

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

На правах рукописи



**НЬЕИН ЧАН МОЕ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПОЛУЧЕНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ  
ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

2.6.9. Технология электрохимических процессов  
и защита от коррозии

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре технологии неорганических веществ и электрохимических процессов ФБГОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

Научный руководитель:

кандидат химических наук, доцент **Бродский Владимир Александрович**, доцент кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, ФБГОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор **Ольшанская Любовь Николаевна**, ФБГОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность».

кандидат химических наук, **Ботрякова Инна Геннадьевна**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, старший научный сотрудник, Лаборатория поверхностных слоёв.

**Ведущая организация** - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).

Защита состоится «03» июня 2026 г. в 11.00 час. на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.07 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., 9, аудитория 443 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева, а также на официальном сайте [https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse\\_announcements/](https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/).

Автореферат диссертации разослан «29» апреля 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного Совета РХТУ.2.6.07  
Кандидат технических наук, доцент



Чуднова Т. А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

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 низковольтных 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.

### **Степень разработанности темы.**

Технология получения электродов из диоксида свинца достигла значительного прогресса благодаря развитию методов электроосаждения и модификации материалов. Такие научные исследования ранее проводились в ведущих научных школах Греции, Китая, США, Германии. В СССР и РФ основные работы велись в ГОСНИИХЛОПРОЕКТ, а также такими учёными, как В.И. Щепкина, В.Г. Михайленко, А.В. Антонов и другими. В МХТИ им. Д.И. Менделеева – под руководством Н.Г. Бахчисарайцян. Однако для того, чтобы определить возможность использования электрода из диоксида свинца в различных электрохимических процессах и разработать масштабируемую технологию производства электродов для предприятий России и других стран, необходимо получить новые данные и выявить новые закономерности электрохимического поведения анодов для всех электрохимических процессов, в которых предполагается их использование, в том числе производстве гипохлорита натрия и хлората натрия, гидроксида натрия и серной кислоты, очистке сточных вод методом электрофлотации, электрокоррекции рН и т.д.

**Цель работы.** Разработка новых электродных материалов на основе диоксида свинца для улучшения энергоресурсоэффективности электрохимических процессов получения неорганических веществ и процессов очистки сточных вод методом электрофлотации.

**Задачи работы:**

1. Выбрать подходящий электролит и подложку для нанесения покрытий из диоксида свинца, обладающих повышенной устойчивостью в электрохимических процессах в качестве анодных материалов.

2. Оптимизировать параметры получения покрытий из диоксида свинца на титановой подложке из щелочного плюмбитного электролита (1н NaOH, PbO до насыщения) с добавлением порошков TiO<sub>2</sub> и SnO<sub>2</sub>.

3. Провести анализ физико-химических свойств электродных материалов на основе PbO<sub>2</sub>, модифицированных добавками порошков TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, с подложками из различных материалов (титан, нержавеющая сталь, свинец).

4. Провести экспериментальные исследования поведения анодов на основе PbO<sub>2</sub> в низкотоковых (до 5 А/дм<sup>2</sup>) процессах электрохимического получения неорганических веществ на примере гипохлорита и хлората натрия, процессах электрофлотационного извлечения малорастворимых соединений металлов из растворов электролитов, электрокоррекции рН, мембранного обессоливания с целью получения гидроксида натрия и серной кислоты.

5. Провести испытания устойчивости анодного материала на основе PbO<sub>2</sub> в исследуемых электрохимических процессах.

**Научная новизна:**

1. Впервые установлена возможность использования модифицированных электродных материалов на основе PbO<sub>2</sub> с добавкой TiO<sub>2</sub> 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/дм<sup>2</sup>.

2. Показана возможность использования разработанного анодного материала на основе PbO<sub>2</sub> с добавкой TiO<sub>2</sub> 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:**

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 рН 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 рН 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/дм<sup>2</sup>.

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/дм<sup>2</sup>.

