

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке

РХТУ им. Д.И. Менделеева

д.х.н., профессор Р.А. Козловский



20 26 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Нанесение, структура и функциональные свойства покрытий на основе соединений титана для электродов электрохимических устройств с твердополимерным электролитом» по научной специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ, отрасль Химическая технология выполнена на кафедре технологии изотопов и водородной энергетики Института материалов современной энергетики и нанотехнологий - инженерный физико-химический факультет (ИМСЭН-ИФХ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Синяков Матвей Владимирович, «30» ноября 1998 года рождения, был аспирантом кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Института материалов современной энергетики и нанотехнологий - инженерный физико-химический факультет (ИМСЭН-ИФХ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» очной формы обучения с 01.09.2022 по 31.08.2026.

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 к.т.н. (научная специальность 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов), доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Института материалов современной энергетики и нанотехнологий - инженерный физико-химический факультет (ИМСЭН-ИФХ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» Пак Юрий Самдорович.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Нанесение, структура и функциональные свойства покрытий на основе соединений титана для электродов электрохимических устройств с твердополимерным электролитом» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что развитие современных энергосистем, интегрирующих возобновляемые

источники энергии (ВИЭ), требует создания высокоэффективных, долговечных и экономичных технологий для конверсии и хранения энергии. Одним из наиболее перспективных устройств в данной области являются обратимые топливные элементы (ОТЭ) с протонообменной мембраной (ПОМ), способные работать в режиме топливного элемента (ТЭ) для генерации энергии и в режиме электролизера воды (ЭВ) для производства водорода. Однако их широкомасштабному коммерческому внедрению препятствует ограниченный ресурс работы, ключевой причиной которого является разрушение неорганических компонентов, в первую очередь углеродных газодиффузионных слоев (ГДС) кислородного электрода, в условиях высокой концентрации кислорода, высоких потенциалов (1.5 – 2 В) и температуры (~50 – 90°C).

Повышение долговечности электродов без значительного роста стоимости является критически важной задачей для обеспечения конкурентоспособности данной технологии. Традиционные решения на основе защитных покрытий из благородных металлов (Pt, Ir) характеризуются высокой эффективностью, но неприемлемы с экономической точки зрения для массового производства ввиду высокой стоимости. В связи с этим актуальным направлением является разработка технологии нанесения защитных покрытий на основе соединений переходных металлов (таких как оксиды, нитриды, карбиды), обладающих высокой химической стабильностью в агрессивных средах и существенно меньшей стоимостью.

В качестве перспективного метода получения таких покрытий выступает магнетронное распыление (МР). Данная технология основана на использовании низкотемпературной плазмы и обеспечивает точный контроль над формированием структуры, морфологии и состава наносимых слоев, позволяя получать материалы с различной плотностью и пористостью, регулируемой стехиометрией, оптимальной электропроводностью. Использование метода МР для формирования покрытий позволяет получать оптимальную конструкцию углеродных электродов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Применение модифицированных электродов позволит повысить срок работы электрохимических устройств, а также снизить затраты на их производство за счет замены дорогостоящих покрытий на основе драгоценных металлов.

Таким образом, целью данной работы является разработка технологии формирования защитных покрытий на основе соединений титана и его многокомпонентных аналогов методом МР для защиты электродов в ОТЭ. Достижение поставленной цели включает исследование влияния режимов МР и параметров нанесения на структуру, фазовый состав наносимых покрытий и их функциональные характеристики в составе ОТЭ. Реализация данной задачи позволит создать научно-технические основы для производства новых эффективных компонентов электрохимических устройств с улучшенными ресурсными показателями.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые получено защитное покрытие состава TiC_xNy для защиты углеродного материала методом магнетронного распыления. В основе метода

нанесения лежит применение режима постоянного тока с рабочей мощностью 90 Вт с приложением отрицательного напряжения смещения -200 В на подложку. Приложение потенциала смещения -200 В способствует повышению адгезии осаждаемых частиц, а также образованию многокомпонентного соединения карбонитрида титана. При этом мощность 90 Вт обеспечивает равномерный поток частиц и однородность покрытия.

