



«УТВЕРЖДАЮ»

и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева
д.х.н., профессор Е.В. Румянцев

«12» июня

2025г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Повышение энергоресурсоэффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ за счет создания новых электродных материалов» по научной специальности 2.6.9 –Технология электрохимических процессов и защита о коррозии (технические науки) выполнена на кафедре технологии неорганических веществ и электрохимических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Ньеин Чан Мое, «12» июня 1993 года рождения, был аспирантом кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» с 01.09.2020 г. по 31.08.2022 г. С 01.09.2024 г. по 31.08.2026 г. является соискателем кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» в 2024 году.

Научный руководитель – кандидат химических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии, доцент, доцент кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико - технологический университет имени Д. И. Менделеева» Бродский Владимир Александрович.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Повышение энергоресурсоэффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ за счет создания новых электродных материалов» принято следующее заключение.

Актуальность. Работа посвящена разработке покрытия на основе диоксида свинца, модифицированного оксидами металлов, с целью создания анодных материалов, способных заменить дорогостоящие аноды на основе металлов платиновой группы и, в частности, ОРТА (оксидно-рутениево-титановый анод) в различных электрохимических процессах. Исследования материалов электродов, особенно на основе диоксида свинца (PbO_2), направлены на снижение энергозатрат и стоимости процессов, а также на создание анодов с высокой коррозионной стойкостью и электрокаталитической активностью. Такие нерастворимые аноды с покрытием из PbO_2 , с добавками TiO_2 , SnO_2 и других оксидов, могут быть эффективно использованы в низкотоковых электрохимических процессах получения неорганических веществ, включая синтез гипохлорита натрия и хлората натрия, получения гидроксида натрия и серной кислоты. Кроме того, актуальным представляется использование разрабатываемых электродов в процессах водоочистки методами электрофлотации и электрокоррекции рН. Разработанные электродные материалы должны удовлетворять требованиям к доступности и низкой стоимости используемых в их изготовлении материалов, а также простоте изготовления, что делает их подходящими для применения в развивающихся странах, в частности в Республике Союз Мьянма.

В ходе выполнения научного исследования получены основные экспериментальные результаты, характеризующие процесс электроосаждения покрытий диоксида свинца из щелочных электролитов с композиционными добавками (TiO_2 , ZrO_2 , SnO_2).

Показано, что электроды на основе PbO_2 , модифицированные TiO_2 , можно рекомендовать для использования в качестве анодных материалов в различных электрохимических процессах с плотностью тока не выше 5 A/дм^2 , в том числе в электрофлотационном процессе, в процессах получения гипохлорита и хлората натрия, процессах обессоливания и электрокоррекции рН. Отмечено, что разработанные электродные материалы обладают высокой стабильностью и устойчивостью в средах с повышенным солесодержанием. В исследованных электрохимических процессах

разработанные аноды на основе PbO_2-TiO_2 могут заменить анод ОРТА, что повышает выход целевых продуктов и экономическую эффективность процессов в целом.

Личное участие соискателя в достижении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- поиск научно-технической литературы по теме диссертации, составление литературно-аналитического обзора, критический анализ материала и творческое участие в разработке концепции и плана работы;
- выбор и освоение аналитических методик определения концентрации компонентов, самостоятельное проведение основного массива экспериментов;
- подготовка текстов докладов и публикаций по теме диссертации;
- оформление иллюстрационных материалов;
- формулирование положений и выводов, выносимых на защиту;
- разработаны рекомендации и предложены пути практического применения результатов исследования.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые установлена возможность использования модифицированных электродных материалов на основе PbO_2 с добавкой TiO_2 на титановой основе в качестве анодов в процессе получения гипохлорита и хлората натрия. Показано, что использование разработанного анодного материала вместо электрода ОРТА в процессе безмембранного электролиза раствора хлорида натрия с добавкой дихромата натрия приводит к повышению значения выхода по току наиболее ценного продукта хлората натрия с 63% до 89% при анодной плотности тока 1 А/дм².

