«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор РХТУ им. Д. И. Менделеева
д.х.н., профессор С.Н. Филатов
«11» июня 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» по научным специальностям 2.6.7. Технология неорганических веществ (технические науки) и 1.4.4. Физическая химия (технические науки) выполнена в лаборатории дивертора и пристеночной плазмы отдела термоядерных реакторов отделения перспективных проектов и технологий Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» и на кафедре технологии изотопов и водородной энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Шишкова Татьяна Александровна, «30» июня 1998 года рождения, являлась аспирантом очной формы обучения кафедры технологии изотопов и водородной энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» с 1 сентября 2021 года по 2 июля 2025 года, в настоящее время является соискателем той же кафедры, а также инженером-исследователем в лаборатории дивертора и пристеночной плазмы НИЦ «Курчатовский институт».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в 2026 году.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук по научной специальности 01.04.08 – Физика плазмы, начальник лаборатории дивертора и пристеночной плазмы отдела термоядерных реакторов отделения перспективных проектов и технологий Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Голубева Анна Владимировна.

Научный руководитель – доктор химических наук по специальности 02.00.04 – Физическая химия, профессор, профессор кафедры технологии изотопов и водородной энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» Розенкевич Михаил Борисович.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что практическая реализация современного термоядерного синтеза основана на D-T-реакции, в ходе которой изотопы водорода взаимодействуют со стенками вакуумной камеры. Таким образом накопление трития в конструкционных материалах становится ключевым фактором безопасности и экономики реактора. Одними из критериев выбора материалов являются параметры переноса и накопления изотопов водорода. Для строящегося реактора ИТЭР применяется аустенитная сталь марки 316L, а для перспективного реактора ДЕМО рассматриваются малоактивируемые ферритно-мартенситные стали. К малоактивируемым ферритно-мартенситным сталям относится российская сталь ЭК-181. В качестве альтернативы могут быть рассмотрены малоактивируемые аустенитные стали. В России разработана хромомарганцевая малоактивируемая аустенитная сталь (МАС) Fe-11Cr-23Mn-W-V-Ti. Перспективы их практического использования определяются параметрами взаимодействия с водородом. Важнейшей задачей является разработка эффективных методов извлечения трития (детритизации) для периодической очистки камеры, поскольку предельно допустимое его содержание ограничено нормами безопасности (≈1 кг для проекта ИТЭР). Основными подходами к детритизации выступают термодесорбция и изотопное замещение трития, что актуально как в процессе эксплуатации, так и при замене элементов реактора или их окончательной утилизации.

Научная новизна заключается в следующем:

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. 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 состоит в том, что 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 использования 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.

Практическая значимость работы подтверждена выдачей свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026610367 (заявл. 23.12.2025, опубл. 13.01.2026).

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 23 научных работах, в том числе в 3 статьях в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus. Получено 1 (одно) свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на Двадцать восьмой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2022 г.); 15-й (Окуловка, 2022 г.), 16-й (Саров, 2023 г.), 17-й (Саров, 2024 г.), 18-й (Саров, 2023 г.) Международной школе молодых ученых и специалистов имени А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами»; XVII (Москва, 2023 г.), XVIII (Москва, 2025 г.) Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе; IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», (Москва, 2024 г.); LII (Звенигород, 2025 г.), LIII (Звенигород, 2026 г.) Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу; XXI Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (Сочи, 2025 г.); 30-й международной конференции МАГАТЭ по термоядерной энергетике FEC-2025 (Чэнду, 2025 г.); XXIX Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 2026 г.).

Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных

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

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

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

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах)

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.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.7. Технология неорганических веществ в части п. 6. Свойства сырья и материалов, закономерности технологических процессов для разработки, технологических расчетов, проектирования и управления химико-технологическими процессами и производствами; и паспорту специальности научных работников 1.4.4. Физическая химия в части п. 3. Определение термодинамических характеристик процессов на поверхности, установление закономерностей адсорбции на границе раздела фаз и формирования активных центров на таких поверхностях.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Шишковой Татьяны Александровны является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Шишковой Татьяне Александровне; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научным специальностям 2.6.7. Технология неорганических веществ и 1.4.4. Физическая химия.

