

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Гаспарян Юрий Микаэлович

**ЗАХВАТ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ
СТАЦИОНАРНОМ И МОЩНОМ ИМПУЛЬСНОМ
ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ**

1.3.9 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Официальные оппоненты:

Будаев Вячеслав Петрович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела токамака Т-10, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва;

Тажибаева Ирина Лашкаровна

доктор физико-математических наук, профессор, исполнительный директор научно-технического центра безопасности ядерных технологий, г. Алматы, Республика Казахстан;

Черныш Владимир Савельевич

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва;

Зиновьев Александр Николаевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией атомных столкновений в твердых телах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

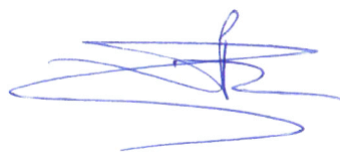
Защита диссертации состоится “24” апреля 2024 года в 15 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета МИФИ.01.01 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте: <http://ds.mephi.ru>

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2024 года

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенных печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.01.01
кандидат физико-математических наук



Степаненко А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность направления исследований

Управляемый термоядерный синтез является одним из наиболее перспективных и безопасных источников энергии. Наибольший прогресс на пути к практической реализации промышленного реактора достигнут в установках с магнитным удержанием плазмы. Ведется активная работа по строительству международного экспериментального реактора ИТЭР (Кадараш, Франция), в котором должно быть продемонстрировано длительное (400 секунд) удержание горячей D-T плазмы с отношением произведенной термоядерной энергии к вложенной на уровне $Q = 10$. Параллельно во многих странах ведется проектирование демонстрационных (DEMO) реакторов следующего поколения для отработки необходимых реакторных технологий.

Эксплуатация проектируемых термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы, помимо сложностей, характерных для существующих установок, столкнется с проблемой радиационной безопасности, поскольку рабочий газ будет содержать радиоактивный тритий. Эксперименты с тритием, проведенные в конце XX века на токамаках TFTR (США) и JET (Великобритания), продемонстрировали рекордные на тот момент показатели по производству термоядерной энергии в ходе разряда [1,2], однако, негативным результатом этих экспериментов было недопустимо большое накопление трития в установках. Причиной столь высокого удержания трития стали особенности взаимодействия изотопов водорода с графитом, из которого были изготовлены обращенные к плазме элементы.

В ИТЭР основную площадь стенки планировалось покрывать бериллием, а область с максимальными потоками тепла и частиц (дивертор) – вольфрамом [3]. В настоящий момент рассматривается вариант полностью вольфрамовой облицовки стенки. Возможность достижения хороших параметров удержания плазмы с «полностью металлической» стенкой была продемонстрирована на токамаках ASDEX-Upgrade (Германия) и JET (Великобритания). При этом

скорость накопления изотопов водорода в обоих случаях снизилась более чем на порядок величины по сравнению с экспериментами с углеродной стенкой [4,5].

Согласно многим оценкам, накопление трития в ИТЭР с бериллий-вольфрамовой стенкой должно быть в пределах допустимых норм на протяжении всего времени работы установки. При этом, предполагается, что захват трития в вольфрамовые элементы стенки не будет определяющим. Эти расчеты, однако, не учитывали некоторые факторы, влияние которых было недостаточно изучено на тот момент. В результате DT-реакции в плазме накапливается примесь гелия, в объеме стенки гелий также образуется в результате ядерных реакций и бета-распада трития. Накопление гелия приводит к трансформации поверхности и может оказывать существенное влияние на эффективность захвата и удержания изотопов водорода. Другим важным фактором является наличие в режимах с наиболее высокими характеристиками удержания плазмы быстрых переходных процессов, которые характеризуются короткими временами, но чрезвычайно высокими потоками тепла и частиц на стенку. Накопление изотопов водорода в облучаемых материалах в ходе таких процессов также не было изучено. Достаточно большой оставалась неопределенность в характеристиках взаимодействия изотопов водорода с индуцированными нейтронами радиационными дефектами и влияния легирующих добавок в новых вольфрамовых сплавах, разрабатываемых для повышения эксплуатационных характеристик. Все эти факторы вносят значительную неопределенность в оценках накопления трития в термоядерных установках.

Процессы захвата и обратного газовыделения водорода со стенки, так называемого рециклинга, оказывают также серьезное влияние на эффективность удержания и свойства плазменного шнура. Контроль рециклинга изотопов водорода оказывается особенно важным при росте длительности разрядов, когда поток частиц со стенок может даже превышать падающий на стенку поток частиц [6].

Смежной задачей является диагностика содержания водорода в материалах реактора в процессе его работы. В отличие от диагностики плазмы, развитие методов контроля состояния и состава поверхности стенок происходит гораздо менее активно, хотя проблема стоит не менее остро и обозначена ИТЭР как одна из приоритетных [7].

Все перечисленные аспекты накопления изотопов водорода в вольфраме являются актуальными как для существующих плазменных установок, так и для ИТЭР. Еще более актуальными они являются для ДЕМО реакторов, где ожидаются гораздо большие дозы нейтронов, мощность и длительность плазменных разрядов, а вольфрам рассматривается в ряде проектов [8] как основной кандидат для облицовки обращенных к плазме элементов.

Цель и задачи работы

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей накопления изотопов водорода в вольфраме в условиях, имитирующих основные особенности термоядерных реакторов, и получение количественных характеристик, необходимых для оценки накопления трития.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- 1) Разработка и реализация экспериментальных методов для получения достоверных данных о взаимодействии дейтерия с радиационными дефектами в вольфраме.
- 2) Определение характеристик взаимодействия дейтерия с вакансиями и вакансионными кластерами, а также дефектами, образованными при облучении МэВными ионами вольфрама, имитирующими нейтронное повреждение.
- 3) Исследование особенностей транспорта дейтерия в объеме вольфрама в ходе ионного облучения поверхности при наличии высокой концентрации дефектов кристаллической решетки и при наличии углеродной пленки на поверхности.

- 4) Изучение особенностей захвата гелия на стадии значительной модификации поверхностного слоя в широком диапазоне температур и влияния гелия на накопление изотопов водорода.
- 5) Исследование захвата дейтерия в вольфраме при облучении мощными импульсными потоками плазмы, характерными для быстрых переходных процессов в крупных токамаках.
- 6) Анализ применимости лазерно-ассистированных методов для дистанционного определения содержания изотопов водорода в стенках токамака.

Научная новизна

- 1) Разработана схема проведения эксперимента для получения на спектрах термодесорбции дейтерия из вольфрама изолированных пиков, соответствующих выходу дейтерия из вакансий и вакансионных кластеров, что позволило определить соответствующие энергии связи дейтерия методом Киссинджера.
- 2) Впервые проведены измерения термодесорбции дейтерия из вольфрама, поврежденного собственными ионами W^{6+} с энергией 20 МэВ для имитации нейтронного повреждения, на основе которых определены энергии выхода дейтерия из образованных дефектов.
- 3) Впервые проведены экспериментальные измерения проникновения ионно-имплантированного дейтерия через вольфрам с углеродной пленкой и обнаружено диаметрально противоположное влияние углеродной пленки на проникающий поток в подложку в зависимости от интегральной дозы облучения. Предложена модель, объясняющая основные экспериментальные закономерности.
- 4) Впервые измерено накопление дейтерия в вольфраме при мощных импульсных плазменных нагрузках, имитирующих быстрые переходные процессы в токамаках, и обнаружена возможность

высокого уровня накопления дейтерия в объеме материала даже при плавлении поверхности.

- 5) Впервые экспериментально продемонстрировано явление замещения изотопов гелия в поверхностном слое вольфрама в ходе последовательного ионного облучения.
- 6) Впервые исследована зависимость накопления дейтерия в поверхностном слое вольфрама в зависимости от содержания в нем гелия и показано резкое снижение эффективности удержания дейтерия при высокой концентрации гелия.
- 7) Предложена и реализована новая методика определения содержания гелия в наноструктурированном поверхностном слое вольфрама («пух») на основе термодесорбционных измерений.
- 8) Впервые проведено сравнение термодесорбции гелия из вольфрама после ионного внедрения до и после контакта с атмосферой и показана ключевая роль этого контакта на возможность выхода гелия в ходе ТДС измерений ниже температуры облучения.
- 9) Впервые исследован захват ионов дейтерия и гелия в вольфрамовых сплавах W-Cr-Y и определены энергии взаимодействия дейтерия с наиболее сильными ловушками.
- 10) Впервые исследованы закономерности выхода дейтерия из вольфрамовых пленок и элементов стенки токамака Глобус-М под действием наносекундного лазерного излучения для обоснования возможности количественного измерения содержания изотопов водорода в узком поверхностном слое обращенных к плазме элементов термоядерных установок.

Практическая значимость работы

Созданы новые сверхвысоковакуумные установки, которые позволяют проводить облучение материалов двумя сортами ионов кэВных энергий, термодесорбционный анализ с возможностью разделения газов близких масс, без

контакта с атмосферой и до 2500 К, и получать сведения о ранее неизвестных особенностях захвата и обратного газовыделения дейтерия, гелия, и их взаимного влияния, которые будут востребованы для дальнейших исследований.

Полученные значения энергии связи дейтерия с ионно-индуцированными дефектами и экспериментальные спектры термодесорбции уже сейчас используются для верификации теоретических расчетов и моделей, на основе которых проводится анализ накопления трития в термоядерных установках.

Выявлены факторы, которые могут значительно влиять на скорость накопления трития в условиях термоядерных установках. Продемонстрирована возможность повышения проникающего потока дейтерия в объем вольфрама при наличии тонкой углеродной пленки на его поверхности в ходе длительного ионного облучения.

Показано, что при мощных импульсных плазменных нагрузках, приводящих к резкому увеличению температуры поверхности вплоть до плавления, количество захваченного газа превышает значения, которые обычно наблюдаются в экспериментах по стационарному плазменному облучению, в результате чего скорость накопления трития при наличии ELM-событий может превышать ожидаемые значения, рассчитанные на основе стационарных потоков.

Показано, что накопление гелия в поверхностном слое до высоких концентраций приводит к снижению эффективности удержания дейтерия в вольфраме и поэтому в термоядерных установках появление примеси гелия не будет приводить к повышению накопления трития в стенках.

Экспериментально апробирована и продемонстрирована высокая чувствительность лазерно-ассистированной диагностики содержания изотопов водорода в стенках термоядерных установок с использованием наносекундного лазерного излучения, которая будет использована на токамаке Глобус-М2 для дальнейших исследований и рассматривается для токамака с реакторными технологиями (ТРТ), проектируемого в настоящее время в России.

Достоверность полученных результатов

Достоверность экспериментальных данных определяется использованием современного оборудования, регулярным проведением калибровочных экспериментов, тестами на воспроизводимость результатов, сопоставлением данных с другими методами анализа (там, где это возможно), а также сопоставлением с результатами численного моделирования с использованием кодов, принятых в мировом термоядерном сообществе как надежные.

Часть используемого оборудования была задействована в сравнительных термодесорбционных экспериментах, организованных рабочей группой МАГАТЭ «Deuterium Retention in Radiation Damaged Tungsten Materials», где было получено хорошее согласие с остальными зарубежными научными группами.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Энергии выхода дейтерия из вакансий и вакансионных кластеров в вольфраме составляют, соответственно, $(E_b + E_{dif})_{vac} = 1,56 \pm 0,06$ эВ и $(E_b + E_{dif})_{vc} = 2,10 \pm 0,02$ эВ.
- 2) Повреждение вольфрама ионами W^{6+} с энергией 20 МэВ приводит к образованию высокой концентрации сильных ловушек с энергией $(E_b + E_{dif}) = 1,7 - 2,1$ эВ. Это приводит к достижению высокой концентрации дейтерия в вольфраме при плазменном облучении, свыше 0,1 ат.% при температурах до 700 К.
- 3) Углеродная пленка на поверхности вольфрама с толщиной, превышающей глубину внедрения, может как замедлять (при низких дозах ионов), так и ускорять (при высоких дозах ионов) проникновение дейтерия через вольфрам при ионном внедрении.
- 4) При облучении вольфрама мощными импульсными плазменными потоками (плотность энергии: 0,5 – 3,5 МДж/м², длительность: 0,2 – 1 мс), приводящими к нагреву поверхности вплоть до ее плавления, наблюдается аномально высокий для таких температур

захват дейтерия и накопление дейтерия увеличивается с увеличением вкладываемой в плазменный поток энергии.

