечивание линии водорода  $H_{\alpha}$  при первом выстреле при удалении плёнки бора.

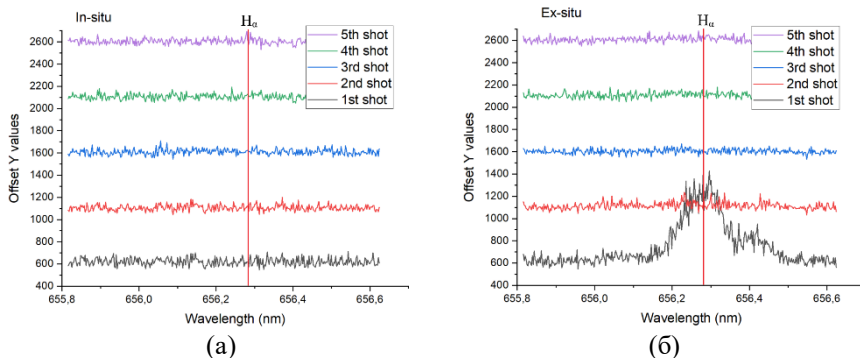


Рисунок 2 – Спектры с высоким разрешением вблизи линии водорода 656,28 нм для in-situ (а) и ex-situ LIBS измерений плёнки бора толщиной 100 нм (б)

Полученные результаты демонстрируют возможность применения метода LIBS в составе in-situ диагностических систем контроля состояния первой стенки и конкретно борсодержащих покрытий без нарушения вакуумных условий установки. В предлагаемой конфигурации LIBS позволяет регистрировать борсодержащие слои толщиной от 30 нм при использовании наносекундных лазерных импульсов. Данная методика позволяет выявлять наличие водорода в поверхностных слоях покрытий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00360-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00360/>.

## Литература

- [1] Schamis H. et al., Nuclear Fusion. – 2025. – Т. 65. – №. 8. – С. 086037.
- [2] Rohde V. et al., Nuclear Materials and Energy. – 2025. – С. 102036.
- [3] Wu H. et al., Nuclear Materials and Energy. – 2024. – Т. 41. – С. 101812.
- [4] Wu H. et al., Nuclear Materials and Energy. – 2025. – С. 102018.

А.А. СТЕПАНЕНКО\*, Ю.М. ГАСПАРЯН  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
\*aastepanenko@mephi.ru

## **ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАЗЕРНО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Неразрушающий дистанционный контроль содержания трития в стенке ИТЭР является неотъемлемой частью реализации проекта термоядерного реактора, связанной с выполнением законодательных ограничений в сфере атомной энергии агентств СЕА, ASNR [1,2]. В настоящее время в качестве кандидатного метода подобного контроля рассматривается метод лазерно-стимулированной десорбционной диагностики (laser-induced desorption quadrupole mass-spectrometry, LID-QMS) [3]. Методика предполагает нагрев поверхности тайлов короткими лазерными импульсами миллисекундной длительности для измерения локального газовыделения из образца. Интерпретация измерений сложна из-за малого объема получаемых диагностических данных [4] и требует применения методов компьютерного моделирования процессов нагрева мишени и последующей термодесорбции газа [5-7].

Ранее нами было получено приближенное аналитическое решение задачи о нагреве мишени образца импульсами лазерного излучения с круглым гауссовым пространственным распределением интенсивности и трапецевидным временным профилем [8], позволившее с высокими точностью и скоростью разрешить временную и пространственную динамику поля температур и интегрировать их в программу для расчёта процесса термодесорбции газа из мишени при проведении LID-QMS диагностики. В то же время облучение поверхности тайла не всегда происходит при нормальном падении лазерного луча и часто область контакта излучения с материалом стенки имеет не круглую, а эллиптическую форму. В представленной работе нами получено обобщение результатов [8] на случай эллиптических гауссовых пучков. Проведено сравнение аналитических результатов с данными численных расчётов в пакетах прикладных программ. Показано, что предлагаемые новые соотношения могут быть использованы для быстрого восстановления профиля температуры поверхности тайла при проведении LID-QMS диагностики гауссовым лучом эллиптической формы.

А.А.С. выражает глубокую благодарность своему отцу

А.Ф. Степаненко за плодотворное обсуждение задачи. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSWU-2024-0001).

### **Литература**

- [1] Girard J. P. et al. ITER, safety and licensing // *Fus. Eng. Design.* 2007. V. 82. №. 5-14. P. 506-510.
- [2] Barabaschi P. et al. ITER progresses into new baseline // *Fus. Eng. Design.* 2025. V. 215. P. 114990.
- [3] Zlobinski M. et al. Laser induced desorption as tritium retention diagnostic method in ITER // *Fus. Eng. Design.* 2011. V. 86. №. 6-8. P. 1332-1335.
- [4] Stepanenko A. A., Kashin D. A., Gasparyan Y. M. Possibility of using machine learning methods to reconstruct solid body parameters during laser-induced desorption analysis // *Phys. Scripta.* 2023. V. 98. №. 11. P. 116004.
- [5] Zlobinski M. Laser induced desorption as hydrogen retention diagnostic method: PhD thesis – 2016.
- [6] Kulagin V., Gasparyan Y., Degtyarenko N. Numerical estimation of the atomic fraction during laser-induced desorption of hydrogen from tungsten and beryllium // *Fus. Eng. Design.* 2022. V. 184. P. 113287.
- [7] Sizyuk T., Abrams T. Dynamics of deuterium retention and desorption from plasma-facing materials in fusion reactor-relevant conditions // *J. Nucl. Mater.* 2022. V. 572. P. 154095.
- [8] Stepanenko A. A., Gasparyan Y. M. Dimensional effects in analysis of laser-induced-desorption diagnostics data *Physica Scripta.* - 2024. – V. 99. - № 8
- [9] iijh-induced-desorption diagnostics data 085604.

В.А. БОЧАРНИКОВ<sup>1</sup>, Л.А. ГАЛИМОВА<sup>1</sup>, Е.А. СТАРОВОЙТОВ<sup>1</sup>,  
Д.Д. ГАЛИЦЫН<sup>1</sup>, С.А. НИКИТЕНКО<sup>1</sup>, А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>,  
Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>, А.Н. МОКЕЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ЦУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

*vladislav.bocharnikov@mail.ioffe.ru*

## **ПРОГРЕСС РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО КОДА KITE, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В СЛОЖНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ**

Разработка диагностических систем для термоядерных установок, таких как ИТЭР, требует детального понимания процессов транспорта частиц и газового разряда в диагностических каналах при низком давлении. Традиционные методы исследования включают экспериментальные измерения на макетах и численное моделирование с использованием методов Монте-Карло для транспорта нейтральных частиц и гидродинамических приближений для описания плазмы. Однако сложная трехмерная геометрия диагностических портов ИТЭР, наличие магнитных полей и необходимость самосогласованного описания кинетики заряженных и нейтральных частиц требуют применения более совершенных численных методов. Метод «частица-в-ячейке» с процедурой Монте-Карло для столкновений (PIC/MC) позволяет проводить кинетическое моделирование низкотемпературной плазмы с учетом реальной геометрии и граничных условий, что критически важно для оптимизации оптических диагностик термоядерной плазмы.