2. Показана возможность использования разработанного анодного материала на основе PbO_2 с добавкой TiO_2 в процессах электрохимического мембранного обессоливания растворов сульфата натрия с получением растворов серной кислоты и гидроксида натрия, процессах электрофлотации и электрокоррекции рН, в том числе в растворах с повышенным солесодержанием.

Теоретическая и практическая значимость работы выражается в следующем:

1. Установлены закономерности формирования покрытий PbO_2 из щелочных плюмбитных электролитов, определено влияние плотности тока, температуры и состава на их морфологию, прочность и адгезию.

2. Разработаны технологические режимы процесса осаждения анодных покрытий на основе PbO_2 с добавкой TiO_2 , обеспечивающие получение прочных и стойких покрытий пригодных для промышленного использования, в т.ч. в процессах получения

гипохлорита и хлората натрия, очистки сточных вод и мембранного обессоливания с получением серной кислоты и щёлочи.

3. Расширены теоретические представления о поведении модифицированных электродов на основе PbO_2 в процессах синтеза неорганических веществ – гипохлорита и хлората натрия, серной кислоты и гидроксида натрия, а также в процессах электрофлотации, электрокоррекции pH и мембранного электролиза.

4. Получены новые данные о влиянии природы и концентрации фоновых солей (Na_2SO_4 , $NaCl$, $NaNO_3$ с концентрацией до 100 г/л), углубляющие понимание о влиянии состава среды на перенапряжение анодных реакций на электродах на основе PbO_2 .

5. Проанализировано влияние плотности тока и состава электролита на деградацию электродов PbO_2-TiO_2 растворах Na_2SO_4 , $NaCl$, $NaNO_3$, характерных для процессов электрохимического синтеза гипохлорита и хлората натрия, серной кислоты и щелочи, а также процессов электрофлотации, электрокоррекции pH и мембранного обессоливания.

6. Систематизированы механизмы деградации электродов PbO_2-TiO_2 в различных электрохимических процессах и средах, даны рекомендации по увеличению срока службы электродов и определены области их применения. Показано, что разработанный электрод демонстрирует высокую электрохимическую устойчивость в различных процессах в интервале анодных плотностей тока 1-5 А/дм².

7. Экономическая целесообразность применения разработанных анодных материалов на основе PbO_2-TiO_2 обусловлена низкой стоимостью материала по сравнению с анодами ОРТА, применяемыми в исследуемых процессах: разработанные материалы почти в 10 раз дешевле при сопоставимом сроке службы в условиях анодной плотности тока не выше 5 А/дм².

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

Основные положения диссертации получили полное отражение в 4 статьях в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Chemical Abstracts, а также в 12 тезисах докладов на конференциях. Получен патент РФ на полезную модель.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности» (ИНТЕКС-2022) (г. Москва, 2022 г.); IX Всероссийской конференции «Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды», посвящённой 55-летию Чувашского государственного университета имени

И.Н. Ульянова (г. Чебоксары, 2022 г.); Международном молодёжном научном форуме «Ломоносов-2023» (г. Москва, 2023 г.); Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодёжных учёных «Ломоносов-2024» (г. Москва, 2024 г.); XXII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Федеральная территория «Сириус», 2024 г.).

Результаты работы апробированы и внедрены ООО «Фирма Экотрак» для организации энергоресурсоэффективного процесса очистки сточных вод от малорастворимых соединений тяжёлых металлов методом электрофлотации, обессоливания сточных вод методом мембранного электролиза с получением кислоты и щёлочи и электрокоррекции рН растворов в процессах водоочистки с использованием новых нерастворимых анодных материалов на основе диоксида свинца, модифицированного TiO_2 .