2. Впервые исследовано влияние покрытия состава TiC_xNy на долговечность электродов на основе углеродных материалов в условиях ускоренного стресс-тестирования в составе обратимого топливного элемента. Показано повышение дегазационной стойкости углеродных электродов за счет смещения окислительных реакций на защитный подслоя.

3. Создана многослойная архитектура кислородного электрода обратимого топливного элемента с применением подслоя на основе покрытия состава TiC_xNy , позволяющая повысить долговечность и эффективность обратимого топливного элемента. Разделение каталитических слоев с помощью подслоя позволяет повысить их индивидуальную эффективность и защитить от взаимного разрушения.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Подобранные параметры магнетронного распыления позволяют создавать высокоэффективные защитные покрытия для защиты электродов на основе углеродного материала, позволяющие повысить их долговечность. Подобные электроды могут применяться во многих электрохимических устройствах, в том числе, в обратимом топливном элементе.

2. Показано, что применение защитного покрытия состава TiC_xNy в качестве подслоя в составе кислородного электрода может повышать количество циклов работы при переключении обратимого топливного элемента между режимами топливного элемента и электролизера воды. Результаты исследований могут быть использованы при создании высокоэффективных электродов для различных видов электрохимических устройств.

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

Основные положения диссертации получили полное отражение в 12 опубликованных работах, в том числе 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные базы цитирования, также получен 1 патент на изобретение.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на Пятнадцатой и Семнадцатой Международной Школе молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова (Окуловка, 2020 г. и г. Саров, 2024 г.); Второй Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» (г. Москва, 2022 г.), Двадцать девятой, Тридцатой и Тридцать первой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА» (г. Москва, 2023-2025 г.);

Семнадцатой Курчатовской молодёжной научной школе (г. Москва, 2023 г.); Десятой Всероссийской конференции с международным участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе» (г. Черноголовка 2023 г.).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Alekseeva O.K., **Sinyakov M.V.**, Ivanova N.A., et al. Nanostructured Coatings to Extend the Component Lifetime in Electrochemical Devices Based on Proton Exchange Membrane // Nanobiotechnology Reports. – 2023. – V. 18. – №. Suppl 2. – P. S225-S239. DOI:10.1134/S2635167624600147. (WoS, Scopus).
2. **Sinyakov M.V.**, Zasyapkina A.A., Tishkin V.V., et al. Titanium-Based Nanostructured Coatings for Electrodes of Electrochemical Devices with Proton Exchange Membrane // Moscow University Physics Bulletin. – 2023. – V. 78. – №. 2. – P. 185-191. <https://doi.org/10.3103/S0027134923020133>. (Scopus).
3. **Sinyakov M. V.**, Spasov D.D., Mensharapov R.M., et al. Nanostructured coatings of TiC_xN_y as a sublayer of electrodes for devices with a proton exchange membrane // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2023. – V. 5. – P. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086752. (Scopus).
4. **Sinyakov M. V.**, Mensharapov R.M., et al. Study of the water electrolyzer with proton exchange membrane performance based on Ti current collectors charged with hydrogen // Electroanalysis. – 2025. – V. 37. – №. 1. – P. e202400091. <https://doi.org/10.1002/elan.202400091>. (WoS, Scopus).
5. **Sinyakov M.V.**, Spasov D.D., Mensharapov R.M., et al. Effect of TiCN Sublayer in Improving the Efficiency and Durability of Bifunctional Oxygen Electrode in URFC // Electroanalysis. – 2026. – V. 38. – №. 1. – P. e70094. <https://doi.org/10.1002/elan.70094>. (WoS, Scopus).

