Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

На правах рукописи



Шишкова Татьяна Александровна

Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями

2.6.7 Технология неорганических веществ

1.4.4 Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук **Голубева Анна Владимировна**, начальник лаборатории дивертора и пристеночной плазмы НИЦ «Курчатовский институт».
Научный руководитель доктор химических наук, профессор **Розенкевич Михаил Борисович**, профессор кафедры технологии изотопов и водородной энергетики РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Заика Юрий Васильевич**	ведущий научный сотрудник Отдела комплексных научных исследований федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
доктор физико-математических наук **Гаспарян Юрий Микаэлович**	заведующий кафедрой физики плазмы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ведущая организация: акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Защита диссертации состоится «10» декабря 2026 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.06 в конференц-зале (ауд. 344) Тушинского комплекса федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125480, г. Москва ул. Героев Панфиловцев, домовладение 20).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»
https://muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.2.6.06
кандидат технических наук, доцент А.Д. Стоянова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время работы, направленные на практическую реализацию термоядерного синтеза, основаны на использовании реакции на смеси тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития. В процессе эксплуатации термоядерного или гибридного («синтез—деление») реактора изотопы водорода будут взаимодействовать со стенками вакуумной камеры, в которой будет протекать реакция синтеза. Количество трития, удерживаемое в конструкционных и обращенных к плазме материалах реактора, а также проникающие через них потоки трития являются одними из основных факторов, влияющих на безопасность и экономику термоядерного реактора. В связи с этим важными критериями при выборе материалов для вакуумной камеры термоядерной установки являются параметры переноса и накопления изотопов водорода.

В качестве конструкционного материала вакуумной камеры строящегося термоядерного реактора ИТЭР используется аустенитная нержавеющая сталь типа 316L. Для проектируемых термоядерных реакторов ДЕМО предлагаются малоактивируемые ферритно-мартенситные стали. Альтернативой высокоактивируемым аустенитным и малоактивируемым ферритно-мартенситным сталям могут стать безникелевые аустенитные стали. В России разработаны малоактивируемая ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 и хромомарганцевая малоактивируемая аустенитная сталь Fe-11Cr-23Mn-W-V-Ti (далее — МАС). Отечественные стали ЭК-181 и МАС могут рассматриваться для применения в термоядерных установках. Параметры переноса изотопов водорода в малоактивируемых аустенитных хромомарганцевых сталях ранее не исследовались.

В рамках исследования накопления изотопов водорода в конструкционных и обращенных к плазме материалах термоядерного реактора (далее — ТЯР) одним из важных направлений является поиск эффективных методов извлечения трития. Чтобы в процессе эксплуатации термоядерной установки накопление трития в вакуумной камере не превышало установленного предела, необходима периодическая очистка материалов камеры от трития. Предельно допустимое количество трития, содержащееся в вакуумной камере в процессе эксплуатации термоядерной установки, будет ограничиваться нормами безопасности (~ 1 кг для проекта ИТЭР). Для детритизации вакуумной камеры, в том числе в проекте ИТЭР, рассматриваются методы, основанные на термодесорбции и изотопном замещении трития. Задача извлечения трития из материалов также актуальна в рамках замены элементов реактора или подготовки их к окончательной утилизации.

Из-за сложности работ с тритием экспериментальные работы по определению параметров переноса изотопов водорода в материалах и эффективности методов детритизации материалов

чаще проводятся с протием и дейтерием. Полученные результаты используют для оценки характеристик взаимодействия трития с материалами.

Степень разработанности темы исследования. Параметры взаимодействия изотопов водорода со сталью ЭК-181 изучались ранее. При этом число работ, посвященных удалению трития или дейтерия из конструкционных материалов, ограничено, а удаление изотопов водорода из малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 ранее не исследовалось.

Параметры переноса изотопов водорода для аустенитных хромоникелевых и малоактивируемых ферритно-мартенситных сталей широко изучены и представлены в литературе. Параметры взаимодействия изотопов водорода с малоактивируемыми аустенитными хромомарганцевыми сталями, в том числе Fe-11Cr-23Mn-W-V-Ti, ранее не изучались.

Цель работы: получение комплекса физико-химических данных о взаимодействии изотопов водорода с отечественными малоактивируемыми сталями ЭК-181 и МАС, необходимых для оценки возможности использования этих сталей в качестве конструкционных материалов ТЯР.

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

1. Сравнить эффективность извлечения дейтерия из стали ЭК-181 путем изотопного обмена водорода и термодесорбции;
2. Определить параметры взаимодействия изотопов водорода (коэффициенты диффузии, проницаемости и растворимости дейтерия и протия) с малоактивируемой аустенитной хромомарганцевой сталью.

Научная новизна:

1. Впервые исследовано изотопное замещение дейтерия протием в стали ЭК-181 при облучении плазмой и воздействии газа. Показано, что при температуре 473 К изотопное замещение протием — более эффективный метод удаления дейтерия из стали ЭК-181, чем прогрев в вакууме.
2. Впервые исследовано взаимодействие изотопов водорода с малоактивируемой аустенитной хромомарганцевой сталью (МАС). Определены значения коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости протия и дейтерия в малоактивируемой аустенитной стали (МАС) в диапазоне температур 468–653 К.
3. Впервые установлено, что проникающие через малоактивируемую аустенитную сталь (МАС) потоки изотопов водорода существенно зависят от состояния поверхностей. Нанесение Pd-покрытий толщиной 0,1 мкм после ионной очистки поверхностей мембраны из МАС приводит к десятикратному увеличению проникающего потока дейтерия при температурах 583 К и 623 К.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные температурные зависимости коэффициентов диффузии и проницаемости протия и дейтерия через малоактивируемую аустенитную хромомарганцевую сталь позволяют определить потоки изотопов водорода через этот материал в условиях термоядерных установок и оценить перспективность МАС в качестве конструкционного материала.

Показано, что изотопный обмен водорода путем плазменного облучения является эффективным методом удаления дейтерия из стали ЭК-181. Результаты исследований удаления дейтерия из стали ЭК-181 методами изотопного обмена и термодесорбции могут быть использованы для выбора метода детритизации этого материала в условиях термоядерных установок.