Программный код KITE (Kinetic Impurity Tracing) [1] разработан для моделирования транспорта нейтральных частиц и низкотемпературного газового разряда в произвольных трехмерных геометриях методом PIC/MC. Код реализует полное кинетическое описание заряженных и нейтральных частиц с учетом упругих и неупругих столкновений, ионизации и взаимодействия с поверхностью. Для моделирования ВЧ-разряда используется самосогласованное решение уравнений движения частиц и уравнения Пуассона для электрического поля с граничными условиями теоремы Гаусса для зарядов на электродах. Код оптимизирован для параллельных вычислений и поддерживает импорт сложных CAD-геометрий, что особенно актуально для моделирования диагностических систем ИТЭР с их многочисленными оптическими элементами, зеркалами и окнами.

В рамках работ по проекту ИТЭР с помощью кода KITE было выполнено моделирование транспорта частиц в диагностическом канале системы диверторного томсоновского рассеяния. Также проведено моделирование транспорта в диагностическом канале системы активной спектроскопии (CXRS), где критическим параметром является распределение рабочего газа в области наблюдения. Для верификации модуля моделирования газового разряда выполнена серия расчетов ВЧ емкостного разряда в различных геометриях: сферической, плоскопараллельной, цилиндрической.

Работа является вкладом Российской Федерации в проект ИТЭР (контракт Росатома № Н.4а.241.19.25) и выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания 124031800036-2 (FFUG–2024–0034).

### **Литература**

[1] Varshavchik L. A. et al. Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 025005.

Р.С. ПАССЕТ<sup>1,2,\*</sup>, Г.А. ГАВРИЛОВ<sup>1</sup>, В.Ю. ГОРЯИНОВ<sup>1</sup>, А.А. КАПРАЛОВ<sup>1</sup>,  
Г.Ю. СОТНИКОВА<sup>1</sup>, А.А. СУХАРЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ФГБОУ Государственный университет путей сообщения Императора  
Александра I, Санкт-Петербург

\*rostislav.passet@mail.ru

## **ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ДВУХСПЕКТРАЛЬНАЯ ИК- ТЕРМОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

В докладе представлена двухспектральная цифровая система детектирования и регистрации динамики излучения объектов в области среднего ИК-диапазона спектра (3-4 мкм) с временным разрешением 4 нс. Приводятся первые результаты исследования динамики тепловых процессов на поверхности пьезоэлектрической керамики во время импульсного воздействия на нее струи высокоэнергетической плазмы. В отличие от металлов и полупроводниковых материалов, исследования в области взаимодействия потоков плазмы с пьезоэлектрическими (керамическими) материалами ранее не проводились. Однако, возрастающая потребность в расширении рабочего температурного диапазона высокоточных сенсорных и приводных устройствах, изготавливаемых на ее основе, стимулировало интерес к использованию плазменных технологий для решения задачи повышения термостойкости существующих пьезоматериалов. В этой связи крайне важно не только разработать соответствующие экспериментальные методы и установку, но и обеспечить оперативный контроль параметров плазменного воздействия и регистрировать его эффект, прежде всего температуру поверхности исследуемого образца, непосредственно в ходе эксперимента. Именно величина и временная динамика тепловых процессов определяют характер необратимых структурно-фазовых превращений в приповерхностном слое материале, которые могут способствовать значительной модификации совокупности его функциональных свойств.

Данные о динамике изменения температуры поверхности исследуемого материала в процессе плазменного воздействия представляют значительный фундаментальный и практический интерес, так как важны для понимания механизмов термической деградации пьезоматериалов и служат основой для оптимизации методов плазменной обработки любых твердотельных объектов. Очевидно, что подобные данные могут быть получены только с

использованием специализированных бесконтактных, радиационных методов измерения температуры, которые, несмотря на ряд фундаментальных методических ограничений, разрабатываются и используются в системе обеспечения безопасности для мониторинга температуры внутренней стенки реактора ITER [1] и других исследовательских реакторов типа токамак [2]. Быстродействие рассмотренных температурных сенсоров составляет 1 мкс. Как отмечается в [1], экстремально высокие импульсные тепловые нагрузки на поверхность стенки, обращенной к плазме, могут приводить к существенным методическим погрешностям в расчете ее температуры по детектируемому ИК-излучению, рассматриваемому как равновесное тепловое излучение, подчиняющееся закону Планка. Вместе с тем, именно экстремальные тепловые нагрузки, приводящие к развитию совокупности нестационарных процессов различной физической природы, лежат в основе плазменной обработки металлов, так как позволяют осуществить модификацию свойств материала, не достижимых в других технологиях.

В этой связи мониторинг излучения поверхности объекта в различных спектральных областях с высоким временным разрешением является важным инструментом не только для расчета температуры поверхности образца во время высокоэнергетического плазменного воздействия, но и для выявления излучательных процессов, вызванных различными физическими механизмами, в том числе, не тепловыми. Особое значение это имеет при исследовании сложных функциональных материалов, к которым относятся пьезоэлектрические керамики.

Исследования проводились на экспериментальной установке типа «плазменная пушка» в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН [3]. Схема установки оказана на рис.1. и включает набор датчиков для контроля параметров плазменной струи и высокоскоростной двухспектральный пирометрический сенсор, основанный на сдвоенной полупроводниковой фотодиодной гетероструктуре, чувствительной в среднем ИК-диапазоне [4]. Он регистрирует излучение поверхности образца одновременно на двух близких длинах волн  $\lambda_1 \approx 3,3$  мкм и  $\lambda_2 \approx 4,1$  мкм. Выбор этих диапазонов обусловлен прозрачностью генерируемой плазменной струи для излучения указанных волн. Благодаря этому сенсор регистрирует преимущественно излучение нагретой поверхности образца, минимизируя влияние яркого свечения самой плазмы.

Были выявлены «холодные» импульсы плазменного воздействия, не приводящие к существенному нагреву образца. Такие аномалии указывают на

срыв ионизационных процессов в плазменном ускорителе, при котором отдельные разряды не вносят значимого теплового вклада.

Для всех типов газовой плазмы воздействия наблюдался примерно одинаковый характер модификации структуры (элементного состава) и рельефа поверхности образцов, показывающий резкие изменения на первых импульсах воздействия (5-10) и приходящий к некоторому стационарному состоянию к 20 импульсу, мало меняющемуся далее вплоть до 70 импульсов. Наблюдаемые при этом отклики в ИК - спектральных каналах и рассчитанные по ним эпюры динамики изменения температуры поверхности также показывают существенно различный характер для начальных импульсов плазменного воздействия и после 10 импульсов. Наблюдаемые резкие перепады сигналов могут свидетельствовать как о существенной неоднородности потока частиц, так и о возникновении сопутствующих излучательных процессов, обусловленных, например, ИК-люминесценцией дефектов, образующихся в материале или дипольном излучении под воздействием сильных электрических полей в результате пьезоэлектрического и пьезоэлектрического эффектов.