- 5) Температура выхода гелия из вольфрама определяется концентрацией и шириной профиля дефектов. При малых концентрациях и широком профиле распределения (> 1 мкм) возможно длительное удержание при температурах свыше 2000 К. При достижении высокой концентрации гелия (> 10 ат.%) становится возможным его выход при низких температурах и эффективным процесс замещения удерживаемых частиц гелия вновь имплантированными ионами при комнатной температуре.
- 6) Эффективность захвата ионов дейтерия в поверхностном слое вольфрама резко снижается при достижении в нем высокой концентрации гелия.
- 7) Контакт с атмосферой приводит к облегченному выходу захваченных в поверхностном слое вольфрама атомов гелия, становится возможным выход при температурах меньших, чем температура облучения.
- 8) Наличие легирующих элементов в вольфрамовых сплавах W-Cr-Y не приводит к расширению диапазона энергий связи дейтерия с ловушками по сравнению с чистым вольфрамом.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы многократно докладывались на профильных международных и всероссийских конференциях: International Workshop/Conference on Plasma Facing Materials and Components for Fusion Applications (2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017), международные конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021), International Conference on Plasma Surface Interaction (2008, 2010, 2012, 2014, 2016), International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials (2008, 2010, 2012, 2014), International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM, 2009, 2021), 30th Symposium on Fusion

Technology (SOFT, 2018), международные конференции "Взаимодействие плазмы с поверхностью" (2012-2023), Research Coordination Meeting (RCM) of the Coordinated Research Project (CRP) on "Plasma-Wall Interaction with Irradiated Tungsten and Tungsten Alloys in Fusion Devices" (2013, 2015, 2017), International workshop on Models and Data for Plasma-Material Interaction in Fusion Devices, (2015, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 110 печатных работ, включая 36 в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ и журналах, включенных в базы Web of Science и Scopus, 1 патент на изобретение, 72 публикации в сборниках трудов и тезисов международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора

Все основные результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии. Это относится к постановке задач исследования, планированию экспериментов, разработке экспериментальных установок, проведению экспериментов, анализу их результатов и численному моделированию. Консультации в этих работах оказывали проф. А.А. Писарев (НИЯУ МИФИ), М. Майер (Институт физики плазмы им. Макса Планка), О.В. Огородникова (НИЯУ МИФИ), Н.Н. Трифонов (НИЯУ МИФИ). Большая часть работ выполнена при активном участии студентов и аспирантов, работавших под руководством автора.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения. Работа содержит 269 страниц, 145 рисунков, 3 таблицы. Список литературы включает 266 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, новизна и практическая значимость, а также выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приведен обзор основных публикаций по тематике работы, рассмотрены основные требования к материалам обращенных к плазме элементов (ОПЭ) термоядерных установок (ТЯУ), причины интереса к вольфраму и материалам на его основе, ключевые механизмы накопления изотопов водорода и гелия в условиях работы ТЯУ и актуальные экспериментальные и теоретические данные о поведении водорода и гелия в вольфраме.

Отмечается, что при использовании ОПЭ из вольфрама, в отличие от материалов из элементов с низким атомным номером (Be, C), ожидается малый вклад в интегральное накопление трития процесса со-осаждения частиц рабочего газа с продуктами эрозии стенки. Накопление же в объеме ОПЭ во многом определяется концентрацией дефектов кристаллической решетки, которая в условиях термоядерного реактора будет расти под действием нейтронного облучения. Поэтому значительные усилия направлены на уточнение характеристик взаимодействия изотопов водорода с различными видами дефектов в вольфраме, включая повреждения, создаваемые МэВными ионами вольфрама для имитации нейтронного воздействия. При этом отмечается значительный разброс теоретических и экспериментальных значений энергии связи водорода даже с вакансиями, наиболее простыми дефектами. Частично это связано с процедурой получения таких данных. Анализируется обычно удержание водорода после высоких доз облучения, приводящих к широкому разнообразию дефектов, вызванному в том числе и высокой заселенностью ловушек. Энергии связи получаются путем моделирования экспериментальных спектров термодесорбции с перекрывающимися пиками с использованием дополнительных параметров, известных с недостаточной точностью.

Показано, что скорость заполнения ловушек при плазменном облучении сильно зависит от состояния поверхностного слоя. В частности, в ряде экспериментов наблюдалось уменьшение скорости накопления изотопов водорода в вольфраме при наличии в плазме примеси гелия, сопровождающееся сильной модификацией поверхности. При этом детальное изучение процессов в поверхностном слое вольфрама при наличии гелия не проводилось.

На момент начала проведения работы отсутствовали также данные о скорости накопления изотопов водорода в вольфраме при появлении на поверхности пленок других элементов, а также при воздействии мощных импульсных потоков плазмы. Хотя режимы с максимальными характеристиками удержания плазмы в термоядерных установках сопровождаются быстрыми переходными процессами (ELM-события, Edge localized modes), в ходе которых на поверхность ОПЭ попадают дополнительные мощные импульсные потоки тепла и частиц (в ИТЭР: импульсы до ~ 2 ГВт/м² длительностью 250 – 500 мкс), а при использовании нескольких материалов ОПЭ, как это предполагалось в ИТЭР, взаимное перепыление материалов друг на друга неизбежно.

Во **второй главе** рассмотрены методические особенности проводимых экспериментов. Основным методом изучения поведения изотопов водорода и гелия в вольфраме в проводимых работах была термодесорбционная спектроскопия (ТДС), которая позволяет анализировать интегральное накопление частиц в твердом теле, а также характеристики материала, определяющие эффективность захвата и удержания имплантированных частиц. Хорошо дополняющим ТДС методом исследования является измерение проникающего потока изотопов водорода через мембрану при бомбардировке ее поверхности ионами.

Представлены экспериментальные подтверждения большого влияния на результаты процедуры проведения ТДС измерений, а именно, времени между окончанием облучения и началом измерений, а также контакта с атмосферой.

Описаны особенности масс-спектрометрических измерений при одновременной десорбции гелия (^3He , ^4He) и дейтерия (HD , D_2).

Проанализирована возможность определения характеристик взаимодействия водорода с ловушками в твердом теле. Отмечается, что наиболее надежно может быть определена сумма энергии связи и диффузионного барьера ($E_b + E_{dif}$), которая обычно предполагается равной энергии выхода водорода из ловушек E_{dt} . В ходе измерений важно обеспечивать высокую скорость рекомбинации водорода на поверхности, что можно реализовать при *in situ* ТДС измерениях. В противном случае при анализе экспериментов требуется учет процессов на поверхности. В частности, в случае достаточно высокой скорости рекомбинации (в работе получен численный критерий) методом Киссинджера возможно определение суммы ($E_b + E_{dif}$) в серии ТДС измерений одинаково подготовленных образцов с различной скоростью нагрева по сдвигу температуры максимума десорбции (T_{max}):

$$\frac{E_b + E_{dif}}{kT_{max}^2} = \frac{dt}{dT} v_{eff} \exp\left(-\frac{E_b + E_{dif}}{kT_{max}^2}\right), \quad (1)$$

где $v_{eff} \approx \frac{\pi^2 D_0 n_{Me}}{d^2 N_t}$, d – толщина слоя залегания водорода с концентрацией ловушек N_t и энергией связи E_b , $D = D_0 \times \exp(-E_{dif}/kT)$ – коэффициент диффузии, n_{Me} – концентрация атомов твердого тела, k – постоянная Больцмана. Важно, что при этом не требуется знание никаких дополнительных параметров, как в случае компьютерного моделирования экспериментальных спектров.

Представлено описание основных экспериментальных установок, созданных или модифицированных при непосредственном участии автора. Большая часть экспериментов проводилась на ионно-пучковой установке Медион, которая в современном виде позволяет в условиях сверхвысокого вакуума проводить отжиг образцов, облучение двумя независимыми моноэнергетичными, сепарированными по массе пучками ионов и *in situ* ТДС измерения без контакта с атмосферой с разделением сигналов дейтерия и гелия. Анализ содержания захваченных частиц в образцах, облученных в различных

плазменных установках, проводился в сверхвысоковакуумном ТДС стенде, позволяющем регистрировать десорбцию частиц до температуры 2500 К, что недоступно в большинстве аналогичных установок. Скорость нагрева в ходе ТДС составляла 2 К/с во всех экспериментах, кроме отдельно указанных случаев.

Эксперименты по проницаемости проводились на установке PERMEX в Институте физики плазмы им. Макса Планка (Гархинг, Германия), здесь же проводилось облучение образцов МэВными ионами и анализ состава поверхности методами ядерных реакций (МЯР) и обратного резерфордовского рассеяния (ОРР). Автором разработана конструкция держателя образца, позволившая проводить многодневные эксперименты по измерению проникающего потока и анализ состава поверхности по окончании эксперимента.

Приведено описание компьютерных кодов, использованных в расчетах, лежащие в их основе базовые уравнения и используемые значения основных параметров.

В третьей главе описаны эксперименты по определению энергии связи дейтерия с радиационными дефектами в вольфраме. В первой части главы обсуждаются эксперименты, проведенные на установке Медион, где проводилось облучение малыми потоками низкоэнергетичных ионов для изучения общих закономерностей накопления дейтерия в вольфраме, а также определения энергии выхода дейтерия из вакансий и вакансионных кластеров, что имеет значение для верификации теоретических расчетов и моделей.

При базовой процедуре проведения эксперимента, когда ТДС измерения проводились непосредственно после облучения поверхности вольфрама ионами дейтерия, спектры термодесорбции состояли из широких пиков, наплывающих друг на друга, что усложняло их детальное изучение. Это связано с большим разнообразием образующихся в ходе облучения дефектов, а также высокой степенью заполнения и зависимостью энергии связи с ловушками от их

заселенности. Анализ становится проще при малой концентрации ловушек и водорода в них, а также доминировании одного из видов ловушек.

Для определения энергии связи с вакансиями и вакансионными кластерами рекристаллизованный (30 минут, 1800 К) образец вольфрама облучался при комнатной температуре относительно малой дозой ($3 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$) ионов D^+ с максимально возможной в условиях данной установки энергией 10 кэВ. В этих условиях ожидается доминирование дефектов вакансионного типа. Согласно расчетам в коде SDTrimSP (пороговая энергия смещения атома решетки – 90 эВ), профиль образованных при таком облучении дефектов имеет близкое к Гауссовскому распределение с максимумом на расстоянии 23 нм от поверхности и уровнем повреждений в максимуме $6,3 \times 10^{-3}$ сна (учитывая коэффициент отражения $R = 0,27$). Однако уже при таких дозах облучения спектр термодесорбции дейтерия имеет достаточно сложную структуру из нескольких пиков (рис.1, спектр 1), что говорит об образовании нескольких типов центров захвата.

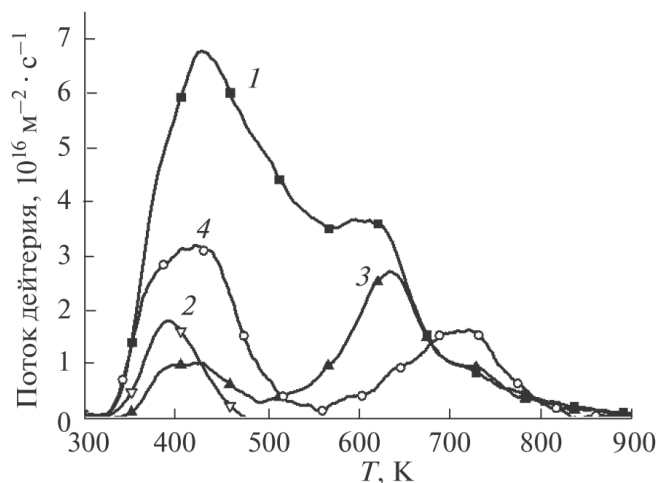


Рис.1. Сравнение ТДС спектров дейтерия из вольфрама: (1) облучение ионами D^+ с энергией 10 кэВ дозой $3 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$; (2) облучение ионами D_3^+ (2 кэВ, $1 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$); (3) облучение ионами D^+ (10 кэВ, $3 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$), выдержка 5 минут при 550 К, облучение ионами D_3^+ (2 кэВ, $1 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$); (4) облучение ионами D^+ (10 кэВ, $3 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$), выдержка 5 минут при 800 К, облучение ионами D_3^+ (2 кэВ, $1 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$)

После уменьшения содержания дейтерия в образце путем выдержки в течение 5 минут при температуре 550 К и последующего облучения ионами D_3^+ с энергией 2 кэВ (ниже порога образования пары Френкеля) и дозой $1 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$

был получен более простой спектр с хорошо изолированным пиком при температуре 630 К (спектр 3). С увеличением температуры обезгаживания наблюдалось уменьшение амплитуды данного пика и рост пика с максимумом при температуре 720 К, который доминировал при температуре выдержки 800 К перед повторным облучением (спектр 4). Согласно исследованиям методом позитронной аннигиляции в [9], в этом диапазоне температур активируется кластеризация вакансий и можно ожидать соответствие первого пика (630 К) выходу дейтерия из вакансий, а второго (720 К) – из вакансионных кластеров.

Для удаления дефектов после каждого измерения проводился отжиг образца в течение 1 часа при температуре 1700 К и процедура эксперимента повторялась заново. Влияния предварительной истории в случае облучений с малой дозой не наблюдалось, хотя образование устойчивых к такому отжигу пор в зоне облучения наблюдалось при использовании больших доз облучения. Положение пиков при многократных повторениях процедуры эксперимента на одном образце повторялось с высокой точностью, поэтому такой подход позволил определить энергию выхода дейтерия из соответствующих ловушек методом Киссинджера (рис.2), т.е. в серии идентичных экспериментов, но с разной скоростью нагрева в ходе ТДС измерений.

