

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи

Кулагин Владимир Владимирович

**Моделирование процессов захвата и десорбции дейтерия в
вольфраме при импульсном плазменном и лазерном
воздействии**

Специальность 1.3.9 — «Физика плазмы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, доцент
Гаспарян Юрий Микаэлович

Москва — 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Обзор современного состояния исследований накопления	
изотопов водорода в материалах ОПЭ	14
1.1 Плазменные нагрузки на ОПЭ в ТЯУ	14
1.2 Материалы ОПЭ в ТЯУ	19
1.3 Накопление изотопов водорода в вольфраме	24
1.3.1 Механизмы накопление изотопов водорода в ТЯУ	24
1.3.2 Взаимодействие изотопов водорода с вольфрамом	27
1.3.3 Закономерности накопления при стационарном плазменном облучении	32
1.3.4 Влияние импульсных нагрузок на накопление	32
1.4 Методы дистанционного контроля содержания изотопов водорода в ОПЭ	32
1.5 Выводы к Главе 1	33
Глава 2. Методика анализа динамики транспорта дейтерия в	
вольфраме	34
2.1 Модель транспорта изотопов водорода в материалах	34
2.1.1 Объемные процессы	34
2.1.2 Поверхностные процессы	35
2.2 Программный пакет FESTIM	35
2.3 Реализация нульмерной модели, учитывающей поверхностные процессы, в программном пакете FESTIM	35
2.3.1 Верификация модели	36
2.3.2 Валидация модели	36

2.4	Выводы к Главе 2	36
Глава 3. Захват дейтерия в вольфраме под действием		
	импульсно-периодических плазменных нагрузок	38
3.1	Валидация	38
3.1.1	Детали эксперимента	38
3.1.2	Расчетная модель	38
3.1.3	Сравнение результатов моделирования и эксперимента	38
3.2	Моделирование накопления дейтерия в вольфраме под действием	
	импульсно-периодических плазменных нагрузок	38
3.2.1	Постановка задачи	38
3.2.2	Эволюция температуры	38
3.2.3	Коэффициент рециклинга	38
3.2.4	Влияние параметров плазменных нагрузок	38
3.2.5	Влияние параметров центров захвата и скорости рекомбинации на поверхности	38
3.3	Аналитический анализ	38
3.3.1	Квазистационарное приближение	38
3.3.2	Распределение концентрации дейтерия при насыщении	38
3.3.3	Сравнение аналитического решения с результатами численного расчета	38
3.4	Выводы к Главе 3	38
Глава 4. Десорбция дейтерия из вольфрама при импульсном		
	лазерном нагреве	39
4.1	Валидация	39
4.1.1	Детали эксперимента по лазерно-индуцированной десорбции дейтерия из вольфрамовых пленок	39
4.1.2	Определение параметров центров захвата дейтерия	42

	Стр.
4.1.3 Расчетная модель	44
4.1.4 Сравнение результатов моделирования и эксперимента . . .	44
4.2 Анализ состава потока десорбированных частиц	44
4.2.1 Постановка задачи	44
4.2.2 Аналитический анализ	44
4.2.3 Результаты численного моделирования	44
4.3 Анализ влияния параметров материала на выход дейтерия	44
4.3.1 Постановка задачи	44
4.3.2 Влияние теплопроводности материала	44
4.3.3 Влияние параметров дефектов в вольфраме	44
4.3.4 Влияние градиента температур	44
4.3.5 Режимы десорбции во время лазерно-индуцированной десорбции	44
4.4 Выводы к Главе 4	44
Заключение	45
Список сокращений и условных обозначений	46
Публикации автора по теме диссертации	48
Список литературы	49
Список рисунков	61
Список таблиц	63

Введение

В условиях растущего мирового населения и активной глобальной индустриализации, сопровождаемых повышением объемов потребления электроэнергии, все более актуальной становится необходимость в источниках энергии, способных обеспечить устойчивое и надежное энергоснабжение. Этот вызов требует поиска инновационных решений, которые могли бы существенно изменить существующую парадигму энергетического производства и потребления. Одним из наиболее перспективных направлений формирования новых источников энергии является управляемый термоядерный синтез (УТС), рассматриваемый в качестве «чистой» и безопасной альтернативы подходам, основанным на использовании ископаемых ресурсов. Прогресс в области УТС может стать ключевым фактором в развитии энергетических технологий следующего поколения.

За последние десятилетия наибольшие успехи на пути к практической реализации контролируемой реакции УТС были достигнуты в установках с магнитным удержанием горячей плазмы типа токамак. Возможность генерации энергии за счет дейтерий-тритиевой реакции термоядерного синтеза была продемонстрирована на токамаках TFTR [1] и JET [2] еще в конце XX века. Последующая модернизация токамака JET и оптимизация методики эксперимента позволила повысить мощность генерируемой энергии и длительность плазменного импульса [3, 4]. На токамаках WEST и EAST были получены рекордные результаты по длительности удержания горячей плазмы (без генерации термоядерной энергии) продолжительностью в 364 с [5] и 1056 с [6], соответственно. Наблюдаемые достижения свидетельствуют о перспективности и потенциальной реализуемости УТС за счет удержания термоядерной плазмы в магнитной конфигурации токамака.

В настоящее время идет активная фаза строительства международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР), спроектированного для практической демонстрации возможности квазистационарного удержания термоядерной DT-плазмы и решения сопутствующих инженерных задач. Введены в эксплу-

атацию наибольший в России токамак Т15-МД [7] и наибольший в мире токамак JT60-SA [8], расположенный в Японии. Во множестве стран разрабатываются проекты установок следующего поколения для отработки реакторных технологий, в том числе в России ведется активное проектирование токамака с реакторными технологиями (ТРТ) [9]. Помимо этого, растет число частных компаний, развивающих уникальные подходы и технологии УТС для коммерческих целей. По данным Ассоциации термоядерной промышленности (FIA) [10], более 50% компаний занимаются разработками в области УТС на основе магнитного удержания плазмы, что дополнительно усиливает актуальность направления.

Ввод в эксплуатацию термоядерных установок (ТЯУ) потребует решения целого ряда физических и технологических задач. Одними из наиболее существенных остаются проблемы удержания энергии и частиц, выбора материалов обращенных к плазме элементов (ОПЭ), эффективной организации топливного цикла, а также обеспечения радиационной безопасности. Последний пункт обусловлен планируемым использованием смеси дейтерия и радиоактивного трития в качестве топлива для термоядерных реакторов, что определяет необходимость в понимании процессов накопления и систематическом контроле содержания изотопов водорода в конструкционных элементах.

В первых экспериментах с DT-плазмой на токамаках TFTR и JET наблюдалось чрезмерно большое накопление трития [11], связанное с особенностями взаимодействия изотопов водорода с используемыми на тот момент углеродными ОПЭ. Последующие результаты, полученные на токамаках с металлической облицовкой (JET [3, 4]: бериллиевая первая стенка и вольфрамовый дивертор, EAST [6]: молибденовая первая стенка и вольфрамовый дивертор, ASDEX-Upgrade [12] и WEST [5]: вольфрамовые первая стенка и дивертор), продемонстрировали перспективу в достижении хороших параметров удержания плазмы при одновременном снижении (по сравнению с углеродными ОПЭ) скорости накопления изотопов водорода. Важно заметить, что вольфрам используется в качестве основного материала наиболее нагруженной области большинства действующих токамаков — дивертора. Как материал ОПЭ, вольфрам характеризуется

низким коэффициентом распыления легкими ионами и высокой температуростойкости, что может играть ключевую роль в обеспечении продолжительного срока службы под воздействием интенсивных нейтронных и плазменных потоков [13]. К тому же, Международной организацией ИТЭР было принято решение о переходе к полностью вольфрамовой облицовке [14], а во множестве проектов демонстрационных реакторов вольфрам рассматривается как приоритетный материал ОПЭ [15].

Оценки уровня накопленного трития в ИТЭР [16, 17] с полностью вольфрамовой стенкой показывают, что допустимый уровень содержания не должен быть превышен за период эксплуатации, причем захват в ОПЭ не будет определяющим процессом глобального удержания. Однако при получении данных консервативных оценок не учитывался ряд процессов, протекание которых ожидается во время работы реактора. Одним из таких факторов являются быстрые переходные процессы, как локализованные на периферии неустойчивости (Edge localised modes — ELMs), наблюдаемые в плазменных разрядах с наилучшими параметрами удержанием плазмы в токамаках (H-мода). Развитие ELM-неустойчивости сопровождается мощными кратковременными плазменными потоками, приходящими на ОПЭ. Длительное импульсно-периодическое воздействие плазменных потоков может влиять как на динамику накопления рабочего газа в ОПЭ, так и на процессы взаимодействия плазмы с их поверхностью.

По всей видимости, единственные эксперименты по имитации воздействия мощных плазменных потоков, соответствующих ELM-событиям, на захват изотопов водорода в вольфраме проводились на линейной установке КСПУ-Т [18]. Полученные результаты свидетельствуют о потенциально большей скорости накопления во время переходных процессов по сравнению со случаем стационарного облучения, характерного для нормальных плазменных разрядов. Тем не менее, параметры облучения в установках такого типа не могут в полной мере воспроизвести условия, соответствующие крупным токамакам типа ИТЭР, что говорит об актуальности дальнейших исследований влияния импульсных плазменных нагрузок на удержание изотопов водорода в ОПЭ.

Схожей задачей является анализ влияния импульсных тепловых нагрузок на выход изотопов водорода из ОПЭ. Данный процесс лежит в основе метода дистанционного контроля содержания изотопов водорода в поверхностном слое материалов за счет лазерно-индуцированной десорбции (ЛИД). Диагностический метод ЛИД заключается в нагреве участка исследуемой поверхности лазерным импульсом с последующим анализом состава вышедшего газа. Применимость ЛИД была продемонстрирована на множестве токамаков (TEXTOR [19], JET [20], Глобус-М2 [21] и т.д.), а соответствующие диагностические комплексы разрабатываются для токамака ИТЭР и были предложены для российского проекта ТРТ [22]. Ввиду этого, анализ процессов выхода водорода при лазерном нагреве также является актуальным вопросом для определения наиболее эффективных режимов диагностического метода как в действующих плазменных установках, так и в будущих ТЯУ.

Целью диссертационной работы является выявление закономерностей процессов удержания и выхода дейтерия в вольфраме под действием импульсного плазменного и лазерного воздействия.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Построить и валидировать математическую модель, описывающую транспорт дейтерия в вольфраме под действием импульсных тепловых и плазменных нагрузок.
2. Оценить параметры плазменных нагрузок, приходящих на ОПЭ во время ELM-событий в крупных токамаках.
3. Исследовать влияние быстрых переходных процессов, соответствующих ELM-событиям в крупных токамаках, на интегральное накопление дейтерия в вольфраме.
4. Оценить влияние поверхностных процессов на выход дейтерия из вольфрама при лазерном нагреве.
5. Провести анализ состава потока десорбированного дейтерия с поверхности вольфрама при лазерном нагреве.

6. Определить зависимость доли вышедших атомов дейтерия из поверхностных слоев вольфрама от параметров лазерного нагрева и теплофизических свойств материала.

Методология и методы исследования. Достижение поставленной цели и решение сопутствующих задач осуществлялись путем проведения численного моделирования, которое позволяет исследовать влияние импульсных нагрузок в широком диапазоне параметров, обычно недоступном в рамках действующих экспериментальных и лабораторных установок. Результаты численных расчетов были получены методом конечных элементов в свободно распространяемом программном пакете FESTIM, разработанном в международном коллективе при участии автора. Для решения части ресурсоёмких задач были использованы ресурсы высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ. Для демонстрации надежности и корректности использованных моделей проводилась их верификация и валидация путем сравнения с экспериментальными результатами представленными в литературе или полученными в рамках данной диссертационной работы. Построение аналитической модели, описывающей распределение изотопов водорода в вольфраме при наличии градиента температур (эффект Соре) и ловушек водорода, проводилось путем решения системы дифференциальных уравнений в частных производных методом функции Грина.

Научная новизна:

1. Впервые исследовано влияние длительных (1000 с) импульсно-периодических плазменных нагрузок, соответствующих ELM-событиям в токамаках, на накопление дейтерия в вольфрамовых ОПЭ.
2. Предложена оригинальная аналитическая модель, описывающее распределение содержания водорода в материалах при наличии градиента температур и центров захвата водорода.
3. Впервые оценено влияние поверхностных процессов, теплофизических свойств и параметров лазерного импульса на выход дейтерия из поверхностных слоев вольфрама при лазерном нагреве.

4. Впервые проведен анализ состава потока дейтерия, десорбированного с поверхности вольфрама при лазерном нагреве.