Выявлено пороговое изменение теплофизических свойств поверхностного слоя по мере накопления дозы плазменного воздействия: начиная с определённого импульса (примерно 5-6) кривая охлаждения заметно замедляется по сравнению с начальными циклами, что свидетельствует о формировании в поверхностном слое нового состояния материала с пониженной теплопроводностью.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00716 (<https://rscf.ru/project/24-19-00716/>).

Ф.Р. КОЛЕСОВ<sup>1\*</sup>, Е.Д. МАРЕНКОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия

\*frkolesov@mephi.com

## МЕТОД РАСЧЕТА БЫСТРОГО ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ НА ПЛАСТИНАХ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В КОДЕ SOLPS-ITER

При расчетах эрозии материалов дивертора и первой стенки токамака с небольшим первым потенциалом ионизации, таких как Li (5.39 эВ), важен учет явления быстрого переосаждения. Оно заключается в том, что нейтральный атом, распыленный (испаренный) с поверхности потоком плазмы, может сразу после ионизации вернуться обратно на поверхность под воздействием магнитного поля токамака и электрического поля пристеночного слоя Дебая-Чодуры. Эффективность быстрого переосаждения характеризуется коэффициентом  $R_p$ , определяемым как отношение переосажденного потока к потоку эродированных частиц. Обычно  $R_p$  считается методом Монте-Карло или по формуле, предложенной Фуссманном [1]. Однако вычисления методом Монте-Карло довольно длительны и потому не подходят для использования в кодах, моделирующих пристеночную плазму, а оценка по формуле Фуссмана не учитывает влияние электрического поля пристеночного слоя и применима только для распределения эродированных частиц по косинусу.

Нами был предложен численный метод расчета  $R_p$ , основанный на аналитическом решении кинетического уравнения для функции распределения ионов у поверхности [2]. На основе решения данного уравнения был разработан модуль быстрого переосаждения, который был имплементирован в код SOLPS-ITER (SOLPS 5.2). Работоспособность модуля в режиме физического распыления эродированных частиц уже была протестирована на мишенях токамака Т-15МД с литиевым покрытием. На сравнении с формулой Фуссмана была проверена эффективность работы модуля; также было исследовано влияние параметров потенциала пристеночного слоя на величину  $R_p$ , откуда был сделан вывод об оптимальной точности вычислений, которая не превышала бы ошибку вследствие неопределенности этих параметров, и не являлась бы тем самым избыточной.

Для быстрого вычисления кратных интегралов, необходимых для нахождения  $R_p$ , используется библиотека QUADPACK языка Fortran,

реализующие адаптивный метод Гаусса-Кронрода. Была проведена оптимизация скорости вычислений путем подбора точности в зависимости от температуры электронов в плазме.

Реализация модуля позволяет выбирать между несколькими вариантами распределения эродированных частиц по энергиям и углам. Распределение по энергиям может быть Томпсоновское, характерное для физического распыления, или распределение Максвелла, характерное для испарения. Распределение по углам возможно равномерное или по косинусу. Отметим, что если речь идет о быстром переосаждении лития, то точный вид распределения по скоростям эродированных частиц неизвестен в случае термического распыления.

Проводились тестовые расчеты для конфигурации токамака T-15МД с пластинами дивертора, покрытыми литием. Эти расчеты выполнялись для мощности, проходящей через сепаратрису, 10 МВт и различных значениях газонапуска водорода,  $10^{19}$ - $10^{20}$  с<sup>-1</sup>. Расчеты показали, что эффективность быстрого переосаждения лития на пластинах очень существенная, больше 90% во всех рассмотренных случаях. Как и следовало ожидать, вычисления по формуле Фуссмана, не учитывающей электрическое поле дебаевского слоя, дают заниженные значения  $R_p$ , следовательно, завышая источник лития, попадающего с пластин в плазму. Показано, что на величину  $R_p$  оказывает сильное влияние распределение эродированных частиц по энергиям: если предположить, что испаренный литий имеет энергии порядка температуры поверхности (0.1 эВ), то практически все атомы ионизируются внутри дебаевского слоя и переосаждаются на поверхность. Для физического распыления энергия вылетающих атомов существенно больше (2 эВ), что приводит к меньшим значениям  $R_p$ .

## Литература

- [1] Fussmann G. et al. 1995. Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Seville) (Vienna: IAEA) vol. 2, p. 143
- [2] Marenkov E.D., Kolesov F.R. 2025. Phys. Plasmas 32

## РАСПЫЛЕНИЕ ОКСИДОВ МОЛИБДЕНА И ТАНТАЛА ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Распыление оксидов металлов при бомбардировке пучком атомов или ионов является важным технологическим процессом при ионной имплантации, при изготовлении тонких пленок и покрытий, при послойном анализе состава поверхности. В термоядерных исследованиях важное значение приобретает очистка поверхности зеркал из молибдена от оксидов и других загрязнений [1]. В то же время надежные экспериментальные данные по коэффициентам распыления оксидов весьма ограничены [2-5].

В работе была разработана программа для расчета коэффициентов распыления многокомпонентных мишеней –  $Ta_2O_5$  и  $MoO_3$ , основанная на методе Монте-Карло и приближении парных взаимодействий. Расчеты проводились для налетающих частиц He, Ne, Ar, разряды в этих газах могут использоваться для очистки зеркал, а также присутствовать в качестве примесей в токамаке-реакторе. В программе учитывались торможение частиц в веществе вследствие электронных тормозных потерь, наличие колебаний (при комнатной температуре) атомов в кристалле. В качестве потенциала взаимодействия был взят потенциал Kr – C [6]. Тормозные потери на электронах получены с помощью SRIM [7] с поправкой на плотность  $Ta_2O_5$  и  $MoO_3$ .

Был рассмотрен случай падения по нормали к поверхности пучка на мишень для статического режима распыления, когда состав поверхностных слоев соответствовал стехиометрическому. Распыленными считались частицы отдачи, преодолевшие потенциальный барьер: для плоской поверхности обычно используется условие  $E_1 \cdot \cos^2\theta \geq U_s$ , где  $E_1$  – энергия распыленной частицы,  $\theta$  – угол вылета частицы относительно нормали к поверхности,  $U_s$  – поверхностная энергия связи.

В случае оксида тантала  $Ta_2O_5$  имеются экспериментальные данные при распылении ионами аргона [4, 5]. В наших расчетах мы рассматривали два варианта: 1) равенство поверхностной энергии связи кислорода и тантала, т.е.  $U_s[Ta]=U_s[O]=2.58$  eV; 2) энергии связи различны, то есть  $U_s[Ta]=8.1$  eV и  $U_s[O]=2.58$  eV (эти значения энергий связи взяты из справочника [8] и использовались ранее в расчетах программой SDTrimSP [3]). Как видно из

рис. 1, имеется хорошее совпадение суммарного коэффициента распыления с данными двух экспериментов.