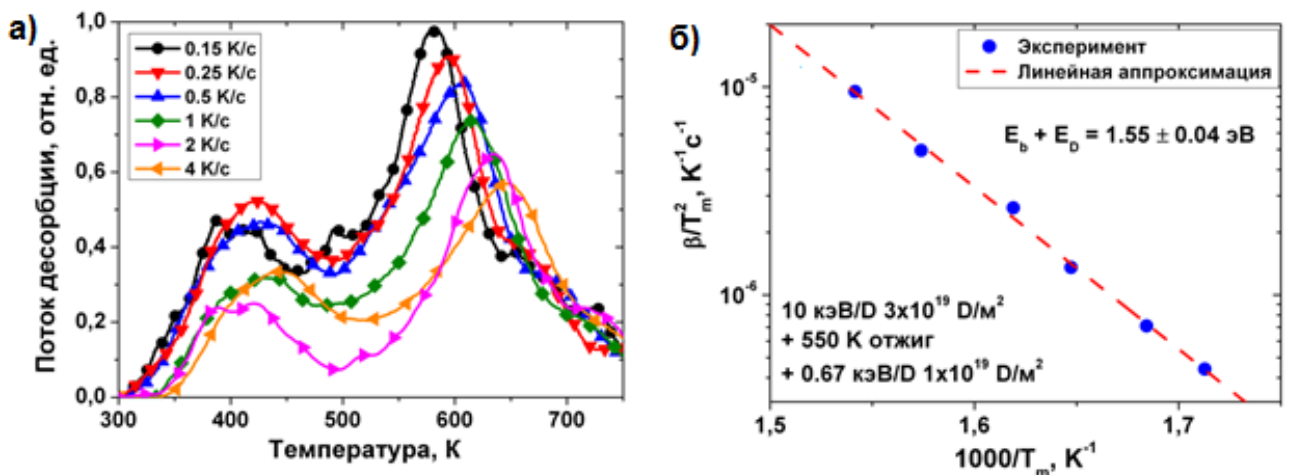


Рис.2. а) ТДС дейтерия из вольфрама после предоблучения (D^+ , 10 кэВ, $3 \times 10^{19} D/m^2$) при комнатной температуре, выдержки при 550 К в течение 5 минут и облучения ионами D_3^+ с энергией 2 кэВ и дозой $1 \times 10^{19} D/m^2$ при различной скорости нагрева (0,15 – 4 К/с) в ходе ТДС. Спектры приведены в разном масштабе. б) Зависимость β/T_m^2 от $1/T_m$ для высокотемпературного пика и линейная аппроксимация (β – скорость нагрева)

Зависимость положения максимума от скорости нагрева (рис.2б) в случае доминирования пика, отнесенного к выходу дейтерия из вакансий, хорошо описывается уравнением (1), на основе которого было получено соответствующее значение для суммы энергии связи дейтерия с вакансией и диффузионного барьера $(E_b + E_{dif})_{vac} = 1,56 \pm 0,06$ эВ.

Аналогичная серия экспериментов была проведена для определения энергии взаимодействия дейтерия с вакансионными кластерами (рис.3) с температурой выдержки после первичного облучения 800 К. Зависимость смещения положения пика термодесорбции от скорости нагрева также хорошо описывается уравнением (1) со значением энергии $(E_b + E_{dif})_{vc} = 2,10 \pm 0,02$ эВ.

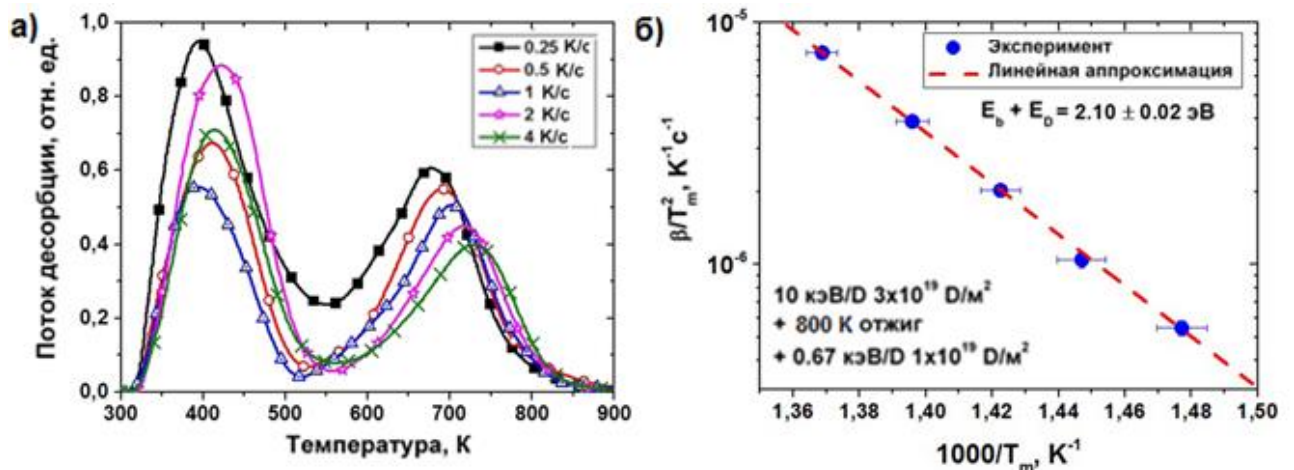


Рис.3. а) ТДС дейтерия из вольфрама после предоблучения (D^+ , 10 кэВ, 3×10^{19} D/m²) при комнатной температуре, выдержки при 800 К в течение 5 минут и облучения ионами D_3^+ с энергией 2 кэВ и дозой 1×10^{19} D/m² при различной скорости нагрева (0,25 – 4 К/с) в ходе ТДС. Спектры приведены в разном масштабе. б) Зависимость β/T_m^2 от $1/T_m$ для высокотемпературного пика и линейная аппроксимация (β – скорость нагрева)

В качестве альтернативы применения вольфрама в термоядерных установках предлагаются сплавы W-Cr-Y [10], основным преимуществом которых является возможность подавления интенсивного испарения оксида вольфрама в аварийных ситуациях с потерей теплоносителя. Хорошая устойчивость к окислению позволяет их рассматривать и в ряде других энергетических приложений. Было проведено исследование поведения дейтерия в двух W-Cr-Y сплавах, произведенных по различной технологии. Облучение

проводилось ионами D_3^+ с энергией 2 кэВ и дозой 10^{21} D/м² при температурах 300 – 900 К. Накопление в сплавах во всех случаях превышало накопление в чистом вольфраме. В случае сплава W-11,4Cr-0,6Y (Германия), полученного методом механического легирования соответствующих порошков и последующего уплотнения методом искрового плазменного спекания, на ТДС спектрах наблюдался дополнительный высокотемпературный пик (рис.4). В аналогичных измерениях для сплава W-10Cr-0,5Y (Испания), полученного методом горячего изостатического прессования, такого пика не наблюдалось.

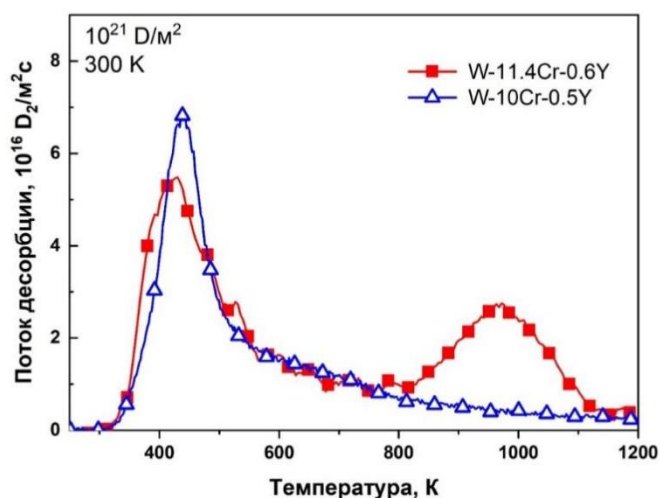


Рис.4. Спектры термодесорбции дейтерия из сплавов W-11,4Cr-0,6Y (Германия), W-10Cr-0,5Y (Испания), облученных ионами дейтерия с энергией 0,67 кэВ/D дозой 10^{21} D/м² при комнатной температуре

Хорошая повторяемость положения высокотемпературного пика снова позволила определить энергию соответствующих ловушек методом Киссинджера: $(E_b + E_{dif}) = 2,21 \pm 0,05$ эВ. Был сделан вывод, что дополнительный пик вызван повышенной концентрацией наноразмерных пор в объеме материала. Наличие пор не было подтверждено другими методами, однако наблюдалась пониженная устойчивость этого материала к механической обработке, что можно рассматривать как косвенное подтверждение. Таким образом, термодесорбционные измерения могут быть полезны для обнаружения и выявления природы внутренних дефектов при разработке новых материалов.

Во второй части главы 3 на основе термодесорбционных измерений сделаны оценки энергии связи дейтерия с дефектами, образованными в

вольфраме при облучении МэВными ионами W^{6+} . Повреждение тяжелыми ионами, аналогично нейтронам, приводит к образованию плотных каскадов смещений атомов решетки, к тому же ионы вольфрама не создают дополнительных примесей в отличие от других ионов. Поэтому такой подход создает приближенную к нейтронному повреждению структуру дефектов, хотя и в более узком (~ 2 мкм) поверхностном слое.

При облучении радиационно-поврежденных образцов дейтериевой плазмой (600 К, 200 эВ/D, $3,8 \times 10^{23}$ D/m²) термодесорбционные измерения ожидаемо показали рост интегрального накопления дейтерия в вольфраме с ростом дозы повреждающего облучения. При этом основное увеличение происходило при дозах повреждения менее 1 сна, как это наблюдалось и при измерениях методом ядерных реакций в аналогичных экспериментах [11].

Более детальные термодесорбционные исследования проводились в рамках международной коллаборации с Институтом физики плазмы им. Макса Планка (Германия) и Институтом им. Джозефа Стефана (Словения) для поврежденных (0,9 сна) образцов вольфрама, насыщенных дейтерием с помощью источника тепловых атомов со средней энергией около 0,2 эВ. Температура образцов в ходе облучения выбиралась в диапазоне 600 – 800 К, а доза облучения в диапазоне $3,8 \times 10^{23}$ – 2×10^{24} D/m². Меньшей дозы было достаточно для достижения равновесной концентрации дейтерия в поврежденном слое при температурах 700 – 800 К. При температуре облучения 600 К требовалась максимальная доза облучения. Эксперименты (рис.5) показали, что захват дейтерия в радиационных дефектах даже при температуре облучения 800 К может достигать 0,03 ат.%, при 700 К – более 0,1 ат.%.

Моделирование полученных спектров термодесорбции в коде TMAP 7 позволило оценить энергию взаимодействия дейтерия с образующимися ловушками. Хорошее согласие было достигнуто при использовании энергии выхода дейтерия из дефектов $E_{dt} = 1,7 - 2,0$ эВ.

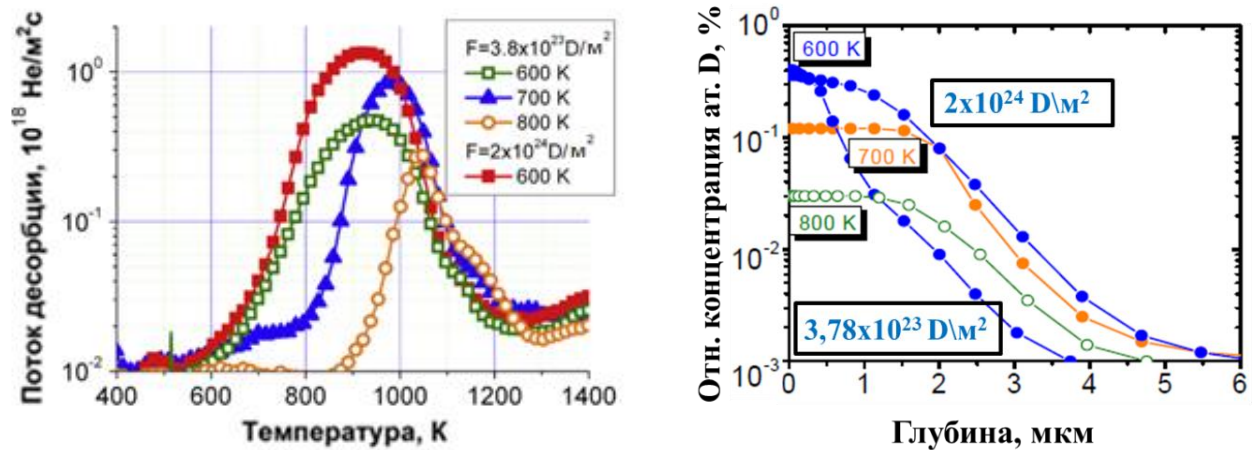


Рис.5. Спектры термодесорбции дейтерия (а) и профили распределения дейтерия (б) в поврежденных W образцах, облученных потоком атомов дейтерия в различных условиях, указанных для каждой кривой на рисунке

Из полученных результатов сделан вывод, что повреждение ионами вольфрама с МэВными энергиями приводит к формированию высокой концентрации высокоэнергетичных ловушек, энергия выхода из которых сравнима со энергией выхода из вакансионных кластеров. При высоких температурах облучения именно эти ловушки определяют скорость накопления дейтерия. Таким образом, несмотря на формирование более плотных каскадов смещений в ходе облучения МэВными ионами вольфрама, близких по характеристикам к нейтронному повреждению, диапазон энергий выхода дейтерия из образующихся ловушек оказывается близким к ситуации с облучением низкоэнергетичными ионами, но профиль распределения ловушек оказывается более широким, что приводит к более высокотемпературным пикам на спектрах термодесорбции.