Научная и практическая значимость заключаются в следующем:

1. Результаты численного и теоретического анализа, разработанная аналитическая модель, описывающая содержание водорода в материалах при наличии градиента температур, могут быть использованы при прогнозировании содержания изотопов водорода, накопленных в ОПЭ ТЯУ.
2. Результаты численного и теоретического анализа влияния параметров лазерного нагрева и материала на выход изотопов водорода из поверхностных слоев могут быть использованы при разработке и выборе оптимальных параметров диагностического метода контроля содержания изотопов водорода в ОПЭ, основанного на ЛИД. Результаты экспериментов по ЛИД дейтерия из слоев вольфрама, со-осажденных с дейтерием, могут быть использованы для валидации численных моделей.
3. Имплементированная в коде FESTIM модель, учитывающая поверхностные процессы, доступна всем пользователям кода и существенно расширяет его область применения. Результаты валидации модели включены в книгу по верификации и валидации кода FESTIM и могут быть использованы для проведения сравнения результатов, полученных с помощью иных кодов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Одномерная аналитическая модель, описывающая стационарное распределение водорода при учете влияния градиента температур (эффекта Сорре) и центров захвата в приближении мгновенной рекомбинации атомов на обращенной к плазме поверхности и мгновенной рекомбинации или нулевого потока атомов на обратной поверхности и позволяющая прогнозировать предельное накопление изотопов водорода в обращенных к плазме материалах.
2. Возникновение импульсно-периодических плазменных нагрузок, соответствующих ELM-событиям в токамаках (частота: 10 — 100 Гц, дли-

тельность: ~ 1 мс, плотность энергии: $0.45 — 0.14$ МДж/м²), наряду со стационарными плазменными потоками (плотность мощности: $1 — 10$ МВт/м²) ведет к снижению скорости накопления дейтерия в вольфраме при длительности облучения более 10 с за счет значительного повышения температуры материала относительно случая облучения стационарными потоками плазмы.

3. Дополнительный нагрев во время импульсно-периодических плазменных нагрузок, соответствующих ELM-событиям в токамаках, приводит к более быстрому проникновению дейтерия вглубь материала за счет большей подвижности, что может усложнить процесс обезгаживания ОПЭ в ТЯУ.
4. Атомарная фракции в потоке водорода, десорбированного с поверхности вольфрама, растет с увеличением температуры поверхности и уменьшением потока частиц, выходящих на поверхность. Величина атомарной фракции в потоке десорбированного водорода может достигать ~ 1 % и ~ 10 % при импульсном лазерном нагреве с наносекундной и миллисекундной длительностью до температуры плавления вольфрама.
5. Поверхностные процессы снижают долю десорбированного водорода с чистой поверхности вольфрама при импульсном лазерном нагреве с длительностью менее 10 мкс.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением общепризнанного численного метода решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, имплементированного в верифицированном и валидированном программном пакете FESTIM. Разработанные модели основаны на теориях Макнабба и Фостера, надежность которой была продемонстрирована путем воспроизведения результатов множества лабораторных экспериментов. Помимо этого, использованные модели были валидированы путем сравнения результатов численных расчетов с экспериментальными данными, приведенными в литературе или полученными в рамках данной диссертационной работы. По-

лученные результаты демонстрируют качественное и количественное согласие с литературными данными, полученными независимыми авторами на основе моделирования или экспериментального анализа.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях:

- XXV, XXVI, XXVII, XXVIII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 2022 — 2025 гг.)
- Пятнадцатая международная школа молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова (Окуловка, 2022 г.)
- 26th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (PSI-26, Marseille, France, 2024 г.)
- 1st Open Source Software for Fusion Energy Conference (OSSFE, 2025 г.)

Полученные результаты также представлялись и обсуждались на собраниях разработчиков программного пакета FESTIM.

Личный вклад. Все результаты, выносимые на защиту, были получены автором или при его непосредственном участии. Лично автором были построены численные и аналитические модели, использованные для исследования процессов накопления и выхода дейтерия из вольфрама под действием импульсных плазменных и лазерных нагрузок, проведены моделирование и обработка полученных результатов. Постановка задач, выбор входных параметров для моделирования и анализ полученных результатов обсуждались с непосредственным научным руководителем д.ф.-м.н. Ю.М. Гаспаряном. Имплементация модели, учитывающей поверхностные процессы, в коде FESTIM проводилась совместно с главным разработчиком кода Ph.D. Р. Делапорте-Матюран (Массачусетский технологический институт, США) при определяющем участии автора, реализовавшим модель и осуществившим ее верификацию и валидацию. Эксперименты по ЛИД дейтерия из пленок вольфрама, со-осажденных вместе с дейтерием, были проведены коллективом ФТИ им. А.Ф. Иоффе в лице к.ф.-м.н. О.С. Медведева, Е.В. Шубиной, А. Белокура при непосредственном участии автора в постановке экспериментов,

обработке результатов измерений и проведении сравнения с модельными данными.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 1 из которых издано в журналах, рекомендованных ВАК, 5 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 0 приложений. Полный объем диссертации составляет 63 страницы, включая 12 рисунков и 0 таблиц. Список литературы содержит 99 наименований.

Глава 1. Обзор современного состояния исследований накопления изотопов водорода в материалах ОПЭ

Исследования в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) с магнитным удержанием плазмы достигли важного этапа, на котором длительное ($\sim 100 - 1000$ с) удержание энергии в горячей плазме становится все более реализуемо. Инженерно-техническая реализация термоядерных установок (ТЯУ) промышленного масштаба потребует решения совокупности взаимосвязанных задач для осуществления квазистационарного режима горения плазмы с параметрами, необходимыми для протекания реакции термоядерного синтеза. Ключевым аспектом продолжительной работы установок такого типа являются процессы взаимодействия пристеночной плазмы с поверхностью обращенных к плазме элементов (ОПЭ). Эти процессы существенно влияют на параметры плазмы и во многом определяют срок службы компонентов, предназначенных для защиты внутренних элементов установки, что также накладывает ограничения на выбор материалов ОПЭ. Сопутствующим процессом данного взаимодействия является накопление изотопов водорода в ОПЭ. Исследование механизмов и закономерностей изотопов водорода представляет собой ключевую задачу будущих ТЯУ, использующих в качестве компонентов топлива радиоактивный тритий.

1.1 Плазменные нагрузки на ОПЭ в ТЯУ

Элементы первой стенки в ТЯУ на базе токамака будут подвержены воздействию интенсивных потоков тепла и частиц. В действующих установках среднее значение плотности потока тепла (отношение полной мощности, попадающей на стенку, к ее проективной площади) на ОПЭ оценивается на уровне $0,2 - 0,6$ МВт/м² [23]. Особенности удержания плазмы в магнитной конфигурации

токамака однако приводят появлению пространственно-временного распределения этой нагрузки. Диверторная область токамаков является наиболее нагруженной. Прогностическое моделирование для строящегося токамака ИТЭР показывает, что стационарные нагрузки в нормальных разрядах¹ могут достигать величины $5\text{--}15\text{ МВт/м}^2$ [24, 25] вблизи пересечения сепаратрисы и внешних панелей дивертора, приводя к существенному нагреву поверхности до $500\text{--}1000\text{ К}$.

Величина потоков тепла на ОПЭ может меняться в ходе различных переходных процессов, которые можно разделить на медленные и быстрые. К медленным можно отнести неизбежные процессы зажигания и затухания разряда длительностью около 100 с для ИТЭР, а также допустимые кратковременные повышения нагрузок до уровня 20 МВт/м^2 длительностью в несколько секунд [26]. Иницирование быстрых переходных процессов связано с развитием неустойчивостей разного рода [27]. На рисунке 1.1 приведена сравнительная диаграмма тепловых потоков, приходящих на диверторные пластины ИТЭР [28].

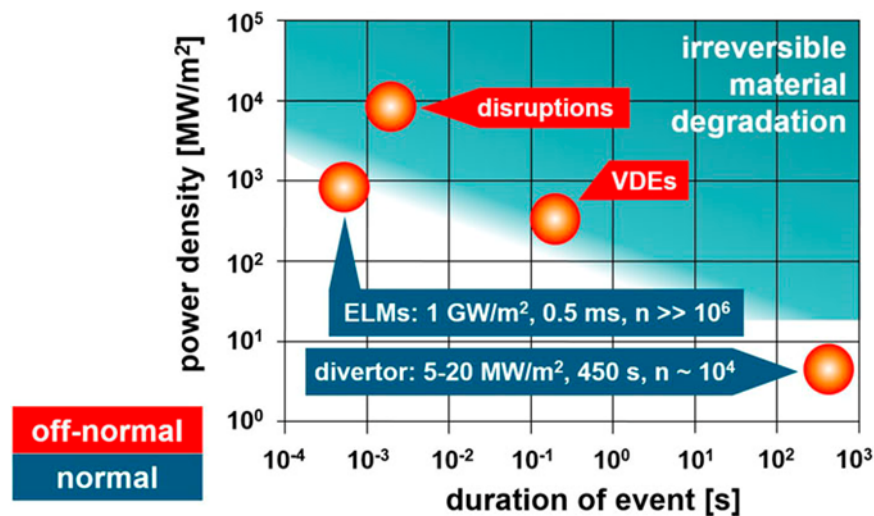


Рисунок 1.1 — Ожидаемые тепловые потоки, приходящие на ОПЭ в ИТЭР [28]. Бирюзовая область соответствует области нанесения необратимого ущерба поверхности

Значительную опасность представляют три типа событий: большие срывы тока, вертикальные смещения плазменного шнура и импульсно-периодические

¹Под «нормальными разрядами» подразумеваются квазистационарные режимы горения плазмы, не подверженных влиянию глобальных неустойчивостей

плазменные нагрузки во время ELM-событий. Большие срывы тока происходят при развитии глобальных магнитогидродинамических неустойчивостей. Они представляют наибольшую опасность, т.к. приводят к выбросу значительной части запасенной в плазме энергии на ОПЭ за времена порядка 10–100 мс. Вертикальные смещения характерны для D-образного сечения плазменного шнура при утере устойчивости в вертикальном направлении за счет быстрых изменений параметров плазмы. События неконтролируемого вертикального смещения ведут к выходу за сепаратрису, создавая дополнительную тепловую нагрузку на ОПЭ за время порядка 0,1–1 с. Возникновение импульсно-периодических плазменных нагрузок на ОПЭ характерно для плазменных разрядов в H-мод, переход в которую сопровождается формированием транспортного барьера на периферии плазмы. Образование транспортного барьера ведет к росту давления плазмы и его градиента на периферии пока не будет достигнут предел магнитогидродинамической устойчивости [29]. Возникающая в результате неустойчивости (ELM-неустойчивости) вызывает быструю релаксацию давления с выбросом потока плазмы, содержащего порядка процента запасенной энергии в плазме, на ОПЭ за время $\sim 0,1–1,0$ мс. Согласно оценкам [30, 27, 26, 24], потоки тепла во время переходных процессов в ИТЭР могут достигать ~ 10 ГВт/м². Воздействие мощных плазменных потоков во время описанных переходных процессов может нанести серьезный ущерб поверхности (растрескивание, плавление, испарение и т.д.). Предотвращение возможного ущерба является приоритетной задачей, для решения которой разрабатываются соответствующие операционные системы и подходы [31, 32, 33]. Ввиду этого, далее в работе основное внимание будет уделено переходным процессам типа ELM-событий, последствия развития которых предполагаются либо допустимыми, либо могут быть минимизированы до приемлемого уровня.

Потоки частиц, приходящие на ОПЭ в действующих установках, в основном состоят из электронов, ионов и нейтралов перезарядки изотопов водорода. Возможно также наличие малой доли примеси более тяжелых атомов/ионов материалов ОПЭ, остаточного газа или примесей, вводимых в установку для кондициони-

рования стенок или распределения тепловых нагрузок. В проектируемых ТЯУ, в т.ч. и токамаке ИТЭР, корпускулярные нагрузки также будут включать продукты DT-реакции синтеза: высокоэнергетичные нейтроны (14,1 МэВ) и альфа-частицы (3,5 МэВ). Длительные режимы работы установок будут сопровождаться высокой дозой облучения ОПЭ, что также может приводить к модификации как поверхностной, так и объемной структуры. К тому же, важной задачей с точки зрения обеспечения радиационной безопасности является минимизация накопления радиоактивного трития в элементах установки на протяжении ее срока эксплуатации.

Плотность потока частиц на элементы первой стенки ИТЭР оценивается на уровне $10^{18} - 10^{20}$ част./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) [34, 35], когда для диверторных пластин — на уровне $10^{23} - 10^{24}$ част./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) [24, 25], причем энергия приходящих ионов составляют величину порядка 1–100 эВ. Оценка суммарной дозы облучения пластин дивертора в ИТЭР показывает, что за 5000 номинальных разрядов длительностью 400 с ее величина составит $\sim 10^{29} - 10^{30}$ част./ м^2 . Как показано на сравнительных диаграммах на рисунке 1.2, условия эксплуатации ОПЭ в ИТЭР будут намного суровее, чем в действующих установках по исследованию магнитного удержания плазмы. Энергии ионов в диверторе сопоставимы с энергиями, используемыми в различных методах плазменного осаждения и травления, однако плотности потока ионов и энергии на несколько порядков выше. Помимо этого, поток и энергия ионов, приходящих на поверхность ОПЭ, могут увеличиваться во время переходных процессов. Анализ данных с диагностических систем (зонды Ленгмюра и D_α -спектроскопия) токамака JET [37, 38] демонстрирует кратное увеличение измерительных сигналов во время ELM-событий, что косвенно соответствует пропорциональному росту потока частиц. Считается, что энергия частиц во время ELM-событий пропорциональна температуре плазмы на пьедестале [39]. При сохранении аналогичных зависимостей для токамака масштаба ИТЭР можно ожидать соответствующее превышение уровня стационарных нагрузок с энергия приходящих ионов порядка нескольких килоэлектронвольт.