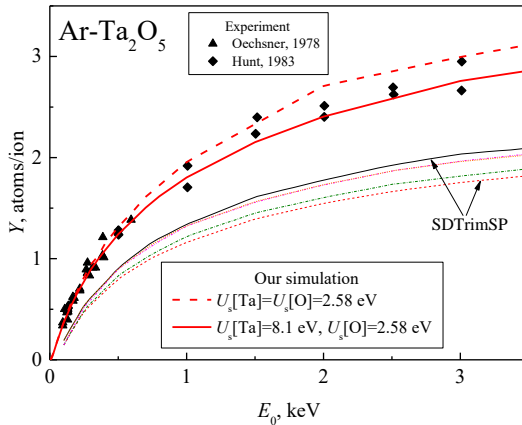


Рисунок 1 – Зависимость суммарного коэффициента распыления  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ионами  $\text{Ar}$  от начальной энергии частиц  $E_0$ . Приведены данные нашего расчета, а также данные расчетов программой SDTrimSP [3] для различных моделей энергий поверхностной связи. Точки – данные экспериментов [4, 5].

На рис. 2 приводятся экспериментальные данные о парциальных составляющих коэффициента распыления для оксида  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . По данным эксперимента вылет молекулярной компоненты  $\text{TaO}$  составляет до 50% от коэффициента распыления. Можно предположить, что молекуле легче покинуть поверхность вследствие меньшей энергии связи. При этом часть молекул может развалиться, и этот процесс может определять выход атомарного  $\text{Ta}$ . Наши данные по выходу кислорода соответствуют сумме коэффициентов распыления для  $\text{O}$  и  $\text{TaO}$ . Как видно из рис. 2, вклад коэффициента распыления кислорода близок к суммарному коэффициенту. В программе SDTrimSP предложено множество вариантов для оценки  $U_s$ , но согласие с экспериментом отсутствует.

Данные по выходу атомарного  $\text{Ta}$  согласуются с экспериментом, если принять в расчете энергию сублимации  $U_s[\text{Ta}] = U_s[\text{O}] = 2.58 \text{ eV}$ , и много ниже эксперимента, если принять  $U_s[\text{Ta}] = 8.1 \text{ eV}$  и  $U_s[\text{O}] = 2.58 \text{ eV}$ . Таким образом,

можно заключить, что при распылении Ta молекулярная структура Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> разрушена и величина потенциального барьера одинакова для всех компонент.

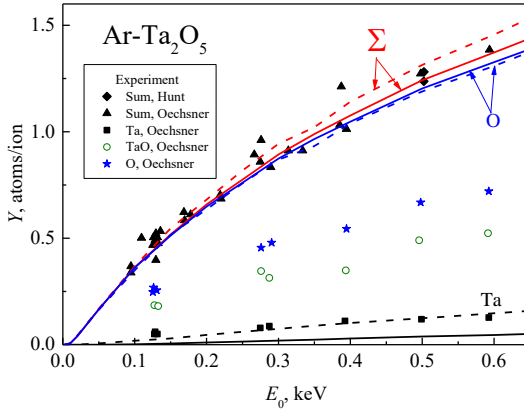


Рисунок 2 – Зависимость суммарного коэффициента распыления Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (отмечено значком  $\Sigma$ ) и парциальных коэффициентов распыления Ta, TaO и O ионами Ar. Приведены данные нашего расчета (пунктирные линия – случай  $U_s[\text{Ta}] = U_s[\text{O}] = 2.58 \text{ eV}$ ; штриховые линии – случай  $U_s[\text{Ta}] = 8.1 \text{ eV}$  и  $U_s[\text{O}] = 2.58 \text{ eV}$ ) и данные эксперимента [4, 5].

Были выполнены расчеты для систем He-MoO<sub>3</sub>, Ne-MoO<sub>3</sub>, Ar-MoO<sub>3</sub> и двух вариантов выбора  $U_s$ . Рассмотрен случай равенства энергии сублимации для Mo и O –  $U_s[\text{Mo}] = U_s[\text{O}] = 1.43 \text{ eV}$ . Значение 1.43 eV взято из справочника [9]. В другом случае принято, что  $U_s[\text{Mo}] = 6.82 \text{ eV}$  и  $U_s[\text{O}] = 1.43 \text{ eV}$ . Значение  $U_s[\text{Mo}] = 6.82 \text{ eV}$  взято из справочника [8] и соответствует энергии сублимации в чистом Mo.

Данные для выхода кислорода O для этих обоих случаев практически совпадают. Данные по выходу Mo значительно отличаются. Опираясь на данные эксперимента для мишени Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, мы отдаем предпочтение данным, представленным на рис. 3.

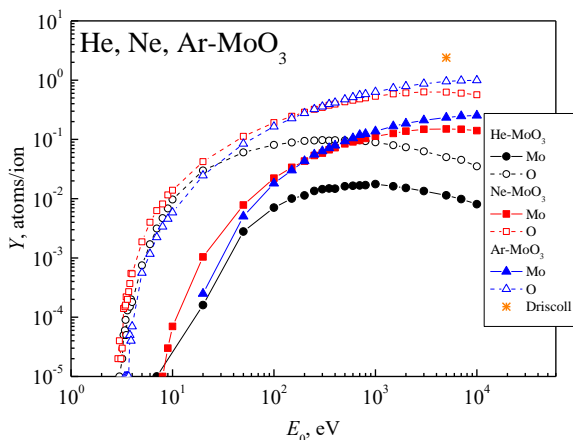


Рисунок 3 – Зависимость парциальных коэффициентов распыления O и Mo при соударениях He-MoO<sub>3</sub>, Ne-MoO<sub>3</sub>, Ar-MoO<sub>3</sub> для случая  $U_s[\text{Mo}] = U_s[\text{O}] = 1.43 \text{ eV}$ . Звездочка – значение суммарного коэффициента распыления, измеренное в [10].

## Литература

- [1] D. Mazon, G. Vayakis, M. Walsh et al., Nucl. Fusion, 65, 113001 (2025). DOI: 10.1088/1741-4326/adfc7c
- [2] D. Depla, Vacuum, 228, 113546 (2024). DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113546
- [3] A. Mutzke, U. von Toussaint, W. Eckstein, R. Dohmen, K. Schmid, SDTrimSP Version 7.00 IPP report 2024-06. (IPP, Greifswald, 2024).
- [4] H. Oechsner, H. Schoof, E. Stumpe, Surf. Sci., 76 (2), 343 (1978). DOI: 10.1016/0039-6028(78)90102-4
- [5] C.P. Hunt, M.P. Seah, Surf. Interf. Anal., 5 (5), 199 (1983). DOI: 10.1002/sia.740050506
- [6] W.D. Wilson, L.G. Hagmark, J.P. Biersack, Phys. Rev. B., 15 (5), 2458 (1977). DOI: 10.1103/PhysRevB.15.2458
- [7] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM. <http://www.srim.org>.
- [8] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics. 8th edition (Wiley, N.Y., 2005).
- [9] W.M. Haynes, CRC Handbook of Chemistry and Physics 95th Edition (CRC Press, Boca Raton, 2014). DOI: 10.1201/b17118
- [10] T.J. Driscoll, L.D. McCormick, W.C. Lederer, Surf. Sci., 187, 539 (1987). DOI: 10.1016/s0039-6028(87)80074-2