В **четвертой главе** описаны эксперименты по измерению проникающего потока дейтерия через вольфрам в ходе ионного облучения поверхности. Помимо непосредственных измерений проникающего потока, что важно для оценок утечек в систему охлаждения в термоядерных установках, такие измерения позволяют оценить характеристики материала, определяющие скорость накопления изотопов водорода в объеме ОПЭ.

В первых базовых экспериментах измерялся проникающий поток дейтерия через чистую вольфрамовую мембрану (толщина – 50 мкм). Измерения

проводились в ходе облучения поверхности образцов ионами D_3^+ с энергией 600 эВ и потоком $10^{17} - 10^{18}$ D/м²с в диапазоне температур 823 – 923 К. Показано, что наличие дефектов кристаллической решетки приводит к значительному замедлению проникновения дейтерия. В условиях проводимых экспериментов время задержки между началом облучения и появлением проникающего потока на шесть порядков величины превысило значение, рассчитанное на основе коэффициента диффузии Фраунфельдера [12] (рис.6). Последнее получено из экспериментов, проведенных после длительного высокотемпературного отжига вольфрама, на основе измерений при значительно больших температурах (1100 – 2400 К), где влияние дефектов мало.

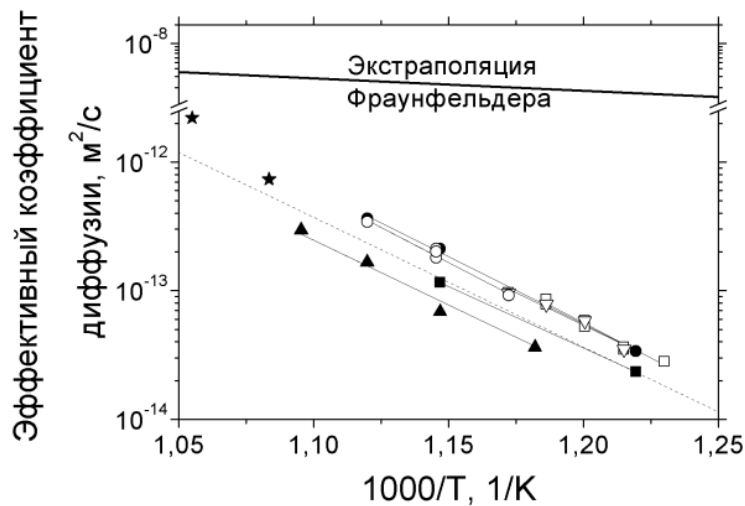


Рис.6. Сравнение с экстраполяцией данных Фраунфельдера [12] полученных значений эффективного коэффициента диффузии $D_{eff} = \frac{L^2}{2\pi^2\tau}$ (τ – время задержки, L – толщина мембраны)

Согласно моделированию, ключевую роль в замедлении диффузии в нашем случае играли ловушки с энергией $(E_b + E_{dif}) = 2,05 \pm 0,15$ эВ и концентрацией порядка 10^{-5} ат. долей, отнесенные к поверхности внутренних полостей. В условиях облучения термоядерными нейтронами можно ожидать еще более высокую концентрацию ловушек с энергией такого уровня, как это происходило в случае повреждения МэВными ионами вольфрама в главе 3. Это будет приводить к еще более медленному распространению изотопов водорода в объем вольфрама.

Во второй части главы представлены результаты экспериментов по влиянию углеродной пленки (толщиной 120 – 170 нм) на поверхности вольфрама на проникновение ионов дейтерия. Появление различных пленок на поверхности ОПЭ типично для термоядерных установок, особенно, в случае использования нескольких материалов облицовки. Измерения проводились при температуре 873 К, чтобы обеспечить приемлемое время задержки проникающего потока. В первых сериях экспериментов поверхность облучалась ионами с энергией 200 эВ/D, в этих условиях скорость распыления была очень велика ($Y \approx 0,25$ C/D). Было показано, что наличие углеродной пленки еще больше увеличивает время задержки проникающего потока в силу очень малой скорости распространения в ней дейтерия (рис.7), максимум проникающего потока достигался спустя ~ 10 часов после начала облучения.

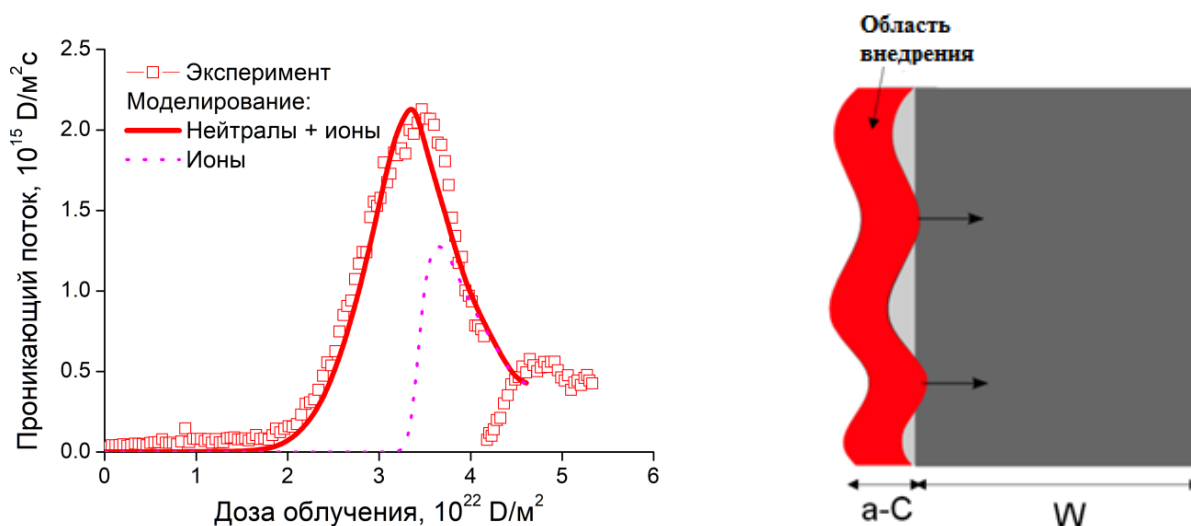


Рис.7. Проникающий поток дейтерия через образец вольфрама, покрытый углеродной пленкой 120 нм, от дозы облучения ($E = 200$ эВ/D, $F_{inc} = 8 \times 10^{17} \text{ D/m}^2 \text{ c}$, $T = 873 \text{ K}$). б) Иллюстрация модели с нулевой скоростью диффузии дейтерия в пленке

Появление проникающего потока по ходу облучения в этих условиях, согласно проведенному моделированию, можно объяснить появлением возможности прямого внедрения в вольфрам по мере уменьшения толщины пленки с учетом экспериментально измеренной вариации ее толщины, предполагая нулевую скорость диффузии дейтерия в углеродной пленке. Наилучшее согласие с экспериментальной кривой достигалось при учете

наличия в падающем на поверхность потоке ионов малой фракции ($\sim 1\%$) более высокоэнергетичных нейтралов перезарядки, которые образуются за счет взаимодействия с остаточным газом ионов с остаточным газом. Ионы D_3^+ транспортировались через сепарирующий магнит с энергией 3600 эВ и тормозились на мишени потенциалом 3 кэВ, который не оказывал влияния на нейтральные частицы.

В следующей серии экспериментов поверхность образцов бомбардировалась ионами D_3^+ с энергией 3600 эВ без торможения на мишени. Коэффициент распыления пленки упал в этом случае до уровня $Y \approx 0,03$ C/D, что позволило длительное время проводить облучение без прямой имплантации в вольфрам. В этом случае проникающий поток рос на протяжении всего эксперимента (~ 50 часов) и достигал уровня в несколько процентов от падающего потока, значительно превышая значение для случая чистой поверхности вольфрама (рис.8). При этом при остановке облучения проникающий поток спадал и появлялся при возобновлении облучения с временем задержки, характерным для чистого вольфрама. Для описания такого поведения водорода требуется учесть особенности транспорта водорода в углеродных материалах. Хотя процесс распространения водорода в углеродных материалах сложнее, чем в металлах, в силу высокой пористости, малых размеров кристаллитов и высокой концентрации оборванных связей, был применен диффузионный подход, аналогичный описанию для металлов. Предполагалось наличие двух компонент дейтерия: свободно диффундирующий и сильно связанный в ловушках (свободные углеродные связи). Однако, хорошее согласие было достигнуто только в предположении (рис.8б) наличия в пленке четырех видов макроскопических дефектов (поры, трещины): 1) сквозь всю толщины пленки, 2) открытые только в сторону вакуума, 3) открытые только к границе W-C, 4) закрытые.

Поры (или трещины) первого типа ответственны за наблюдаемую проницаемость из газа на ранних этапах облучения. Поры третьего типа

уменьшают проникающий поток. После насыщения поверхностного слоя до соответствующей глубины становится возможной десорбция дейтерия в объем пор четвертого типа, что позволяет дейтерию мгновенно достичь поверхности вольфрама. Предполагается, что давление в этих порах может становиться очень большим и приводить к большому проникающему потоку.

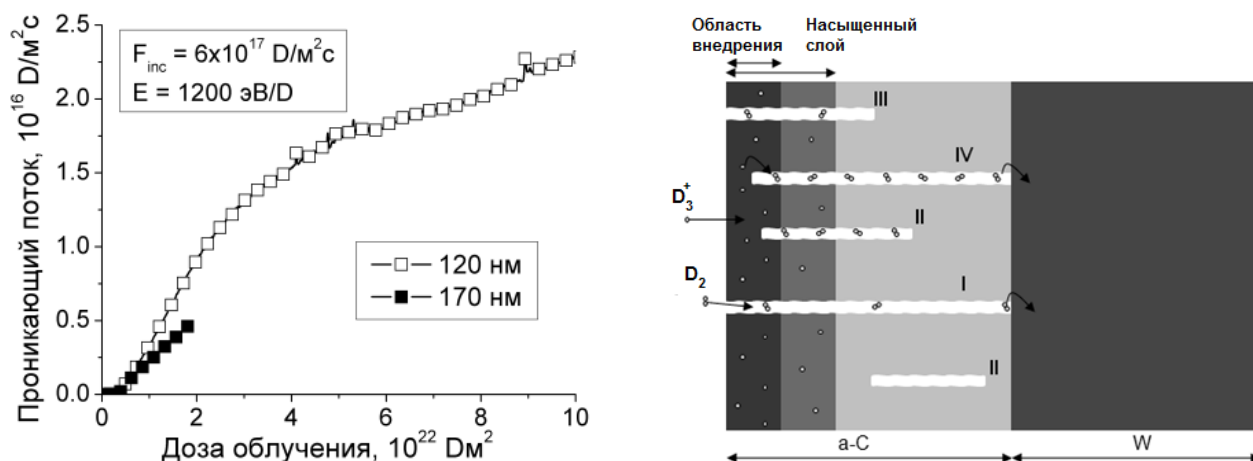


Рис.8. а) Проникающий поток через вольфрам с углеродной пленкой различной исходной толщиной при облучении ионами D₃⁺ с энергией 3600 эВ. б) Иллюстрация модели с ненулевой скоростью распространения дейтерия в пленке и наличии пор

Таким образом, по мере облучения ионами дейтерия тонкие углеродные пленки полностью меняли свою проницаемость. На начальном наблюдается практически полное подавление потока дейтерия в вольфрамовую подложку, но по ходу насыщения дейтерием она не только становилась проницаемой, но и увеличивала поток дейтерия в подложку.

В пятой главе приведены результаты исследования накопления дейтерия в вольфраме при облучении мощными импульсными потоками плазмы в квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), имитирующем нагрузки на стенки в ходе быстрых переходных процессов в крупных установках масштаба ИТЭР в режимах с высокими характеристиками удержания. Ожидается, что нагрузки на стенку в ходе ELM-событий в ИТЭР могут достигать 1,5 – 2,2 ГВт/м² с характерным временем 0,1 – 0,5 мс [13] и будут сопровождаться повышенным потоком ионов изотопов водорода на поверхность. Температура поверхности в результате такого воздействия может

превышать температуру плавления. Рассматриваются различные меры по снижению нагрузок на ОПЭ в ходе переходных процессов, т.к. они могут оказывать разрушающее действие. В рамках данной работы впервые были произведены измерения накопления дейтерия в ходе таких плазменных нагрузок (рис.9).