Публикации в рецензируемых изданиях:

1. Alekseeva O.K., **Sinyakov M.V.**, Ivanova N.A., et al. Nanostructured Coatings to Extend the Component Lifetime in Electrochemical Devices Based on Proton Exchange Membrane // Nanobiotechnology Reports. – 2023. – V. 18. – №. Suppl 2. – P. S225-S239. DOI:10.1134/S2635167624600147. (WoS, Scopus).
2. **Sinyakov M.V.**, Zasyapkina A.A., Tishkin V.V., et al. Titanium-Based Nanostructured Coatings for Electrodes of Electrochemical Devices with Proton Exchange Membrane // Moscow University Physics Bulletin. – 2023. – V. 78. – №. 2. – P. 185-191. <https://doi.org/10.3103/S0027134923020133>. (Scopus).
3. **Sinyakov M. V.**, Spasov D.D., Mensharapov R.M., et al. Nanostructured coatings of TiC_xN_y as a sublayer of electrodes for devices with a proton exchange membrane // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2023. – V. 5. – P. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086752. (Scopus).
4. **Sinyakov M. V.**, Mensharapov R.M., et al. Study of the water electrolyzer with proton exchange membrane performance based on Ti current collectors charged with hydrogen // Electroanalysis. – 2025. – V. 37. – №. 1. – P. e202400091. <https://doi.org/10.1002/elan.202400091>. (WoS, Scopus).

5. **Sinyakov M.V.**, Spasov D.D., Mensharapov R.M., et al. Effect of TiCN Sublayer in Improving the Efficiency and Durability of Bifunctional Oxygen Electrode in URFC // *Electroanalysis*. – 2026. – V. 38. – №. 1. – P. e70094. <https://doi.org/10.1002/elan.70094>. (WoS, Scopus).

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

1. **М.В. Сняков**, А.А. Засыпкина, Д.Д. Спасов и др. Карбиды титана в качестве антикоррозионных покрытий для электродов твердополимерных электрохимических устройств // Сборник тезисов II Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение». – Москва, Россия, 2022. – С. 135-136.
2. **М.В. Сняков**, Д.Д. Спасов, С.А. Григорьев и др. Антикоррозионные покрытия на основе карбидов титана для электрохимических устройств с твердым полимерным электролитом // Сборник тезисов докладов XXIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, Россия, 2023. – С. 674.
3. **М.В. Сняков**, А.А. Засыпкина, Б.В. Иванов и др. Влияние наводороживания анода на эффективность электролизеров воды с ТПЭ // Сборник тезисов докладов XVII Курчатовской молодёжной научной школы. – Москва, Россия, 2023. – С. 285.
4. **М.В. Сняков**, Д.Д. Спасов, Р.М. Меншарапов и др. Применение антикоррозионных покрытий на основе соединений титана в обратимом топливном элементе // Сборник тезисов докладов Десятой Всероссийской конференции с международным участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Черноголовка, Россия, 2023. – С. 256-258.
5. **М.В. Сняков**, Ю.С. Пак, Д.Д. Спасов и др. Исследование влияния водородного насыщения титановых коллекторов тока на электрохимические характеристики электролизной ячейки с ПОМ // Сборник тезисов докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, Россия, 2024. – С. 828.
6. **Сняков М.В.**, Спасов Д.Д., Меншарапов Р.М. и др. Исследование влияния водородного насыщения титановых коллекторов тока на электрохимические характеристики электролизера воды с ПОМ // Сборник тезисов докладов 8-ой Международной конференции им. А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами». – Саров, Россия, 2024. – С. 184-186.
7. **М.В. Сняков**, Ю. С. Пак, Д.Д. Спасов и др. Оптимизация электрокаталитических слоев обратимого топливного элемента с протонообменной мембраной // Сборник тезисов докладов XXXI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.7. Технология неорганических веществ в части п. 8 «Разработка теоретических основ и установление общих закономерностей проектирования и технологий изготовления неорганических материалов» и п. 9 «Разработка оптимальных структур и конструкций, а также инновационных технологий изготовления материалов с заданными потребительскими и технико-экономическими показателями для обеспечения снижения затрат на организацию их производства и повышение качества продукции».

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Синякова Матвея Владимировича 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 Синякову Матвею Владимировичу; 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: «Нанесение, структура и функциональные свойства покрытий на основе соединений титана для электродов электрохимических устройств с твердополимерным электролитом» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ.