Р.И. ХУСНУТДИНОВ<sup>1,2\*</sup>, А.Г. АЛЕКСЕЕВ<sup>2</sup>, Е.Н. АНДРЕЕНКО<sup>2</sup>,  
К.Ю. ВУКОЛОВ<sup>2,3</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, А.В. ГОРШКОВ<sup>2</sup>, Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>,  
А.Б. КУКУШКИН<sup>1,2</sup>, И.А. НИКИТИН<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*\*RIKhusnutdinov@mephi.ru*

## **ЗАВИСИМОСТЬ РАСПЫЛЕНИЯ ПЕРЕЗАРЯДОЧНЫМИ НЕЙТРАЛАМИ БОРНОГО ПОКРЫТИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ИТЭР ОТ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В СОЛ**

Задача оценки эрозии первой стенки является критической при управлении термоядерной установкой. Для прогноза процессов эрозии важно создание быстрого кода расчета рециклинга изотопов водорода в пристеночной плазме, который был бы протестирован путем сравнения с сложными численными кодами, наиболее успешным примером такого рода является код EIRENE [1]. В настоящей работе приведены результаты использования такого быстрого численного кода VM1D2V [2], основанного на полуаналитической баллистической модели [3, 4], соответствующей быстрому коду VM1D1V [5]. Код VM1D2V дополнен модулем, позволяющим оценить распыление материала первой стенки атомами водорода в пристеночной плазме.

В настоящей работе представлены результаты расчетов модифицированным кодом VM1D2V для задачи эрозии бора как материала покрытия вольфрамовой первой стенки токамака. Расчет рециклинга водорода в пристеночной плазме и распыления бора производился в четырех сценариях. Два из них — это сценарии с высокой и низкой плотностью плазмы в пристеночном слое на стороне сильного магнитного поля в токамаке ИТЭР. Профили параметров плазмы (температура и плотность ионов и электронов) были взяты, как и в [5], из расчета кодом SOLPS4.3 [7] сценария №2252 работы дивертора ИТЭР. Результат расчета для атомов водорода вблизи стенки показан на рис. 1. На графиках ось абсцисс соответствует энергии частиц, летящих на стенку, а ось ординат – дифференциальной по энергии и углу плотности потока. Используя эти данные, была рассчитана эрозия бора. Результат расчета распыления бора вблизи стенки показан на рис. 2.

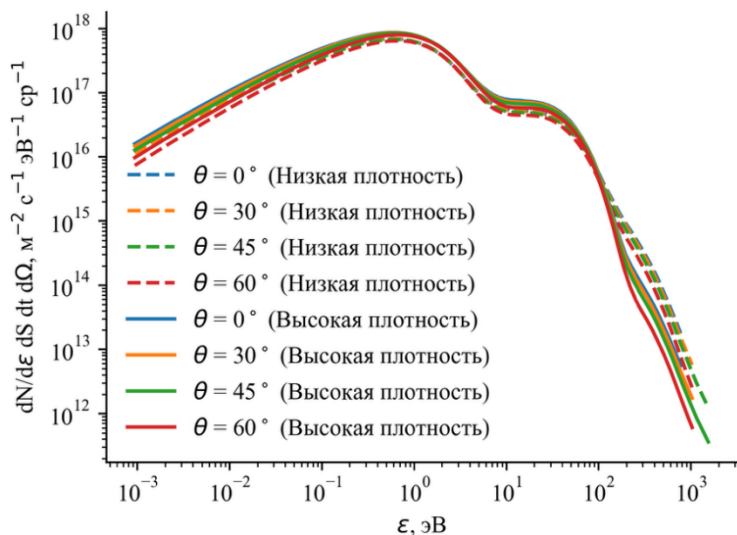


Рисунок 1 – Дифференциальная по энергии и углу плотность потока атомов водорода, падающих на стенку в сценариях с низкой и высокой плотностью плазмы в пристеночном слое плазмы

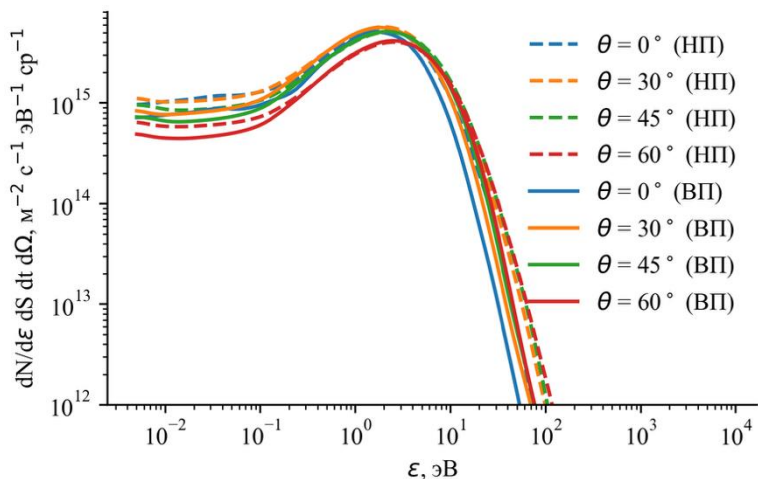


Рисунок 2 – Аналогичное рис. 1 распределение уходящих со стенки распыленных атомов бора

Еще два сценария с низкой и высокой плотностью плазмы, но уже на стороне слабого магнитного поля были взяты из расчетов кодом OEDGE [8]. Для наглядности были взяты сценарии «d» и «i», отличающиеся по плотности плазмы на несколько порядков, при этом температуры как ионов, так и электронов в обоих сценариях близки. Полученная в результате расчета дифференциальная по энергии и углу плотность потока атомов водорода, падающих на стенку, для данных сценариев показана на рисунке 3. Данные профили, в отличие от представленных на рисунке 1, отличаются на два порядка, что показывает существенное влияние пристеночной плотности плазмы на поток атомов перезарядки, летящих на стенку.

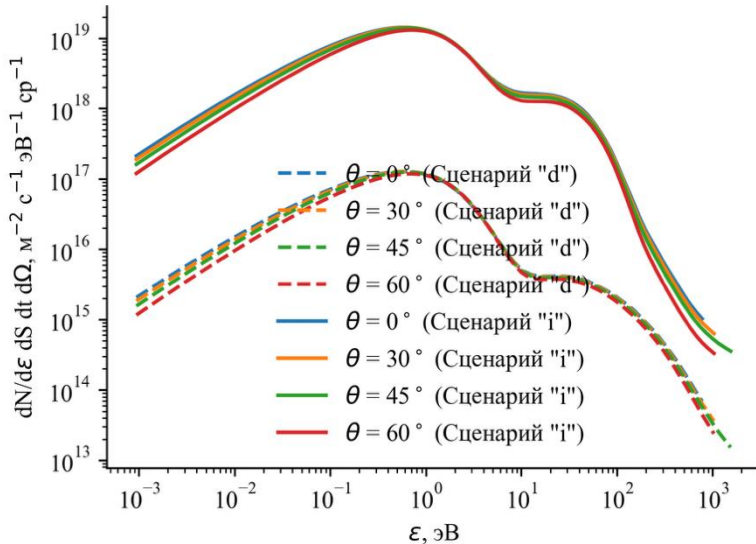


Рисунок 3 – Дифференциальная по энергии и углу плотность потока атомов водорода, падающих на стенку в сценариях «d» и «i»

Аналогично описанному ранее, была рассчитана эрозия бора в данном случае. Результаты расчетов представлены на рисунке 4. Эрозионные потоки также различаются на два порядка.