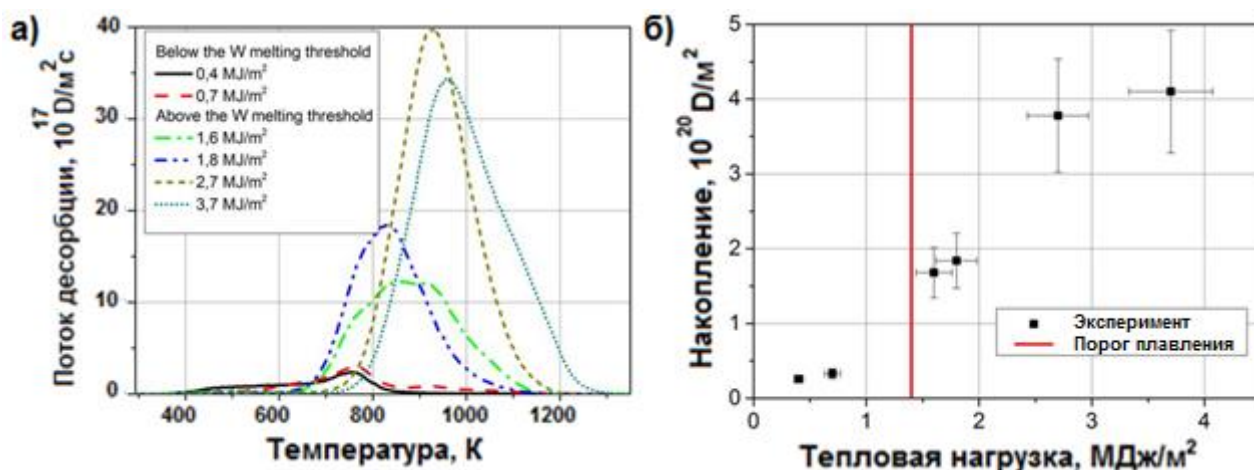


Рис.9. а) Спектры термодесорбции дейтерия (D_2) из вольфрама после воздействия единичным импульсом с различной тепловой нагрузкой. б) Зависимость интегрального накопления дейтерия от величины тепловой нагрузки

Показано, что, несмотря на высокие температуры на поверхности, накопление дейтерия может быть большим за счет быстрого распространения в более глубокие слои с меньшей температурой и захвата в существующие там ловушки. Это видно из сравнения данных ТДС об интегральном содержании дейтерия в образцах с результатами измерений содержания дейтерия в поверхностном слое толщиной около 7 мкм методом ядерных реакций. Интегральное накопление оказалось выше более чем в десять раз и монотонно росло с увеличением энергии, вкладываемой в плазму, даже после перехода через порог плавления поверхности. Стоит отметить, что даже после одного импульса интегральное накопление дейтерия оказывалось сравнимо со случаем длительного стационарного облучения (рис.5).

Моделирование с помощью стандартной диффузионной модели позволило хорошо описать наблюдаемые закономерности при использовании пониженного коэффициента рекомбинации на поверхности. Высокий уровень накопления

дейтерия в режимах плавления поверхности требует предположения дополнительных факторов, ускоряющих поток дейтерия вглубь образца.

Дополнительно были проведены серии экспериментов для двух других материалов (алюминий и молибден), в которых было показано, что наблюдаемые для вольфрама тенденции, в целом, повторяются и для этих материалов. Хотя были отмечены и некоторые особенности, объяснение которых требует более детальных исследований. Таким образом, быстрые переходные процессы в условиях токамака могут приводить к повышенной скорости накопления изотопов водорода в ОПЭ из вольфрама.

В **шестой главе** представлены исследования захвата ионов гелия в вольфраме в широком диапазоне доз облучения ($10^{19} - 10^{25}$ He/m²) и температур (300 – 1200 К), позволяющие лучше понять происходящие в этих условиях активные изменения структуры и рельефа поверхности, а также особенности влияния гелия на захват изотопов водорода. Для получения полной картины термодесорбционные измерения в данном случае требуют проведения нагрева образцов, как минимум, до 2500 К. Особенно это оказалось важным при проведении ТДС после облучения низкими дозами, когда доминирующая часть захваченных частиц выходила при температурах свыше 2000 К (рис.10).

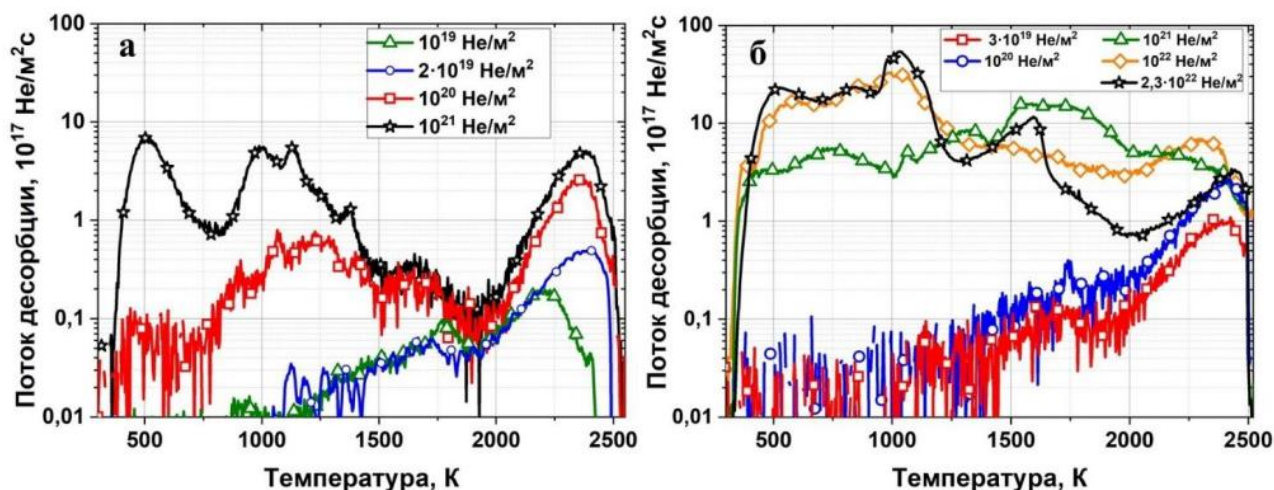


Рис.10. Спектры термодесорбции гелия из вольфрама после облучения при комнатной температуре ионами с энергией 400 эВ (а) и 3 кэВ (б). Дозы облучения для каждой кривой указаны на рисунках

Эффективность захвата гелия за счет большой энергии связи со всеми дефектами кристаллической решетки оказывается высокой даже при повышенных температурах (рис.11), поэтому достаточно быстро в приповерхностном слое накапливается большая концентрация гелия даже при облучении ионами с энергией ниже порога образования пары Френкеля (для гелия $E_{порог} \approx 500$ эВ). Это приводит к постепенной модификации поверхностного слоя и к изменениям в характере удержания. Десорбция гелия в ходе ТДС измерений после высокодозного ($> 10^{21}$ He/м² в случае ионов с энергией 3 кэВ) облучения начинается вблизи 400 К, высокотемпературная часть, при этом, сохраняется.

Несмотря на высокое значение коэффициента диффузии гелия в вольфраме, значительного ухода вглубь материала не наблюдалось, поэтому после насыщения поверхностного слоя рост интегрального накопления гелия практически останавливался. При этом зависимость уровня насыщения от температуры была очень слабой (рис.11).

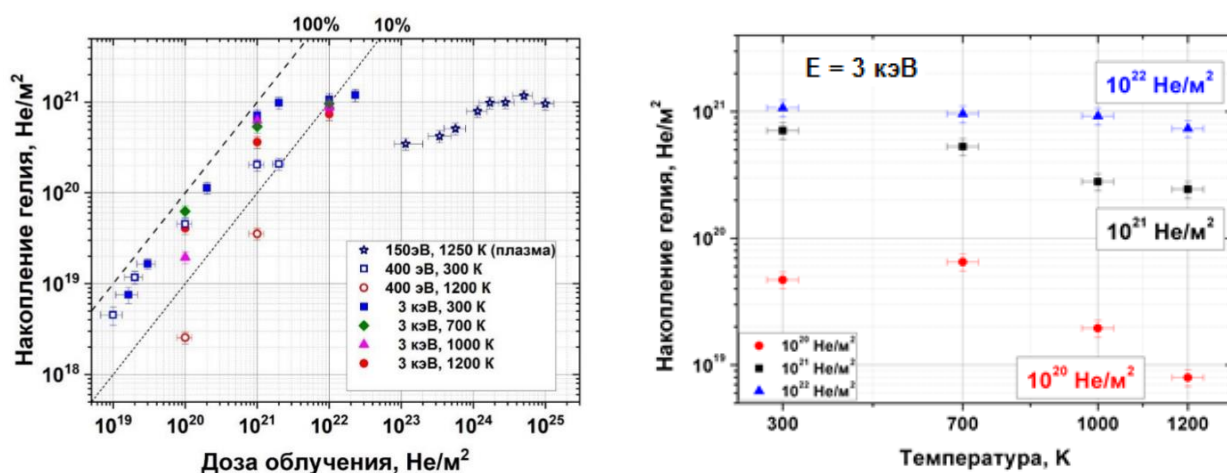


Рис.11. Дозовая и температурная зависимость интегрального накопления гелия в вольфраме при различных энергиях ионов

Для детального понимания механизмов удержания гелия были проведены эксперименты с последовательным облучением вольфрама ионами двух различных изотопов гелия (⁴He и ³He). В ходе первого облучения достигалось насыщение поверхностного слоя гелием (⁴He). Второе облучение позволяло судить об эффективности захвата новых ионов гелия (³He). Даже в ходе

облучения при комнатной температуре наблюдалось эффективное замещение атомов ${}^4\text{He}$ на вновь имплантированные ${}^3\text{He}$. Скорость распыления поверхности при этом была пренебрежимо малой. С учетом коэффициента упругого отражения от поверхности эффективность замещения оказалась близка к 100 %, поэтому слабо увеличивалась с температурой (рис.12).

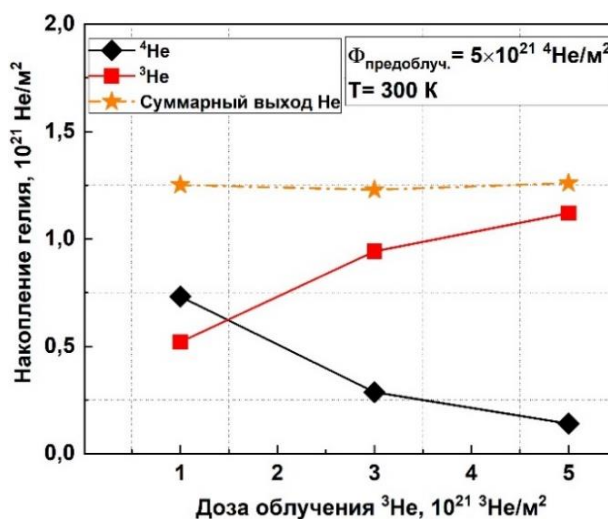


Рис.12. Интегральное количество изотопов гелия в вольфраме после последовательного облучения ионами ${}^4\text{He}^+$ дозой $5 \times 10^{21} \text{He}/\text{м}^2$ и ионами ${}^3\text{He}^+$ с различной дозой. Энергия ионов – 3 кэВ

Замещение гелия происходило во всех доступных ловушках, т.е. на ТДС спектрах рост амплитуды пиков ${}^3\text{He}$ и уменьшение пиков ${}^4\text{He}$ наблюдались во всем диапазоне температур. Это говорит о том, что все атомы гелия в пересыщенном слое оказываются слабо связаны и могут легко покинуть вольфрам в ходе внедрения дополнительных частиц. По мере уменьшения концентрации атомов гелия в поверхностном слое снова появляются центры захвата с большей энергией связи, о чем свидетельствует сохранение высокотемпературных пиков на спектрах термодесорбции.

Как и в ряде других работ, выход дейтерия в ходе ТДС после ионного облучения при повышенных температурах с высокой дозой начинался вблизи комнатной температуры. Благодаря реализации *in situ* измерений впервые удалось продемонстрировать, что такая особенность вызвана именно контактом с атмосферой перед проведением ТДС (рис.13). В случае проведения *in situ* ТДС измерений рост потока десорбции начинался вблизи температуры облучения, как

это обычно наблюдается в экспериментах с другими газами. Сильное влияние контакта с атмосферой объясняется скоплением захваченного гелия в очень узком поверхностном слое, который при этом может окисляться и модифицироваться.

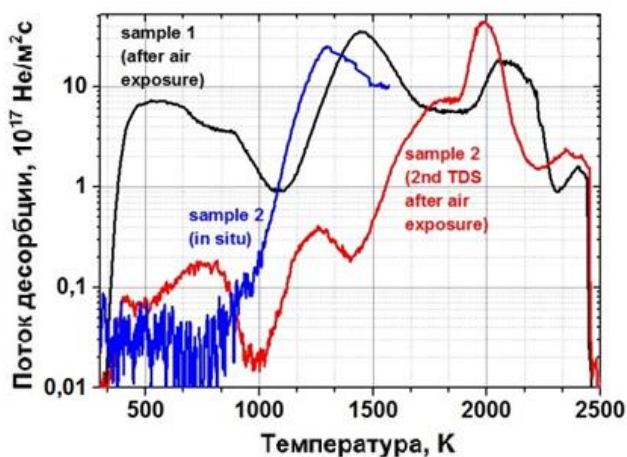


Рис.13. Сравнение спектров термодесорбции гелия из вольфрама после облучения при 1000 К ионами He^+ (3 кэВ, 10^{22} He/m^2): (1) черная линия - образец 1 через 2 дня в воздухе; (2) синяя линия - образец 2 через 15 ч в вакууме; (3) красная линия - образец 2, второй ТДС через 2 дня пребывания на воздухе

Рост концентрации гелия в поверхностном слое сопровождается активными изменениями структуры и рельефа поверхности (рис.14). При температурах облучения ниже 1000 К наблюдалась, в целом, схожая картина с формированием ярко выраженного модифицированного слоя толщиной 50 – 70 нм. При разломе образцов наблюдалось растрескивание и его отслоение. Также происходило образование вздутий (блистеров) на поверхности размером до 150 нм при энергии ионов 3 кэВ, что характерно для облучения моноэнергетичным пучком и подавляется при плазменном облучении с широким распределением ионов по энергии [14]. С увеличением температуры наблюдался рост размера пузырьков в поверхностном слое и формирование губчатой структуры, что объясняется увеличением подвижности гелий-вакансионных комплексов.

