

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»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

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

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник

Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным длин-
ным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образо-
вательное учреждение высшего образования «На-
циональный исследовательский ядерный универ-
ситет «МИФИ»

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов** на заседании диссер-
тационного совета МИФИ.1.01 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:
<https://ds.mephi.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, уче-
ному секретарю диссертационного совета МИФИ.1.01.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm** 2025 года.
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00.**

Ученый секретарь
диссертационного совета
МИФИ.1.01, к. ф.-м. н.

Петрова Е. К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В условиях растущего мирового населения и активной глобальной индустриализации, сопровождаемых повышением объемов потребления электроэнергии, все более актуальной становится **разработка новых подходов и источников энергии**, способных обеспечить устойчивое и надежное энергоснабжение. **Необходимость в этом также обуславливается стремлением к эффективному использованию природных ресурсов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.** Одним из наиболее перспективных направлений является управляемый термоядерный синтез (УТС), рассматриваемый в качестве «чистой» альтернативы традиционным подходам на основе сжигания ископаемых ресурсов, так и ключевого звена гибридной системы в реакторах **типа синтез-деление.** 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 **горения** дейтерий-тритиевой (DT) 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 достичь **на сегодняшний день рекордных параметров DT-плазмы с протекающей реакцией синтеза и длительностью разряда около 6 с** [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 **длительного (400 с)** удержания термоядерной DT-плазмы и решения сопутствующих инженерных задач. Введены в эксплуатацию 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 в области УТС, развивающих уникальные подходы и технологии для коммерческих целей. По данным Ассоциации термоядерной промышленности (FIA) [10], более 50% компаний из данной сферы разрабатывают подходы на основе магнитного удержания плазмы, что дополнительно подчеркивает актуальность направления.

Ввод в эксплуатацию термоядерных установок (ТЯУ) потребует решения целого ряда физических и технологических задач. Одними из наиболее суще-

ственных 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; ASDEX-Upgrade [12]: вольфрамовые первая стенка и дивертор), продемонстрировали перспективу в достижении **соизмеримых** параметров удержания плазмы при одновременном снижении (по сравнению с углеродными ОПЭ) скорости накопления изотопов водорода более чем на порядок. 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. 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 (ELMs — Edge localised modes), наблюдаемые в режимах с наилучшими параметрами удержания плазмы в токамаках (H-мода). Развитие ELM-неустойчивости сопровождается **мощными кратковременными (≤ 1 мс) потоками тепла и высокоэнергетических частиц, приходящими на ОПЭ с характерной частотой $\sim 10\text{--}100$ Гц**. 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.

Немногочисленные эксперименты по имитации воздействия мощных плазменных потоков, соответствующих ELM-событиям, на захват изотопов водорода в вольфраме проводились на линейных плазменных установках [18, 19, 20]. Полученные результаты указывают на потенциально большую скорость проникновения изотопов водорода вглубь материала при импульсном воздействии

по сравнению со случаем стационарного облучения, характерного для нормальных плазменных разрядов, однако не дают однозначной информации о влиянии на скорость интегрального накопления. Помимо этого, параметры облучения в установках такого типа не могут в полной мере воспроизвести условия, соответствующие крупным токамакам масштаба ИТЭР. Численное моделирование длительного накопления на больших временных масштабах также затруднительно ввиду малой длительности переходных процессов.

Диагностика содержания изотопов водородов в ОПЭ является не менее приоритетным вопросом. В настоящее время особое внимание уделяется развитию методов дистанционного контроля, основанных на использовании лазерного излучения. Одним из таких методов является лазерно-индуцированная десорбция (ЛИД), которая основана на нагреве участка исследуемой поверхности лазерным импульсом с последующим анализом состава вышедшего газа. Применимость ЛИД была продемонстрирована на ряде установок (TEXTOR [21], JET [22], Глобус-М2 [23] и т.д.), а соответствующие диагностические комплексы разрабатываются для ИТЭР и были предложены для российского проекта ТРТ [24]. Выход изотопов водорода из ОПЭ под действием импульсных тепловых нагрузок является схожим и в то же время более простым процессом по сравнению со случаем захвата при импульсно-периодическом плазменном облучении. Тем не менее, исследование основных зависимостей выхода при лазерном нагреве является актуальным вопросом для определения наиболее эффективных режимов диагностического метода.

Целью диссертационной работы является выявление закономерностей процессов удержания и выхода дейтерия в вольфраме при импульсном плазменном и лазерном воздействии.

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

1. Построить математическую модель, описывающую транспорт дейтерия в вольфраме под действием импульсных тепловых и плазменных нагрузок.
2. Провести анализ применимости стандартных моделей транспорта изотопов водорода в материалах к моделированию процессов захвата и десорбции при импульсных нагрузках.
3. Оценить параметры плазменных нагрузок, приходящих на ОПЭ во время ELM-событий, на основе данных для ИТЭР.
4. Исследовать влияние быстрых переходных процессов, соответствующих ELM-событиям, на накопление дейтерия в вольфраме на временных масштабах, соответствующих длительности плазменных разрядов в ИТЭР.
5. Провести анализ состава потока десорбированного дейтерия с поверхности вольфрама при лазерном нагреве.

