

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и инновациям

ФГБОУ ВО «КНИТУ», д.т.н.

Гильмутдинов И.М.

» Май 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ») на диссертационную работу *Ньин Чан Мое* на тему: «Повышение энергоресурсоэффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ за счет создания новых электродных материалов», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии

Актуальность работы. В настоящее время отмечается интенсивное развитие электрохимических производств и, в частности, электрохимического синтеза неорганических веществ в развивающихся странах, к которым относится Республика Союз Мьянма. Существующие электрохимические технологии часто требуют значительных энергозатрат, а использование дефицитных и дорогостоящих материалов, таких как металлы платиновой группы, делает их экономически невыгодными. Продолжаются исследования, направленные на создание новых материалов электродов для электрохимических процессов, отличительной особенностью которых является простота и низкая стоимость изготовления, обусловленные применением доступных и недорогих материалов. В связи с этим, создание новых электродных материалов на основе диоксида свинца (PbO_2), модифицированного добавками TiO_2 , SnO_2 и других оксидов, и испытание этих материалов в качестве анодов в электрохимических процессах получения неорганических веществ, включая синтез гипохлорита натрия и хлората натрия, получения гидроксида натрия и серной кислоты, а также в процессах водоочистки методами электрофлотации и электрокоррекции pH, является *актуальной* научно-технической задачей.

Научная новизна результатов работы. 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. Показана возможность применения разработанного анодного материала на основе PbO₂ с добавкой TiO₂ 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. Получены новые данные о влиянии природы и концентрации фоновых солей (Na₂SO₄, NaCl, NaNO₃), углубляющие понимание влияния состава среды на перенапряжение анодных реакций на электродах на основе диоксида свинца.

Теоретическая значимость работы:

1. Установлены закономерности формирования покрытий PbO₂ из щелочных плюмбитных электролитов, определено влияние плотности тока, температуры и состава на их морфологию, прочность и адгезию.

2. Расширены теоретические представления о поведении модифицированных электродов на основе PbO₂ в процессах синтеза неорганических веществ – гипохлорита и хлората натрия, серной кислоты и гидроксида натрия, а также в процессах электрофлотации, электрокоррекции рН и мембранного электролиза.

3. Систематизированы механизмы деградации электродов PbO₂-TiO₂ 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.

4. Получены данные о влиянии природы и концентрации фоновых солей (Na₂SO₄, NaCl, NaNO₃) с концентрацией до 100 г/л, углубляющие понимание влияния состава среды на перенапряжение анодных реакций на электродах на основе диоксида свинца.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны технологические режимы процесса осаждения анодных покрытий на основе PbO₂ с добавкой TiO₂, 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.

2. Проанализировано влияние плотности тока и состава электролита на деградацию электродов PbO₂-TiO₂ в растворах Na₂SO₄, NaCl, NaNO₃, характерных для процессов электрохимического синтеза гипохлорита и хлората натрия, серной кислоты и щелочи, а также процессов электрофлотации, электрокоррекции рН и мембранного обессоливания.

3. Экономическая целесообразность применения разработанных анодных материалов на основе PbO₂-TiO₂ 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.

Обоснованность и достоверность основных положений, результатов и выводов диссертационной работы обусловлены применением современных физико-химических методов исследования, публикацией результатов исследований в журналах, индексируемых в международных базах цитирования и апробацией результатов работы на российских и международных конференциях.

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 16 работах, включая 4 статьи в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Chemical Abstracts, 12 тезисов докладов на конференциях. Получен 1 патент на полезную модель.

В работе применены многочисленные современные методы исследования. Так, для изучения морфологии покрытий использован метод сканирующей электронной микроскопии (JEOL 1610LV). Элементный состав был определен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (EDX-700). Твердость покрытий оценивали с использованием микротвердомера (DuraScan-70). Адгезионные свойства исследовали с помощью автоматического устройства PosiTest AT-A. Толщину покрытий измеряли с использованием тринокулярного микроскопа Levenhuk MED 40T. Анодные поляризационные кривые были получены с применением потенциостата IPC-Pro. Концентрацию ионов металлов в растворе определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Анализ содержания работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и одного приложения. Текст диссертации изложен на 233 страницах и включает 25 таблиц, 63 рисунка. Библиография насчитывает 190 источников.

Диссертационная работа по **содержанию и структуре** полностью отвечает требованиям к научно-квалификационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук по заявленной специальности.