Отметим, что данная модель не учитывает поток атомов перезарядки, летящих из центральной области плазмы [9]. Данные атомы могут давать сравнимый вклад с распылением пристеночной плазмой, поскольку при меньшем количестве они обладают кинетической энергией, на порядок превосходящий атомы перезарядки из пристеночной плазмы.

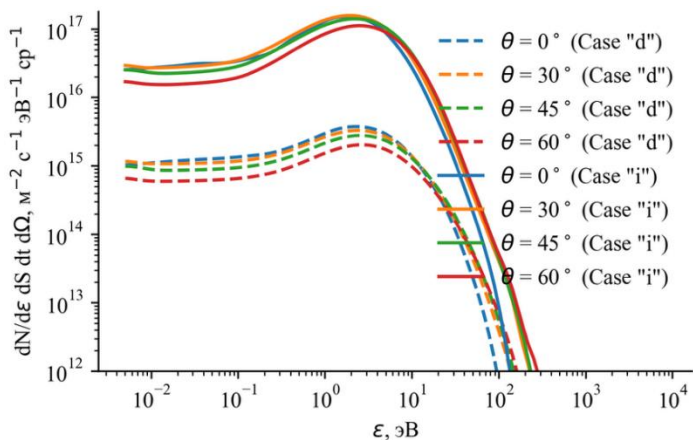


Рисунок 4 – То же, что на рис. 2, но для условий рис. 3.

## Литература

- [1] 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)
- [2] Р.И. Хуснутдинов, Н.Е. Ефимов, И.А. Никитин, Ю.М. Гаспарян и А.Б. Кукушкин. 2024 *ВАИТ (Сер. Терм. Сун.)* Т. 47, №3, С. 117-128.
- [3] 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>)
- [4] 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>)
- [5] 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>)
- [6] A. Mutzke, R. Schneider, W. Eckstein, R. Dohmen, K. Schmid, U. von Toussaint, G. Badelow. (2019). *SDTrimSP Version 6.00* (IPP 2019-02). Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. (<https://doi.org/10.17617/2.3026474>)
- [7] 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>)
- [8] Lisgo S. W., et al., *J. Nucl. Mater.*, 2011, 415, 965.
- [9] Babenko P.Y., Mironov M.I., Mikhailov V.S., Zinoviev A.N. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, № 4, 45020

Н.Н. АНДРИАНОВА<sup>1,2</sup>, А.М. БОРИСОВ<sup>1,2,3</sup>, Р.Р. МУЛЮКОВ<sup>4,5</sup>,  
М.А. ОВЧИННИКОВ<sup>1,\*</sup>, Р.Х. ХИСАМОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,  
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский  
университет), Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва,  
Россия

<sup>4</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

<sup>5</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

\*E-mail: [ov.mikhail@gmail.com](mailto:ov.mikhail@gmail.com)

## **ЭРОЗИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА ПРИ ВЫСОКОДОЗНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ С ЭНЕРГИЕЙ 30 кэВ**

Актуальные для обращенных к плазме материалов в термоядерных установках исследования эрозии вольфрама ионами гелия с энергиями десятки кэВ показывают десятикратно превышающую потерю массы по сравнению с данными моделирования эрозии при физическом распылении [1]. Столь большое различие, обусловленное блистерингом и флекингом, наблюдается как для монокристаллического, так и поликристаллического вольфрама. В наших работах [2,3] с ультрамелкозернистым вольфрамом, полученным интенсивной пластической деформацией, показано сильное влияние размера зерен на блистеринг, а дополнительное создание ионно-индуцированного конусообразного рельефа подавляет образование блистеров на вольфраме. В настоящей работе высокодозное облучение вольфрама при комнатной температуре ионами He<sup>+</sup> с энергией 30 кэВ показывает многократное уменьшение эрозии при формировании в нем ультрамелкозернистой структуры, эрозия ультрамелкозернистого вольфрама с ионно-индуцированным конусообразным рельефом поверхности описывается физическим распылением.

В эксперименте использовали вольфрам марки ВМ-П (99.98 вес.%). Как и в [2,3] ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру в образцах вольфрама с размером зерен 100-300 нм получали с помощью интенсивной пластической деформации. На одном из УМЗ образцов был сформирован регулярный конусообразный рельеф облучением ионами 30 кэВ Ag<sup>+</sup>. Для сравнительных исследований использовали образцы с мелкозернистой (МЗ) структурой со

средним размером зерен 7 мкм, которые получали отжигом УМЗ образцов при 1500°C в течение 1 ч в вакууме.

Облучение образцов ионами He<sup>+</sup> при нормальном падении с энергией 30 кэВ проводили на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [4] с флюенсами от  $\Phi = 1 \times 10^{19}$  до  $6 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>. Плотность тока ионов составляла 0.3 мА/см<sup>2</sup>, поперечное сечение пучка –  $S=0.3$  см<sup>2</sup>. Температура образцов при облучении не превышала 50°C. Для определения потери массы вследствие эрозии образцы взвешивали после каждого этапа облучения. Инструментальная погрешность весов составляла 0.01 мг.

Экспериментальные значения удельной потери массы  $m$  с площадки  $S$  после облучения ионами 30 кэВ He<sup>+</sup> МЗ, УМЗ и УМЗ вольфрама с конусообразным рельефом в зависимости от флюенса  $\Phi$  облучения приведены на рис. 1а. Пунктирная линия показывает удельную потерю массы вольфрама за счет физического распыления согласно выражению  $m/S=Y\Phi \cdot M/N_a$ , где  $Y=0.035$  – коэффициент физического распыления по данным [5],  $N_a$  – число Авогадро,  $M$  – молярная масса мишени.

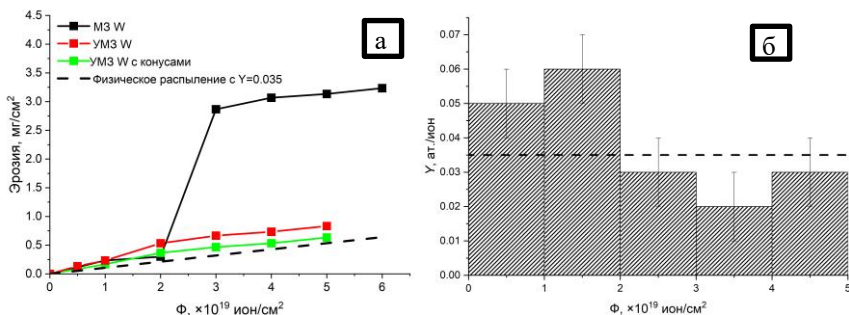


Рис. 1. Зависимость эрозии УМЗ и МЗ вольфрама от флюенса облучения  $\Phi$  ионами He<sup>+</sup> с энергией 30 кэВ (а) и соответствующая данным для УМЗ вольфрама с конусообразным рельефом зависимость коэффициента распыления  $Y = \Delta m N_a / (M \cdot \Delta \Phi \cdot S)$  (б). Пунктир –  $Y = 0.035$  [5].