### **Методология и методы исследования.**

В данной работе применены современные методы исследования, направленные на оптимизацию процесса осаждения покрытий из диоксида свинца и анализ физико-химических свойств полученных покрытий. 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 спектрометрии, а концентрацию получаемых продуктов – методом титрования. Для оценки изменения массы использовали методы утрат массы и длительных погружений.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Оптимизация электрохимического процесса получения электродов на основе PbO<sub>2</sub>: Оптимизированы параметры процесса электроосаждения PbO<sub>2</sub> (ток, температура, модифицирующие добавки) для улучшения структуры и прочности покрытия. Осуществлён подбор оптимального материала основы для электроосаждения диоксида свинца (титан ВТ-1-00).

2. Электрохимический синтез NaClO/NaClO<sub>3</sub>: определены оптимальные технологические параметры проведения процесса, позволяющие получать наиболее ценный продукт NaClO<sub>3</sub> с ВТ 89% (анодная плотность тока 1 А/дм<sup>2</sup>, безмембранный электролиз с дихроматом натрия).

3. Электролиз Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с получением NaOH и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: определена оптимальная плотность тока для процесса мембранного электролиза Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ВТ (NaOH) 78%, ВТ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – 77%, анодная и катодная плотность тока 3 А/дм<sup>2</sup>)

4. Экологические процессы (водоочистка методом электрофлотации и электрокоррекция рН): эффективность процессов электрофлотации и электрокоррекции рН при использовании в электролизёрах анодов на основе PbO<sub>2</sub> превышает эффективность процессов с использованием электролизёров с анодами ОРТА при низких плотностях тока

(до 0,1 А/л), что связано с низким перенапряжением анодных реакций на электродах на основе  $\text{PbO}_2$ .

5. Модифицирование электродов  $\text{PbO}_2$ : впервые выявлены различия в морфологии, составе и механических свойствах (адгезии покрытия к основе и твёрдость покрытия) электродов на основе  $\text{PbO}_2$  при их модификации порошками  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$  и др., а также при использовании различных материалов в качестве основы (нержавеющая сталь, свинец, титан). Подобраны материалы с лучшей адгезией покрытия к основе и твёрдостью –  $\text{PbO}_2$  модифицированный  $\text{TiO}_2$ .

6. Проведены испытания на устойчивость электродных материалов на основе  $\text{PbO}_2$ - $\text{TiO}_2$  на титановой подложке в различных электрохимических процессах методом ЦВА и испытания в процессах электрохимического синтеза хлората и гипохлорита натрия, обессоливания, электрофлотации и электрокоррекции рН при анодной плотности тока 0,4-5 А/дм<sup>2</sup>, продолжительность испытаний 600 часов. Показано, что электродные материалы устойчивы в растворах  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaNO}_3$  с концентрацией до 100 г/л, и могут быть использованы вместо электродов ОРТА.

**Личный вклад автора.** Автор самостоятельно определил актуальность темы, сформировал основные цели и задачи работы. Все этапы экспериментальных исследований, сбора, обработки и аналитической интерпретации данных выполнены автором лично. Проведен детализированный анализ полученных данных, разработаны рекомендации и предложены пути практического применения результатов исследования. Все разделы диссертации, включая обзор литературы, методологическую и экспериментальную части, выводы и обсуждения, написаны непосредственно автором.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлены на конференциях: 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.).

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 16 работах, включая 4 статьи, изданных в журналах, входящих в перечни Scopus и Chemical Abstracts, 12 тезисов докладов на конференциях. Получен 1 патент.

**Объем и структура диссертации.** Научное исследование изложено на 233 страницах машинописного текста и включает 25 таблиц, 63 рисунка. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и одного приложения. Библиография насчитывает 190 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрены данные о роли основных компонентов плюмбитных растворов, влиянии предварительной подготовки поверхности металла перед электроосаждением и режима процесса на свойства покрытий. Проведено сравнение нерастворимых анодов, проанализированы области их применения и легирующие материалы. Рассмотрено применение низкоизнашиваемого анода из диоксида свинца на титановой основе; технологические условия электроосаждения диоксида свинца. На основе анализа литературы определены цели исследования.