Диссертация рассмотрена на заседании комиссии по итоговой аттестации научной специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», состоявшемся «30» июня 2026 года, протокол № 1. В обсуждении приняли участие: доцент, и. о. заведующего кафедрой ТНВ и ЭП, д.т.н. Колесников А. В. ; доцент, заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, д.т.н. Растунова И. Л. ; профессор кафедры ТНВ и ЭП, д.т.н. Почиталкина И. А. ; доцент кафедры ТНВ и ЭП, главный специалист ЦКП РХТУ, к.х.н. Морозов А. Н. ; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, к.т.н. Пак Ю. С. ; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, к.х.н. Боева О. А.

Принимало участие в голосовании 5 человек. Результаты голосования:
«За» - 5 человек, «Против» - 0 человек, «Воздержались» - 0 человек,
протокол № 1 от « 30 » 06 2026 г.

Председатель комиссии



А.В. Колесников

Секретарь комиссии



О.В. Винокурова

ПРОТОКОЛ

заседания комиссии по итоговой аттестации
по научной специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ
от «30» июня 2026 г. № 1

Присутствовали: доцент, и. о. заведующего кафедрой ТНВ и ЭП, д.т.н. Колесников Артем Владимирович (председатель комиссии); доцент, заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, д.т.н. Растунова Ирина Леонидовна (зам. председателя комиссии); профессор кафедры ТНВ и ЭП, д.т.н. Почиталкина Ирина Александровна; доцент кафедры ТНВ и ЭП, главный специалист ЦКП РХТУ, к.х.н. Морозов Александр Николаевич; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, к.т.н. Пак Юрий Самдорович; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, к.х.н. Боева Ольга Анатольевна.

Всего присутствовало: 6 человек.

ПОВЕСТКА ДНЯ

Предварительное рассмотрение диссертационной работы Синякова Матвея Владимировича, аспиранта кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Института материалов современной энергетики и нанотехнологии - инженерный физико-химический факультет (ИМСЭН-ИФХ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева) на тему: «Нанесение, структура и функциональные свойства покрытий на основе соединений титана для электродов электрохимических устройств с твердополимерным электролитом».

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

Тема диссертационной работы Синякова Матвея Владимировича и научный руководитель к.т.н., доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики ИМСЭН-ИФХ РХТУ им. Д.И. Менделеева Пак Юрий Самдорович утверждены на заседании Ученого совета Университета от 28.09.2022 (протокол № 2).

СЛУШАЛИ:

Сообщение Синякова Матвея Владимировича, изложившего основное содержание своей диссертационной работы.

Синякову Матвею Владимировичу были заданы следующие вопросы:

(Колесников А. В.)

Уточните пожалуйста характеристики мембраны.

Возможна ли комбинация металлов (с драгоценными)?

Какова толщина нанесения?

(Боева О. А.)

Что представляет собой платиновый катализатор?

Вы использовали коммерческий образец катализатора или самостоятельно полученный?

(Растунова И. Л.)

Что включает в себя процесс стрессотестирования?

Достаточно ли проведения 20-ти циклов?

(Морозов А. Н.)

Какие размеры на микрофотографиях?

Какая марка титана использовалась в работе?

Учитывалось ли в работе, что титан всегда покрыт оксидом? удаляли ли оксид с поверхности?

Как оценивали сопротивление?

Чем отличаются способы формирования покрытий на слайде 13?

Почему выбрали метод магнитного напыления?

Какой элементный анализ вы проводили?

В обсуждении приняли участие: доцент, и. о. заведующего кафедрой ТНВ и ЭП Колесников А.В.; доцент, заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики Растунова И. Л.; профессор кафедры ТНВ и ЭП Почиталкина И. А.; доцент кафедры ТНВ и ЭП, главный специалист ЦКП РХТУ Морозов А. Н.; доцент кафедры технологии изотопов и водородной энергетики Боева О. А

ПОСТАНОВИЛИ:

Заслушав и обсудив диссертационную работу Синякова Матвея Владимировича, принять заключение организации по диссертации на тему: «Нанесение, структура и функциональные свойства покрытий на основе соединений титана для электродов электрохимических устройств с твердополимерным электролитом».

Председатель комиссии



А.В. Колесников

Секретарь комиссии



О.В. Винокурова