Формирование развитой структуры поверхности с открытыми порами является еще одной причиной упрощенного выхода гелия из вольфрама при максимальных дозах облучения.

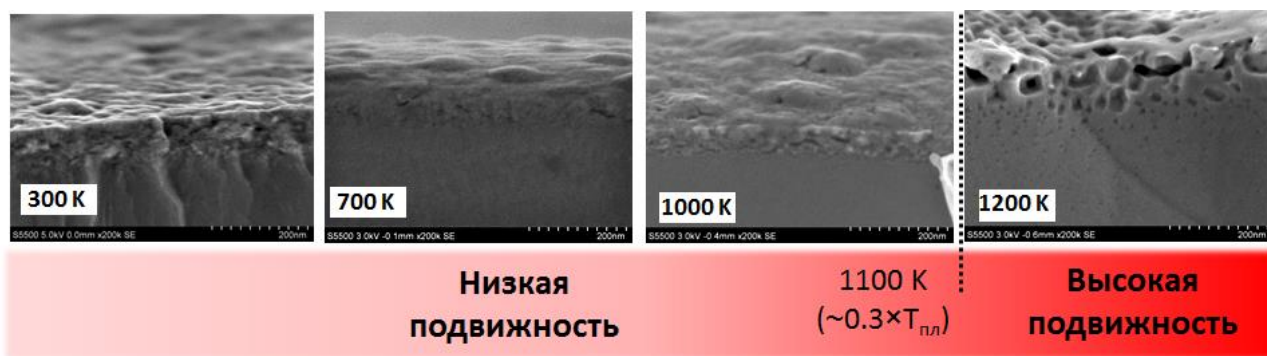


Рис.14. Поперечное сечение образцов, облученных ионами He^+ с энергией 3 кэВ дозой $10^{22} \text{He}/\text{м}^2$ при различных температурах

Интенсивное плазменное облучение вольфрама при температурах свыше 1000 К приводит к формированию наноструктурированной поверхности, состоящей из тонких волокон («пух»). Это явление относительно недавно было обнаружено в [15], в рамках данной работы с помощью термодесорбционных измерений была определена концентрация гелия $\text{He}/\text{W} = (13 \pm 4) \%$ в аналогичной структуре (рис.15), сформированной после облучения гелиевой плазмой (1500 К, $2,9 \times 10^{23} \text{He}/\text{м}^2\text{с}$) в установке Pilot-PSI (Нидерланды) путем проведения измерений для образцов после облучения без дополнительной подготовки и образцов с механически удаленным слоем «пуха». Эти данные имеют значения для верификации теоретических моделей, описывающих механизмы формирования таких структур.

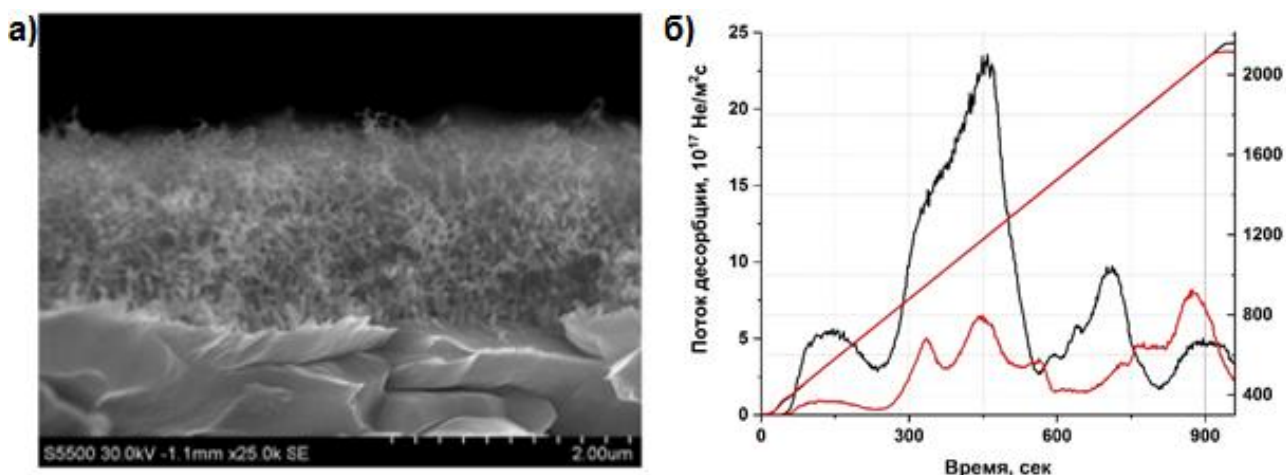


Рис.15. а) СЭМ изображение скола образца вольфрама после облучения гелиевой плазмой дозой $10^{27} \text{He}/\text{м}^2$ в установке Pilot-PSI. б) Спектры термодесорбции гелия из образца с «пухом» (черная линия), после механического удаления «пуха» (красная)

В рамках работы близкая по структуре поверхность была получена в НИЯУ МИФИ в компактной установке с индуктивно-связанной плазмой, но при значительно меньших потоках ионов ($1,8 \times 10^{21}$ He/м²с), что может быть более эффективным способом для применения в прикладных задачах.

В завершении главы приведены результаты исследования термодесорбции ионов гелия, имплантированных с энергией 0,3 – 1 МэВ при комнатной температуре. Доза облучения варьировалась в диапазоне $3 \times 10^{18} - 10^{20}$ He/м². Концентрация гелия в этом случае была значительно меньше, чем в случае облучения ионами низких энергий, в силу более широкого профиля внедрения, порядка 1 мкм. С ростом дозы и энергии ионов наблюдалось значительное увеличение температуры выхода гелия, что объясняется многократным перезахватом в ловушки на пути к поверхности при выходе из материала. При дозах свыше 10^{20} He/м² нагрев до 2500 К позволял удалить из образца менее 5 % внедренных частиц. При этом оценки энергии связи гелия с ловушками снова дали близкие значения со случаем облучения кэВными ионами.

Главным выводом представленных в главе экспериментов является существенная зависимость эффективности удержания гелия в вольфраме от его концентрации. Если при малых концентрациях гелия его выход из ловушек при разумных температурах практически не возможен, то после достижения больших концентраций и сопутствующей трансформации поверхностного слоя температура выхода гелия резко снижается.

В **седьмой главе** рассмотрено влияние гелия на накопление дейтерия в вольфраме и в сплаве W-11,6Cr-0,6Y. В установке Медиион проводилось последовательное облучение ионами гелия (3 кэВ, $10^{19} - 10^{22}$ He/м²) и дейтерия (0,67 кэВ/D, 10^{19} D/м² или 10^{21} D/м²) при комнатной температуре.

При относительно малых дозах ($< 10^{21}$ He/м²) предоблучения ионами гелия наблюдалось увеличение эффективности захвата ионов дейтерия с дозой облучения (рис.16) за счет образования дополнительных центров захвата. Наблюдалось также постепенное увеличение температуры выхода дейтерия.

Энергия выхода из наиболее сильных ловушек была оценена на уровне 2,1 – 2,3 эВ, что сравнимо с энергиями выхода с поверхности внутренних полостей без гелия. Облучение гелием образует наполненные гелием пузырьки и, по всей видимости, на этой стадии гелий не оказывает влияния на удержание дейтерия на поверхности этих пузырьков. При дальнейшем увеличении дозы гелиевого предоблучения наблюдался спад эффективности захвата дейтерия, наиболее ярко заметный при дозе облучения дейтерием 10^{19} D/m², когда удержание происходит преимущественно вблизи зоны имплантации.

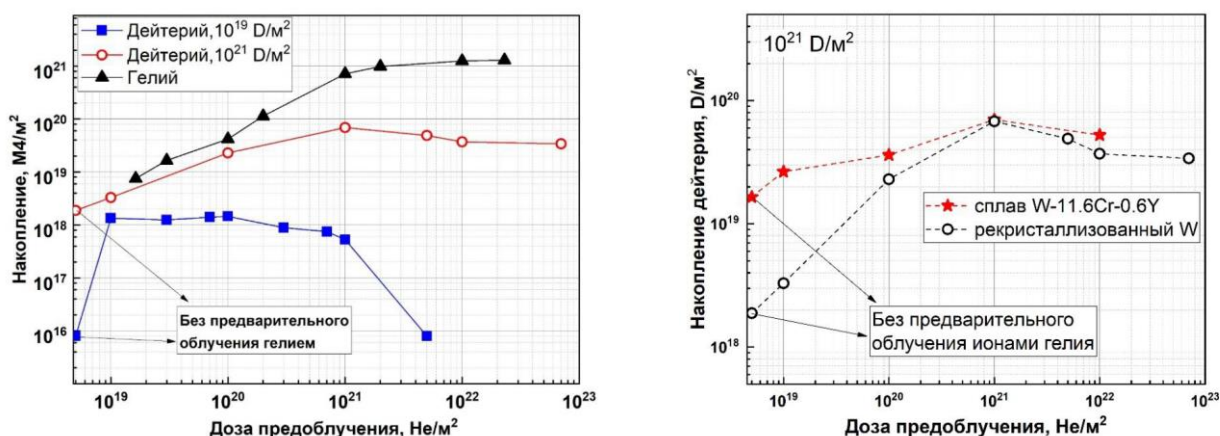


Рис.16. а) Накопление дейтерия и гелия в вольфраме при последовательном облучении ионами гелия (3 кэВ , $10^{19} - 10^{22} \text{ He/m}^2$) и дейтерия ($0,67 \text{ кэВ/D}$, 10^{19} D/m^2 или 10^{21} D/m^2). б) Сравнение захвата дейтерия в вольфраме и сплаве W-11,6Cr-0,6Y

Таким образом, по мере насыщения поверхностного слоя гелием происходит резкое снижение эффективности удержания дейтерия в нем, как и самих атомов гелия, что было показано в главе 6. К причинам этого можно отнести и снижение энергии связи с ловушками по мере увеличения в них содержания гелия, и существенную трансформацию поверхностного слоя с появлением открытой пористости и значительных напряжений в нем.

Важно отметить, что после частичного выхода гелия, захваченные при последующем облучении атомы дейтерия снова удерживались в вольфраме с высокой энергией связи, что подтверждает важную роль содержания гелия в поверхностном слое.

Поведение дейтерия в предварительно облученном ионами гелия сплаве W-11,6Cr-0,6Y оказалось очень близким, также наблюдалось снижение

эффективности удержания дейтерия после насыщения поверхности гелием. Из особенностей можно выделить снижение амплитуды высокотемпературного пика термодесорбции, характерного для этого материала (рис.4), при увеличении дозы гелиевого предоблучения, что можно объяснить расположением соответствующих дефектов в глубине образца и снижением диффузионного потока дейтерия вглубь образца. Снижение потока дейтерия в объем вольфрама при накоплении гелия в поверхностном слое наблюдалось и другими авторами. Анализ, проведенный в работе, предполагает, что основными причинами пониженного потока вглубь образца является ускоренное перемещение гелия в насыщенном гелием слое, вызванное сформировавшимися напряжениями, а также более короткий путь до открытой поверхности в результате развития пористости.

Восьмая глава посвящена анализу возможности использования лазерного излучения с наносекундной длительностью импульса для дистанционной диагностики содержания изотопов водорода в поверхностном слое вольфрама и других материалов. Воздействие лазерного излучения приводит к нагреву поверхностного слоя твердого тела, что стимулирует выход захваченных изотопов водорода. В зависимости от мощности лазерного излучения это может быть десорбция или абляция всего поверхностного слоя мишени. В зависимости от длительности излучения меняется толщина прогреваемого слоя и, соответственно, глубина, с которой могут выходить частицы. Наиболее простым для количественной интерпретации является случай длинных импульсов, когда удастся полностью обезгазить поверхностный слой, в котором сконцентрированы захваченные частицы, например, в случае формирования насыщенных водородом пленок на поверхности исходного материала. Использование наносекундного импульса позволяет получить информацию о содержании захваченных частиц в более узком поверхностном слое, но количественная интерпретация при этом усложняется. В рамках работы проведены эксперименты с модельными образцами и моделирование

полученных результатов с помощью моделей, используемых ранее для анализа захвата и десорбции изотопов водорода при ионной имплантации.

Приведены результаты экспериментов по измерению количества выходящего дейтерия (рис.17) при воздействии Nd:YAG лазеров из вольфрамовых и титановых пленок, полученных в результате со-осаждения в магнетронном разряде в установке МР-2 [16], и из элементов стенки токамака Глобус-М после длительной экспозиции. Показана возможность проведения измерений с помощью квадрупольного масс-спектрометра как в режиме абляции поверхностного слоя, так и в режиме десорбции без повреждения поверхности.