**Во второй главе** представлено описание объектов и методов исследования. Объектами исследований являлись диоксид-свинцовые покрытия, нанесенные из плюмбитного электролита на подложке из титана (марки ВТ-1-00).

Для подготовки поверхности титановых пластинок ВТ-1-00 к нанесению покрытия, была проведена предварительная обработка наждачной бумагой (марки Р400) необходимая для улучшения адгезии диоксида свинца ( $PbO_2$ ). После этого титановую основу травили в растворе азотной и плавиковой кислот (2:1) в течение 15–30 секунд при комнатной температуре и тщательно промывали водой. Неактивные участки электрода покрывали устойчивым к химическим воздействиям лаком (цапон, бесцветный) перед нанесением основного покрытия. Размер электродов для всех исследуемых процессов 55 мм x 65 мм x 1 мм, для исследований методом ЦВА 10 мм x 10 мм x 1 мм.

Щелочной плюмбитный электролит приготавливали химическим растворением свежесажённого гидроксида свинца  $Pb(OH)_2$  в горячем растворе  $NaOH$  ( $80-90^\circ C$ ). Гидроксид свинца получали взаимодействием эквивалентных количеств  $Pb(NO_3)_2$  (хч) и  $NaOH$ . Осадки  $Pb(OH)_2$  очищали от нитрат-ионов трёхкратной декантацией дистиллированной водой для улучшения качества покрытий. Анодные покрытия наносили методом электролиза в стеклянной ванне объёмом 0,1 литра (электролит = 40 г/л  $NaOH$ ,  $PbO_2$  до насыщения,  $t = 60^\circ C$ ,  $i_v = 1 \text{ А/дм}^2$ ,  $\tau = 2 \text{ ч. } 45 \text{ мин.}$ ) с циркуляционной рубашкой для поддержания стабильной температуры с помощью термостата LOIP LT-308. В качестве анодов использовали титан ВТ-1-00, нержавеющую сталь СТ 08Х18Н10Т, свинец, никель, а катодами служили никелевые пластины размером  $55 \times 65 \times 1 \text{ мм}$ . Электролит перемешивался мешалкой MSH-300, а электрический ток подавался с помощью источника КА3005D. Модифицирование электродов композиционными добавками  $TiO_2$  и  $SnO_2$  осуществлялось путем введения в электролит порошков оксидов металлов (1г/л) с диаметром гранул  $TiO_2$  5-10 мкм (марка о.с.ч, ТУ 6-09-3811-79),  $SnO_2$  10-30 мкм, а остаток на сите №028 - не более 1% (марка ч.д.а. ТУ 2611-013-0020506, ГОСТ 22516-77).

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты и их обсуждение. Микрофотографии поверхностей покрытий  $PbO_2$  на титановой основе без добавок и с добавками 1 г/л  $TiO_2$  и  $SnO_2$ , полученные методом сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 1.