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. **Ньеин Ч.М.**, Абакумов М.В., Касаткина В.В., Колесников А.В., Мазурова Д.В. Электроосаждение покрытий диоксида свинца из щелочных электролитов с композиционными добавками и анализ их структуры // Химическая промышленность сегодня. 2022. № 5. С. 24-33. (Chemical Abstracts)

2. **Ньеин Ч.М.**, Абакумов М.В., Рыкалина У.С., Бродский В.А., Колесников А.В. Исследование электрофлотационного извлечения тяжёлых металлов из модельных растворов с диоксид-свинцовым анодным материалом // Гальванотехника и обработка поверхности. 2023. Т. 31, № 2. С.21-29. (Chemical Abstracts)

3. **Ньеин Ч.М.**, Абакумов М.В., Колесников А.В., Бродский В.А. Утилизация солевых отходов методом электролиза с получением вторичных продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 96–103. (Scopus)

4. **Ньеин Ч.М.**, Абакумов М.В., Колесников А.В., Бродский В.А., Новиков В.Т. Исследование процесса обессоливания раствора сульфата натрия методом стационарного электролиза в трёхкамерном электролизёре // Химическая промышленность сегодня. 2023. № 4. С. 43-50. (Chemical Abstracts)

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

1. **Ньеин Ч.М.** Получение анодных покрытий из диоксида свинца введением в их структуру композиционных добавок / Ч.М. Ньеин, М.В. Абакумов, М.К. Исаев, А.В. Колесников // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022): сборник материалов Всероссийской научной

конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 18 – 20 апреля 2022 года. Том 4. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2022. – С. 177–180.

2. Касаткина В. В. Осаждение диоксида свинца из щелочного электролита с добавлением композиционных добавок / В.В. Касаткина, М.В. Абакумов, **Ч.М. Ньейн**, Д.В. Мазурова, А.В. Колесников // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: Сборник материалов IX Всероссийской конференции, посвященной 55-летию Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, 01 – 02 декабря 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2022. – 338 с. – С. 188–189.

3. **Ньейн Ч.М.** Получение новых анодных материалов на основе диоксида свинца с введением композиционных добавок в их структуру / Ч.М. Ньейн, М.В. Абакумов, В.А. Бродский, А.В. Колесников // Материалы Международного молодёжного научного форума «Ломоносов-2023» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2023. ISBN 978-5-317-06952-0.

4. Абакумов М.В. Переработка солевых техногенных отходов I-II классов опасности методом электролиза с получением вторичных продуктов / М.В. Абакумов, А.М. Мостовая, **Ч.М. Ньейн**, А.В. Колесников // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: Сборник материалов IX Всероссийской конференции, посвященной 55-летию Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, 01 – 02 декабря 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – 338 с. – С. 82–83.

5. Абакумов М. В. Усовершенствованная конструкция электролизёра фильтр-прессного типа для получения пероксида водорода электрохимическим методом / М.В. Абакумов, А.В. Колесников, В.А. Бродский, **Ч.М. Ньейн** // Материалы Международного молодёжного научного форума «Ломоносов-2023» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2023. ISBN 978-5-317-06952-0.

6. **Ньейн Ч.М.** Влияние состава среды на эффективность извлечения гидроксидов тяжелых металлов из сточных вод методом электрофлотации / Ч.М. Ньейн, В.А. Бродский // Материалы Международного молодёжного научного форума

«Ломоносов-2024» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова [Электронный ресурс]. – М.: ООО СИПНН Н.Д. Кондратьева, 2024. ISBN 978-5-901-64042-5.

7. **Ch. M. Nyein**, V. A. Brodsky, S. W. Jima, and C. Myo. Practical Application of Lead Dioxide Anode for Removal of Heavy Metals from Wastewater // *Advances in Ecology and Environmental Engineering: Proceedings of the 2nd International Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon-2024)*, Moscow, March 25 – 29, 2024. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2024. – 560 p. – P. 243-254.

8. **Ньеин Ч.М.** Влияние композиционных добавок на морфологию электрохимического диоксида свинца / Ч.М. Ньеин, М.В. Абакумов, М.К. Исаев, А.В. Колесников // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2022. – Т. 36, № 4 (253). – С. 107-109.

9. **Ньеин Ч.М.** Разработка и совершенствование технологии очистки сточных вод методом электрофлотации / Ч.М. Ньеин, В.А. Бродский // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023: Сборник докладов IV Национальной научной конференции*, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), 2024. – С. 592-596.