Диссертация рассмотрена на совместном заседании кафедры технологии изотопов и водородной энергетики и кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, состоявшемся «29» мая 2026 года, протокол № 11. В обсуждении приняли участие: доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук, доцент Пак Ю.С., доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук Варежкин А.В., профессор кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, доктор химических наук, доцент Либерман Елена Юрьевна, доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат химических наук Боева О.А., доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат химических наук Букин А.Н., зав. кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, доктор технических наук, профессор Растунова И.Л., профессор кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, доктор химических наук, профессор Розенкевич М.Б., профессор кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, доктор химических наук, профессор Алёхина М.Б. Принимало участие в голосовании 13 человек. Результаты голосования: «За» - 13 человек, «Против» - нет, воздержались - нет, протокол № 11 от «29» мая 2026 г.

Заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, д.т.н., доцент — И. Л. Растунова

Секретарь заседания, к.т.н. — В.С. Мосеева

ПРОТОКОЛ

совместного заседания кафедры технологии изотопов и водородной энергетики и кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева
от «29» мая 2026 г. № 11

Присутствовали: заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, доктор технических наук, доцент Растунова Ирина Леонидовна; профессор кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, доктор химических наук, профессор Алёхина Марина Борисовна; профессор кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, доктор химических наук, доцент Либерман Елена Юрьевна; профессор кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, доктор химических наук, профессор Розенкевич Михаил Борисович; заведующий лабораторией кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук Марунич Сергей Андреевич; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук Боева Ольга Анатольевна; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук Варежкин Александр Владимирович; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук, доцент Пак Юрий Самдорович; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук Букин Алексей Николаевич; ассистент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Викулов Дмитрий Дмитриевич, ассистент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Иванов Павел Игоревич, старший преподаватель кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Вораксо Иван Андреевич, ведущий инженер кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, кандидат технических наук Мосеева Валерия Сергеевна;

Всего присутствовало: 13 человек.

ПОВЕСТКА ДНЯ

Предварительное рассмотрение диссертационной работы Шишковой Татьяны Александровны, инженера-исследователя лаборатории дивертора и пристеночной плазмы НИЦ «Курчатовский институт» на тему: «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями».

Работа выполнена в лаборатории дивертора и пристеночной плазмы отдела термоядерных реакторов отделения перспективных проектов и технологий Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» и на кафедре технологии изотопов и водородной энергетики РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Тема диссертационной работы Шишковой Татьяны Александровны и научные руководители кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории дивертора и пристеночной плазмы отдела термоядерных реакторов

отделения перспективных проектов и технологий Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Голубева Анна Владимировна; доктор химических наук, профессор кафедры технологии изотопов и водородной энергетики РХТУ им. Д.И. Менделеева Розенкевич Михаил Борисович утверждены на заседании Ученого совета ИМСЭН-ИФХ от 13 мая 2026 года (протокол № 7).

СЛУШАЛИ:
Сообщение Шишковой Татьяны Александровны, изложившей основное содержание своей диссертационной работы.
Шишковой Татьяне Александровне были заданы следующие вопросы:
Доцент Пак Юрий Самдорович:
Как технически реализуется процесс облучения плазмой? Почему этот метод оказался наиболее эффективным, может быть из-за локальных перегревов? Контролировалась ли температура плазмы? Какой потенциал подаётся на образец? Покрывали палладием только одну сторону мембраны, или обе?
Доцент Варежкин Александр Владимирович:
Вопрос касется терминологии. Что такое S? Коэффициент растворимости? Что такое P? Проницаемость или коэффициент проницаемости?
Доцент Либерман Елена Юрьевна:
Проводилось ли исследование состояния поверхности? Исследовалась ли дефектность поверхности? Какая природа дефектов?
Доцент Боева Ольга Анатольевна:
Делали ли исследование дефектов методом сканирующей электронной микроскопии?
Доцент Букин Алексей Николаевич:
Исследуются два типа сталей, мартенситные и аустенитные, по причине того, что мало данных. Какие именно стали плохо исследованы?
Почему две стали по-разному испытываются? У каких именно сталей происходит процесс очищения поверхности?