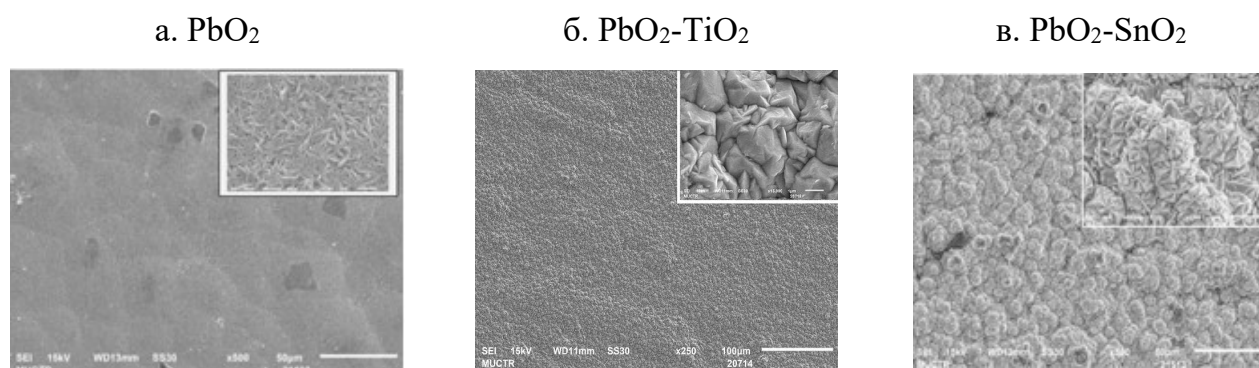


Рисунок 1 – Фотографии поверхностей покрытий  $PbO_2$  без добавок, с добавками 1 г/л,  $TiO_2$  и  $SnO_2$  полученные при  $1 \text{ А/дм}^2$ ,  $T = 60^\circ C$ , основа - пластины  $Ti$ . Увеличение: 500 (большая фотография), 15000 (маленькая фотография)

На фотографиях поверхностей покрытий отсутствуют изломы, что свидетельствует о небольшом внутреннем напряжении осадков  $PbO_2$  на поверхности титана. Покрытие, полученные из электролитов с введением с добавками  $TiO_2$  и  $SnO_2$  имеет другое строение поверхности. Она более крупнозернистая с более плотным прилеганием зерен размера частиц. Данные РФА для покрытий  $PbO_2$  на титановой основе приведены в таблице 1. Экспериментальные данные согласуются с полученными микрофотографиями поверхностей, т. к. при получении покрытий  $PbO_2$  с добавками  $TiO_2$  и  $SnO_2$ , олово и титан входят в состав покрытия и изменяют структуру получаемого осадка  $PbO_2$ . По-видимому, олово и титан содержатся в структуре осадка в виде самостоятельной дисперсной фазы  $TiO_2$  и  $SnO_2$ . При добавлении  $TiO_2$  осадок получается более крупнокристаллическим, с плотным прилеганием зёрен, хорошей адгезией с основой (0,7-1,0МПа) и повышенной твердостью (среднее значение 369 HV) за счет развитой микроструктуры. В отличие от этого, модификация оксидом олова ( $SnO_2$ ) приводит к нестабильной адгезии ( $PbO_2-SnO_2$ ) с широким диапазоном значений (0,25-0,64 МПа), что указывает на неоднородность структуры материала.

Таблица 1 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа электроосаждённого покрытия  $PbO_2$  с добавками  $TiO_2$  и  $SnO_2$  на титановой основе

Элемент	Pb, %	O, %	Sn, %	Ti, %
Без добавок	77,71	16,34	-	-
$TiO_2$ (1 г/л)	73,19	18,11	-	<b>2,13</b>
$SnO_2$ (1 г/л)	70,80	19,38	<b>2,41</b>	-

С целью определения перенапряжения анодных реакций, проведено сравнение анодных поляризационных кривых (ПК) (снятие ПК без компенсации омических потерь) в растворах сульфата натрия ( $Na_2SO_4$ ) и хлорида натрия ( $NaCl$ ) с концентрацией 100 г/л. В качестве электродных материалов использовались аноды из диоксида свинца ( $PbO_2$ ), как без добавок, так и модифицированные оксидами титана и олова. Для сравнения представлены поляризационные кривые, снятые на ОРТА (рисунок 2).