Методология и методы исследования. Ввиду сложности проведения экспериментальных работ с радиоактивным тритием, исследования проводили с протием и дейтерием. Для определения содержания изотопов водорода в материалах применялся метод термодесорбционной спектроскопии. Для определения коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости изотопов водорода применялся дифференциальный метод газовой проницаемости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Влияние температуры прогрева в диапазоне 373-623 К на эффективность термодесорбции дейтерия из стали ЭК-181. Длительность прогрева при температуре 473 К в зависимости от толщины образца, необходимая для достижения эффективности процесса термодесорбции ≥ 98 %.
2. Влияние давления протия на эффективность изотопного замещения дейтерия в стали ЭК-181 при выдержке в газе H_2 при температуре 473 К.
3. Сравнение эффективностей процессов термодесорбции и изотопного обмена при плазменном облучении и при выдержке в газе как способов удаления дейтерия из стали ЭК-181.
4. Полученные коэффициенты диффузии, проницаемости и растворимости протия и дейтерия в стали МАС при температурах 468 – 653 К и давлениях на входной стороне мембраны из МАС 10^3 – $5 \cdot 10^4$ Па.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов и обоснованность сделанных выводов обеспечена использованием надёжных методик эксперимента (термодесорбционная спектроскопия, дифференциальный метод газовой проницаемости), соответствующих современному научному уровню, воспроизводимостью полученных результатов, сравнением полученных результатов с литературными данными.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в формировании экспериментального плана работ, выполнении экспериментальных исследований на установке

термодесорбционного анализа и ГДП-стенде (НИЦ «Курчатовский институт»), обработке и интерпретации экспериментальных данных, сравнении полученных результатов с данными литературных источников, подготовке к публикации материалов данной работы в научных изданиях и докладах на конференциях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и научных школах по тематике диссертации: 28-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2022, Москва); 15-ой, 16-ой, 17-ой, 18-ой Международных школах молодых ученых и специалистов имени А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (2022, Окуловка; 2023, Саров; 2024, Саров; 2025, Саров); XVII и XVIII Курчатовских молодежных научных школах (2023, Москва; 2025, Москва); IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (2024, Москва); LII и LIII Международных Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2025, Звенигород; 2026, Звенигород); XXI Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2025, Сочи); 30-ой международной конференции МАГАТЭ по термоядерной энергетике FEC-2025 (2025, Чэнду); XXIX Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (2026, Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК и индексируемых в международной базе данных Scopus, в материалах всероссийских и международных научных мероприятий – 20. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Все работы опубликованы в соавторстве.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Работа представлена на 135 страницах и содержит 9 таблиц, 68 рисунков. Список литературы включает 156 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, отражена их апробация.

В первой главе обсуждаются свойства материалов, рассматриваемых для применения в термоядерных установках в качестве конструкционных и обращенных к плазме. Обсуждаются процессы взаимодействия изотопов водорода с материалами, в том числе представлен подробный анализ литературных данных, посвященных исследованию транспортных характеристик изотопов водорода в аустенитных и малоактивируемых ферритно-мартенситных сталях. В первой

главе также обсуждаются возможные методы детритизации материалов термоядерной энергетики.

Во второй главе описаны исследуемые в данной работе материалы: малоактивируемая ферритно-мартенситая сталь ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B) и малоактивируемая аустенитная хромомарганцевая сталь (Fe-11Cr-23Mn-W-V-Ti). Подробно изложены методика экспериментального исследования накопления и удаления дейтерия из малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 и методика определения параметров переноса протия и дейтерия через малоактивируемую аустенитную хромомарганцевую сталь.

Содержание дейтерия в стали ЭК-181 исследовали методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС), который позволяет определить интегральное содержание изотопов водорода в образце. ТДС-анализ основан на регистрации потоков газа, десорбирующихся из образца при его нагреве с постоянной скоростью.

Облучение образцов плазмой в процессах насыщения и изотопного замещения проводили на стенде «ПИМ» (НИЦ «Курчатовский институт»). Поток дейтерия в составе ионов и в атомарном виде на поверхность облучаемого образца при облучении D-плазмой составлял $2{,}0\cdot10^{20}$ – $2{,}1\cdot10^{20}$ ат. D/(с·м^2), поток протия при облучении H-плазмой – $2{,}3\cdot10^{20}$–$2{,}4\cdot10^{20}$ ат. H/(с·м^2). Доза облучения при насыщении дейтерием составляла $1\cdot10^{25}$ ат. D/м^2, при облучении протием – от $5{,}7\cdot10^{23}$ ат.H/м^2 до $1\cdot10^{25}$ ат. H/м^2. Насыщение дейтерием из газа проводилось в специальном высоковакуумном модуле газовой экспозиции при давлении 0,5 МПа и температуре 473 К в течение 25 ч. Также в модуле насыщения проводили выдержку в газообразном протии при исследовании изотопного обмена. Прогрев в вакууме осуществляли в зависимости от конкретной задачи в камере плазменного облучения стенда «ПИМ», в основной камере ТДС-стенда или в модуле насыщения. Размер исследуемых образцов стали ЭК-181 составлял ~9х9 мм.

Исследования проницаемости изотопов водорода через сталь МАС проводились на высоковакуумном стенде ГДП. Используемый метод газовой проницаемости основан на измерении проникающего потока газа через образец-мембрану при подаче газообразного протия или дейтерия на одну сторону мембраны и непрерывной вакуумной откачке с другой стороны мембраны. После подачи протия или дейтерия на входную сторону мембраны проникающий поток, появляющийся через некоторое время с обратной стороны мембраны, растет и при фиксированных условиях достигает стационарного значения.

Парциальные давления десорбирующихся газов на стендах ТДС и ГДП регистрировались с помощью квадрупольных масс-спектрометров. Квадрупольные масс-спектрометры калибруются по потокам протия и дейтерия при помощи калиброванных диафрагм.