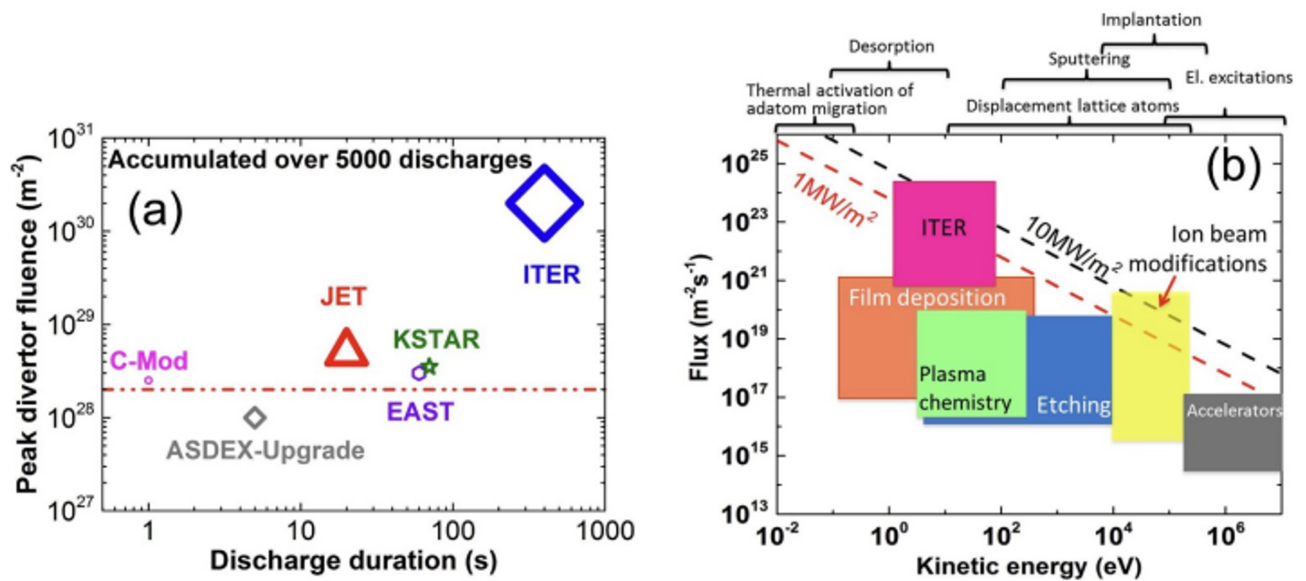


Рисунок 1.2 — Сравнение оцененной ионной дозы после 5000 тысяч нормальных плазменных разрядов в различных токамаках (слева) и характерных условий облучения в различных типах экспериментов [36]

Немаловажным остается влияние образования гелия и нейтронов на эксплуатацию ОПЭ. Генерируемы в ходе DT-реакции частицы гелия должны терять большую часть своей энергии в центре плазменного шнура, однако стационарное облучение материалов ионами гелия с низкой энергией также может оказывать существенное влияние. Известно, что облучение тугоплавких металлов ионами гелиевой плазмы индуцирует формирование гелиевых пузырей в объеме материала, а также может приводить к его структурным изменениям с образованием высокопостристых структур [40, 41, 42]. Любые незапланированные структурные изменения морфологии поверхности ОПЭ будут влиять на процессы взаимодействия плазмы с ней, что может приводить к глобальным изменениям в режимах удержания плазмы.

Взаимодействие ионов с ОПЭ носит поверхностный характер. Падающий на поверхность поток частиц может приводить либо к обратной эмиссии частиц (отражение, распыление), либо к их имплантации. Средняя глубина внедрения частиц (за исключением эффектов каналирования) может достигать нескольких десятков нанометров в зависимости от состава и структуры мишени, сорта приходящих частиц и их энергии [43]. Ввиду гораздо большей глубины пробега нейтронов

основные процессы взаимодействия происходят в объеме материалов. Облучение нейтронными потоками ведет к объемному нагреву материалов, их трансмутации, а также образованию дефектов кристаллической решетки за счет развития каскадов столкновений. Прогнозируемый уровень повреждений в конце срока службы токамака ИТЭР оценивается гораздо ниже инженерных ограничений [44]. Тем не менее, образование радиационных дефектов в материалах ОПЭ в ходе работы установки может влиять на удержание изотопов водорода.

1.2 Материалы ОПЭ в ТЯУ

Влияние описанных в предыдущим разделе отдельных типов нагрузок широко исследовалось в лабораторных условиях (исключением могут служить эффекты, связанные с облучением нейтронами с МэВ-ной энергии). В общем случае, они будут оказывать совместное влияние, что качественно проиллюстрировано на рисунке 1.3. Синергетические эффекты воздействия на ОПЭ в не достижимых ранее условиях ТЯУ могут создавать новые вызовы для выбора их оптимальной конструкции. Эти аспекты также накладывает совокупность требований и на выбор используемых материалов. К основным факторам, определяющим этот выбор, можно отнести термостойкость и теплопроводность, эрозионную устойчивость при ионном облучении, способность накапливать изотопы водорода, устойчивость и низкую активируемость при нейтронном облучении. Высокая термостойкость и теплопроводность, а также низкая эрозия при облучении легкими ионами характерны для тугоплавких металлов с большим зарядовым числом ядра (Z). Однако распыление и попадание в область горячей плазмы атомов таких материалов может приводить к увеличению потерь мощности на излучение из плазмы [45]. Более легкие материалы подвержены большей эрозии поверхности и могут влиять на динамику накопления изотопов водорода в ТЯУ.

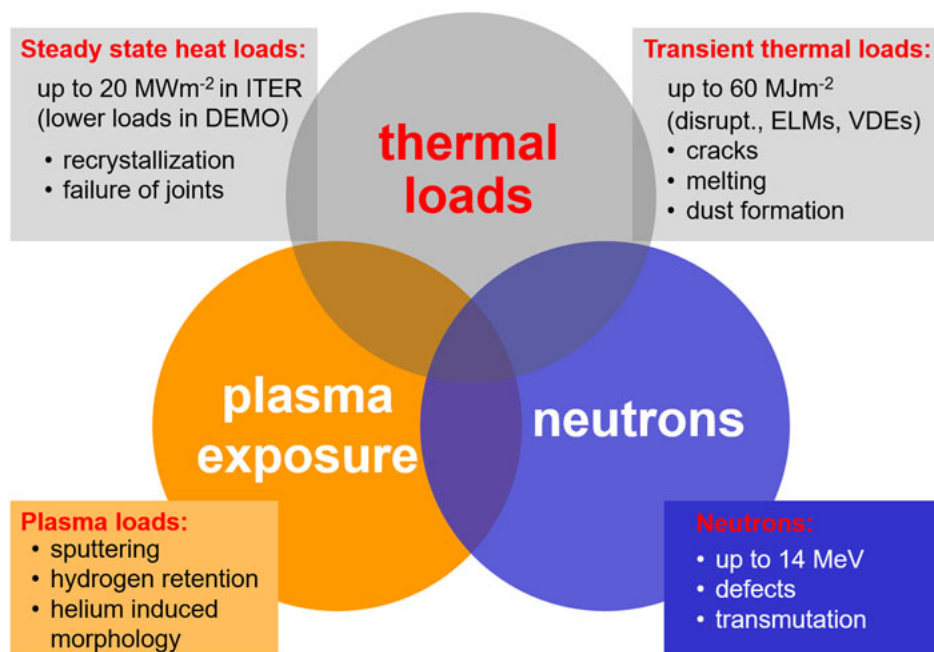


Рисунок 1.3 — Синергетические нагрузки и их основные последствия для ОПЭ при работе ТЯУ [28]

Основными материалами, применяемыми в современных установках, являются графит (JT-60SA [8], T-15МД [7]), бериллий (JET [3, 4]), молибден (EAST [6]) и вольфрам (JET, EAST, WEST [5], ASDEX-Upgrade [12]). Углеродные материалы являются привлекательным выбором для ОПЭ ввиду ряда преимуществ. Проникновение углерода в плазму ведет к малым потерям мощности с излучением из-за его низкого зарядового числа ($Z = 6$). Углеродные материалы характеризуются высокими теплостойкостью и значением теплопроводности ($100\text{--}300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при комнатной температуре [46, 47]), сопоставимой с металлами. Помимо этого, нагрев поверхности до высоких температур ($>3800 \text{ К}$) ведет к сублимации материала, а не плавлению, что предотвращает вероятность развития процессов взаимодействия расплава с приповерхностной плазмой и магнитным полем. Однако углеродные материалы более подвержены распылению при облучении легкими ионами, чем, например, вольфрам. а также характеризуются высоким коэффициентом химического распыления при облучении изотопами водорода. Для сравнения на рисунке 1.4 приведены расчетные коэффициенты распыления углерода (физического и химического), бериллия и вольфрама. Влияние химического распыления может быть минимизировано обеспечением «благоприятного» режима

облучения, но другим важным недостатком углеродных материалов является накопление изотопов водорода. Изотопы водорода образуют прочные С-Н связи, что может приводить к чрезмерному накоплению трития в переосажденных пленках и затруднять извлечению трития из установки [11]. Помимо этого, интенсивное облучение потоками нейтронов и компонентов плазмы может приводить к деградации теплофизических свойств [48] и структурным изменениям поверхностных слоев [49, 50, 51].

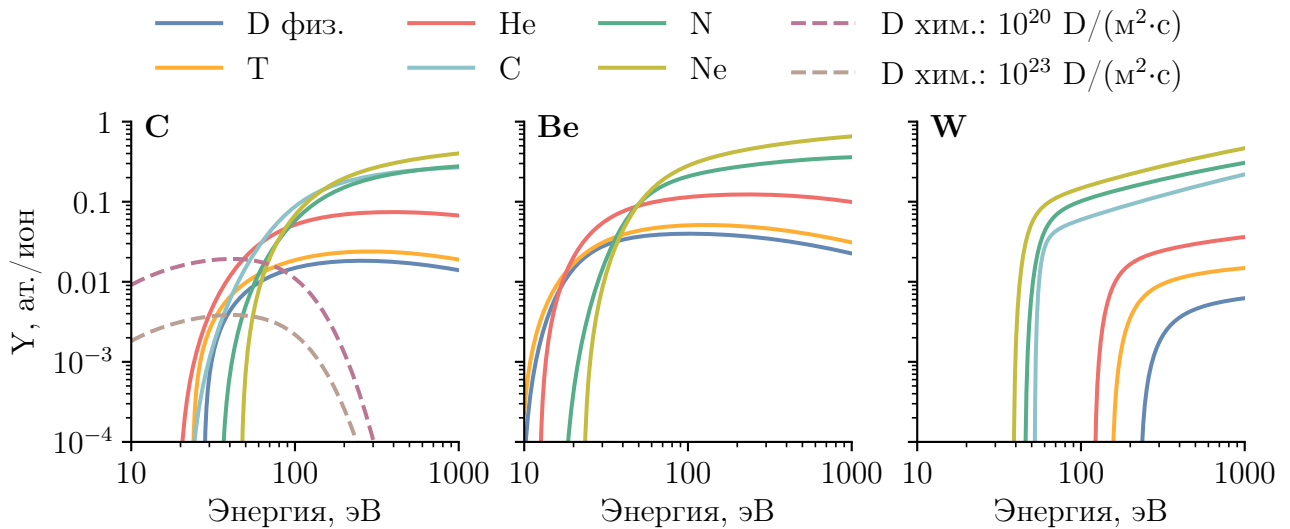


Рисунок 1.4 — Расчетные зависимости коэффициентов физического распыления бериллия, углерода и вольфрама от энергии некоторых типов ионов при нормальном падении [52, 53]. Для углерода также приведены зависимости коэффициента химического распыления дейтерием при комнатной температуре и различных значениях потока [54, 55]

Бериллий, как и углерод, обладает низким атомным номером ($Z = 4$), что обеспечивает относительно хорошую совместимость за счет минимизации потерь мощности на излучения при проникновении бериллия в область горячей плазмы. Он также обладает высокой теплопроводностью ($200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) и относительно высокой температурой плавления (1560 К) [56]. По сравнению с углеродными материалами, скорость химического распыления [57] и накопления изотопов водорода [34] в нем существенно меньше. Переход к металлической облицовке в токамаке JET привел к снижению интегральной эрозии ОПЭ и, как следствие, накоплению изотопов водорода [58]. Бериллий также химически активен, что позволяет эффективно связывать кислород. Не смотря на явные преимущества бериллия как

материала для ОПЭ, он обладает рядом существенных недостатков. Первым из них является токсичность бериллиевой пыли, что требует применения специальных мер по работе с ним [59]. Вторым недостатком является низкая энергия связи атомов кристаллической решетки, что приводит к более высокому коэффициенту физического распыления по сравнению с графитом (рис. 1.4) и, соответственно, меньшему сроку службы под действием интенсивного ионного облучения. Следующим негативным свойством является деградация теплофизических свойств и охрупчивание бериллия, являющееся синергетическим эффектом облучения потоками нейтронов и гелия [60, 61]. Последним является малая температура плавления по сравнению с иными материалами, что ограничивает использование бериллия в высоконагруженных областях установки без активного охлаждения. Совокупность этих и иных особенностей послужили причиной принятия решения об отказе от использования бериллия в качестве ОПЭ токамака ИТЭР [14], однако использование бериллия рассматривается для российского токамака ТРТ [23, 62].