В обсуждении приняли участие: доцент Пак Ю.С., доцент Варежкин А.В., Доцент Либерман Е.Ю., доцент Боева О.А., доцент Букин А.Н., зав. кафедрой ТИВЭ Растунова И.Л., профессор Розенкевич М.Б., профессор Алёхина М.Б.

ПОСТАНОВИЛИ:
Заслушав и обсудив диссертационную работу Шишковой Татьяны Александровны, принять следующее заключение.

Председатель заседания,
заведующий кафедрой технологии
изотопов и водородной энергетики,
д.т.н., доцент — И.Л. Растунова

Секретарь заседания, к.т.н. — В.С. Мосеева

УТВЕРЖДАЮ
Директор
НИЦ «Курчатовский институт»
Ю.А. ДЬЯКОВА
_____
«__» июня 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного учреждения
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
по диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук, специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ, 1.4.4. Физическая химия

Диссертация Шишковой Татьяны Александровны «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальностям 2.6.7. Технология неорганических веществ и 1.4.4. Физическая химия выполнена в Курчатовском комплексе термоядерной энергетики и плазменных технологий (далее – ККТЭиПТ) федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (далее – НИЦ «Курчатовский институт») и на кафедре технологии изотопов и водородной энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (далее – РХТУ им. Д.И. Менделеева).

В 2021 г. Шишкова Т.А. окончила РХТУ им. Д.И. Менделеева с присвоением квалификации инженер по специальности «Химическая технология материалов современной энергетики».

В период с 2021 г. по 2025 г. Шишкова Т.А. проходила обучение в очной аспирантуре РХТУ им. Д.И. Менделеева по направлению подготовки 18.06.01 «Химическая технология» под руководством профессора кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, доктора химических наук, профессора Розенкевича Михаила Борисовича. Диплом об окончании аспирантуры выдан 2 июля 2025 г.

РХТУ им. Д.И. Менделеева. В ходе обучения сданы кандидатские экзамены: по иностранному языку (английский) с оценкой «отлично» в 2022 г., истории и философии науки с оценкой «отлично» в 2022 г., специальной дисциплине «Технология неорганических веществ» с оценкой «отлично» в 2023 г. В 2025 г. был дополнительно сдан экзамен по специальной дисциплине «Физическая химия» с оценкой «отлично».

Шишкова Т.А. работает в НИЦ «Курчатовский институт» с 2021 г. В настоящее время — в должности инженера-исследователя в Лаборатории дивертора и пристеночной плазмы (далее — ЛДПП) Отдела термоядерных реакторов (далее — ОТР) Отделения перспективных проектов и технологий (далее — ОППТ) ККТЭиПТ.

Научные руководители Шишковой Т.А. — Голубева Анна Владимировна, кандидат физико-математических наук, начальник Лаборатории дивертора и пристеночной плазмы ОТР ОППТ ККТЭиПТ и Розенкевич Михаил Борисович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры технологии изотопов и водородной энергетики РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Доклад Шишковой Т.А. по диссертационной работе «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» был заслушан и обсуждён на заседании Научно-технического совета ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт» (Протокол от 04.06.2026 г. № 155).

В обсуждении работы приняли участие: д.ф.-м.н. К.Ю. Вуколов, д.ф.-м.н. А.Б. Кукушкин, д.ф.-м.н. П.В. Саврухин, д.ф.м.н., профессор В.М. Чернов, к.ф.-м.н. А.В. Голубева, к.ф.-м.н. Д.Н. Демидов, к.ф.-м.н. Ю.В. Капустин, к.ф.-м.н. Коновалов, М.Л. Субботин.

На все вопросы Шишкова Т.А. дала обстоятельные поясняющие ответы.