В третьей главе обсуждаются результаты исследования влияния на накопление дейтерия в стали ЭК-181 различных факторов: условий насыщения и хранения, толщины образцов и вида

металлопроката. Сравнение накопления дейтерия после выдержки в газе D_2 (473 К, 25 ч, 0,5 МПа) и после облучения D-плазмой (473 К, ~14 ч, $1 \cdot 10^{25}$ ат. D/м^2) показывает, что содержание дейтерия в образцах после насыщения в газе при указанных условиях в среднем выше в 7 раз. Наблюдаемое различие в содержании дейтерия после насыщения образцов из газа и из плазмы объясняется тем, что при выдержке в газе достигается равномерное насыщение дейтерием по всему объему образца, в то время как при облучении плазмой высокие концентрации дейтерия достигаются только в приповерхностном слое, что подтверждается литературными данными.

В работе исследовалось влияние длительности хранения в вакууме на содержание дейтерия в образцах стали ЭК-181. Показано, что хранение образцов в вакууме при комнатной температуре в период до 3 месяцев не приводит к заметному снижению содержания дейтерия в образцах.

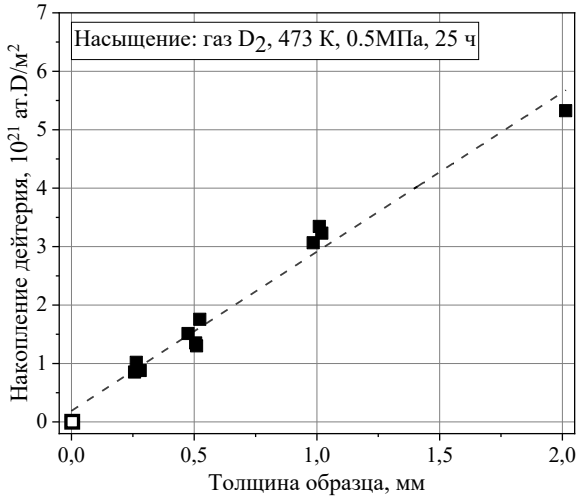


Рисунок 1 – Содержание дейтерия в стали ЭК-181 в зависимости от толщины образцов, вырезанных из штабика

Исследовалось накопление дейтерия в образцах стали ЭК-181, выдержанных в газообразном дейтерии при температуре 473 К и давлении 0,5 МПа, в зависимости от вида проката и от толщины образцов. Было показано, что захват дейтерия в образцах одинаковой толщины из разного металлопроката (цилиндрический штабик, плоский прокат толщиной 0,86 мм и 3,4 мм) может отличаться в 2-3 раза. Накопление дейтерия в образцах из одного проката прямо пропорционально их объему (рисунок 1).

Чтобы убедиться, что при прогреве до 1200 К в процессе термодесорбционного анализа дейтерий полностью покидает образец, а не остается в высокоэнергетичных ловушках, исследовали остаточное содержание дейтерия в стали ЭК-181 после ТДС-анализа. По результатам повторного ТДС-анализа с линейным нагревом до более высокой температуры (1440 К), а также по выходу протонов в реакции $^2H(^{12}C, p)^{13}C$ при анализе методом ядерных реакций было показано, что линейный нагрев образцов стали ЭК-181 до температуры 1200 К при термодесорбционном анализе позволяет извлечь не менее 99% от начального содержания после насыщения в газе D_2.

В четвертой главе обсуждаются результаты исследования удаления дейтерия из стали ЭК-181 путем прогрева в вакууме и путем изотопного обмена при облучении протиевой плазмой и воздействии газообразного протия. В работе было исследовано влияние толщины образцов и температуры при прогреве в вакууме на удаление дейтерия из стали ЭК-181 после насыщения в

газообразном D_2. Показано, что степень извлечения дейтерия из стали ЭК-181 при прогреве в вакууме возрастает с ростом температуры прогрева (рисунок 2), а время, необходимое для удаления дейтерия, увеличивается пропорционально толщине образцов. Степень извлечения дейтерия (F) рассчитывалась по формуле:

$$F = \frac{[D]_0 - [D]_{ост}}{[D]_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $[D_0]$ – содержание дейтерия в образцах после насыщения, $[D_{ост}]$ – остаточное содержание дейтерия после процедуры удаления (прогрева в вакууме или в газе H_2 и после облучения Н-плазмой).

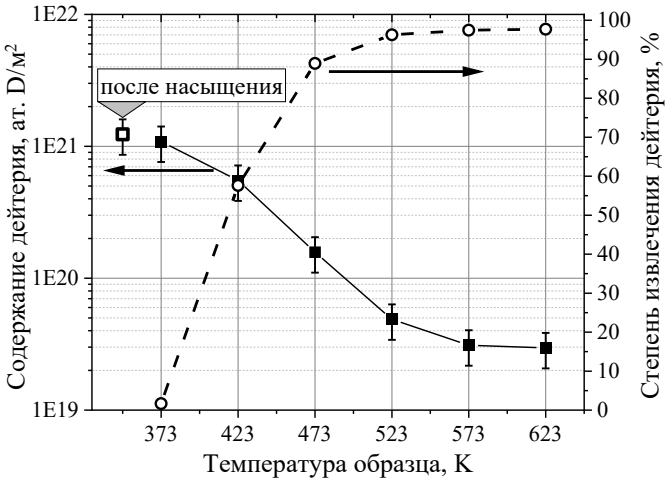


Рисунок 2 – Содержание дейтерия и степень извлечения дейтерия из образцов толщиной 0,5 мм после выдержки в вакууме в течение 1 ч при разных температурах

В работе проводилось исследование изотопного замещения дейтерия протием в стали ЭК-181 при облучении Н-плазмой. Содержание дейтерия в образцах, предварительно облученных дейтериевой плазмой (473 К, $1 \cdot 10^{25}$ ат./м^2), после воздействия протиевой плазмы при тех же условиях (473 К, $1 \cdot 10^{25}$ ат./м^2) снизилось в ~25 раз.