Молибден ($Z = 42$) и вольфрам ($Z = 74$) являются тугоплавкими металлами с высокими температурами плавления: 2896 К и 3695 К, соответственно. Однако вольфрам предпочтительнее по причине более высоких эксплуатационных характеристик, хоть и обладает рядом свойств усложняющих технологическое производство элементов облицовки с ним [62]. Исходя из этого, основное внимание будет уделено вольфраму. Помимо высокой теплостойкости, вольфрам характеризуется низким коэффициентом распыления легкими ионами (рис. 1.4), совместимостью с нейтронным облучением и низкой растворимостью изотопов водорода [63, 64]. Явным недостатком вольфрама является вероятность распыления тяжелыми примесными ионами в плазме или ее легкими основными компонентами с высокой энергией, сопровождаемое загрязнением плазмы частицам с высоким атомным номером. Как отмечалось в разделе 1.1, потоки частиц плазмы с высокой энергией ожидаются в ходе различных переходных процессов. Известна также проблема образования трещин на поверхности вольфрама при циклических тепловых нагрузках, характерных для ELM-событий. Дополнительно необходимо отметить активно исследуемые в последнее время изменения поверхности воль-

фрама при облучении ионами гелиевой плазмы. В условиях, характерных для диверторной области токамаков, облучение ионами гелия ведет к формированию высокопористой наноструктуризованной морфологии, называемой «пух» [40, 41, 42, 65, 66, 67]. Рост вольфрамового «пуха» на поверхности может повысить вероятность зажигания униполярных дуг с соответствующем увеличением уровня эрозии поверхности. Невзирая на недостатки вольфрама, он выбран в качестве основного материала ОПЭ для ИТЭР [17] и находится в приоритетном списке как для ТРТ [62], так и для других установок, проектируемых в настоящее время.

Учитывая риски появления тяжелой примеси в горячей плазме при распылении вольфрама, рассматривается применения различных материалов для нанесения кондиционирующих покрытий. Двумя распространенными материалами, применяемыми в действующих установках, являются литий ($Z = 5$) и бор ($Z = 3$). Оба материала обладают низким атомным номером и являются химически активными по отношению к кислороду и углероду, что позволяет снизить долю более тяжелой примеси в плазме [68, 69]. С другой стороны, более высокая скорость эрозии покрытий требует применения методов их регулярного обновления. Тем не менее, эксперименты на токамаках ASDEX-Upgrade [70] и EAST [71] продемонстрировали, что применению легких материалов для кондиционирования стенок может обеспечить режимы плазменных разрядов с низким рециклингом изотопов водорода, что может привести к осуществлению длительных стабильных разрядов [72]. Помимо методов нанесения защитных покрытий, ведется активное развитие альтернативных вариантов, например самопассивируемые сплавы вольфрама с пониженным термоокислением [73] и капиллярно-пористые системы с жидкими металлами [74], которые, возможно, решат проблемы, характерные для традиционных материалов.

1.3 Накопление изотопов водорода в вольфраме

Как показано в предыдущем разделе, вольфрам обладает совокупностью свойств, определяющим его применимость в качестве материала ОПЭ. Перспектива его использования инициировала всестороннее изучение закономерностей накопления изотопов водорода в условиях, ожидаемых в ТЯУ. Необходимость детального анализа во многом обусловлена необходимостью контроля за содержанием радиоактивного трития. Так, для токамака ИТЭР установлен административный лимит в 700 г по интегральному накоплению в элементах вакуумной камеры с учетом возможных погрешностей и накопления в крионасосах [16]. В данном разделе приведены основные механизмы и экспериментальные результаты исследования накопления изотопов водорода в вольфраме.

1.3.1 Механизмы накопление изотопов водорода в ТЯУ

Изотопы водорода могут накапливаться на поверхности ОПЭ за счет адсорбции низкоэнергетичных атомов или молекул. Совокупность каналов адсорбции является процессом динамического (краткосрочного) удержания и не представляет особой проблемы, т.к. дегазация поверхности протекает достаточно быстро при повышенных температурах. Выделяют два основных канала долгосрочного удержания изотопов водорода: захват в объеме материала и соосаждение [11, 75]. Также можно отметить накопление изотопов на поверхности или в объеме пылевых микрочастиц, образующихся в процессе эрозии поверхностных слоев ОПЭ. Накопление в пылевых частицах сильно зависит от механизма их образования и во многом может описываться процессами, определяющими захват водорода в объеме ОПЭ или при соосаждении. В силу этого, основное внимание

будет уделено двум другим процессам долгосрочного удержания изотопов водорода в ТЯУ.

Основные процессы, определяющие долгосрочное накопление, схематически представлены на рисунке 1.5. Захват изотопов водорода при ионном облуче-

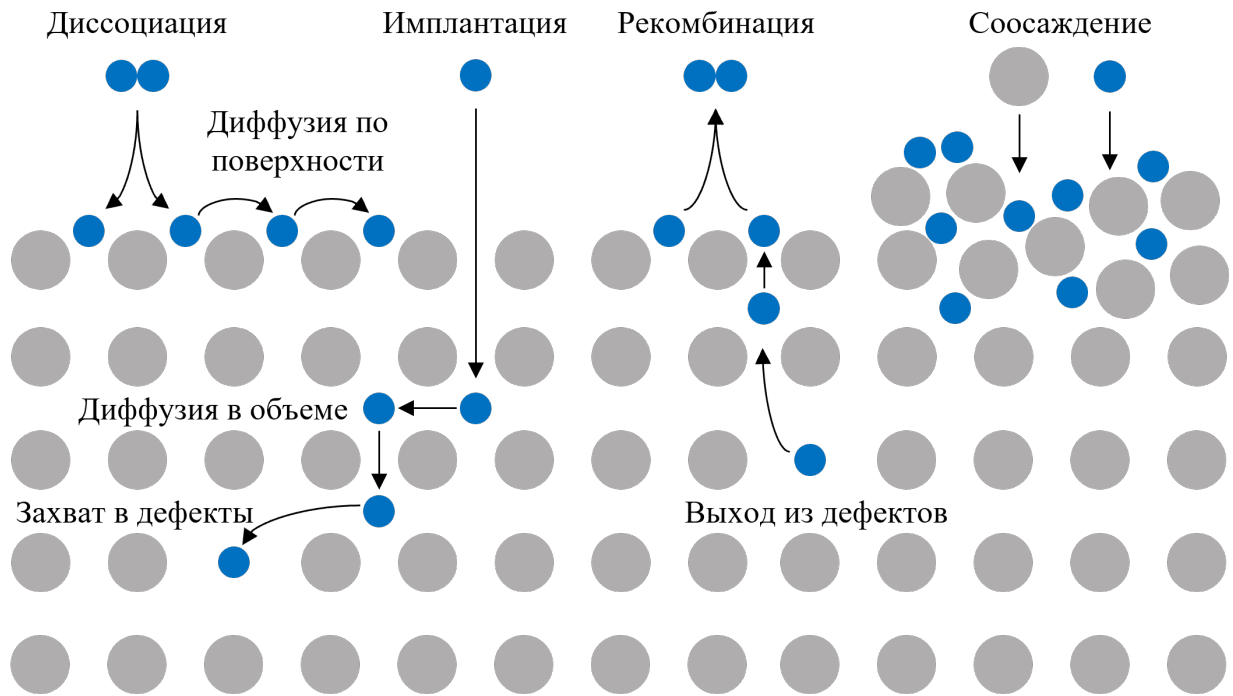


Рисунок 1.5 — Схематическое представление процессов захвата изотопов водорода при имплантации и соосаждении. Синие круги соответствуют атомам водорода, серые — атомам облучаемого материала

нии изначально происходит за счет имплантации частиц. Вероятность внедрения ионов определяется интегральным коэффициентом отражения, зависящим от параметров облучения и сортов взаимодействующих частиц. При попадании в объем внедренные частицы продолжают движение, теряя свою начальную энергию за счет упругих и неупругих потерь, пока не термализуются. Подвижность атомов водорода в металлах, как вольфрам, остается достаточно высокой при повышенных температурах, что позволяет им диффундировать обратно к поверхности и десорбироваться за счет различных процессов, например рекомбинации. С другой стороны, характерная глубина внедрения ионов в условиях токамака не превышает десятков нанометров. Интенсивное облучение поверхности приводит к быстрому насыщению водорода в зоне имплантации, что инициирует распространение водорода вглубь материала. В ходе диффузии подвижные атомы во-

дорода могут захватываться различными дефектами кристаллической решетки, представляющие собой более глубокие потенциальные ямы по сравнению с межузельными положениями. Учитывая диффузионный характер накопления, величина интегрального накопления пропорциональна квадратному корню из времени (дозы) облучения, что наблюдается в многочисленных экспериментах [76, 77, 78, 79]. Ввиду малой растворимости водорода в вольфраме, долгосрочное накопление будет определяться распределением и концентрацией дефектов, образование которых будет происходить при ионном и нейтронном облучении.

Процесс соосаждения водорода и материалов первой стенки в токамаках происходит в несколько итерационных этапов. Непрерывное распыление материалов ОПЭ приводит к попаданию примесных атомов в плазму, в которой они ионизируются. Ионы материалов стенки за счет процессов переноса в пристеночной плазме в итоге нейтрализуются и осаждаются на других элементах облицовки, инициируя рост поверхностных пленок. В то же время осаждаемые пленки подвергаются непрерывному облучению потоками частиц из плазмы. Совместное протекание обоих процессов ведет к практическому равномерному накоплению изотопов водорода, интегральная величина которого растет приблизительно линейно с временем. Важно заметить, что накопление изотопов водорода в процессе совместного соосаждения также сопровождается всеми процессами, характерными при имплантации в объем.

Результаты, полученные на современных токамаках, указывают на то, что соосаждение является доминирующим каналом накопления изотопов водорода. Параметры удержания водорода, физические свойства и скорость роста пленок сильно зависят от параметров совместного осаждения [80, 81, 82]. Доля водорода в пленках может достигать десятков процентов для различных материалов (см. Рисунок 1.6). Примечательно, что содержание водорода оказывается систематически меньше в пленках вольфрама по сравнению с другими материалами. Помимо этого, скорость образования вольфрамовых пленок может быть меньше в ТЯУ из-за более высокого порога распыления. Однако недавний *post-mortem* анализ

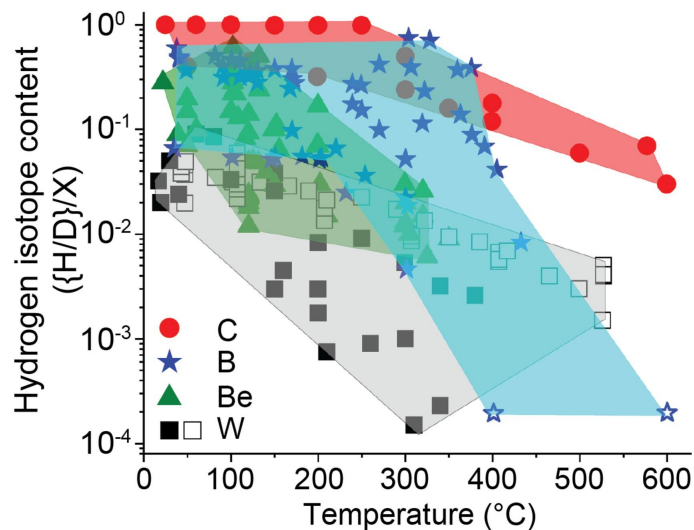


Рисунок 1.6 — Содержание изотопов водорода в зависимости от температуры совместного осаждения для пленок бора (голубая область), вольфрама (серая область), бериллия (зеленая область) и углерода (красная область) [17]

образцов-свидетелей из токамака WEST указывает на образование переосажденных слоев с толщиной несколько микрон [83].

1.3.2 Взаимодействие изотопов водорода с вольфрамом

Транспорт внедренных атомов водорода в вольфраме включает множество механизмов, которые можно разделить на несколько групп: диффузионные механизмы, взаимодействие с различными типами дефектов и поверхностные процессы. Качественное описание каждой из групп можно дать на основе одномерного представления пространственного распределения потенциальной энергии атомов водорода вблизи поверхности материала (см. рисунок 1.7). Важно заметить, что в реальности ситуация оказывается гораздо сложнее, а распределение энергии водорода в материале с дефектами кристаллической решетки представляет из себя трехмерное пространство с совокупностью локальных экстремумов и седловых точек. Получение детальной информации о распределении потенциальной энергии возможно при помощи *ab initio* методов, как теория функционала электронной плотности (DFT).