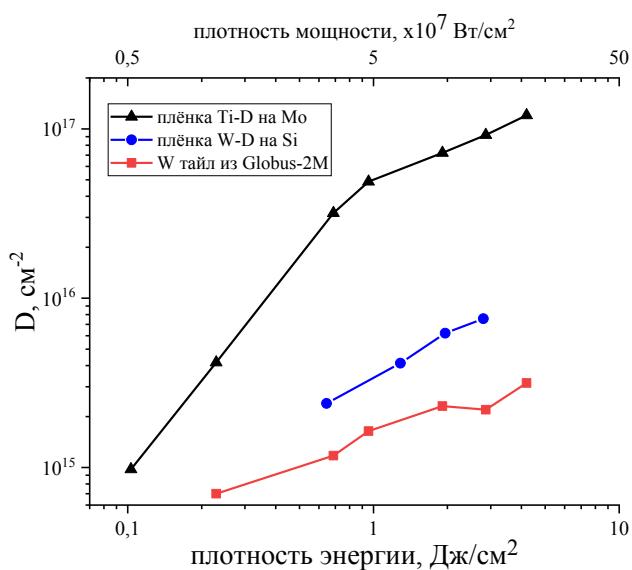


Рис.17. Интегральный выход дейтерия в зависимости от плотности энергии лазерных импульсов из: титана, вольфрама и бор-углеродной пленки на вольфрамовой плитке из токамака Глобус-М

Несмотря на значительно большие потоки ($\sim 10^{27} \text{ D}/\text{м}^2\text{с}$) захваченного дейтерия с поверхности в ходе лазерного импульса, описание выхода водорода в ходе лазерного воздействия в режиме десорбции с помощью стандартных диффузионных моделей позволило хорошо описать наблюдаемые экспериментальные закономерности. Выход дейтерия, согласно моделированию, происходит из слоя толщиной менее 100 нм, хотя в ходе лазерного воздействия атомы дейтерия могут покидать ловушки на значительно больших глубинах.

Проведены также первые испытания методики в условиях токамака Глобус-М2 при использовании Nd:YAG лазера с энергией в импульсе менее 100 мДж и штатного квадрупольного масс-спектрометра. Лазерное излучение фокусировалось на диверторный тайл, через поверхность которого проходит внешняя ветвь сепаратрисы. Продемонстрирована высокая чувствительность методики и отсутствие каких-либо видимых последствий для дальнейших экспериментов, проводимых на токамаке.

Основные результаты и выводы работы:

Среди наиболее значимых результатов докторской диссертации можно выделить следующие:

1) Модифицированы или созданы новые установки, позволяющие проводить облучение двумя независимыми сортами пучками ионов, *in situ* ТДС измерения без контакта с атмосферой с разделением сигналов дейтерия и гелия, измерять проникающий поток при ионной имплантации, и получать сведения о ранее неизвестных особенностях захвата ионов.

2) Без использования не известных надежно дополнительных параметров выполнены измерения энергий выхода водорода из вакансий и вакансионных кластеров в вольфраме при низком уровне заселенности: $(E_b + E_{dif})_{vac} = 1,56 \pm 0,06$ эВ и $(E_b + E_{dif})_{vc} = 2,10 \pm 0,02$ эВ, соответственно.

3) При облучении ионами W^{6+} с МэВными энергиями в вольфраме формируется высокая концентрация ловушек для водорода с энергией $(E_b + E_{dif}) = 1,7 - 2,1$ эВ. Эти ловушки определяют высокий уровень накопления изотопов водорода при повышенных температурах. После плазменного облучения вольфрама с высоким уровнем повреждений ($> 0,9$ сна) концентрация дейтерия может достигать более 0,1 ат.% при температурах до 700 К.

4) Экспериментально продемонстрировано увеличение характерного времени распространения дейтерия в вольфраме при высокой концентрации

дефектов более чем на шесть порядков величины по сравнению с ожидаемыми значениями для бездефектного материала.

5) В экспериментах по проникновению ионно-имплантированного дейтерия через вольфрам, покрытый углеродной пленкой показано, что углеродная пленка существенно замедляет транспорт дейтерия, что связывается с большой концентрацией центров захвата. По мере насыщения углеродной пленки дейтерием, скорость проникновения через такую систему увеличивается и может даже превышать поток через вольфрам с чистой поверхностью.

6) При облучении мощными импульсными потоками плазмы (~ 1 мс, ~ 1 МДж/м²) накопление дейтерия в вольфраме может быть высоким, несмотря на плавление поверхности, если обратная сторона остается при низких температурах, что обусловлено диффузией дейтерия вглубь материала и удержанием его расположенных там ловушках. Поэтому ELM-события могут приводить к увеличению накопления изотопов водорода в условиях токамака.

7) Температура выхода гелия из вольфрама в ходе проведения ТДС определяется концентрацией и глубиной профиля дефектов. При малых концентрациях и глубоком профиле распределения (> 1 мкм) возможно длительное удержание при температурах свыше 2000 К. При достижении высокой концентрации гелия (> 10 ат.%) эффективность удержания гелия в поверхностном слое резко снижается, и значительная его часть выходит из вольфрама в ТДС уже при 400 – 700 К.

8) Экспериментально показано изотопное замещение гелия ^4He и ^3He при последовательном облучении изотопами. Эффект ярко выражен при высоких концентрациях первичного гелия и наблюдается даже при комнатной температуре.

9) Удержание изотопов водорода в поверхностном слое вольфрама резко уменьшается при достижении высокой концентрации гелия.

10) На основе термодесорбционных измерений определена концентрация гелия в наноструктурированном поверхностном слое («пух»)

вольфрама образующемся при высокотемпературном плазменном облучении. Показана возможность роста «пуха» при относительно небольших потоках частиц из плазмы ($\sim 10^{21}$ He/см²).

11) Исследовано накопление дейтерия в вольфрамовых сплавах W-Cr-Y. Наблюдаемое повышенное накопление в сплавах было отнесено к большей концентрации дефектов в исходных материалах. Ловушек с энергией связи, превышающей диапазон энергий для чистого вольфрама, не обнаружено. Влияние гелия на накопление дейтерия в сплаве аналогично чистому вольфраму. Значительным ограничением использования W-Cr-Y сплавов может стать активное испарение хрома с поверхности при температурах свыше 1400 К.

12) Исследован выход дейтерия из пленок под действием наносекундного лазерного излучения для обоснования лазерно-ассистированной диагностики содержания изотопов водорода в стенках термоядерных установок. Методика апробирована в условиях токамака Глобус-М2, показана высокая чувствительность метода. Проанализированы возможности количественной интерпретации данных в режиме десорбции.

Список цитированной литературы:

1. Andrew P. et al. Tritium retention and clean-up in JET // Fusion Eng. Des. 1999. Vol. 47, № 2–3. P. 233–245.
2. Skinner C. Plasma wall interaction and tritium retention in TFTR // J. Nucl. Mater. 1997. Vol. 241–243, № 1. P. 214–226.
3. Pitts R.A. et al. Physics basis and design of the ITER plasma-facing components // J. Nucl. Mater. 2011. Vol. 415. P. S957–S964.
4. Rohde V., Mertens V., Scarabosio A. Gas balance in ASDEX Upgrade with tungsten first wall // J. Nucl. Mater. 2009. Vol. 390–391, № 1. P. 474–477.
5. Brezinsek S. et al. Fuel retention studies with the ITER-Like Wall in JET // Nucl. Fusion. 2013. Vol. 53, № 8. P. 083023.
6. Yu Y. et al. Fuel recycling control in long pulse operation with full tungsten divertors in EAST tokamak // Nucl. Mater. Energy. 2023. Vol. 34. 101333.
7. Loarte A. Required Research and Development in Existing Fusion Facilities to Support the ITER Research Plan // ITER Tech. Rep. 2020. Vol. ITR-20-008. P. 43.
8. Bachmann C. et al. Issues and strategies for DEMO in-vessel component integration // Fusion Eng. Des. 2016. Vol. 112. P. 527–534.
9. Eleveld H., van Veen A. Deuterium interaction with impurities in tungsten studied

- with TDS // *J. Nucl. Mater.* 1992. Vol. 191–194. P. 433–438.
10. Litnovsky A. et al. Advanced Self-Passivating Alloys for an Application under Extreme Conditions // *Metals*. 2021. Vol. 11. P. 1255.
 11. Alimov V.K. et al. Deuterium retention in tungsten damaged with W ions to various damage levels // *J. Nucl. Mater.* 2013. Vol. 441, № 1–3. P. 280–285.
 12. Frauenfelder R. Solution and Diffusion of Hydrogen in Tungsten // *J. Vac. Sci. Technol.* 1969. Vol. 6, № 3. P. 388–397.
 13. Loarte A. et al. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation // *Phys. Scr.* 2007. Vol. T128. P. 222–228.
 14. Roth J., Behrisch R., Scherzer B.M.U. Contribution of blistering to first wall erosion in plasma wall contact // *J. Nucl. Mater.* 1975. Vol. 57, № 3. P. 365–370.
 15. Kajita S. et al. Formation process of tungsten nanostructure by the exposure to helium plasma under fusion relevant plasma conditions // *Nucl. Fusion*. 2009. Vol. 49, № 9. P. 095005.
 16. Krat S. et al. Tungsten-deuterium co-deposition: Experiment and analytical description // *Vacuum*. 2018. Vol. 149. P. 23–28.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Z. Harutyunyan, O.V. Ogorodnikova, **Y. Gasparyan**, A. Umerenkova, Y. Wang, E. Sal, C. García-Rosales. Deuterium retention in W-Cr-Y alloy: Impact of the manufacturing method and helium presence // *Journal of Nuclear Materials - 2023 - vol.578 - 154353*. (Web of Science, Scopus; Q1)
2. Z. Harutyunyan, **Y. Gasparyan**, V. Efimov, S. Krat, A. Umerenkova. Helium isotope exchange in tungsten irradiated sequentially with 4He and 3He ions // *Journal of Nuclear Materials - 2023 - vol.573 - 154094*. (Web of Science, Scopus; Q1)
3. Z. Harutyunyan, **Yu. Gasparyan**, V. Efimov, A. Litnovsky, F. Klein, A. Pisarev, J.W. Coenen, Ch. Linsmeier. Analysis of trapping sites for deuterium in W–Cr–Y SMART alloy // *Vacuum - 2022 - vol.199 - 110956*. (Web of Science, Scopus; Q1)
4. V. Kulagin, **Yu. Gasparyan**, N. Degtyarenko. Numerical estimation of the atomic fraction during laser-induced desorption of hydrogen from tungsten and beryllium // *Fusion Engineering and Design - 2022 - vol.184 - 113287*. (Web of Science, Scopus; Q2)
5. O.V. Ogorodnikova, Z.R. Harutyunyan, **Y.M. Gasparyan**, V.S. Efimov, M.M. Kharkov, A.V. Kaziev, S. Kanashenko. Effect of the presence of helium in tungsten on deuterium retention // *Journal of Nuclear Materials - 2021 - vol.548 - 152873*. (Web of Science, Scopus; Q1)
6. Z. Harutyunyan, **Y. Gasparyan**, S. Ryabtsev, V. Efimov, O. Ogorodnikova, A. Pisarev, S. Kanashenko. Deuterium trapping in the subsurface layer of tungsten pre-irradiated with helium ions // *Journal of Nuclear Materials - 2021 - vol.548 - 152873*. (Web of Science, Scopus; Q1)