При облучении протиевой плазмой на образец оказывают воздействие поток ионов из плазмы, повышенная температура и остаточное давление протия в камере. Остаточное давление в камере при облучении плазмой составляет порядка ~10^{-1} Па. Чтобы оценить вклад термодегазации и воздействия газообразного протия в удаление дейтерия, образцы, насыщенные дейтерием из газа, облучали протиевой плазмой, прогревали в вакууме и в газе H_2 (~10^{-1} Па) при одинаковых значениях длительности и температуры (473 К, 1 ч). Показано, что воздействие протия в виде газа и прогрев в вакууме при указанных условиях одинаково эффективно удаляют дейтерий, остаточное содержание дейтерия в образцах толщиной 0,5 мм составляет порядка 20 %. В то же время после облучения протиевой плазмой остаточное содержание дейтерия в образце на порядок ниже по сравнению с образцами, выдержанными в вакууме и в газе при тех же условиях.

Исследовали влияние давления на эффективность удаления дейтерия при прогреве в газообразном H_2. Показано, что прогрев в газе H_2 при давлениях $\leq 5 \cdot 10^3$ Па и температуре 473 К не приводит к заметному снижению содержания дейтерия по сравнению с прогревом в вакууме при той же температуре и длительности. После прогрева в газе H_2 при давлении $\geq 5 \cdot 10^4$ Па в течение 2 ч содержание дейтерия ниже в 3-5 раз по сравнению с прогревом в вакууме, при этом остаточное содержание дейтерия не зависит от давления газа H_2 в диапазоне $5 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^5$ Па. В то же время выдержка в газе H_2 при более низкой температуре (373 К) и при давлении 10^5 Па не привела к снижению содержания дейтерия относительно начального содержания (рисунок 3).

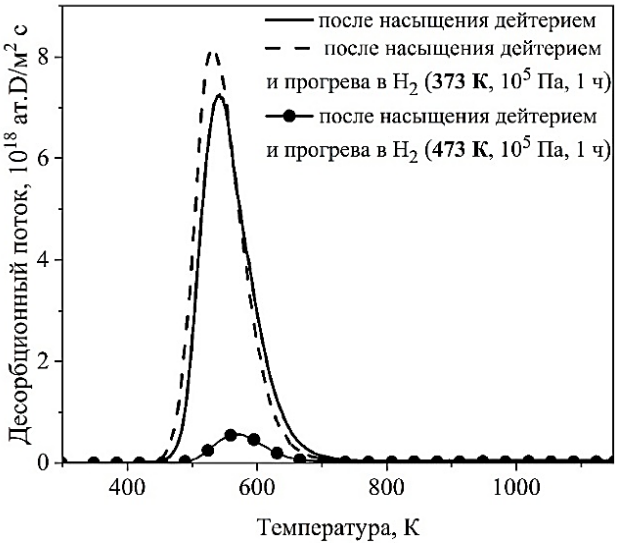


Рисунок 3 – Спектры десорбции дейтерия из образцов стали ЭК-181: насыщенного в газе D_2; насыщенного в газе D_2 и прогретого в газе H_2 (1 ч, 10^5 Па) при 473 К; насыщенного в газе D_2 и прогретого в газе H_2 (1 ч, 10^5 Па) при 373 К

Накопление протия в образцах, предварительно насыщенных дейтерием, при выдержке в газообразном протии в течение 2 ч при температуре 473 К прямо пропорционально корню из давления (рисунок 4), что согласуется с законом Сивертса:

$$C = S \cdot p^{0.5}, \qquad (2)$$

где S - растворимость протия в металле, p – давление газа, C – концентрация протия в материале.

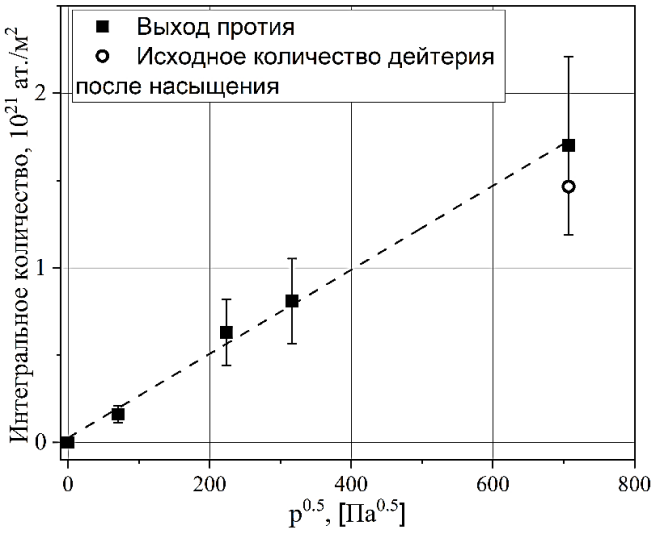


Рисунок 4 – Зависимость содержания протия в стали ЭК-181 от давления H_2 при изотопном замещении дейтерия в образцах, предварительно насыщенных в газе (0,5 МПа D_2, 473 К, 25 ч)

Основные результаты главы иллюстрирует рисунок 5, на котором показано содержание дейтерия в образцах после насыщения в газе (25 ч, 473 К, $5 \cdot 10^5$ Па), а также после удаления дейтерия из образцов путем прогрева в вакууме, прогрева в газе или облучения Н-плазмой. При температуре 473 К и облучение Н-плазмой (1 ч, давление ~10^{-1} Па, вытягивающий потенциал -100 В), и выдержка в H_2 (2 ч, давление $\geq 5 \cdot 10^4$ Па) позволяют извлечь 98 % дейтерия от начального содержания. Исходя из полученных результатов можно заключить, что среди рассмотренных способов удаления дейтерия из стали ЭК-181 изотопное замещение протием при плазменном облучении – наиболее эффективный способ, требующий меньше времени, чем прогрев в вакууме и выдержка в газообразном протии, и существенно меньшего расхода газа, чем выдержка в H_2.