ПО ИТОГАМ ОБСУЖДЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ПРИНЯТО СЛЕДУЮЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Диссертационная работа посвящена изучению изотопных эффектов при взаимодействии изотопов водорода с отечественными малоактивируемыми сталями: ферритно-мартенситной сталью ЭК-181 и хромомарганцевой аустенитной сталью. Соискателем получены новые данные об эффективности удаления дейтерия из стали ЭК-181 методами изотопного обмена и термодесорбции, а также получены параметры переноса протия и дейтерия в хромомарганцевой малоактивируемой

аустенитной стали. Экспериментальные исследования выполнены в НИЦ «Курчатовский институт».

Актуальность темы диссертации

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.

Цель диссертационной 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.

Были поставлены следующие задачи:

— сравнить эффективность извлечения дейтерия из стали ЭК-181 путем изотопного обмена водорода и термодесорбции;

— определить параметры взаимодействия изотопов водорода (коэффициенты диффузии, проницаемости и растворимости дейтерия и протия) с малоактивируемой аустенитной хромомарганцевой сталью.

Научная новизна результатов работы

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. Определены значения коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости протия и дейтерия в МАС в диапазоне температур 468–653 К.

3. Впервые установлено, что проникающие через 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.

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.

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 результатов работы

Результаты работы докладывались на 28 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2022, Москва); 15-й, 16-й, 17-й, 18-й Международной школе молодых ученых и специалистов имени А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (2022; 2023; 2024; 2025); XVII, XVIII Курчатовской молодежной научной школе (2023; 2025, Москва); IV

Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», (2024, Москва); LII, LIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2025, 2026, Звенигород); XXI Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2025, Сочи); 30-й международной конференции МАГАТЭ по термоядерной энергетике FEC-2025 (2025, Чэнду); XXIX Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (2026, Москва).

Степень достоверности результатов проведенных исследований

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.

Публикации, содержащие результаты диссертации

По теме диссертации опубликовано 23 печатные работы, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК и индексируемых в международной базе данных Scopus:

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.

Научная специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Шишковой Татьяны Александровны «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» соответствует пункту 6 «Свойства сырья и материалов, закономерности технологических процессов для разработки, технологических расчетов, проектирования и управления химико-технологическими процессами и производствами» паспорта специальности 2.6.7. «Технология неорганических веществ» и пункту 3 «Определение термодинамических характеристик процессов на поверхности, установление закономерностей адсорбции на границе раздела фаз и формирования активных центров на таких поверхностях» паспорта специальности 1.4.4. «Физическая химия».

Заключение

Диссертация Шишковой Татьяны Александровны «Изотопные эффекты при взаимодействии водорода с малоактивируемыми сталями» является законченной, самостоятельной и оригинальной научно-исследовательской работой, которая соответствует паспортам специальностей 1.4.4. Физическая химия и 2.6.7. Технология неорганических веществ. Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней» (в действующей редакции); требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и. о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, и рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальностям 1.4.4. «Физическая химия» и 2.6.7. «Технология неорганических веществ».

Заключение принято тайным голосованием на заседании Научно-технического совета Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт».

Присутствовало на заседании 21 чел. из 30 чел. списочного состава (из них 9 докторов наук, 6 кандидатов наук). Результаты голосования: «за» — 18 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 2 чел., недействительных бюллетеней — 1) протокол от «04» июня 2026 г. № 155.

Руководитель
Курчатовского комплекса термоядерной
энергетики и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт» А.В. Лутченко

Научный руководитель
Курчатовского комплекса термоядерной
энергетики и плазменных технологий,
Председатель Научно-технического совета ККТЭиПТ
НИЦ «Курчатовский институт»,
доктор технических наук П.П. Хвостенко

Учёный секретарь
Курчатовского комплекса термоядерной энергетики
и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»,
кандидат физико-математических наук,
доцент Л.К. Кузнецова

Подписи А.В. Лутченко, П.П. Хвостенко, Л.К. Кузнецовой
Заверяю

И.о. директора
Департамента кадровой политики
НИЦ «Курчатовский институт» Н.Е. Филимонова