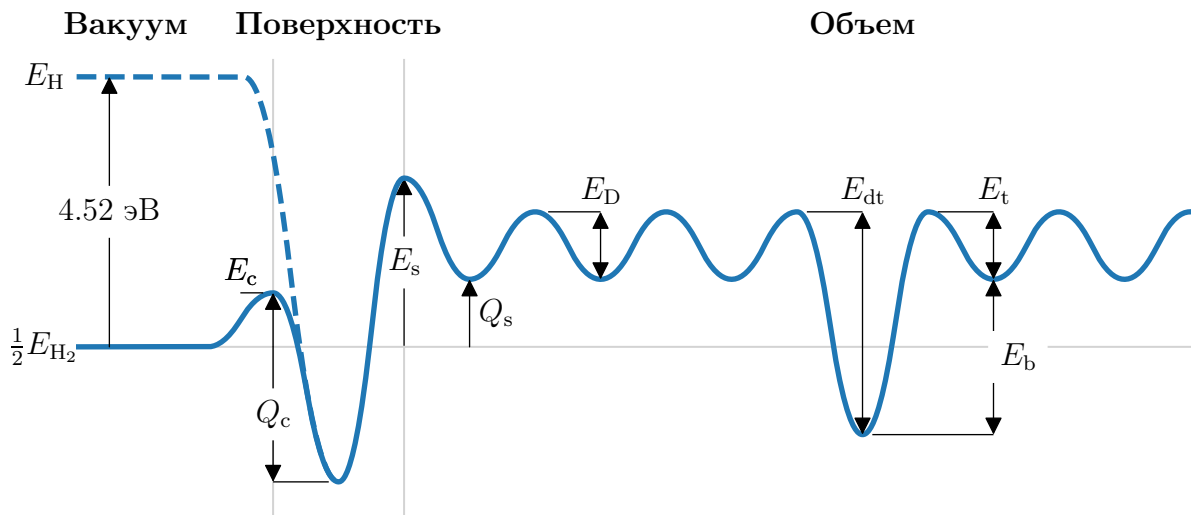


Рисунок 1.7 — Схематическая диаграмма потенциальной энергии водорода вблизи поверхности металла с положительной теплотой растворения. Уровни энергии отсчитываются от связанного состояния атома в молекуле водорода, расположенной далеко в вакууме

Диффузия

Отталкивающий характер взаимодействия между атомами кристаллической решетки и водорода определяет предпочтительная оккупация последним межузельных положений, являющимися локальными минимумами потенциальной энергии. Для вольфрама с объемно-центрированной кубической решеткой наиболее устойчивыми положениями являются тетраэдрическое и октаэдрическое, причем первое является более энергетически выгодным со значение теплоты растворения Q_c равным 0,9–1,0 эВ [84, 85, 86]. В процессе колебаний атомы водорода могут перескакивать между равновесными положениями, распространяясь стохастически по объему материала. Направления диффузионный поток атомов водорода \mathbf{J} может быть обусловлен градиентами химического потенциала с вкладом \mathbf{J}_c и температуры с вкладом \mathbf{J}_T [87, 88, 89]:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_T. \quad (1.1)$$

В приближении малой концентрации растворенного водорода и отсутствия градиента напряжений в решетке вольфрама вклад от градиента химического потенциала можно редуцировать к влиянию градиента концентрации (закон Фика), опре-

деляющего поток \mathbf{J}_c :

$$\mathbf{J}_c = -D\nabla c_m, \quad (1.2)$$

где D [м²/с] — коэффициент диффузии, c_m [ат./м³] — концентрация атомов подвижного водорода. Диффузия, вызванная градиентом концентрации, является термоактивируемым процессом и в обычных условиях протекает быстрее с ростом температуры. Температурная зависимость коэффициента диффузии обычно описывается в соответствии с законом Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{k_B T}\right), \quad (1.3)$$

где E_D [эВ] — энергия активации диффузии, $k_B = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К — постоянная Больцмана, T [К] — абсолютная температура.

Определение коэффициента диффузии проводилось как посредством экспериментов, так и путем моделирования. Параметры коэффициента диффузии, определенные Р. Фраунфельдером ($D_0 = 4,1 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $E_D = 0,39$ эВ, $T = 1100–2400$ К) [90], продолжительное время считались наиболее надежными. Последующие результаты моделирования методом DFT [84, 85, 86] и недавние эксперименты [91] указывают на большую подвижность атомов водорода в вольфраме с энергией активации диффузии в диапазоне 0,2–0,28 эВ. Указанный диапазон согласуется с результатами Фраунфельдера при учете экспериментальных данных в высокотемпературной области, когда влиянием центров захвата на диффузию можно пренебречь [84]. Тем не менее, значения коэффициента диффузии изотопов водорода сильно варьируются в литературе [92], что значительно затрудняет проведение оценок накопления в материалах ОПЭ.

Облучение ОПЭ мощными тепловыми потоками неминуемо приведет к образованию температурных градиентов. Такая ситуация особо актуальна для конструкций элементов с активным водяным охлаждением, как диверторные моноблоки токамака ИТЭР. Градиент температур индуцирует поток термодиффузии \mathbf{J}_T (эффект Соре):

$$\mathbf{J}_T = -D \frac{c_m Q^*}{k T^2} \nabla T, \quad (1.4)$$

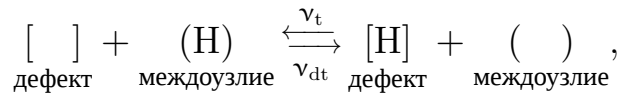
направление которого определяется знаком теплоты переноса Q^* [эВ].

К сожалению, в настоящее время отсутствует общепринятое значение теплоты транспорта водорода в вольфраме. Экспериментальные измерения показывают, что теплота переноса в металлах с положительной теплотой растворения отрицательна и незначительно растет с температурой [87]. Оценки величины методом молекулярной динамики [89, 93] также подтверждают отрицательное значение, но определенная функциональная зависимость обратно пропорционально квадрату температуры:

$$Q^* = -0.0045k_B T^2. \quad (1.5)$$

Центры захвата

Дефекты в кристаллической решетке вольфрама, такие как вакансии, примеси, дислокации или пустоты, создают потенциальные энергетические ямы, более глубокие, чем для междоузлий. Такие дефекты являются потенциальными «ловушками» для подвижных атомов водорода. Захваченные в ловушки атомы становятся «иммобильным» и могут покинуть ее, если тепловой энергии достаточно для преодоления потенциального барьера E_{dt} [эВ]. Упрощенный процесс захвата можно представить в следующем виде [94]:



где ν_t [м³/с] и ν_{dt} [1/с] скорости захвата и выхода из дефекта. Скорости обоих процессов определяются законом Аррениуса:

$$\nu_t = \nu_{t,0} \exp \left(-\frac{E_t}{k_B T} \right); \quad (1.6a)$$

$$\nu_{dt} = \nu_{dt,0} \exp \left(-\frac{E_{dt}}{k_B T} \right), \quad (1.6b)$$

где E_t [эВ] — энергия активация захвата в дефект. Обычно полагается, что скорость захвата определяется диффузией: $E_t \approx E_D$.

Информацию о параметрах центров захвата можно получить экспериментально или путем моделирования. Моделирование позволяет рассчитать энергию связи атома с дефектом E_b , когда рамках экспериментов наиболее надежно определяют барьер выхода из ловушек $E_{dt} = E$. Широко распространенным методом определения параметров дефектов является термодесорбционная спектроскопия (ТДС). Энергия связи зависит от типа дефекта. Исчерпывающие обзоры [95, 96]

Дефекты в материале можно классифицировать на два типа. Первый тип, часто называемый внутренними дефектами (или естественными дефектами), является свойственным материалу, такими как примеси и границы зерен. Второй тип, внешние дефекты, возникают в результате внешних воздействий, включая повреждения от бомбардировки частицами (такими как ионы и нейтроны) или механического напряжения, и могут развиваться во времени и пространстве.

Внешние дефекты имеют решающее значение для характеристики термоядерных реакторов из-за высоких потоков нейтронов, с которыми компоненты, находящиеся поблизости от плазмы, вероятно, будут взаимодействовать. Интенсивная бомбардировка нейтронами в этих условиях может привести к значительным повреждениям, создавая высокую плотность внешних дефектов, которые могут повлиять на свойства и работу материала. Понимание формирования и эволюции этих дефектов имеет важное значение для прогнозирования срока службы и надежности компонентов реактора. Несмотря на их важность, динамика формирования внешних ловушек в результате взаимодействия с нейтронами не была широко исследована в литературе.

Поверхностные процессы

$$K_S = c_m \sqrt{P} \quad (1.7)$$

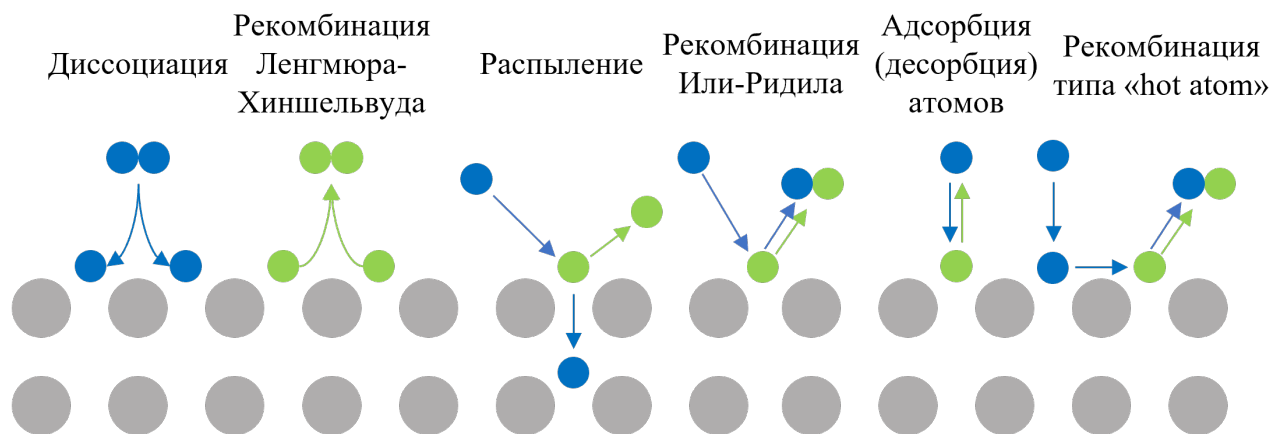


Рисунок 1.8 — Схематическое представление некоторых процессы, происходящих на поверхности металла. Синие круги представляют падающие частицы (атомы или молекулы) из приповерхностной среды, зеленые круги соответствуют изначально адсорбированным атомам, серые — атомам материала поверхности

1.3.3 Закономерности накопления при стационарном плазменном облучении

Влияние потока

Влияние дозы

Влияние гелия

1.3.4 Влияние импульсных нагрузок на накопление

Импульсные тепловые нагрузки

Импульсные плазменные нагрузки

1.4 Методы дистанционного контроля содержания изотопов водорода в ОПЭ

1.5 Выводы к Главе 1

Для теста [A97]

Глава 2. Методика анализа динамики транспорта дейтерия в вольфраме

Данная глава посвящена описанию математических моделей и программного пакета FESTIM, использованных в рамках данной диссертации для анализа транспорта изотопов водорода в материалах. Описана реализация модели, учитывающей поверхностные процессы, в коде FESTIM, а также представлены результаты ее верификации и валидации.

2.1 Модель транспорта изотопов водорода в материалах

2.1.1 Объемные процессы

Транспорт водорода

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c_m) - \sum_i \frac{\partial c_{t,i}}{\partial t} + \sum_j S_j, \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial c_{t,i}}{\partial t} = k_i c_m (n_i - c_{t,i}) - p_i c_{t,i}, \quad (2.1b)$$

Уравнения (2.1a) и (2.1b) в системе (2.1)

Перенос тепла

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \sum_i Q_i \quad (2.2)$$

2.1.2 Поверхностные процессы

2.2 Программный пакет FESTIM

2.3 Реализация нульмерной модели, учитывающей поверхностные процессы, в программном пакете FESTIM

Результаты анализа корректности имплементации модели распространяются свободно [98] и включены в онлайн-книгу с результатами верификации и валидации кода FESTIM [99].

2.3.1 Верификация модели

2.3.2 Валидация модели

Эксперимент по абсорбция протия в титане

**Эксперимент по адсорбция дейтерия на поверхности оксидированного
вольфрама**

**Эксперимент по облучению вольфрама низкоэнергетичными атомами
дейтерия**

Эксперимент по облучению стали EUROFER ионами дейтерия

2.4 Выводы к Главе 2

Глава 3. Захват дейтерия в вольфраме под действием импульсно-периодических плазменных нагрузок

3.1 Валидация

3.1.1 Детали эксперимента

3.1.2 Расчетная модель

3.1.3 Сравнение результатов моделирования и эксперимента

3.2 Моделирование накопления дейтерия в вольфраме под действием импульсно-периодических плазменных нагрузок

3.2.1 Постановка задачи

3.2.2 Эволюция температуры

3.2.3 Коэффициент рециклинга

3.2.4 Влияние параметров плазменных нагрузок

3.2.5 Влияние параметров центров захвата и скорости рекомбинации на поверхности

Глава 4. Десорбция дейтерия из вольфрама при импульсном лазерном нагреве

4.1 Валидация

Исходные данные, расчетные коды и результаты сравнения представлены в открытом (**необходимо сделать архив zenodo**) доступе.

4.1.1 Детали эксперимента по лазерно-индуцированной десорбции дейтерия из вольфрамовых пленок

Эксперименты для проверки корректности модели ЛИД проводились на базе физико-технического института им. А. Ф. Иоффе. В экспериментах использовались пленки со-осаждения вольфрама и дейтерия. Пленки были нанесены на медные подложки ($20 \times 20 \times 3$ мм) методом импульсного лазерного осаждения в атмосфере дейтерия (давление 30 Па) с плазменным ассистированием при частоте 13,56 МГц. Для осаждения плёнок вольфрама использовался твердотельный лазер Nd:YAG с длиной волны 1064 нм, энергией в импульсе 1,3 Дж, длительностью импульса 12 нс и частотой следования импульсов 10 Гц. Лазерное излучение фокусировалось на вольфрамовой мишени для обеспечения плотности энергии ≈ 25 Дж/см². Осаждение проводилось в течение 15 минут при водяном (18 °C) охлаждении держателя. Толщина осажденных пленок составила ≈ 1 мкм.