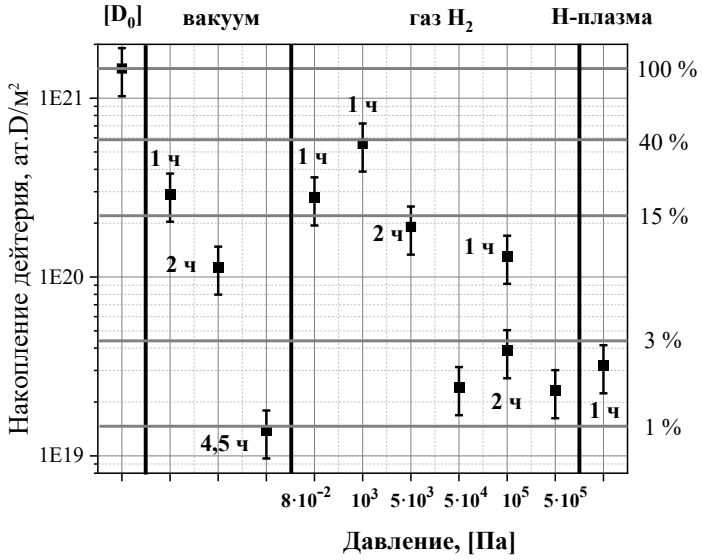
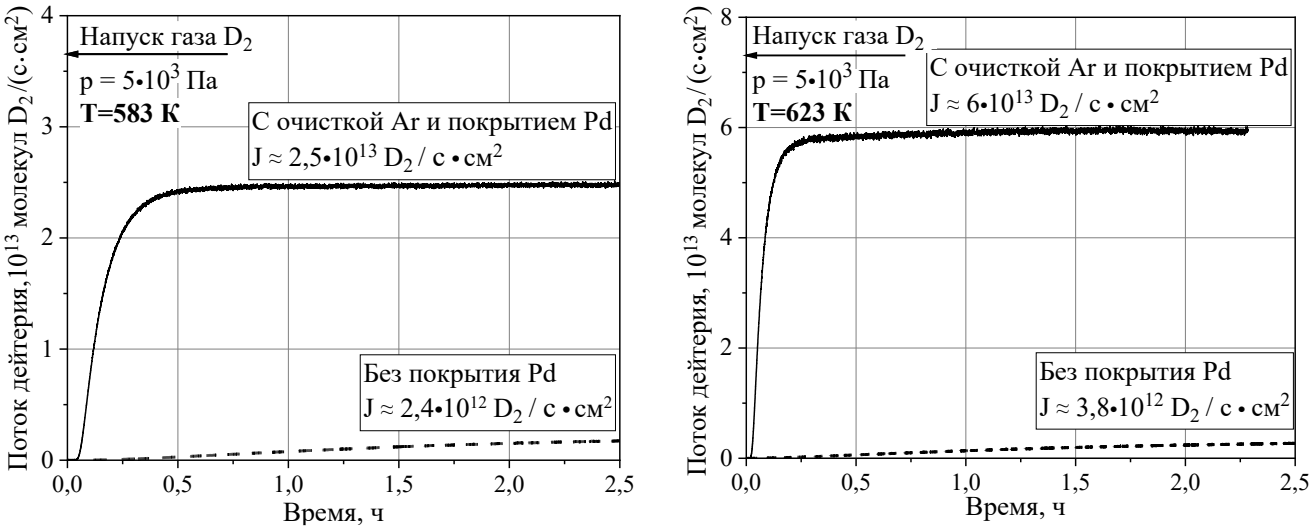


Рисунок 5 – Содержание дейтерия в образцах стали ЭК-181 после насыщения в газе D_2 (473 К, 0,5 МПа, 25 ч) [D_0] и после последующих процедур удаления дейтерия при температуре 473 К (прогрев в вакууме, прогрев в газе H_2, облучение Н-плазмой)

В пятой главе обсуждаются результаты исследования водородопроницаемости малоактивируемой хромомарганцевой стали при взаимодействии с газом. В процессе измерений при температурах 583 К и 623 К проникающий поток дейтерия через мембрану №1 толщиной 0.26 мм не выходил на стационарное значение, что может быть связано с изменением состояния одной или обеих поверхностей, в том числе окислением. Для предотвращения окисления в ходе экспериментов обе поверхности мембраны №2 толщиной 0.27 мм подвергли плазменной очистке ионами аргона, после чего методом магнетронного напыления покрыли тонким слоем палладия (~100 нм), для которого характерны малая величина энергетического барьера диссоциативной адсорбции и малая отрицательная теплота растворения. Установлено, что удаление оксидных слоев на поверхностях МАС и нанесение на них Pd-покрытий толщиной 0,1 мкм существенно (до 10 раз) повышает проникающий поток при давлении $5 \cdot 10^3$ Па и температурах 583 – 623 К (рисунок 6).



(а) (б)

Рисунок 6 – Потоки дейтерия, проникающие через мембрану из МАС при температурах 583 К (а) и 623 К (б)

В экспериментах с покрытой палладием мембраной при температурах в диапазоне 468 – 653 К и давлениях на входе мембраны 10^3 – $5 \cdot 10^4$ Па стационарный поток $J \sim p^k$, где k=0.49 – 0.55 (рисунок 7), что свидетельствует о достижении диффузионно-ограниченного режима, в котором зависимость проникающего потока описывается формулами:

$$J = \frac{DS\sqrt{P}}{L}\left(1 + 2\sum_{m=1}^{\infty}(-1)^m \exp\left(-\frac{D}{L^2}m^2\pi^2 t\right)\right), \quad (3)$$

$$J_{CT} = \frac{SD\sqrt{p_{вх}}}{L} = \frac{P\sqrt{p_{вх}}}{L}, \quad (4)$$

где J – величина проникающего потока, J_{CT} – величина проникающего потока после достижения стационара, D – коэффициент диффузии, S – растворимость, P – коэффициент проницаемости, L – толщина мембраны, t – время.