7. A. Litnovsky, F. Klein, X. Tan, J. Ertmer, J.W. Coenen, C. Linsmeier, J. Gonzalez-Julian, M. Bram, I. Povstugar, T. Morgan, **Y.M. Gasparyan**, A. Suchkov, D. Bachurina, D. Nguyen-Manh, M. Gilbert, D. Sobieraj, J.S. Wróbel, E. Tejado, J. Matejicek, H. Zoz, H.U. Benz, P. Bittner, A. Reuban. Advanced self-passivating alloys for an application under extreme conditions // *Metals*, 2021 - vol.11 - 1255. (Web of Science, Scopus; Q1)
8. S.A. Krat, A.S. Popkov, **Y.M. Gasparyan**, Y.A. Vasina, A.S. Prishvitsyn and A.A. Pisarev. A setup for study of co-deposited films // *JINST* - 2020 - vol.15 - P01011. (Web of Science, Scopus; Q1)
9. **Yu. Gasparyan**, S. Ryabtsev, V. Efimov, Z. Harutyunyan, A. Aksenova, A. Poskakalov, A. Kaziev, M. Kharkov, O. Ogorodnikova, A. Pisarev, S. Kanashenko, Yu. Ivanov. Helium retention in tungsten under plasma and ion beam irradiation and its impact on surface morphology // *Phys. Scr.* - 2020 - vol.T171 - 014017. (Web of Science, Scopus; Q2)
10. S. Ryabtsev, **Yu. Gasparyan**, V. Efimov, Z. Harutyunyan, A. Aksenova, A. Poskakalov, A. Pisarev, S. Kanashenko, Yu. Ivanov. Helium retention in tungsten irradiated with He⁺ ion beam at elevated temperatures // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* - 2019 - vol.460 - pp.108-113. (Web of Science, Scopus; Q2)
11. **Yu. Gasparyan**, S. Krat, A. Davletiyarova, Ya. Vasina, A. Pisarev. Temperature dependence of hydrogen co-deposition with metals // *Fusion Engineering and Design* - 2019 - vol.146 - pp.1043-1046. (Web of Science, Scopus; Q2)
12. S. Krat, **Yu. Gasparyan**, Ya. Vasina, A. Davletiyarova, A. Pisarev. Tungsten-deuterium co-deposition: experiment and analytical description // *Vacuum* - 2018 - vol.149 - pp.23-28. (Web of Science, Scopus; Q1)
13. S.A. Ryabtsev, **Yu.M. Gasparyan**, Z.R. Harutyunyan, I.M. Timofeev, O.V. Ogorodnikova and A.A. Pisarev. Deuterium thermal desorption and re-emission from RAFM steels // *Physica Scripta* - 2017 - vol.T170 - 014016. (Web of Science, Scopus; Q2)
14. S.A. Krat, **Yu.M. Gasparyan**, A.S. Popkov, A.A. Pisarev Time-resolved studies of deuterium release from lithium films exposed to water vapor // *Fusion Engineering and Design* - 2017 - vol.124 - pp.333-337. (Web of Science, Scopus; Q2)
15. **Yu. Gasparyan**, V. Efimov and K. Bystrov. Helium concentration measurement in tungsten fuzz-like nanostructures by means of thermal desorption spectroscopy // *Nuclear Fusion* - 2016 - vol.56 - 054002. (Web of Science, Scopus; Q1)
16. M. Zibrov, S. Ryabtsev, **Yu. Gasparyan**, A. Pisarev. Experimental determination of the deuterium binding energy with vacancies in tungsten // *Journal of Nuclear Materials* - 2016 - vol.477 - pp.292-297. (Web of Science, Scopus; Q1)
17. S. Ryabtsev, **Yu. Gasparyan**, M. Zibrov, A. Shubina, A. Pisarev. Deuterium thermal desorption from vacancy clusters in tungsten // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* - 2016 - vol.382 - pp.101–104. (Web of Science, Scopus; Q2)

18. **Yu.M. Gasparyan**, O.V. Ogorodnikova, V.S. Efimov, A. Mednikov, E.D. Marenkov, A.A. Pisarev, S. Markelj, I. Čadež. Thermal desorption from self-damaged tungsten exposed to deuterium atoms // *Journal of Nuclear Materials* - 2015 - vol.463 - pp.1013–1016. (Web of Science, Scopus; Q1)
19. E.D. Marenkov, I.V. Tsvetkov, A.A. Pisarev, **Yu. M. Gasparyan**, A.A. Rusinov. Deuterium release from pores in tungsten created by 10 keV D_3^+ beam // *Nucl. Instr. and Meth. B* - 2011 - vol.269 - pp.876–880. (Web of Science, Scopus; Q2)
20. **Yu. Gasparyan**, M. Mayer, A. Pisarev, A. Wiltner, C. Adelhelm, F. Koch, M. Rasinski, J. Roth. Deuterium permeation through carbon-coated tungsten during ion bombardment // *Journal of Applied Physics* - 2011 - vol.110 - 33303. (Web of Science, Scopus; Q1)
21. **Yu. Gasparyan**, M. Rasinski, M. Mayer, A. Pisarev, J. Roth. Deuterium ion-driven permeation and bulk retention in tungsten // *Journal of Nuclear Materials* - 2011 - vol.417 - pp.540–544. (Web of Science, Scopus; Q1)
22. A. Rusinov, **Yu. Gasparyan**, N. Trifonov, A. Pisarev, M. Mayer, M. Sakamoto. Investigation of defects in tungsten by probe fluence method // *Journal of Nuclear Materials* - 2011 - vol.415 - pp.S645–S648. (Web of Science, Scopus; Q1)
23. K.A. Moshkunov, K. Schmid, M. Mayer, V.A. Kurnaev, **Yu.M. Gasparyan**, Air exposure and sample storage time influence on hydrogen release from tungsten // *Journal of Nuclear Materials* - 2010 - vol.404 - pp.174–177. (Web of Science, Scopus; Q1)
24. **Yu.M. Gasparyan**, A.V. Golubeva, M. Mayer, A. Pisarev, J. Roth. Ion-driven deuterium permeation through tungsten at high temperatures // *Journal of Nuclear Materials* - 2009 - vol.390-391 - pp.606-609. (Web of Science, Scopus; Q1)
25. A.V. Golubeva, M. Mayer, **Yu.M. Gasparyan**, J. Roth, V.A. Kurnaev. The ion-driven permeation experiment PERMEX // *Review of Scientific Instruments* - 2009 - vol.80 - 073501. (Web of Science, Scopus; Q1)
26. Н.Е. Ефимов, Д.Н. Синельников, Д.Г. Булгадарян, **Ю.М. Гаспарян**, Е.Д. Вовченко, С.А. Крат. Применение лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии к анализу захвата дейтерия в титановые пленки // *ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ*, 2022, том 86, № 5, с. 639–643. (Перечень ВАК); N.E. Efimov, D.N. Sinelnikov, D.G. Bulgadaryan, **Y.M. Gasparyan**, E.D. Vovchenko, S.A. Krat. Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Mass Spectrometry to Determine the Retention of Deuterium in Titanium Films // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* - 2022 - vol.86 - pp.532–535. (Web of Science, Scopus; Q3)
27. В.В. Кулагин, А.Ю. Хомяков, **Ю.М. Гаспарян**. Аналитическая оценка соотношения потоков атомарного и молекулярного водорода с поверхности вольфрама // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. №10, 2022, с. 102-106. (Перечень ВАК); V.V. Kulagin, A.Y. Khomyakov, **Y.M. Gasparyan**. Analytical Estimation of the Atomic and Molecular Flux Ratio from the Tungsten Surface // *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques* - 2022 - vol.16 - No.5 - pp. 909–913. (Scopus; Q4)

28. А.Г. Раздобарин, **Ю.М. Гаспарян**, Д.Л. Богачев, А.М. Дмитриев, Д.И. Елец, А.Н. Коваль, Г.С. Курскиев, Е.Е. Мухин, Д.Г. Булгадарян, С.А. Крат, Е.Д. Маренков, И.В. Алексеенко. Комплекс диагностик первой стенки и дивертора токамака с реакторными технологиями: контроль эрозии, температуры и мониторинг накопления термоядерного топлива // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2022, том 48, № 12, с. 1216–1232. (Перечень ВАК); A.G. Razdobarin, **Yu.M. Gasparyan**, D.L. Bogachev, A.M. Dmitriev, D.I. Elets, A.N. Koval, G.S. Kurskiev, E.E. Mukhin, D.G. Bulgadaryan, S.A. Krat, E.D. Marenkov, I.V. Alekseenko. Diagnostics Complex of the First Wall and Divertor of Tokamak with Reactor Technologies: Control of Erosion and Temperature and Monitoring of Fusion Fuel Build-up // Plasma Physics Reports - 2022 - vol.48 - No.12 - pp.1389-1403. (Web of Science, Scopus; Q3)
29. С.А. Крат, Е.А. Фефелова, А.С. Пришвицын, А.К. Хомяков, **Ю.М. Гаспарян**, А.А. Писарев. Накопление дейтерия и гелия в соосажденных вольфрамовых слоях, образующихся в дейтериевой плазме с примесью гелия // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 5, с. 627–632. (Перечень ВАК); S.A. Krat, E.A. Fefelova, A.S. Prishvitsyn, A.K. Khomyakov, **Yu.M. Gasparyan**, A.A. Pisarev. Accumulation of Deuterium and Helium in Co-Deposited W Layers Formed in He-Seeded Deuterium Plasma // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. - 2022 - vol.86 - pp.521–525. (Scopus; Q3)
30. А.Г. Посакалов, Н.С. Климов, **Ю.М. Гаспарян**, О.В. Огородникова, В.С. Ефимов. Изменение структуры приповерхностного слоя вольфрама и накопление дейтерия при импульсных плазменных нагрузках // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с.23-28. (Перечень ВАК); A.G. Poskakalov, N.S. Klimov, **Yu.M. Gasparyan**, O.V. Ogorodnikova, V.S. Efimov. Surface structure modification and deuterium retention in tungsten under pulse plasma loads // Physics of Atomic Nuclei - 2019 - vol. 82 - No. 7 - pp. 1005–1009. (Scopus; Q4)
31. Рябцев С.А., **Гаспарян Ю.М.**, Ефимов В.С., Арутюнян З.Р., Посакалов А.Г., Писарев А.А., Канашенко С.Л., Иванов Ю.Д. Влияние исходной дефектной структуры на захват гелия в вольфрам при ионном внедрении // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 1. С. 21-27. (Перечень ВАК); S.A. Ryabtsev, **Yu.M. Gasparyan**, V.S. Efimov, Z.R. Harutyunyan, A.G. Poskakalov, A.A. Pisarev, S.L. Kanashenko, Yu.D. Ivanov. Influence of the Initial Defect Structure on Helium Trapping in Tungsten under Ion Implantation // Phys. Atom. Nuclei - 2018 - vol.81 - pp.1541-1546. (Scopus; Q4)
32. Рябцев С.А., **Гаспарян Ю.М.**, Ефимов В.С., Арутюнян З.Р., Посакалов А.Г., Писарев А.А., Канашенко С.Л., Иванов Ю.Д. Влияние предварительного облучения мощным тепловым потоком на реэмиссию и термодесорбцию имплантированного дейтерия из малоактивируемых сталей // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 10. С. 96-101. (Перечень ВАК); S.A. Ryabtsev, **Yu.M. Gasparyan**, O.V. Ogorodnikova, Z.R. Harutyunyan, N.S. Klimov, A.G. Poskakalov, A.A. Pisarev. Influence of Preliminary Irradiation by a High Heat Flux on the Re-emission and

- Thermal Desorption of Deuterium Implanted from Reduced Activation Steels // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques - 2018 - vol.12 - pp.1032-1036. (Scopus; Q4)
33. С.А. Рябцев, **Ю.М. Гаспарян**, М.С. Зибров, А.А. Писарев. Отжиг точечных радиационных дефектов в вольфраме // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016, № 6, с. 93–97. (Перечень ВАК); S.A. Ryabtsev, **Yu.M. Gasparyan**, M.S. Zibrov, A.A. Pisarev. On the Annealing of Radiation-Induced Point Defects in Tungsten // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques - 2016 - vol.10 - No.3 - pp. 658–662. (Scopus; Q4)
34. Е.Д. Маренков, **Ю.М. Гаспарян**, С.И. Крашенинников. Влияние захвата в многоместные ловушки на транспорт водорода в твердом теле // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016, № 12, с. 22–27. (Перечень ВАК); E.D. Marenkov, **Yu.M. Gasparyan**, S.I. Krasheninnikov, Effect of multisite traps on hydrogen transport in solids // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques - 2016 - vol.10 - No.6 - pp.1208-1213. (Scopus; Q4)
35. В.С. Ефимов, **Ю.М. Гаспарян**, А.А. Писарев. Исследование тонкой структуры спектров термодесорбции дейтерия из вольфрама // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013, № 5, с. 79–85. (Перечень ВАК); V. S. Efimov, **Yu. M. Gasparyan**, and A. A. Pisarev. Study of the Fine Structure of the Spectra of Deuterium Thermal Desorption from Tungsten // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques - 2013 - vol. 7 - No. 3 - pp. 472–478. (Scopus; Q4)
36. Русинов А.А., **Гаспарян Ю.М.**, Перельгин С.Ф., Писарев А.А., Степанов С.О., Трифионов Н.Н. Стенд для термодесорбционных измерений // Приборы и техника эксперимента. 2009, №6, с.116-121. (Перечень ВАК)
37. M. Zibrov, **Yu. Gasparyan**, S. Ryabtsev, A. Pisarev. Isolation of Peaks in TDS Spectra of Deuterium from Ion Irradiated Tungsten // Physics Procedia – 2015 – vol.71 – pp.83-87. (Scopus)
38. A. Litnovsky, I. Duran, J.W. Coenen, **Y. Gasparyan**, M.R. Gilbert, E. Hollmann, C. Linsmeier, S. Nogami, C.H. Skinner, S. Zinkle. Fusion-Reactor materials // Encyclopedia of Nuclear Energy. 2021. pp. 594-619. (Scopus)
39. **Yu.M. Gasparyan**, O.V.Ogorodnikova, M.S. Zibrov, V.S. Efimov, A.S. Shubina, S.A. Ryabtsev, A.A. Pisarev. Deuterium and helium retention in radiation damaged tungsten // Atomic and plasma-material interaction data for fusion. Volume 18. IAEA, Vienna, 2019. P.45-54.
40. А.А. Писарев, Т.В. Степанова, А.В. Казиев, М.М. Харьков, **Ю.М. Гаспарян**, Д.В. Данилюк. Способ ионно-плазменного получения наноструктур на поверхности вольфрама // Патент на изобретение RU 1694177 С1, 09.07.2019. Заявка № 2019101687 от 22.01.2019.