

Национальный исследовательский ядерный университет «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 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. Таким образом, 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 (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 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 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). Помимо этого, растет число частных компаний, развивающих уникальные подходы и технологии УТС для коммерческих целей. По данным Ассоциации термоядерной промышленности (FIA) [9], более 50% компаний разрабатывают подходы к реализации УТС на основе магнитного удержания плазмы, что дополнительно усиливает актуальность направления.

Реализация термоядерной реакции планируется на основе дейтерий-тритиевой смеси. Использование радиоактивного трития накладывает определенные ограничения на эксплуатацию установки с точки зрения радиационной

безопасности. В связи с этим, одной из важнейших задач будущих термоядерных установок является систематический контроль за накоплением трития в обращенных к плазме элементах (ОПЭ).

В качестве основного материала ОПЭ рассматривается вольфрам.

Согласно оценкам [10], захват трития в вольфрамовые элементы не будет определяющим процессом глобального удержания во время нормальных режимов работы установки. Однако в режимах с улучшенным удержанием горячей плазмы (H-мода) протекают переходные процессы, например ELM-неустойчивости (Edge Localised Modes), приводящие к периодическим импульсным потокам высокой мощности на поверхность ОПЭ. Результаты экспериментов по имитации воздействия мощных плазменных потоков в линейной плазменной установке КСПУ-Т [11] показывают, что скорость накопления изотопов водорода может оказаться выше, чем в случае стационарного облучения, характерного для нормальных плазменных разрядов. Однако параметры облучения в установках такого типа не могут в полной мере воспроизвести условия, соответствующие крупным токамакам. Ввиду этого, исследование закономерностей накопления и удержания изотопов водорода под действием мощных импульсно-периодических плазменных нагрузок представляет повышенный интерес.

Схожей задачей является дистанционная диагностика содержания изотопов водорода в ОПЭ при помощи лазерно-индуцированной десорбции (ЛИД). Метод ЛИД заключается в нагреве участка исследуемой поверхности лазерным импульсом с последующим анализом состава вышедшего газа. Данная диагностика была апробирована на сферическом токамаке Глобус-М2. Помимо этого, возможность применения ЛИД является одной из приоритетных задач исследований ИТЭР [12], а также рассматривается для российского проекта ТРТ [13].

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

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

1. Разработать и **валидировать** численную модель, описывающую транспорт изотопов водорода в металлах под действием импульсных тепловых и плазменных нагрузок.
2. Исследовать влияние быстрых переходных процессов, соответствующих ELM-неустойчивости в токамаках, на интегральное накопление изотопов водорода в вольфрамовых ОПЭ.
3. **Проанализировать динамику изменения коэффициента рециклинга изотопов водорода во время быстрых переходных процессов, соответствующих ELM-неустойчивости в токамаках.**
4. Исследовать влияние поверхностных процессов на выход изотопов водорода из вольфрама при лазерном нагреве.

5. **Определить зависимость доли вышедших атомов изотопов водорода из поверхностных слоев вольфрама от параметров лазерного нагрева и теплофизических свойств материала.**

Методология и методы исследования. Достижение поставленной цели и решение сопутствующих задач осуществлялось путем проведения численного моделирования, позволяющего исследовать влияние импульсных нагрузок в широком диапазоне параметров, обычно недоступном в рамках действующих экспериментальных и лабораторных установок. В качестве основного численного метода для решения задачи транспорта изотопов водорода в вольфраме применялся метод конечных элементов, реализованный в свободно распространяемом программном пакете **FESTIM**, разработанном в международном коллективе при участии автора. 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 ОПЭ при наличии градиента температур и ловушек водорода.
3. Впервые оценено влияние поверхностных процессов, теплофизических свойств и параметров лазерного импульса на выход изотопов водорода из поверхностных слоев вольфрама при лазерном нагреве.
4. Впервые проведен анализ состава потока водорода, 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, основанном на лазерно-индуцированной десорбции. Результаты экспериментов по ЛИД дейтерия из слоев воль-

фрама, 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Одномерная аналитическая модель, описывающая стационарное распределение водорода при учете наличия градиента температур (эффект Соре) и центров захвата водорода в приближении мгновенной рекомбинации атомов водорода на обращенной к плазме поверхности и мгновенной рекомбинации или нулевого потока атомов водорода 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, длительность: ~ 1 мс, плотность энергии: $0.45 — 0.14$ МДж \cdot м $^{-2}$), наряду со стационарными плазменными потоками (плотность мощности: $1 — 10$ МВт \cdot м $^{-2}$) ведет к снижению скорости накопления дейтерия в вольфраме при длительности облучения более 10 с за счет дополнительного нагрева материала относительно случая облучения стационарными потоками плазмы.
3. Коэффициент рециклинга
4. Атомарная фракция 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 теории Макнабба и Фостера, надежность которой была продемонстрирована путем воспроизведения результатов множества лабораторных экспериментов, а также были валидированы путем сравнения результатов численных расчетов с экспериментальными данными, приведенными в литературе и полученными в рамках данной диссертационной работы. Полученные результаты демонстрируют качественное и количественное согласие с литературными данными, по-

лученными 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 разработаны численные и аналитические модели, использованные для исследования закономерностей накопления и выхода изотопов водорода 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 Р. Делапорте-Матюран (Массачусетский технологический институт, США) при определяющем участии автора, реализовавшим модель и проводившим 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 ... 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.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, новизна и практическая значимость, а также 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:

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

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Кулагин, В. В. Аналитическая оценка соотношения потоков атомарного и молекулярного водорода с поверхности вольфрама / В. В. Кулагин, А. Ю. Хомяков, Ю. М. Гаспарян // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2022. — Окт. — Т. 16, вып. 5. — С. 909—913. — DOI: [10.31857/S1028096022100090](https://doi.org/10.31857/S1028096022100090). — (BAK K2, Scopus).
- A2. Kulagin, V. Numerical estimation of the atomic fraction during laser-induced desorption of hydrogen from tungsten and beryllium / V. Kulagin, Y. Gasparyan, N. Degtyarenko // Fusion Engineering and Design. — 2022. — Nov. — Vol. 184. — P. 113287. — DOI: [10.1016/j.fusengdes.2022.113287](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113287). — (Scopus, WoS).
- A3. Kulagin, V. Effect of material properties on the laser-induced desorption of hydrogen from tungsten / V. Kulagin, Y. Gasparyan // Journal of Nuclear Materials. — 2023. — Dec. — Vol. 587. — P. 154747. — DOI: [10.1016/j.jnucmat.2023.154747](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154747). — (Scopus, WoS).
- A4. FESTIM: An open-source code for hydrogen transport simulations / R. Delaporte-Mathurin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. — 2024. — Apr. — Vol. 63. — P. 786—802. — DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.03.184](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.184). — (Scopus, WoS).
- A5. Kulagin, V. Numerical simulation of deuterium retention in tungsten under ELM-like conditions / V. Kulagin, Y. Gasparyan // Journal of Nuclear Materials. — 2025. — Jan. — Vol. 603. — DOI: [10.1016/j.jnucmat.2024.155370](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155370). — (Scopus, WoS).
- A6. Kinetic surface model in FESTIM: Verification and validation / V. Kulagin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. — 2024. — Mar. — Vol. 110. — P. 90—100. — DOI: [10.1016/j.ijhydene.2025.02.128](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.128). — (Scopus, WoS).

Список литературы

1. Plasma wall interaction and tritium retention in TFTR / C. Skinner [et al.] // Journal of Nuclear Materials. — 1997. — Feb. — Vol. 241—243. — P. 214—226. — DOI: [10.1016/S0022-3115\(97\)80041-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)80041-4).

2. Keilhacker, M. D–T experiments in the JET tokamak / M. Keilhacker, M. L. Watkins // *Journal of Nuclear Materials*. — 1999. — Mar. — Vol. 266–269. — P. 1–13. — DOI: [10.1016/S0022-3115\(98\)00811-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00811-3).
3. Overview of T and D–T results in JET with ITER-like wall / C. Maggi [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2024. — Aug. — Vol. 64, issue 11. — P. 112012. — DOI: [10.1088/1741-4326/AD3E16](https://doi.org/10.1088/1741-4326/AD3E16).
4. Overview of the third JET deuterium-tritium campaign / A. Kappatou [et al.] // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2025. — Apr. — Vol. 67, issue 4. — P. 045039. — DOI: [10.1088/1361-6587/ADBD75](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ADBD75).
5. WEST L-mode record long pulses guided by predictions using Integrated Modeling / B. Shi [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2025. — Apr. — Vol. 65, issue 5. — P. 056018. — DOI: [10.1088/1741-4326/ADC7C7](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ADC7C7).
6. Overview of recent experimental results on the EAST Tokamak / Y. Song [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2024. — Aug. — Vol. 64, issue 11. — P. 112013. — DOI: [10.1088/1741-4326/AD4270](https://doi.org/10.1088/1741-4326/AD4270).
7. First Experimental Results on the T-15MD Tokamak / E. P. Velikhov [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Dec. — Vol. 87, Suppl 1. — S1–S9. — DOI: [10.1134/S1063778824130283/FIGURES/12](https://doi.org/10.1134/S1063778824130283/FIGURES/12).
8. Recent progress of JT-60SA project toward plasma operation / H. Shirai [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2024. — Sept. — Vol. 64, issue 11. — P. 112008. — DOI: [10.1088/1741-4326/AD34E4](https://doi.org/10.1088/1741-4326/AD34E4).
9. The global fusion industry in 2024 : tech. rep. / Fusion Industry Association. — 2024. — URL: <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>.
10. Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER / J. Roth [et al.] // *J. Nucl. Mater.* — 2009. — Jan. — Vol. 390/391. — P. 1–9. — DOI: [10.1016/j.jnucmat.2009.01.037](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.037).
11. Deuterium and helium retention in W with and without He-induced W ‘fuzz’ exposed to pulsed high-temperature deuterium plasma / O. Ogorodnikova [et al.] // *J. Nucl. Mater.* — 2019. — Mar. — Vol. 515. — P. 150–159. — DOI: [10.1016/j.jnucmat.2018.12.023](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.12.023).
12. Required R&D in existing fusion facilities to support the ITER research plan : tech. rep. / A. Loarte [et al.]. — 2020.
13. 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 / A. G. Razdobarin [et al.] // *Plasma Phys. Reports*. — 2022. — Dec. — Vol. 48, no. 12. — P. 1389–1403. — DOI: [10.1134/S1063780X22700283](https://doi.org/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 _____