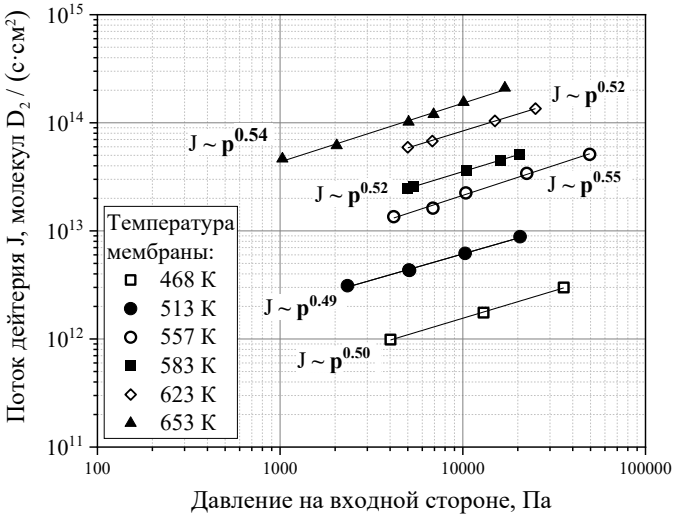


Рисунок 7 – Зависимости потока, проникающего через мембрану из стали МАС, от давления над входной поверхностью при температурах в диапазоне 468 – 653 К

Коэффициент диффузии определялся из аппроксимации зависимости нормированного проникающего потока (выражение 3). С использованием выражения (4) были рассчитаны проницаемость и растворимость. Сравнение полученных температурных зависимостей проницаемостей, растворимостей и коэффициентов диффузии протия и дейтерия с литературными данными приведено на рисунках 8 – 10. Коэффициенты диффузии хорошо согласуются со значениями для аустенитных хромоникелевых сталей (рисунок 8). Проницаемости и растворимости дейтерия и протия для хромомарганцевой стали выше, чем для аустенитных хромоникелевых сталей серии 300 (рисунки 9 и 10).

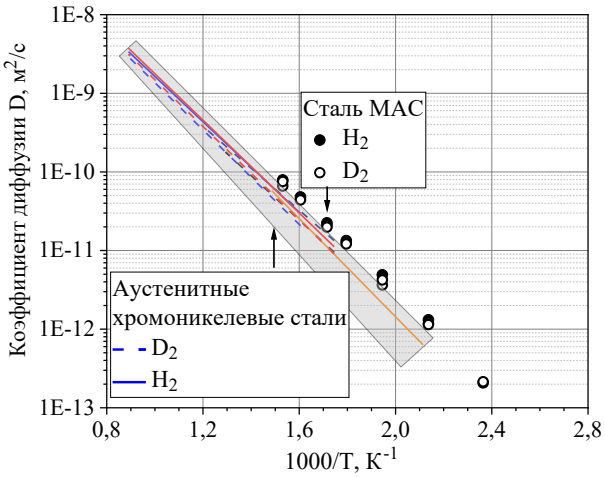


Рисунок 8 – Коэффициенты диффузии протия и дейтерия через сталь МАС в сравнении с литературными данными

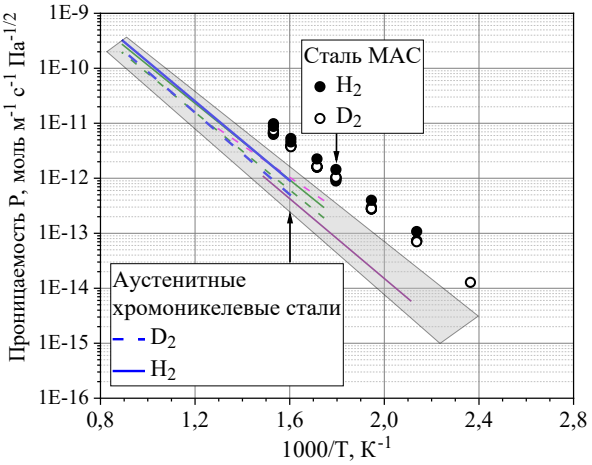


Рисунок 9 – Проницаемости протия и дейтерия для стали МАС в сравнении с литературными данными

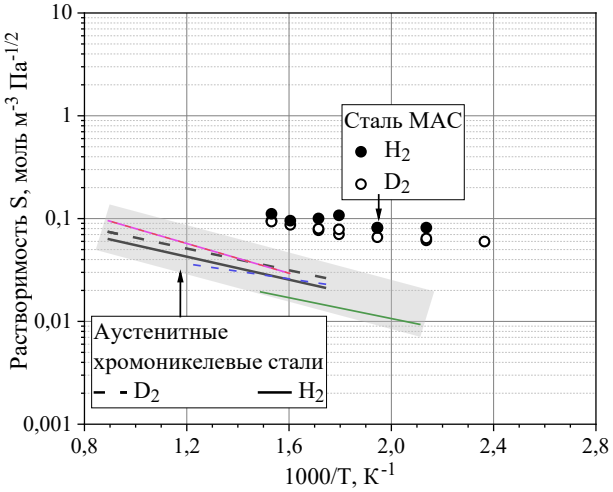


Рисунок 10 – Растворимости протия и дейтерия в стали МАС в сравнении с литературными данными

Среднее значение отношения проницаемостей протия и дейтерия P_H/P_D составило 1,41±0,08, что соответствует корню из обратного отношения масс дейтерия и протия. Среднее отношение полученных коэффициентов диффузии протия и дейтерия ниже корня из отношения масс дейтерия и протия и составило 1,12± 0,03. Отклонение отношений коэффициентов диффузии от предсказываемого теорией корня обратного отношения масс изотопов водорода наблюдается в большинстве работ, где рассмотрен этот вопрос.

Получены температурные зависимости коэффициентов диффузии, проницаемостей и растворимостей протия и дейтерия для стали МАС:

$$P_D = 6{,}5\cdot10^{-7}\exp(-62{,}3\times10^3/RT), \quad (5)$$

$$P_H = 6{,}7\cdot10^{-7}\exp(-60{,}8\times10^3/RT), \quad (6)$$

$$D_D = 2{,}4\cdot10^{-6}\exp(-56{,}4\times10^3/RT), \quad (7)$$

$$D_H = 2{,}4\cdot10^{-6}\exp(-55{,}8\times10^3/RT), \quad (8)$$

$$S_D = 0{,}27\exp(-5{,}9\times10^3/RT), \quad (9)$$

$$S_H = 0{,}28\exp(-5{,}0\times10^3/RT), \quad (10)$$

где D – коэффициент диффузии [$м^2/с$], P – проницаемость [$моль\cdot м^{-1}\cdot с^{-1}\cdot Па^{-1/2}$], S – коэффициент растворимости [$моль\cdot м^{-3}\cdot Па^{-1}$].