6. **Определить влияние процессов на поверхности, параметров центров захвата, теплофизических свойств материала и характеристик импульса на выход дейтерия из вольфрама при лазерном нагреве.**

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 мощности высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ. Для демонстрации надежности и корректности использованных моделей проводилась их верификация и валидация путем сравнения с экспериментальными результатами. Построение аналитической модели, описывающей распределение изотопов водорода в вольфраме при наличии центров захвата изотопов водорода и градиента температур (эффект Core), проводилось путем решения системы дифференциальных уравнений в частных производных методом функции Грина.

Научная новизна:

1. Впервые проведено моделирование длительного (1000 с) накопления дейтерия в вольфрамовых ОПЭ под действием импульсно-периодических плазменных нагрузок, соответствующих ELM-событиям в крупных токамаках, с длительностью одного события 1 мс и частотой повторения от 10 до 100 Гц (от 10^4 до 10^5 событий).
2. Предложена оригинальная аналитическая модель, описывающая одномерное стационарное распределение содержания водорода в материалах при наличии центров захвата и градиента температур в приближении мгновенной рекомбинации атомов на обращенной к плазме поверхности и мгновенной рекомбинации или нулевого потока атомов на обратной поверхности.
3. Впервые проведен детальный анализ состава потока дейтерия, десорбированного с поверхности вольфрама при лазерном нагреве.
4. Впервые проведена оценка роли процессов на поверхности, центров захвата, теплофизических свойств и параметров импульса на выход дейтерия из поверхностных слоев вольфрама при лазерном нагреве.

Теоретическая и практическая значимость заключается в следующем:

1. Результаты анализа влияния импульсно-периодических нагрузок на накопление изотопов водорода в вольфраме могут быть использованы для прогноза содержания изотопов водорода, накопленных в ОПЭ ТЯУ.
2. Результаты анализа влияния параметров лазерного нагрева и материала на выход дейтерия из поверхностных слоев вольфрама 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 соосажденных пленок вольфрама 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 в материале при учете центров захвата и градиента температур, позволяет оценить предельное содержание изотопов водорода под действием импульсно-периодических плазменных нагрузок при достижении квазистационарного режима.
2. Возникновение импульсно-периодических плазменных нагрузок, соответствующих ELM-событиям в токамаках (частота: 10—100 Гц, длительность: 1 мс, плотность энергии: 0,14—0,45 МДж · м⁻²), наряду со стационарными плазменными потоками (плотность мощности: 1—10 МВт · м⁻²) 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 фракция в потоке дейтерия, десорбированного с поверхности вольфрама, растет с увеличением температуры поверхности и уменьшением потока частиц, выходящих на поверхность. Интегральная величина атомарной фракции в потоке десорбированного водорода может достигать ~10 % при лазерном нагреве с длительностью более 10 мкс до температуры плавления вольфрама, что может вносить дополнительную погрешность измерений при анализа содержания изотопов водорода методом ЛИД.
5. Процессы на поверхности могут приводить к снижению доли десорбированного дейтерия из вольфрама при импульсном лазерном нагреве с длительностью менее 10 мкс, уменьшая эффективность анализа содержания изотопов водорода в толстых поверхностных слоях методом ЛИД.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением общепризнанного численного метода решения систем дифференциальных уравне-

ний в частных производных (метод конечных элементов), имплементированного в верифицированном и валидированном программном пакете FESTIM. Построение численных моделей проводилось на основе известных теорий, надежность которых была продемонстрирована путем воспроизведения результатов множества лабораторных экспериментов. Помимо этого, использованные модели были валидированы путем сравнения результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Полученные результаты демонстрируют качественное и количественное согласие с 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.);
- XX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (Сочи, 2023 г.);
- 26th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (Marseille, France, 2024 г.);
- 1st Open Source Software for Fusion Energy Conference (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-Матюрэн (MIT) при определяющем участии автора, реализовавшим модель и осуществившим ее верификацию и валидацию. Эксперименты по ЛИД дейтерия из соосажденных пленок вольфрама были проведены **научным коллективом ФТИ им. А.Ф. Иоффе** при непосредственном участии автора в постановке экспериментов, обработке результатов измерений и проведении сравнения с модельными данными.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 6 печатных работах, которые изданы в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus и приравненных к журналам из перечня ВАК.

Содержание работы

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

Первая глава посвящена ...