Во введении кратко рассмотрены области применения покрытий на основе диоксида свинца, изложены актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, дана общая характеристика диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе представлен литературный обзор по теме исследования. Даны оценка и сравнение нерастворимых анодных материалов, применяемых в электрохимических процессах. Определены существующие и перспективные области применения свинцовых и диоксидно-свинцовых электродных материалов, в частности, в процессах получения гипохлорита и хлората натрия, мембранного обессоливания, электрофлотации и электрокоррекции pH растворов, и других процессах. Проведён обзор материалов для модифицирования электродов на основе диоксида свинца, отмечены плюсы и минусы различных модифицирующих добавок.

Во второй главе приведены объекты и методы исследования. Объектами исследований являлись диоксид-свинцовые покрытия, нанесенные из плумбитного электролита на подложки из различных материалов. Описаны методы получения покрытия на основе диоксида свинца, модифицированного различными добавками, методы исследования модифицированного покрытия диоксида свинца, в т.ч. методики проведения сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа, определения концентрации ионов металлов в модельных растворах методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) и др. Представлены методики и устройство установок для практического применения покрытий на основе диоксида свинца в процессах синтеза хлората и гипохлорита натрия, мембранного электролиза, электрофлотации и электрокоррекции рН растворов. Описаны подходы к определению устойчивости покрытий с использованием метода циклической вольтамперометрии (ЦВА).

В третьей главе приведены экспериментальные результаты и их обсуждение. Подобраны оптимальные условия для электроосаждения PbO_2 из щелочного электролита (1,0 н NaOH, PbO – до насыщения): анодная плотность 1–3 А/дм², температура 60 °С и перемешивание, добавка TiO_2 (0,5–1 г/л), ВТ (PbO_2) 98 %. Показано, что введение в электролит порошка оксида титана (TiO_2) значительно улучшает адгезионные свойства покрытия, показатель адгезии 0,7-1,0 МПа, твёрдость 369 НV. Была изучена эффективность использования анода из диоксида свинца в процессе электрохимического получения гипохлорита и хлората натрия с анодом на основе модифицированного диоксида свинца PbO_2-TiO_2 из минерального сырья «Галит». Сравнение процесса, проведённого с использованием электродов PbO_2-TiO_2 и ОРТА, позволило установить, что использование электродов PbO_2-TiO_2 в безмембранном электролизе с добавлением дихромата натрия позволяет достичь максимально возможного разделения продуктов электролиза и выделить наиболее ценный из них – $NaClO_3$ с выходом по току - ВТ 89 % (анодная плотность тока 1 А/дм²), ВТ $NaClO$ – 11 %.

Проведены исследования эффективности применения электродов на основе диоксида свинца, модифицированных диоксидом титана на титановой подложке (PbO_2-TiO_2), в процессе обессоливания жидких техногенных отходов методом мембранного электролиза в трёхкамерном электролизёре оригинальной конструкции (Патент на полезную модель № 222378 U1) с мембранами МК-40Л (катодная камера 5 г/л NaOH) и МА-41 (анодная камера, 5 г/л H_2SO_4). При концентрации соли 120 г/л достигались высокие выходы по продуктам электролиза. Максимальные значения ВТ NaOH (78 %) и H_2SO_4 (77 %) были зафиксированы при плотности тока 3 А/дм². Проведена оценка использования электрода на основе диоксида свинца, модифицированного оксидом титана в процессах электрофлотации и электрокоррекции рН, дана сравнительная оценка с анодом ОРТА. Дана оценка устойчивости анодов на основе модифицированного диоксида свинца (PbO_2-TiO_2) в условиях электрохимических процессов методом ЦВА в растворах Na_2SO_4 и NaCl. Показано, что электрод PbO_2-TiO_2 обладает наилучшими

электрохимическими характеристиками и стабильностью, что связано с улучшенными механическими свойствами.

В **заключении** отмечено, что электроды на основе $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ можно рекомендовать для использования в качестве дешёвой и простой в получении альтернативы дорогостоящим анодным материалам на основе металлов платиновой группы для различных электрохимических процессов с плотностью тока не выше 5 А/дм^2 , в том числе в электрофлотационном процессе, процессе получения гипохлорита и хлората натрия, процессах обессоливания и электрокоррекции pH. Аноды на основе $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ могут заменить анод ОРТА, что в некоторых случаях приводит к повышению выхода целевых продуктов и экономической эффективности процессов в целом.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту научной специальности 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 электроэкстракции. Электромембранные и электрофорезные технологии; п. 8. Экологические вопросы коррозии, противокоррозионных и электрохимических технологий. Очистка, регенерация, обезвреживание и утилизация отходов электрохимических производств и использование противокоррозионной техники. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

В то же время по диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Диссертантом предложены электроды на основе PbO_2 для очистки сточных вод от тяжелых металлов (электрофлотация), электрокоррекции pH природных и техногенных вод, получения гипохлорита натрия. В разделе 3.8 показана потеря массы данного электрода при всех исследованных процессах. Однако, концентрация Pb^{2+} в обработанных растворах не измерена и не обсуждена, хотя ПДК свинца в питьевой воде составляет $0,01 \text{ мг/л}$ (СанПиН 1.2.3685-21). Экологические аспекты утилизации PbO_2 -электродов также не рассмотрены.