Полученные в экспериментах с протием и дейтерием параметры переноса могут использоваться для оценки переноса трития в материалах ТЯР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено исследование процессов взаимодействия изотопов водорода с отечественными малоактивируемыми сталями ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B) и МАС (Fe-11Cr-23Mn-W-V-Ti). На основании проведенного исследования были сделаны следующие **выводы:**

1. Показано, что степень извлечения дейтерия из образцов стали ЭК-181 толщиной 0.5 мм при прогреве в вакууме в течение 1 ч возрастает с ростом температуры прогрева и составляет при 473 К – 88 %, при 523 К – 96 %, а при 573 К – 98 %.

2. Изотопное замещение дейтерия протием при плазменном облучении – эффективный способ удаления дейтерия из стали ЭК-181, требующий меньше времени, чем прогрев в вакууме и чем выдержка в газообразном протии, и существенно меньшего расхода газа, чем выдержка в H_2. Для образцов толщиной 0,5 мм, насыщенных в D_2, и облучение H-плазмой (473 К, 1 ч, вытягивающий потенциал -100 В), и выдержка в H_2 (473 К, 2 ч, давление $\geq5\cdot10^4$ Па) позволяют извлечь 98 % дейтерия от начального содержания.

3. Полученные коэффициенты диффузии, проницаемости и растворимости протия и дейтерия для МАС при температурах мембраны 468 – 653 К и давлениях на входной стороне 10^3 – $5\cdot10^4$ Па близки к параметрам переноса изотопов водорода в аустенитных хромоникелевых сталях.

4. Установлено, что удаление оксидных слоев на поверхностях МАС и нанесение на них Pd-покрытий толщиной 0,1 мкм существенно (до 10 раз) повышает проникающий поток при давлении $5\cdot10^3$ Па и температурах 583 – 623 К.

Перспективы дальнейших исследований связаны с рассмотрением возможности использования МАС как материала ТЯР и гибридных реакторов и могут включать в себя:

1) изучение влияния состава МАС на параметры переноса изотопов водорода в этой стали;

2) определение эффективности удаления дейтерия из МАС путём термодесорбции и изотопного обмена.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science

1. Shishkova T.A. Isotope effect in the interaction between hydrogen and fusion reactor materials / **Shishkova T.A.**, Golubeva A.V., Rozenkevich M.B. // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2023. – V. 97. - № 10. – P. 2079-2098. DOI: 10.1134/S0036024423100205.

2. Shishkova T.A. Deuterium Removal from EK-181 Steel by Plasma Irradiation / **Shishkova T.A.**, Golubeva A.V., Stepanov N.O., Cherkez D.I., Bobyr N.P., Kozlov D.A., Chernov V.M., Rozenkevich M.B. // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – V.88 – Suppl 2. – S236–S243. DOI: 10.1134/S1063778825140133.

3. Golubeva A.V. Dynamics of Deuterium Release from EK-181 and Eurofer Steels Depending on Storage Conditions / Golubeva A.V., Alimov V.Kh., Efimov V.S., Persianova A.P., Bobyr N.P., **Shishkova T.A.**, Terentyev D., Chernov V.M. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2025. – V.19. – P.582–589. DOI: 10.1134/S1027451025700867.

Публикации в материалах всероссийских и международных научных мероприятий

1. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Розенкевич М. Б. Сравнение изотопного эффекта при взаимодействии изотопов водорода с ферритно-мартенситными и аустенитными сталями // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´23 Junior: сборник докладов 16-й Международной школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова / Под редакцией доктора технических наук А.А. Юхимчука. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2024. – 424 с., ил. – ISBN 978-5-9515-0578-1. – С.182-196.

2. Golubeva A.V., **Shishkova T.A.**, Stepanov N.O., Aleshin A.E., Persianova A.P., Kozlov D.A., Cherkez D.I., Litovchenko I.Yu, Chernov V.M. Deuterium interaction with low–activated chromium-manganese austenitic steel with increased content of carbide particles // 30th IAEA Fusion Energy Conference (IAEA FEC 2025). URL: https://conferences.iaea.org/event/392/papers/36234/files/13399-Manuscript_FEC%202025%20Golubeva%20A.pdf

3. **Анфимова Т.А.** Изотопный эффект во взаимодействии водорода с материалами ТЯР // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать восьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (17–19 марта 2022 г., Москва): Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга"», 2022. – 1000 с. – ISBN 978-5-907292-54-3. – С.614.

4. **Шишкова Т.А.**, Черкез Д.И., Голубева А.В., Степанов Н.О., Бобырь Н.П., Козлов Д.А., Дугин Д.С., Федин П.А., Чернов В.М., Розенкевич М.Б. Изотопный обмен водорода в стали ЭК-181 // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы IV международной конференции, Москва, 21–25 октября 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет МЭИ, 2024. – 460 с. – ISBN 978-5-7046-3072-2. – С.296-297.

5. Голубева А.В., Алимов В.Х., Ефимов В.С., **Шишкова Т.А.**, Черкез Д.И., Степанов Н.О., Козлов Д.А., Персианова А.П., Бобырь Н.П., Чернов В.М. Выход дейтерия из малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 с течением времени // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы IV международной конференции, Москва, 21–25 октября 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет МЭИ, 2024. – 460 с. – ISBN 978-5-7046-3072-2. – С.290-291.

6. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Степанов Н.О., Черкез Д.И., Бобырь Н.П., Козлов Д.А., Чернов В.М., Розенкевич М.Б. Удаление дейтерия из стали ЭК-181 методами термодесорбции и изотопного обмена // Взаимодействие плазмы с поверхностью: Сборник научных трудов XXIX Международной конференции, Москва, 05–06 февраля 2026 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2026. – 92 с. – ISBN 978-5-7262-3227-0. – С.87.

7. **Анфимова Т.А.**, Голубева А.В. Изотопный эффект при взаимодействии водорода с материалами ТЯР // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´22 Junior. Сборник тезисов Пятнадцатой Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова, Окуловка, 3-9 июля 2022 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2022. С.49-51.

8. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Розенкевич М.Б. Изотопный обмен как метод детритизации материалов в термоядерных реакторах – обзор // Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа: Сборник аннотаций, Москва, 20–23 марта 2023 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 2023. – 366 с. – С.356.

9. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Розенкевич М.Б. Методы детритизации материалов в термоядерных реакторах // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´23 Junior. Сборник тезисов Шестнадцатой Международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова. Под редакцией доктора технических наук А.А. Юхимчука – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2023. – С.154-156.

10. **Шишкова Т.А.**, Черкез Д.И., Голубева А.В., Степанов Н.О., Бобырь Н.П., Козлов Д.А., Дугин Д.С., Розенкевич М.Б., Чернов В.М. Изотопный обмен водорода в стали ЭК-181 //

Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´24. Сборник тезисов 8-й Международной и 17-й Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова / Под редакцией доктора технических наук А.А. Юхимчука – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2024. – 214 с.: ил. – С.66-68.

11. Черкез Д.И., Степанов Н.О., Козлов Д.А., **Шишкова Т.А.**, Дугин Д.С., Спицын А.В. Установки для исследования взаимодействия с материалами ЛВГПМ НИЦ «Курчатовский институт» // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´24. Сборник тезисов 8-й Международной и 17-й Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова / Под редакцией доктора технических наук А.А. Юхимчука – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2024. – 214 с.: ил. – С.162-165.

12. Алёшин А.Е., **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Литовченко И.Ю., Чернов В.М. Проникновение дейтерия через малоактивируемую хромомарганцевую аустенитную сталь // XVIII Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа: Сборник аннотаций, Москва, 27–30 мая 2025 года. – Москва: НИЦ "Курчатовский институт", 2025. – 192 с. – С.121.

13. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Степанов Н.О., Черкез Д.И., Козлов Д.А., Бобырь Н.П., Розенкевич М.Б., Чернов В.М. Удаление дейтерия из стали ЭК-181 методами термодесорбции и изотопного обмена // XVIII Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа: Сборник аннотаций, Москва, 27–30 мая 2025 года. – Москва: НИЦ "Курчатовский институт", 2025. – 192 с. – С.169.

14. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Степанов Н.О., Черкез Д.И., Козлов Д.А., Розенкевич М.Б., Чернов В.М., Литовченко И.Ю. Изотопное замещение дейтерия в малоактивируемых сталях // LII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: Сборник тезисов докладов, Звенигород, 17–21 марта 2025 года. – Москва: Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, 2025. – 333 с. – ISBN 978-5-6042115-3-3. – С.95.

15. Голубева А.В., **Шишкова Т.А.**, Литовченко И.Ю., Персианова А.П., Степанов Н.О., Алёшин А.Е., Козлов Д.А., Черкез Д.И., Чернов В.М. Захват и проникновение дейтерия сквозь малоактивируемую хромомарганцевую аустенитную сталь с повышенным содержанием карбидных частиц // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´25. Сборник тезисов 18-й Международной школы Национального центра физики и математики для молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова / Под редакцией доктора технических наук А. А. Юхимчука. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2025. – 77 с.: ил. – С.43.

16. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Степанов Н.О., Черкез Д.И., Козлов Д.А., Бобырь Н.П., Розенкевич М.Б., Чернов В.М. Удаление дейтерия из стали ЭК-181 // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´25. Сборник тезисов 18-й Международной

школы Национального центра физики и математики для молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова / Под редакцией доктора технических наук А. А. Юхимчука. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2025. – 77 с.: ил. – С.49.

17. Голубева А.В., **Шишкова Т.А.**, Персианова А.П., Степанов Н.О., Алёшин А.Е., Козлов Д.А., Черкез Д.И., Литовченко И.Ю., Чернов В.М. Взаимодействие дейтерия с малоактивируемой хромомарганцевой аустенитной сталью – первые результаты // LII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: Сборник тезисов докладов, Звенигород, 17–21 марта 2025 года. – Москва: Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, 2025. – 333 с. – ISBN 978-5-6042115-3-3. – С.137.

18. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Степанов Н.О., Черкез Д.И., Козлов Д.А., Бобырь Н.П., Чернов В.М. Сравнение эффективности удаления дейтерия из стали ЭК-181 различными методами // LIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: Сборник тезисов и докладов, Звенигород, 16–20 марта 2026 года. – Москва: Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, 2026. – 352 с. – ISBN 978-5-6042115-5-7. – С.124.

19. Голубева А.В., **Шишкова Т.А.**, Алешин А.Е., Персианова А.П., Степанов Н.О., Козлов Д.А., Литовченко И.Ю., Чернов В.М. Малоактивируемая аустенитная хромомарганцевая сталь как перспективный материал термоядерных установок // LIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: Сборник тезисов и докладов, Звенигород, 16–20 марта 2026 года. – Москва: Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, 2026. – 352 с. – ISBN 978-5-6042115-5-7. – С.156.

20. **Шишкова Т.А.**, Голубева А.В., Розенкевич М.Б. Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM´26. Сборник тезисов 9-й Международной конференции и 19-й Международной школы Национального центра физики и математики для молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова / Под редакцией доктора технических наук А.А. Юхимчука. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2026. – 95 с.: ил. – С.30.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2026610367 Российская Федерация, Программа для вычисления потоков термодесорбции изотопов водорода из материалов / Степанов Н.О., Шишкова Т.А., Черкез Д.И.; Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». - № 2025697067; заявл.23.12.2025; опубл. 13.01.2026, Бюл. №. 1.