Видно, что уменьшение размера зерен в вольфраме до 100-300 нм путем интенсивной пластической деформации приводит к многократному уменьшению его эрозии. Также видно, что при флюенсах облучения  $\Phi \geq 3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> скорость эрозии, определяемая наклоном кривых  $m/(S \Phi)$ , стабилизируется для всех образцов вольфрама, независимо от размера зерен в них и рельефа поверхности, и является близкой к скорости эрозии, определяемой коэффициентом физического распыления  $Y = 0.035$ .

Эрозия УМЗ вольфрама показывает минимальные отличия от его эрозии за счет физического распыления, рис.1б. Немного повышенные скорости эрозии при  $\Phi < 3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>, очевидно, связаны с изменением рельефа поверхности в процессе облучения. В частности, облучение ионами гелия УМЗ вольфрама с предварительным ионно-индуцированным рельефом из конусов с наклоном образующей 80° приводит к увеличению угла наклона конусов и их практически полному распылению при  $\Phi \geq 3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>, рис.2.

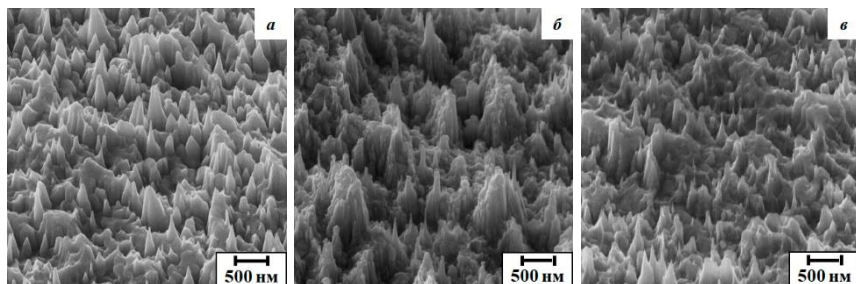


Рис.2. РЭМ изображения поверхности УМЗ вольфрама с конусообразным рельефом до (а) и после облучения ионами He<sup>+</sup> с энергией 30 кэВ при  $\Phi=10^{19}$  (б) и  $5 \cdot 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> (в). Угол наклона при съемке 45°.

Коэффициент распыления  $Y$  при этом уменьшается почти в два раза, что качественно согласуется с моделированием распыления конусообразной морфологии [6,7]. Это также демонстрирует рис.3, на котором по методике [6] с использованием моделирования по программе SRIM приведена

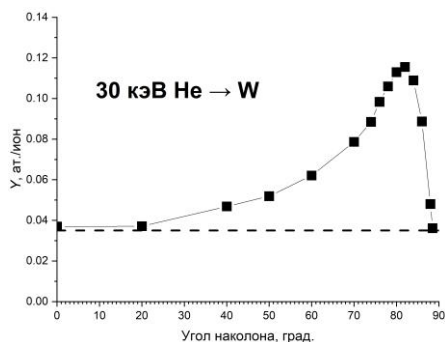


Рис.3. Расчетная зависимость коэффициента распыления  $Y$  вольфрама ионами He<sup>+</sup> с энергией 30 кэВ от угла наклона конусов, полностью

покрывающих поверхность. Пунктир–  $Y_0 = 0.035$  [5]  
расчётная зависимость коэффициента распыления вольфрама ионами гелия с энергией 30 кэВ от угла наклона полностью покрывающих поверхность конусов. Видно, что конусы с углом наклона  $80^\circ$  имеют повышенный коэффициент распыления по сравнению с более гладкой поверхностью и конусами с углом наклона  $>80^\circ$  и их распыление неизбежно будет приводить к рельефу с меньшим коэффициентом распыления.

Работа Н.Н. Андриановой, А.М. Борисова, М.А. Овчинникова выполнена в рамках государственных заданий МГУ им. М.В. Ломоносова и FSFS-2025-0006. Работа Р.Р. Мулюкова, Р.Х. Хисамова выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН. Исследования выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН “Структурные и физико-механические исследования материалов” и “Ускорительного комплекса МГУ”.

## Литература

- [1] L.M. Garrison, G.L. Kulcinski // Phys. Scr. T159 (2014) 014020
- [2] Р.Х. Хисамов, Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов и др. // Ядерная физика и инжиниринг, 2025. Т. 16. № 4. С. 559–564.
- [3] Р.Х. Хисамов, Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов и др. // Поверхность. Рентген., синхр. и нейтр. исслед. 2025. № 4. С. 119–126.
- [4] <http://beam.sinp.msu.ru>
- [5] R. Behrisch, W. Eckstein, Sputtering by Particle Bombardment (Springer, Berlin, Heidelberg, 2007).
- [6] Р.Х. Хисамов, Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов и др. // Поверхность. Рентген., синхр. и нейтр. исслед. 2025. № 2. С. 79–90.
- [7] V.I. Shulga // Vacuum. 2025. V. 240. P. 114489

Г.И. ДОБРОВОЛЬСКИЙ<sup>1\*</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>, А.В. КАЗИЕВ<sup>1</sup>,  
А.В. ТУМАРКИН<sup>1</sup>, М.М. ХАРЬКОВ<sup>1</sup>, К.В. СМИРНОВА<sup>3</sup>,  
М.М. ЦВЕНТУХ<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский  
филиал, Фрязино, МО

<sup>3</sup>МИРЭА, Москва

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

\*dobrogleb@gmail.com

## **ДИАГНОСТИКА СПОНТАННЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ВОЛЬФРАМОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ**

В термоядерных установках вольфрамовые элементы, обращенные к плазме, склонны к образованию наноструктурированных слоев из-за облучения их поверхности интенсивными потоками ионов гелия. Известно, что эти нановолокна вольфрама или вольфрамовый пух способствуют иницированию электрических разрядов на первой стенке.

В данной работе экспериментально исследуется рост наноструктур на вольфрамовых поверхностях в ВЧ-гелиевой плазме и спонтанное иницирование дуг при подаче импульсного напряжения смещения на образец. Для генерации напряжения смещения в одноимпульсном режиме использовался специально разработанный источник питания. Были получены осциллограммы тока и напряжения дуги, а также проанализированы СЭМ-изображения треков дуги, соответствующих зарегистрированным осциллограммам. Поведение дуги на границе гладкой и наноструктурированной поверхностей продемонстрировало благоприятные условия для образования дуги, создаваемые наноструктурированным слоем [1]. Использование одноимпульсного режима смещения позволило регистрировать отдельные следы дуги. На основе экспериментальных результатов были оценены общая длина следа дуги и скорость дуги, которые были сопоставлены с литературными данными, показав хорошее соответствие между экспериментами и теорией.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00274).