Полученные образцы укладывались на медное основание ($100 \times 80 \times 3$ мм). Для обеспечения лучшего теплоотвода во время ЛИД между медным основанием и образцами устанавливались индиевые прокладки. Композитная мишень фиксировалась медной рамкой с окошками, как показано на рисунке 4.1. Образцы облучались лазерными импульсами с длительностью 250 мкс и 1 мс (оптоволоконная лазерная система, IPG YLR-2000, 1070 нм). Полная энергия лазерных импульсов

варьировалась в диапазоне от 0,124 Дж до 0,351 Дж и от 0,255 Дж до 1,003 Дж для микросекундной и миллисекундной длительности импульса, соответственно. Облучение поверхности образцов при максимальной энергии из диапазонов не приводило к изменениям поверхности, что позволило

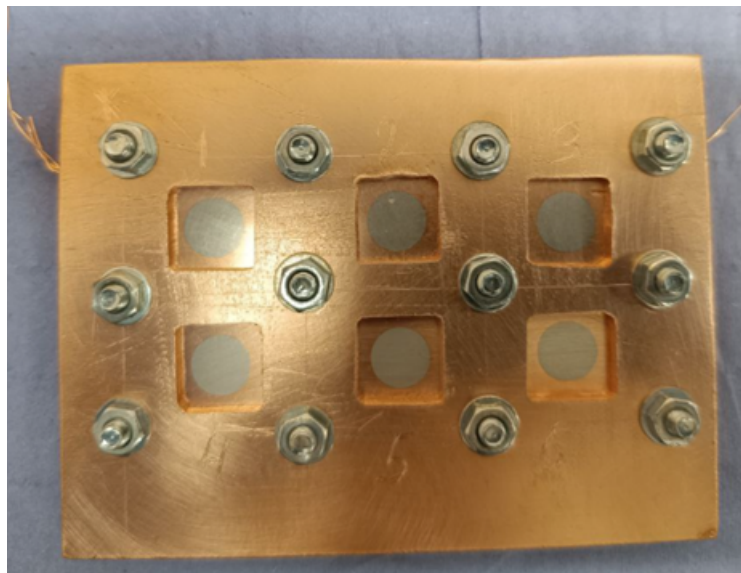


Рисунок 4.1 — Вид образцов с пленками вольфрама, расположенных на медном основании. Серые области — вольфрам-дейтериевые пленки

Пространственный профиль плотности энергии измерялся лазерным анализатором SP620U OPHIR-SPIRICON. Полученный профиль представлен на рисунке 4.2 и соответствует распределению Гаусса с усредненным значением полной ширины на уровне $1/e^2$ равным 1 мм.

Временные профили лазерного импульса измерялись кремниевым фотодиодом ФДУК-200 в фотогальваническом режиме. Временной профиль имел трапециевидную форму с экспоненциально растущим/затухающим фронтами. Пример временного профиля длительностью 1 мс приведен на рисунке 3. Экспериментальный стенд для исследования ЛИД (см. рисунок 4.3) включал в себя оптическую схему на основе двухлинзовой фокусирующей системы Галилея, систему перемещения лазерного луча по поверхности и вакуумный объем (≈ 70 л). Вакуумный объем откачивался турбомолекулярным насосом (Turbovac 90i, Leybold) до базового уровня давления $8 \cdot 10^{-5}$ Па. Для каждой энергии лазерного пучка проводилась серия импульсов с частотой 0,1 Гц. Регистрация сигнала 2, 3, 4

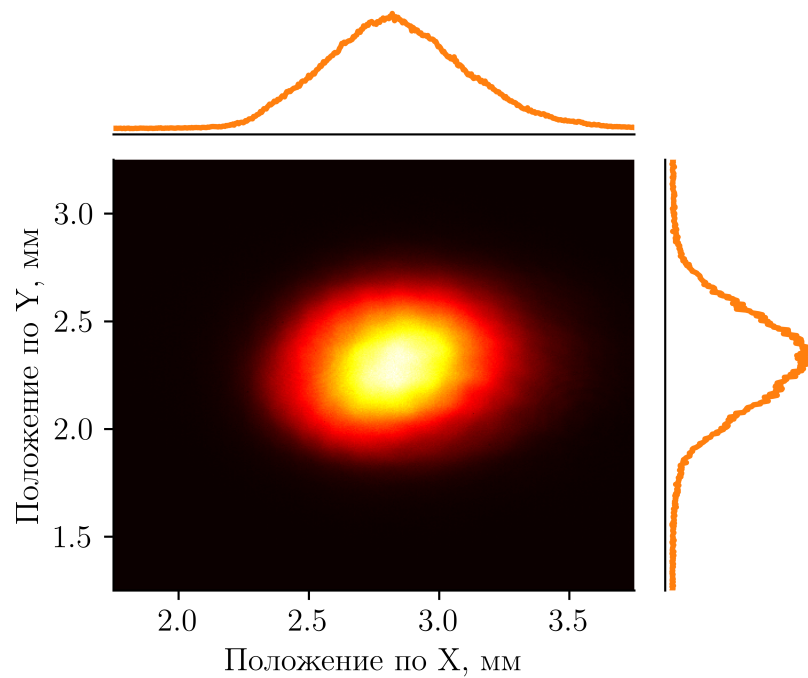


Рисунок 4.2 — Пространственное распределение плотности энергии в лазерном импульсе длительностью 1 мс

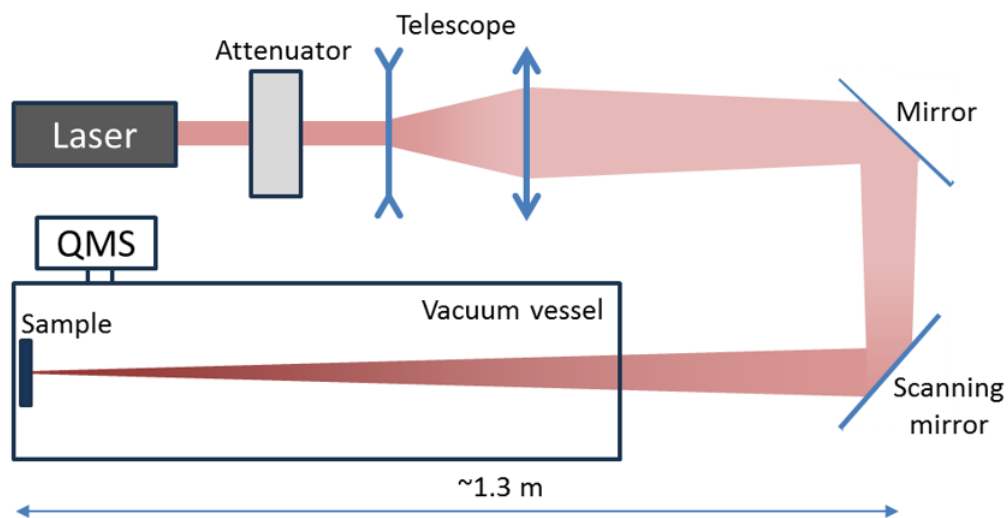


Рисунок 4.3 — Схема установки для проведения измерений ЛИД [21]

масс проводилась квадрупольным масс-спектрометром (Extorr XT300M). **Пример временной зависимости сигналов 3 и 4 масс представлен на рисунке 4.** Масс-спектрометр калибровался по постоянному потоку дейтериевой течи с уровнем потока $10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. После серии импульсов энергия лазерного пучка и область облучения поверхности в пределах одного образца менялись. Смещение лазерного пятна происходило на такое расстояние, чтобы избежать влияния предыдущих импульсов на результаты измерений последующих. Для упрощения сравне-

ния результатов численного моделирования с экспериментом из каждой серии импульсов при различных энергиях пучка использовались только первые выстрелы. Откалиброванный сигнал от первого выстрела интегрировался по времени для определения полного числа десорбированных атомов дейтерия. **Пример откалиброванной временной зависимости потока дейтерия представлен на рисунке 5.**

4.1.2 Определение параметров центров захвата дейтерия

Одними из неизвестных параметров в задаче ЛИД дейтерия из соосаженных пленок вольфрама являются параметры центров захвата дейтерия. Для определения этих параметров был проведен ТДС анализ аналогичных образцов с пленками толщиной 0,5 мкм. ТДС-анализ был проведен на сверхвысоковакуумном стенде НИЯУ МИФИ (кафедра №21), схема которого приведена на рисунке 4.4.

Сверхвысоковакуумный термодесорбционный стенд создан для изучения захвата водорода в образцы, облученные в различных плазменных установках вне камеры, не обладающих возможности проведения ТДС анализа без переноса по атмосфере [100]. Для повышения эффективности работы стенд был сконструирован так, чтобы минимизировать время замены образцов, а Для повышения эффективности работы стенд был сконструирован так, чтобы минимизировать время замены образцов, а также свести к минимуму газовыделение с внутренних конструкционных элементов в ходе ТДС измерений Основная камера представляет собой цилиндр диаметром 150 мм и длиной 230 мм. Высокий вакуум ($< 2 \times 10^{-9}$ мбар) в камере обеспечивается турбомолекулярным насосом с безмасляной форвакуумной откачкой.

На случай длительных перерывов в измерениях дополнительно установлен магниторазрядный насос, который отсекается в ходе ТДС измерений. В центре камеры располагается ленточный нагреватель, изготовленный из вольфрама

(толщина 25 мкм), который закрепляется на двух охлаждаемых водой токовводах (рис.2.11). При замене образцов развакууируется только шлюзовая камера, отделенная проходным клапаном и имеющая собственную независимую откачку. Перемещение образца в камеру измерений осуществляется с помощью сильфонного ввода движения (ход 250 мм). Образец подвешивается к вводу движения на приваренной к нему вольфрамовой термопаре, которой измеряется и температура образца. Для фиксации более "тяжелых" образцов изготавливается и предварительно обезгаживается дополнительный держатель из вольфрама или молибдена. Между камерой загрузки образцов и камерой проведения ТДС устанавливается дополнительный запирающий элемент. При достижении образцом зоны нагрева отверстие в этом элементе перекрывается. При этом сводится к минимуму поток атмосферных газов в камеру измерения. Такая конструкция позволила сократить время замены образцов. Для достижения максимальной температуры в ряде экспериментов использовались дополнительные тепловые экраны из вольфрамовой фольги, окружающие область нагрева. Это позволило для небольших (6×6 мм²) образцов из вольфрамовой фольги достичь температуру 2550 К, что недоступно на большинстве установок для термодесорбционных измерений. Столь большая температура обычно не требуется, но ее достижение позволило зарегистрировать высокотемпературную десорбцию гелия из вольфрама. Линейный нагрев, как и в случае установки Медион, обеспечивается системой ПИД регуляции [169]. Отклонение от линейности роста температуры наблюдалось только на начальной стадии нагрева, до температуры 380 К.

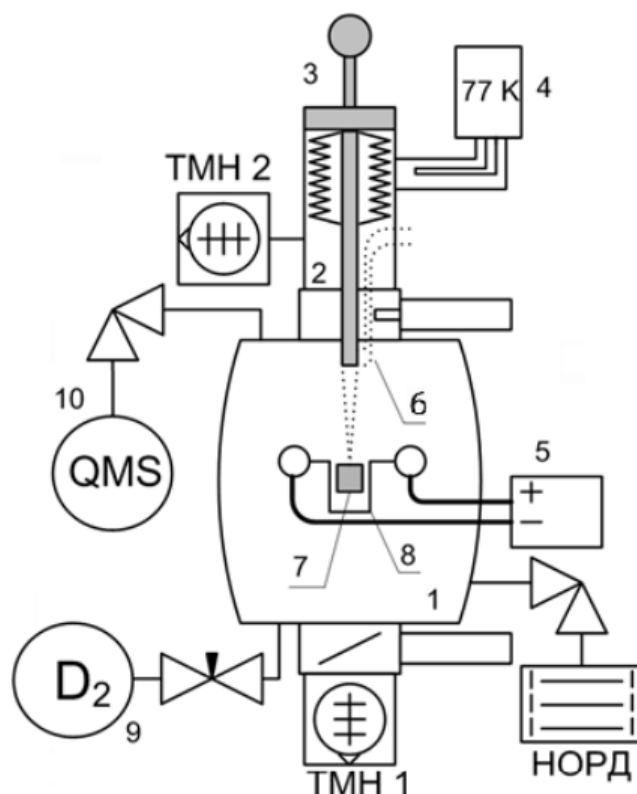


Рисунок 4.4 — Принципиальная схема ТДС-стенда: 1 — камера измерений, 2 — шлюзовая камера, 3 — ввод движения, 4 — азотная ловушка, 5 — блок питания нагрева, 6 — термопара, 7 — образец, 8 — вольфрамовый нагреватель, 9 — резервуар с дейтерием, 10 — квадрупольный масс-спектрометр [100]

4.1.3 Расчетная модель

4.1.4 Сравнение результатов моделирования и эксперимента

4.2 Анализ состава потока десорбированных частиц

4.2.1 Постановка задачи

4.2.2 Аналитический анализ

4.2.3 Результаты численного моделирования

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

И какая-нибудь заключающая фраза.

Последний параграф может включать благодарности. В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Иванову И. И. за поддержку, помощь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит Сидорова А. А. и Петрова Б. Б. за помощь в работе с образцами, Рабиновича В. В. за предоставленные образцы и обсуждение результатов, Занудятину Г. Г. и авторов шаблона *Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template* за помощь в оформлении диссертации. Автор также благодарит много разных людей и всех, кто сделал настоящую работу автора возможной.