2. В тексте диссертации отсутствуют указания на количество параллельных экспериментов, не представлены значения стандартного отклонения или доверительного интервала, отсутствует оценка погрешности или неопределенности измерений. Автор делает выводы о преимуществах предлагаемого электрода $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ перед ОРТА на основании результатов единичных измерений, различия между которыми нередко составляют единицы процентов, т.е. в пределах типичной экспериментальной погрешности.

3. Термин «энергоресурсоэффективность», вынесенный в заголовок работы, не определен, его критерии не сформулированы. Сравнение энергопотребления (раздел 3.9) показывает сопоставимые значения для $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ и ОРТА.

4. Автор неоднократно утверждает, что покрытия из щелочного электролита формируются «преимущественно в α -модификации» PbO_2 , и обсуждает различия свойств α - и β - PbO_2 (литобзор, раздел 3.1). Однако XRD-анализ не описан в экспериментальной части работы. Заявленный в преамбуле раздела 2.2 (с.70) «рентгенофазовый анализ» на проверку оказывается рентгенофлуоресцентным (с.74), т.е. элементным, а не фазовым.

5. Положения, выносимые автором на защиту, в большинстве случаев таковыми не являются. Приведенные диссертантом под эгидой положений высказывания представляют собой либо описание результата исследования, либо действия, или наименование раздела работы.

6. Ряд пунктов, содержащих элементы новизны, помещен в раздел «Практическая значимость» (новые данные о влиянии фоновых солей, систематизация механизмов деградации электродов).

7. В тексте диссертации обнаруживаются ошибки и стилистические неточности, в некоторых случаях, по-видимому, связанные с машинным переводом и генерацией текста искусственным интеллектом.

Приведенные замечания не затрагивают основные результаты работы и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Диссертационная работа обладает актуальностью, достоверностью, научной новизной, теоретической и практической значимостью результатов. Выводы работы достоверны и подтверждены экспериментальными данными, полученными автором самостоятельно.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации, являющейся завершённой научно-квалификационной работой, в которой получен большой объём новых данных, посвящённых разработке и испытаниям анодов на основе диоксида свинца PbO_2 , модифицированных диоксидами титана и олова, в различных электрохимических процессах, в т.ч. при синтезе гипохлорита натрия и хлората натрия, получении гидроксида натрия и серной кислоты, электрокоррекции pH растворов, а также в процессах очистки сточных вод и высококонцентрированных растворов электролитов от ионов тяжёлых металлов с использованием метода электрофлотации.

Заключение по диссертационной работе. Диссертационная работа Ньеин Чан Мое на тему «Повышение энергоресурсоэффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ за счет создания новых электродных материалов» представляет собой завершённое научное исследование, обладающее научной новизной, теоретической и практической значимостью, выполненное на хорошем уровне по актуальной теме, связанной с повышением эффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ за счет создания и применения новых электродов на основе диоксида свинца, модифицированного диоксидами титана и олова.

Диссертационное исследование Ньеин Чан Мое отвечает 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. Автор исследования, Ньейн Чан Мое, заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Диссертация, автореферат и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Аналитической химии, сертификации и менеджмента качества» (АХСМК) ФГБОУ ВО «КНИТУ» (протокол № 13 от 14 мая 2026 г.).

Отзыв подготовили

Профессор кафедры
«Аналитической химии,
сертификации и менеджмента
качества» (АХСМК), д.х.н.,
профессор (02.00.05 –
Электрохимия)

 /Дресвянников Александр Федорович

ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
420015, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68
Рабочий e-mail, рабочий телефон: alfedr@kstu.ru, +7(843) 231-43-71


Профессор кафедры
«Аналитической химии,
сертификации и менеджмента
качества» (АХСМК), д.х.н.,
доцент (02.00.04 – Физическая
химия)

 /Колпаков Михаил Евгеньевич

ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
420015, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68
Рабочий e-mail, рабочий телефон: kolpme@kstu.ru, +7(843) 231-43-71

Подписи А.Ф. Дресвянникова, М.И. Колпакова удостоверяю.
Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО «КНИТУ»
14.05.2026 г.



 И.А. Загидуллина