### **Литература**

[1] A.V. Kaziev, et al. Physics of Plasmas. 2025. Vol. 32. Art. No. 043503

ШИШКОВА Т.А.<sup>1\*</sup>, ГОЛУБЕВА А.В.<sup>1</sup>, СТЕПАНОВ Н.О.<sup>1</sup>, ЧЕРКЕЗ Д.И.<sup>1</sup>,  
БОБЫРЬ Н.П.<sup>1</sup>, КОЗЛОВ Д.А.<sup>1</sup>, ЧЕРНОВ В.М.<sup>2</sup>, РОЗЕНКЕВИЧ М.Б.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

<sup>2</sup>*ВНИИИМ им. А.А. Бочвара, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева*

*\*Anfimova\_ta@nrcki.ru*

## **УДАЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ СТАЛИ ЭК-181 МЕТОДАМИ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ И ИЗОТОПНОГО ОБМЕНА**

В материалах вакуумной камеры термоядерного реактора будут накапливаться топливные изотопы водорода, в том числе радиоактивный тритий. Поскольку содержание трития в вакуумной камере не должно превышать предельно допустимого значения, необходимо применять специальные методы детритизации. Задача детритизации будет также актуальна при подготовке к утилизации элементов, загрязнённых тритием. Чтобы обеспечить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации термоядерного реактора, целесообразно возвращать извлеченный из материалов тритий в топливный цикл для повторного использования.

В качестве методов детритизации конструкции термоядерных реакторов в первую очередь рассматривают термодегазацию (прогрев) и изотопный обмен [1]. Нагрев материала активизирует извлечение трития из ловушек кристаллической решётки и диффузию к поверхности материала из объёма. Метод изотопного обмена основан на замещении в материале трития дейтерием при воздействии в виде плазмы или газа. Большинство работ по исследованию эффективности указанных методов детритизации посвящено вольфраму как облицовочному материалу. В то же время для конструкционных материалов число таких работ весьма ограничено. Из-за сложности организации работ с тритием эффективность методов детритизации зачастую исследуют, используя нерадиоактивные изотопы водорода.

Целью данной работы является сравнение эффективности удаления дейтерия из стали ЭК-181 методами прогрева в вакууме и изотопного обмена. Сталь ЭК-181 – это отечественная малоактивируемая ферритно-мартенситная сталь. Стали этого класса предлагаются к использованию в вакуумных камерах термоядерных реакторов следующего поколения.

В настоящей работе все экспериментальные образцы стали ЭК-181 насыщали дейтерием путем выдержки в газе при температуре 473 К и

давлении 0,5 МПа в течение 25 часов. Для удаления дейтерия часть образцов прогревали в вакууме при температурах 373 – 623 К. Вторую часть образцов прогревали в газе  $\text{H}_2$  при температуре 473 К при давлениях в диапазоне  $5 \cdot 10^3$  –  $5 \cdot 10^5$  Па. Часть образцов облучали противовой плазмой при температуре 473 К. Содержание дейтерия во всех образцах определяли методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС).

Из результатов ТДС следует, что прогрев в газе  $\text{H}_2$  при температуре 473 К и при давлениях не менее  $5 \cdot 10^4$  Па является более эффективным методом удаления дейтерия по сравнению с прогревом в вакууме. Самым эффективным из рассмотренных методов удаления дейтерия является облучение противовой плазмой.

Результаты исследования эффективности прогрева в вакууме и изотопного обмена могут быть использованы для предварительной оценки применимости этих методов в процессах детритизации.

## **Литература**

- [1] Pitts R.A., Loarte A., Wauters T. et al. Plasma-wall interaction impact of the ITER re-baseline // Nuclear Materials and Energy, 2025, vol. 42, p. 101854.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК .....	3
ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА, ВКЛЮЧАЯ ВОЛЬФРАМОВЫЕ И ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ .....	5
СОЗДАНИЕ ПОДВИЖНОГО ЛИТИЕВОГО МОДУЛЯ НА ПРИЕМНОМ ДИВЕРТОРНОМ УСТРОЙСТВЕ ТОКАМАКА КТМ.....	9
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЯР .....	13
ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ МОЛИБДЕНА ЛИТИЕМ.....	14
ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПРОЧНОГО ГРАФИТА МАРКИ АТJ, ОБРАЩЕННОГО К ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА EAST .....	15
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ ТОКАМАКА Т-15МД .....	19
ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ И РАЗМЕРА ЗЁРЕН ВОЛЬФРАМА НА РОСТ ПУХА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ.....	22
НАКОПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В БОРСОДЕРЖАЩИХ ОСАЖДЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАГНЕТРОННОГО И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ .....	26
СТАБИЛЬНОСТЬ ПЛЕНОК БОРА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ.....	29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ДИБОРИДА ТИТАНА НА РОЛЬ ОБРАЩЕННОГО К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛА: УСТОЙЧИВОСТЬ К ИМПУЛЬСНОМУ НАГРЕВУ .....	31
ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПР-8 ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ МАТЕРИАЛОВ И ВНУТРИКАМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	34
СОЗДАНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕСЬЮ Li ДЛЯ ЭРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАНОВКЕ ПР-2 .....	38
ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ НАНОВОЛОКОН ВОЛЬФРАМА .....	41
ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В СООСАЖДЁННЫХ ЛИТИЕВЫХ СЛОЯХ ОТ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ ПОДЛОЖКИ ВО ВРЕМЯ ОСАЖДЕНИЯ .....	45
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЛИТИИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА МИФИСТ-0 .....	49
ФЛУОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ .....	51
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПЭ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО ЛИТИЯ .....	54
IN-SITU И EX-SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЯХ .....	58
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ .....	61
ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАЗЕРНО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ...	65

ПРОГРЕСС РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО КОДА KITE, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В СЛОЖНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ	67
ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ДВУХСПЕКТРАЛЬНАЯ ИК-ТЕРМОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ .....	69
МЕТОД РАСЧЕТА БЫСТРОГО ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ НА ПЛАСТИНАХ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В КОДЕ SOLPS-ITER .	72
РАСПЫЛЕНИЕ ОКСИДОВ МОЛИБДЕНА И ТАНТАЛА ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ.....	74
ЗАВИСИМОСТЬ РАСПЫЛЕНИЯ ПЕРЕЗАРЯДОЧНЫМИ НЕЙТРАЛАМИ БОРНОГО ПОКРЫТИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ИТЭР ОТ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В СОЛ .....	78
ЭРОЗИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА ПРИ ВЫСОКОДОЗНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ С ЭНЕРГИЕЙ 30 кэВ .....	82
ДИАГНОСТИКА СПОНТАННЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ВОЛЬФРАМОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ .....	86
УДАЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ СТАЛИ ЭК-181 МЕТОДАМИ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ И ИЗОТОПНОГО ОБМЕНА .....	87

**МАТЕРИАЛЫ  
XXIX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**Сборник научных трудов**

Москва, НИЯУ МИФИ, 5-6 февраля 2026 г.

Подписано в печать 29.01.2026. Формат 60x84 1/16.  
Уч.-изд. л. 5,75. Печ. л. 5,75. Изд. № 004-2.

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