Список сокращений и условных обозначений

Сокращения

УТС	Управляемый термоядерный синтез
ТЯУ	Термоядерная установка
ИТЭР	Международный экспериментальный термоядерный реактор
ОПЭ	Обращенные к плазме элементы
DT-плазма	Дейтерий-тритиевая плазма
H-мода	Режим с высоким временем удержанием энергии в плазме тока-мака (High confinement regime)
ЛИД	Лазерно-индуцированная десорбция
DFT	Теория функционала электронной плотности (Density functional theory)
ТДС	Термодесорбционная спектроскопия

Условные обозначения

Q_s	Теплота растворения [эВ]
J	Поток атомов [ат./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)]
J_c	Поток атомов, индуцированный градиентом концентрации [ат./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)]
J_T	Поток атомов, индуцированный градиентом температуры (ат./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$))
D	Коэффициент диффузии [$\text{м}^2/\text{с}$]
c_m	Концентрация подвижного водорода [ат./ м^3]
E_D	Энергия активация диффузии [эВ]
k_B	Постоянная Больцмана [эВ/К]
T	Абсолютная температура [К]
Q^*	Теплота переноса [эВ]
ν_t	Скорость захвата атомов в дефекты [$\text{м}^3/\text{с}$]

ν_{dt}	Скорость выхода атомов из дефектов [1/с]
E_t	Энергия активация захвата в дефект [эВ]
E_{dt}	Энергия активации выхода из дефекта
Z	Атомный номер элемента

Публикации автора по теме диссертации

- [A97] В. В. Кулагин, А. Ю. Хомяков и Ю. М. Гаспарян. — «Аналитическая оценка соотношения потоков атомарного и молекулярного водорода с поверхности вольфрама». — В: *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* 16 (5 окт. 2022), с. 909—913. — DOI: 10.31857/S1028096022100090.

Список литературы

- [1] C.H. Skinner и др. — «Plasma wall interaction and tritium retention in TFTR». — В: *Journal of Nuclear Materials* 241-243 (февр. 1997), с. 214—226. — DOI: 10.1016/S0022-3115(97)80041-4.
- [2] M. Keilhacker и M. L. Watkins. — «D–T experiments in the JET tokamak». — В: *Journal of Nuclear Materials* 266-269 (март 1999), с. 1—13. — DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00811-3.
- [3] C.F. Maggi и др. — «Overview of T and D–T results in JET with ITER-like wall». — В: *Nuclear Fusion* 64 (11 авг. 2024), с. 112012. — DOI: 10.1088/1741-4326/AD3E16.
- [4] A Kappatou и др. — «Overview of the third JET deuterium-tritium campaign». — В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 67 (4 апр. 2025), с. 045039. — DOI: 10.1088/1361-6587/ADBD75.
- [5] Bo Shi и др. — «WEST L-mode record long pulses guided by predictions using Integrated Modeling». — В: *Nuclear Fusion* 65 (5 апр. 2025), с. 056018. — DOI: 10.1088/1741-4326/ADC7C7.
- [6] X Gong и др. — «Overview of recent experimental results on the EAST Tokamak». — В: *Nuclear Fusion* 64.11 (2024), с. 112013.
- [7] E. P. Velikhov и др. — «First Experimental Results on the T-15MD Tokamak». — В: *Physics of Atomic Nuclei* 87 (Suppl 1 дек. 2024), S1—S9. — DOI: 10.1134/S1063778824130283/FIGURES/12.
- [8] H. Shirai и др. — «Recent progress of JT-60SA project toward plasma operation». — В: *Nuclear Fusion* 64 (11 сент. 2024), с. 112008. — DOI: 10.1088/1741-4326/AD34E4.

- [9] А. В. Красильников и др. — «Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики». — В: *Физика плазмы* 47 (11 2021), с. 970—985. — DOI: 10.31857/S0367292121110196.
- [10] *The global fusion industry in 2024*. — Тех. отч. — Fusion Industry Association, 2024. — URL: <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>.
- [11] Ю.М. Гаспарян и С.А. Крат. — «Влияние выбора материала облицовки стенок термоядерных установок на накопление изотопов водорода». — В: *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез* 45 (47 2024), с. 5—14. — DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-5-14.
- [12] V. Rohde, V. Mertens и A. Scarabosio. — «Gas balance in ASDEX Upgrade with tungsten first wall». — В: *Journal of Nuclear Materials* 390-391 (1 июнь 2009), с. 474—477. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2009.01.047.
- [13] R. Neu и др. — «Tungsten: An option for divertor and main chamber plasma facing components in future fusion devices». — В: *Nuclear Fusion* 45 (3 февр. 2005), с. 209. — DOI: 10.1088/0029-5515/45/3/007.
- [14] Pietro Barabaschi и др. — «ITER progresses into new baseline». — В: *Fusion Engineering and Design* 215 (июнь 2025), с. 114990. — DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2025.114990.
- [15] C. Bachmann и др. — «Issues and strategies for DEMO in-vessel component integration». — В: *Fusion Engineering and Design* 112 (нояб. 2016), с. 527—534. — DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2016.05.040.
- [16] Joachim Roth и др. — «Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER». — В: *J. Nucl. Mater.* 390-391 (январ. 2009), с. 1—9. — DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.037.

- [17] R. A. Pitts и др. — «Plasma-wall interaction impact of the ITER re-baseline». — В: *Nuclear Materials and Energy* 42 (март 2025), с. 101854. — DOI: 10.1016/J.NME.2024.101854.
- [18] O.V. Ogorodnikova и др. — «Deuterium and helium retention in W with and without He-induced W ‘fuzz’ exposed to pulsed high-temperature deuterium plasma». — В: *J. Nucl. Mater.* 515 (март 2019), с. 150—159. — DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.12.023.
- [19] B. Schweer и др. — «In situ detection of hydrogen retention in TEXTOR by laser induced desorption». — В: *Journal of Nuclear Materials* 390-391 (1 июнь 2009), с. 576—580. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2009.01.108.
- [20] M. Zlobinski и др. — «First results of laser-induced desorption - quadrupole mass spectrometry (LID-QMS) at JET». — В: *Nuclear Fusion* 64 (8 июнь 2024), с. 086031. — DOI: 10.1088/1741-4326/AD52A5.
- [21] O. S. Medvedev и др. — «LIA-QMS method for the quantity analysis of the hydrogen isotopes retention in first-wall components of Globus-M2 tokamak». — В: *Nuclear Materials and Energy* 41 (дек. 2024), с. 101829. — DOI: 10.1016/J.NME.2024.101829.
- [22] A. G. Razdobarin и др. — «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». — В: *Plasma Phys. Reports* 48.12 (дек. 2022), с. 1389—1403. — DOI: 10.1134/S1063780X22700283.
- [23] И. В. Мазуль и др. — «Компоненты, обращённые к плазме, в проекте ТРТ: конструкция, материалы и технологии». — В: *Физика плазмы* 12 (2021), с. 1103—1122. — DOI: 10.31857/S0367292121110214.
- [24] R. A. Pitts и др. — «Physics basis for the first ITER tungsten divertor». — В: *Nuclear Materials and Energy* 20 (авг. 2019), с. 100696. — DOI: 10.1016/J.NME.2019.100696.

- [25] Christopher A Orrico и др. — «Evaluation of ITER divertor shunts as a synthetic diagnostic for detachment control». — В: *Nuclear Fusion* 63.8 (2023), с. 086002.
- [26] R. A. Pitts и др. — «Physics conclusions in support of ITER W divertor monoblock shaping». — В: *Nuclear Materials and Energy* 12 (авг. 2017), с. 60—74. — DOI: 10.1016/J.NME.2017.03.005.
- [27] TC Hender и др. — «MHD stability, operational limits and disruptions». — В: *Nuclear fusion* 47.6 (2007), S128.
- [28] Jochen Linke и др. — «Challenges for plasma-facing components in nuclear fusion». — В: *Matter and Radiation at Extremes* 4 (5 сент. 2019), с. 56201. — DOI: 10.1063/1.5090100/253043.
- [29] A. W. Leonard. — «Edge-localized-modes in tokamaks». — В: *Physics of Plasmas* 21 (9 сент. 2014), с. 90501. — DOI: 10.1063/1.4894742/625104.
- [30] A. Loarte и др. — «Characteristics of type I ELM energy and particle losses in existing devices and their extrapolation to ITER». — В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 45 (9 авг. 2003), с. 1549. — DOI: 10.1088/0741-3335/45/9/302.
- [31] P. T. Lang и др. — «ELM control strategies and tools: status and potential for ITER». — В: *Nuclear Fusion* 53 (4 март 2013), с. 043004. — DOI: 10.1088/0029-5515/53/4/043004.
- [32] T. E. Evans. — «ELM mitigation techniques». — В: *Journal of Nuclear Materials* 438 (SUPPL июль 2013), S11—S18. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2013.01.283.
- [33] M. Lehnen и др. — «Disruptions in ITER and strategies for their control and mitigation». — В: *Journal of Nuclear Materials* 463 (авг. 2015), с. 39—48. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2014.10.075.

- [34] Gregory De Temmerman и др. — «Data on erosion and hydrogen fuel retention in Beryllium plasma-facing materials». — В: *Nuclear Materials and Energy* 27 (июнь 2021), с. 100994. — DOI: 10.1016/J.NME.2021.100994.
- [35] Nicolas Rivals и др. — «Impact of enhanced far-SOL transport on first wall fluxes in ITER from full vessel edge-plasma simulations». — В: *Nuclear Materials and Energy* 33 (окт. 2022), с. 101293. — DOI: 10.1016/J.NME.2022.101293.
- [36] G. De Temmerman, T. Hirai и R. A. Pitts. — «The influence of plasma-surface interaction on the performance of tungsten at the ITER divertor vertical targets». — В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 60 (4 март 2018), с. 044018. — DOI: 10.1088/1361-6587/AAAF62.
- [37] C. Guillemaut и др. — «Ion target impact energy during Type I edge localized modes in JET ITER-like Wall». — В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 57 (8 июль 2015), с. 085006. — DOI: 10.1088/0741-3335/57/8/085006.
- [38] C. Guillemaut и др. — «Experimental validation of an analytical kinetic model for edge-localized modes in JET-ITER-like wall». — В: *Nuclear Fusion* 58 (6 апр. 2018), с. 066006. — DOI: 10.1088/1741-4326/AAB7B1.
- [39] T. Eich и др. — «ELM divertor peak energy fluence scaling to ITER with data from JET, MAST and ASDEX upgrade». — В: *Nuclear Materials and Energy* 12 (авг. 2017), с. 84—90. — DOI: 10.1016/J.NME.2017.04.014.
- [40] Y. Ueda и др. — «Systematic study of He induced nano-fiber formation of W and other period 6 transition metals». — В: *Journal of Nuclear Materials* 511 (дек. 2018), с. 605—609. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2018.04.024.
- [41] Shin Kajita и др. — «Fuzzy nanostructure growth on precious metals by He plasma irradiation». — В: *Surface and Coatings Technology* 340 (апр. 2018), с. 86—92. — DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2018.02.026.

- [42] S. D. Fedorovich и др. — «Growth of nanostructured highly porous surface on refractory metals under plasma treatment in the PLM device». — В: *Journal of Physics: Conference Series* 1370 (1 нояб. 2019), с. 012044. — DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012044.
- [43] Wolfrang Eckstein. — *Penetration (Range)*. — Тех. отч. — 2010.
- [44] R. Villari и др. — «Nuclear analysis of the ITER full-tungsten divertor». — В: *Fusion Engineering and Design* 88 (9-10 окт. 2013), с. 2006—2010. — DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2013.02.156.
- [45] T. Pütterich и др. — «Determination of the tolerable impurity concentrations in a fusion reactor using a consistent set of cooling factors». — В: *Nuclear Fusion* 59 (5 март 2019), с. 056013. — DOI: 10.1088/1741-4326/AB0384.
- [46] M. Merola и C. H. Wu. — «Development of carbon materials and plasma facing components for ITER». — В: *Physica Scripta T* T111 (T111 янв. 2004), с. 152—156. — DOI: 10.1238/PHYSICA.TOPICAL.111A00152/XML.
- [47] Л. Б. Беграмбеков и др. — «Измерение характеристик мелкозернистого графита – материала первой стенки Токамака Т-15МД». — В: *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* 12 (2023), с. 101—112. — DOI: 10.31857/S1028096023080058.
- [48] C. H. Wu и др. — «Neutron irradiation effects on the properties of carbon materials». — В: *Journal of Nuclear Materials* 212-215 (PART 1 сент. 1994), с. 416—420. — DOI: 10.1016/0022-3115(94)90096-5.
- [49] Lei Wang и др. — «Dose dependence of the erosion of graphite under high temperature ion irradiation». — В: *Journal of Physics: Conference Series* 1121 (1 нояб. 2018), с. 012006. — DOI: 10.1088/1742-6596/1121/1/012006.
- [50] L. B. Begrambekov и др. — «Temperature dependence of erosion of graphite under high-temperature ion irradiation». — В: *Journal of Physics: Conference Series* 1328 (1 окт. 2019), с. 012031. — DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012031.

- [51] Mir Mohammadreza Seyedhabashi и др. — «Investigating graphite surface and structural modifications induced by hydrogen ion bombardment in a plasma focus device». — В: *Results in Materials* 26 (июнь 2025), с. 100698. — DOI: 10.1016/J.RINMA.2025.100698.
- [52] *Atomic and Plasma–Material Interaction Data for Fusion*. — Atomic and Plasma–Material Interaction Data for Fusion 7/B. — Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2001. — URL: <https://www.iaea.org/publications/4709/atomic-and-plasma-material-interaction-data-for-fusion>.
- [53] Rainer Behrisch и Wolfgang Eckstein. — *Sputtering by particle bombardment. Experiments and computer calculations from threshold to MeV energies*. — Т. 110. — Springer, янв. 2025. — DOI: 10.1007/978-3-540-44502-9.
- [54] Joachim Roth. — «Chemical erosion of carbon based materials in fusion devices». — В: *Journal of Nuclear Materials* 266-269 (март 1999), с. 51—57. — DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00658-8.
- [55] J. Roth и др. — «Flux dependence of carbon chemical erosion by deuterium ions». — В: *Nuclear Fusion* 44 (11 нояб. 2004), с. L21—L25. — DOI: 10.1088/0029-5515/44/11/L01.
- [56] C.Y. Ho, R.W. Powell и P.E. Liley. — «Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review». — В: *J. Phys. Chem. Ref. Data, Suppl.* 3.1 (дек. 1974), с. 1—796.
- [57] S. Brezinsek и др. — «Study of physical and chemical assisted physical sputtering of beryllium in the JET ITER-like wall». — В: *Nuclear Fusion* 54 (10 сент. 2014), с. 103001. — DOI: 10.1088/0029-5515/54/10/103001.
- [58] Sebastijan Brezinsek и JET-EFDA contributors. — «Plasma-surface interaction in the Be/W environment: Conclusions drawn from the JET-ILW for ITER». — В: *Journal of Nuclear Materials* 463 (2015), с. 11—21.