Вторая глава посвящена исследованию

Третья глава посвящена исследованию

В **четвертой главе** приведено описание

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем: В рамках данной диссертационной работы методом численного моделирования были исследованы закономерности захвата и десорбции дейтерия в вольфраме при импульсных плазменном и лазерном воздействии. Среди наиболее значимых результатов можно выделить следующие:

1. В программном пакете FESTIM была реализована модель, учитывающая кинетику процессов на поверхности. Реализованная модель расширяет функциональные возможности кода, что подтверждено в ходе проверки корректности ее имплементации. Модель включена в состав свободно распространяемого программного обеспечения и доступна всем пользователям.
2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными по захвату дейтерия в вольфраме при импульсном плазменном облучении и экспериментами по ЛИД дейтерия из вольфрамовых пленок показало хорошее соответствие, что подтверждает применимость стандартных моделей для анализа динамики транспорта дейтерия при импульсных нагрузках.
3. На основе численного моделирования проведен комплексный анализ влияния импульсно-периодических плазменных нагрузок, соответствующих ELM-событиям в крупных токамаках, на долговременное накопление дейтерия в вольфраме. Установлено, что в широком диапазоне параметров облучения скорость накопления дейтерия в переходных процессах снижается вследствие существенного нагрева материала высокоэнергетичными частицами. Эффект усиливается с ростом частоты импульсных нагрузок.
4. Показано, что дополнительный нагрев во время переходных процессов способствует более глубокому проникновению дейтерия. Данный эффект усиливается с увеличением частоты импульсных нагрузок, приводящих к росту средней температуры материала. В условиях термоядерных установок это может влиять как на скорость проникновения изотопов водорода в систему охлаждения, так и на эффективность дегазации элементов установки между плазменными кампаниями.
5. В приближении малых импульсных нагрузок во время переходных событий построена аналитическая модель, описывающая квазистацио-

- нарное распределение дейтерия в материале с учетом влияния центров захвата и градиента температур. Развитая модель может быть использована для оценки предельного уровня содержания изотопов водорода в квазистационарном режиме при достижении насыщения.
6. Проведен детальный численный анализ состава потока десорбированных частиц при ЛИД. Установлено, что вероятность прямой десорбции атомов увеличивается с ростом температуры поверхности и уменьшением полного потока выходящих частиц. Условия для десорбции атомов могут быть выполнены при использовании лазерных импульсов с длительностью от 10 мкс. В рамках подхода получена оценка атомарной фракции на уровне $\sim 10\%$ в случае использования применения лазерных импульсов с миллисекундной длительностью, что может вносить дополнительную погрешность при проведении оценки содержания изотопов водорода.
 7. Исследована эффективность анализа содержания дейтерия методом ЛИД в широком диапазоне параметров материала и лазерного облучения. Наибольшая эффективность достигается при использовании более длительных лазерных импульсов. Показано, что измерение температуры поверхности позволяет снизить влияние неопределенности теплофизических свойств материала на точность измерений. Основным источником погрешности - неопределенность энергетического барьера выхода из центров захвата, тогда как влияние концентрации центров захвата оказывается менее значительным.

Публикации автора по теме диссертации

- [A25] 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. — (BAK K2, Scopus, WoS).
- [A26] Vladimir Kulagin, Yury Gasparyan и Nikolay Degtyarenko. — «Numerical estimation of the atomic fraction during laser-induced desorption of hydrogen from tungsten and beryllium». — В: *Fusion Engineering and Design* 184 (нояб. 2022), с. 113287. — DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113287. — (BAK K1, Scopus, WoS).
- [A27] Vladimir Kulagin и Yury Gasparyan. — «Effect of material properties on the laser-induced desorption of hydrogen from tungsten». — В: *Journal of Nuclear Materials* 587 (дек. 2023), с. 154747. — DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154747. — (BAK K1, Scopus, WoS).

- [A28] Rémi Delaporte-Mathurin и др. — «FESTIM: An open-source code for hydrogen transport simulations». — В: *International Journal of Hydrogen Energy* 63 (апр. 2024), с. 786—802. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.184. — (BAK K1, Scopus, WoS).
- [A29] Vladimir Kulagin и Yury Gasparyan. — «Numerical simulation of deuterium retention in tungsten under ELM-like conditions». — В: *Journal of Nuclear Materials* 603 (январь. 2025). — DOI: 10.1016/j.jnucmat.2024.155370. — (BAK K1, Scopus, WoS).
- [A30] Vladimir Kulagin и др. — «Kinetic surface model in FESTIM: Verification and validation». — В: *International Journal of Hydrogen Energy* 110 (март 2024), с. 90—100. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.128. — (BAK K1, Scopus, WoS).

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] D. Nishijima и др. — «Influences of edge localized mode-like pulsed plasma bombardment on deuterium retention in tungsten». — В: *Physica Scripta* 2011 (T145 дек. 2011), с. 014053. — DOI: 10.1088/0031-8949/2011/T145/014053.
- [19] A. G. Poskakalov и др. — «Influence of plasma heat loads relevant to ITER transient events on deuterium retention in tungsten». — В: *Physica Scripta* 2020 (T171 март 2020), с. 014062. — DOI: 10.1088/1402-4896/AB60F9.
- [20] 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.

-
-
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.

Кулагин Владимир Владимирович

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

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____