10. **Ньеин Ч.М.** Использование электрода на основе диоксида свинца в процессе обессоливания жидких техногенных отходов методом мембранного электролиза / Ч.М. Ньеин, В.А. Бродский // *Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: Сборник научных трудов по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции в рамках VI Всероссийского научно-общественного форума «Экологический форсайт»*, Саратов, 30 – 31 октября 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 2024. – С.85-89.

11. **Ньеин Ч.М.** Использование анодов на основе PbO_2 в процессе получения хлоратов натрия / Ч.М. Ньеин, Т.А. Хейн, В.А. Бродский, А.В. Перфильева // *XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии*, 7 – 12 октября, 2024, Федеральная территория «Сириус», Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. Том 2. – М.: ООО «Буки Веди», 2024. – 528 с. – ISBN 978-5-00202-666-1 [т. 2] – С.212.

12. Бродский В.А. Использование электродных материалов на основе PbO_2 допированных TiO_2 в качестве замены электродов ОРТА в электрофлотационном процессе / В.А. Бродский, **Ч.М. Ньеин**, С.В. Джима // *XXII Менделеевский съезд по*

общей и прикладной химии, 7 – 12 октября, 2024, Федеральная территория «Сириус», Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. Том 4. – М.: ООО «Буки Веди», 2024. – 324 с. – ISBN 978-5-00202-668-5 [т. 4] – С.104.

Патенты, полученные в ходе выполнения работы:

1. Патент на полезную модель № 222378 U1 Российская Федерация, МПК C25B 1/28, C25B 9/17. Фильтр-прессный электролизер для получения пероксодисерной кислоты: № 2023128706: заявка. 07.11.2023: опубл. 21.12.2023 / М. В. Абакумов, В. А. Бродский, Ч.М. Ньеин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии в части:

п. 3. Электрохимические, химические, физические и комбинированные методы обработки поверхностных материалов и нанесения покрытий. Гальванопластика и гальваностегия;

п. 4. Технология электрохимического синтеза органических и неорганических веществ, электролиза, электрорафинирования и электроэкстракции. Электромембранные и электрофорезные технологии;

п. 8. Экологические вопросы коррозии, противокоррозионных и электрохимических технологий. Очистка, регенерация, обезвреживание и утилизация отходов электрохимических производств и использование отходов в противокоррозионной технике.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Ньеин Чан Мое 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 Ньеин Чан Мое; 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: «Повышение энергоресурсоэффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ за счет создания новых электродных материалов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», состоявшемся «14» мая 2025 года, протокол №6.

В обсуждении приняли участие: к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой ТНВ и ЭП Колесников А.В., к.т.н., доцент, профессор кафедры ТНВ и ЭП Царькова Т.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры ТНВ и ЭП Конькова Т.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры ТНВ и ЭП Алёхина М.Б., д.х.н., профессор, профессор кафедры ТНВ и ЭП Либерман Е.Ю., д.х.н. профессор, профессор кафедры ТНВ и ЭП Попов А.Н., к.т.н., доцент кафедры ТНВ и ЭП Перфильева А.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры ТНВ и ЭП Морозов А.Н., к.т.н., доцент, доцент кафедры ТНВ и ЭП Нефёдова Н.В., к.х.н., доцент, доцент кафедры ТНВ и ЭП Поляков Н.А., к.х.н., доцент кафедры ТНВ и ЭП Панченко Н.В., к.х.н., доцент, доцент кафедры ТНВ и ЭП Бродский В.А., зав. лабораторией кафедры ТНВ и ЭП Исаев М. К.

Принимало участие в голосовании 12 человек.

Результаты голосования: «За» - 12 человек, «Против» - 0 человек, «Воздержались» - 0 человек, протокол № 6 от «14» мая 2025 г.

И.о. заведующего кафедрой ТНВ и ЭП
к.т.н., доцент

А.В. Колесников

Секретарь заседания

М.К. Исаев