- [59] Christian Strupp. — «Beryllium Metal II. A Review of the Available Toxicity Data». — В: *The Annals of Occupational Hygiene* 55 (1 янв. 2011), с. 43—56. — DOI: 10.1093/ANNHYG/MEQ073.
- [60] W. Kesternich и H. Ullmaier. — «Mechanical properties and microstructure of helium-implanted beryllium». — В: *Journal of Nuclear Materials* 312 (2-3 февр. 2003), с. 212—223. — DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01637-9.
- [61] M. R. Gilbert и др. — «An integrated model for materials in a fusion power plant: transmutation, gas production, and helium embrittlement under neutron irradiation». — В: *Nuclear Fusion* 52 (8 авг. 2012), с. 083019. — DOI: 10.1088/0029-5515/52/8/083019.
- [62] P. Yu Piskarev и др. — «Plasma-Facing Components in the TRT Project: A Design, Materials, and Technologies». — В: *Physics of Atomic Nuclei* 87 (Suppl 1 дек. 2024), S48—S59. — DOI: 10.1134/S1063778824130064/FIGURES/14.
- [63] G. Pintsuk. — «Tungsten as a Plasma-Facing Material». — В: *Comprehensive Nuclear Materials: Volume 1-5* 1-5 (январь. 2012), с. 551—581. — DOI: 10.1016/B978-0-08-056033-5.00118-X.
- [64] Michael Rieth и др. — «Behavior of tungsten under irradiation and plasma interaction». — В: *Journal of Nuclear Materials* 519 (июнь 2019), с. 334—368. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2019.03.035.
- [65] Karl D Hammond. — «Helium, hydrogen, and fuzz in plasma-facing materials». — В: *Materials Research Express* 4.10 (2017), с. 104002.
- [66] Shin Kajita, Naoaki Yoshida и Noriyasu Ohno. — «Tungsten fuzz: Deposition effects and influence to fusion devices». — В: *Nuclear Materials and Energy* 25 (дек. 2020), с. 100828. — DOI: 10.1016/J.NME.2020.100828.
- [67] Jacob A.R. Wright. — «A review of late-stage tungsten fuzz growth». — В: *Tungsten* 4 (3 сент. 2022), с. 184—193. — DOI: 10.1007/S42864-021-00133-2/FIGURES/8.

- [68] Jörg Winter. — «Wall conditioning in fusion devices and its influence on plasma performance». — В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 38.9 (1996), с. 1503.
- [69] T. Wauters и др. — «Wall conditioning in fusion devices with superconducting coils». — В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 62 (3 янв. 2020), с. 034002. — DOI: 10.1088/1361-6587/AB5AD0.
- [70] K. Krieger и др. — «Wall conditioning effects and boron migration during boron powder injection in ASDEX Upgrade». — В: *Nuclear Materials and Energy* 34 (март 2023), с. 101374. — DOI: 10.1016/J.NME.2023.101374.
- [71] Yaowei Yu и др. — «Fuel recycling control in long pulse operation with full tungsten divertors in EAST tokamak». — В: *Nuclear Materials and Energy* 34 (март 2023), с. 101333. — DOI: 10.1016/J.NME.2022.101333.
- [72] Leonid E. Zakharov. — «On a burning plasma low recycling regime with PDT = 23–26 MW, QDT = 5–7 in a JET-like tokamak». — В: *Nuclear Fusion* 59 (9 июль 2019), с. 096008. — DOI: 10.1088/1741-4326/AB246B.
- [73] Andrey Litnovsky и др. — «Smart Tungsten-based Alloys for a First Wall of DEMO». — В: *Fusion Engineering and Design* 159 (окт. 2020), с. 111742. — DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2020.111742.
- [74] ИЕ Люблинский, АВ Вертков и ВВ Семенов. — «Сравнительный анализ возможности применения легкоплавких металлов с капиллярно-пористой системой в условиях токамака». — В: *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез* 38.1 (2015), с. 7—14.
- [75] Charles H. Skinner. — «Tritium Retention and Removal in Tokamaks». — В: *AIP Conference Proceedings* 1095 (1 февр. 2009), с. 127—145. — DOI: 10.1063/1.3097310.
- [76] O. V. Ogorodnikova, J. Roth и M. Mayer. — «Deuterium retention in tungsten in dependence of the surface conditions». — В: *Journal of Nuclear Materials*

- 313-316 (SUPPL. Март 2003), с. 469—477. — DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01375-2.
- [77] O. V. Ogorodnikova. — «Ion-driven deuterium retention in high-Z metals». — В: *Journal of Nuclear Materials* 390-391 (1 июнь 2009), с. 651—654. — DOI: 10.1016/J.JNUCMAT.2009.01.181.
- [78] K. Sugiyama и др. — «Deuterium retention in tungsten used in ASDEX Upgrade: comparison of tokamak and laboratory studies». — В: *Physica Scripta* 2014 (T159 апр. 2014), с. 014043. — DOI: 10.1088/0031-8949/2014/T159/014043.
- [79] Hong Zhang и др. — «Deuterium retention in tungsten and tungsten alloys exposed to pure and impurities seeding deuterium plasma». — В: *Nuclear Materials and Energy* 25 (дек. 2020), с. 100822. — DOI: 10.1016/J.NME.2020.100822.
- [80] Yury Gasparyan и др. — «Temperature dependence of hydrogen co-deposition with metals». — В: *Fusion Engineering and Design* 146 (сент. 2019), с. 1043—1046. — DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2019.01.154.
- [81] S. Krat и др. — «Comparison of erosion and deposition in JET divertor during the first three ITER-like wall campaigns». — В: *Physica Scripta* 2020 (T171 март 2020), с. 014059. — DOI: 10.1088/1402-4896/AB5C11.
- [82] Stepan Krat и др. — «Effect of Substrate Biasing on Deuterium Retention in Deuterium-Tungsten Co-Deposited Films at Low Temperature». — Pre-print: *Journal of Nuclear Materials*. — DOI: 10.2139/ssrn.5210578. — 2025. — DOI: 10.2139/ssrn.5210578.
- [83] J. Bucalossi и др. — «WEST full tungsten operation with an ITER grade divertor». — В: *Nuclear Fusion* 64 (11 сент. 2024), с. 112022. — DOI: 10.1088/1741-4326/AD64E5.

- [84] K. Heinola и T. Ahlgren. — «Diffusion of hydrogen in bcc tungsten studied with first principle calculations». — В: *Journal of Applied Physics* 107 (11 июнь 2010), с. 50. — DOI: 10.1063/1.3386515/146625.
- [85] N. Fernandez, Y. Ferro и D. Kato. — «Hydrogen diffusion and vacancies formation in tungsten: Density Functional Theory calculations and statistical models». — В: *Acta Materialia* 94 (авг. 2015), с. 307—318. — DOI: 10.1016/J.ACTAMAT.2015.04.052.
- [86] Ziling Zhou и др. — «Thermal expansion, lattice vibration, and isotope effect on hydrogen diffusion in BCC Fe, Cr, and W from first-principles calculations». — В: *Journal of Chemical Physics* 160 (18 май 2024), с. 184703. — DOI: 10.1063/5.0204192/3290607.
- [87] Glen R. Longhurst. — «The soret effect and its implications for fusion reactors». — В: *Journal of Nuclear Materials* 131 (1 март 1985), с. 61—69. — DOI: 10.1016/0022-3115(85)90425-8.
- [88] A. H.M. Krom, R. W.J. Koers и A. Bakker. — «Hydrogen transport near a blunting crack tip». — В: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 47 (4 февр. 1999), с. 971—992. — DOI: 10.1016/S0022-5096(98)00064-7.
- [89] Enrique Martínez и др. — «Thermal gradient effect on helium and self-interstitial transport in tungsten». — В: *Journal of Applied Physics* 130 (21 дек. 2021), с. 215904. — DOI: 10.1063/5.0071935.
- [90] R Frauenfelder. — «Solution and diffusion of hydrogen in tungsten». — В: *Journal of Vacuum Science and Technology* 6.3 (1969), с. 388—397.
- [91] G. Holzner и др. — «Solute diffusion of hydrogen isotopes in tungsten—a gas loading experiment». — В: *Physica Scripta* 2020 (T171 март 2020), с. 014034. — DOI: 10.1088/1402-4896/AB4B42.
- [92] Rémi Delaporte-Mathurin и др. — *RemDelaporteMathurin/h-transport-materials: Release 0.17 [Electronic resource]*. — Вер. v0.17. — Окт. 2024. —

- DOI: 10.5281/zenodo.13912922. — URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13912922>.
- [93] Dwaipayan Dasgupta и др. — «Impact of Soret effect on hydrogen and helium retention in PFC tungsten under ELM-like conditions». — В: *Nuclear Fusion* 63 (7 июнь 2023), с. 076029. — DOI: 10.1088/1741-4326/ACDA4A.
- [94] Andreas Drexler и др. — «Microstructural based hydrogen diffusion and trapping models applied to Fe–CX alloys». — В: *Journal of Alloys and Compounds* 826 (июнь 2020), с. 154057. — DOI: 10.1016/J.JALLCOM.2020.154057.
- [95] O. V. Ogorodnikova. — «Fundamental aspects of deuterium retention in tungsten at high flux plasma exposure». — В: *Journal of Applied Physics* 118 (7 авг. 2015), с. 74902. — DOI: 10.1063/1.4928407/168091.
- [96] A. P. Persianova и A. V. Golubeva. — «Hydrogen Traps in Tungsten: A Review». — В: *Physics of Metals and Metallography* 2024 125:3 125 (3 май 2024), с. 278—306. — DOI: 10.1134/S0031918X23602895.
- [98] Vladimir Kulagin и Rémi Delaporte-Mathurin. — *KulaginVladimir/FESTIM-SurfaceKinetics-Validation: Revision 1 [Electronic resource]*. — Вер. v2.0.0. — ЯНВ. 2025. — DOI: 10.5281/zenodo.14738004. — URL: <https://github.com/KulaginVladimir/FESTIM-SurfaceKinetics-Validation>.
- [99] Remi Delaporte-Mathurin, Jair Santana и Vladimir Kulagin. — *FESTIM V&V book [Electronic resource]*. — 2025. — URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/156690.3> (дата обр. 22.04.2025).
- [100] А. А. Русинов и др. — «Стенд для термодесорбционных измерений». — В: *Приборы и техника эксперимента* 6 (2009), с. 116—121.

Список рисунков

- 1.1 Ожидаемые тепловые потоки, приходящие на ОПЭ в ИТЭР [28].
Бирюзова область соответствует области нанесения необратимого
ущерба поверхности 15
- 1.2 Сравнение оцененной ионной дозы после 5000 тысяч нормальных
плазменных разрядов в различных токамаках (слева) и характерных
условий облучения в различных типах экспериментов [36] 18
- 1.3 Синергетические нагрузки и их основные последствия для ОПЭ при
работе ТЯУ [28] 20
- 1.4 Расчетные зависимости коэффициентов физического распыления
бериллия, углерода и вольфрама от энергии некоторых типов ионов
при нормальном падении [52, 53]. Для углерода также приведены
зависимости коэффициента химического распыления дейтерием при
комнатной температуре и различных значениях потока [54, 55] 21
- 1.5 Схематическое представление процессов захвата изотопов водорода
при имплантации и соосаждении. Синие круги соответствуют атомам
водорода, серые — атомам облучаемого материала 25
- 1.6 Содержание изотопов водорода в зависимости от температуры
совместного осаждения для пленок бора (голубая область),
вольфрама (серая область), бериллия (зеленая область) и углерода
(красная область) [17] 27
- 1.7 Схематическая диаграмма потенциальной энергии водорода вблизи
поверхности металла с положительной теплотой растворения.
Уровни энергии отсчитываются от связанного состояния атома в
молекуле водорода, расположенной далеко в вакууме 28

1.8	Схематическое представление некоторых процессы, происходящих на поверхности металла. Синие круги представляют падающие частицы (атомы или молекулы) из приповерхностной среды, зеленые круги соответствуют изначально адсорбированным атомам, серые — атомам материала поверхности	32
4.1	Вид образцов с пленками вольфрама, расположенных на медном основании. Серые области — вольфрам-дейтериевые пленки	40
4.2	Пространственное распределение плотности энергии в лазерном импульсе длительностью 1 мс	41
4.3	Схема установки для проведения измерений ЛИД [21]	41
4.4	Принципиальная схема ТДС-стенда: 1 — камера измерений, 2 — шлюзовая камера, 3 — ввод движения, 4 — азотная ловушка, 5 — блок питания нагрева, 6 — термopара, 7 — образец, 8 — вольфрамовый нагреватель, 9 — резервуар с дейтерием, 10 — квадрупольный масс-спектрометр [100]	44

Список таблиц