Установлено, что в растворе 100 г/л  $Na_2SO_4$  при достижении анодного потенциала  $> + 1900$  мВ скорость реакции выделения кислорода на аноде  $PbO_2-TiO_2$  становится выше, чем на ОРТА (рис. 2а). Для прикладных областей применения электролиза, таких как электрофлотация, где применяются анодные плотности тока выше 30  $mA/cm^2$  анод на

основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  оказывается предпочтительнее ОРТА. Анализ суммарных Анодных поляризационных кривых (АПК) разряда кислорода и хлора (рисунок 2б) показал, что при малых плотностях тока перенапряжение на аноде ОРТА ниже, по сравнению с другими образцами. По достижении анодного потенциала  $> + 1900$  мВ скорость совместной реакции выделения кислорода и хлора на аноде  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  становится выше, чем на ОРТА. Следует отметить, что в высококонцентрированных растворах  $\text{NaCl}$  (100 г/л), анод на основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  предпочтительнее анода ОРТА при анодных плотностях тока выше  $110 \text{ mA/cm}^2$ . При этом в менее концентрированных растворах  $\text{NaCl}$  (1-10 г/л) электроды  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  предпочтительнее при плотностях тока выше  $12 \text{ mA/cm}^2$ , при 50 г/л – выше  $80 \text{ mA/cm}^2$ .

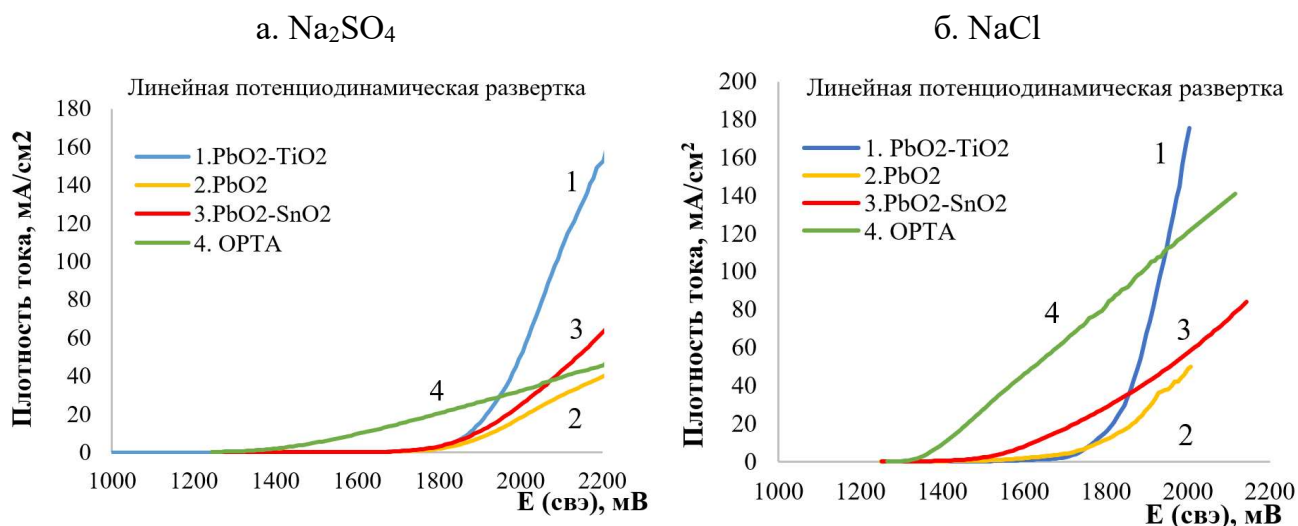


Рисунок 2 – Анодные поляризационные кривые ( $V_{\text{развёртки}} = 200 \text{ мВ/с}$ ), снятые на электродах на основе  $\text{PbO}_2$  и ОРТА в растворах 100 г/л  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (а) и  $\text{NaCl}$  (б)

Были проведены исследования, направленные на определение возможности использования разработанных электродных материалов в процессах электрофлотационной очистки сточных вод. Установлено влияние объемной плотности тока и состава среды (солевой фон) на степень извлечения малорастворимых соединений меди (II), цинка (II) и никеля (II) в составе трехкомпонентной системы из водных растворов (рисунок 3). Анодный материал -  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ ,  $\tau = 5$  мин. Исследование проводилось в растворах сульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) и нитрата натрия ( $\text{NaNO}_3$ ). Концентрация солей – от 1 г/л до 100 г/л. Объемная плотность тока 0,1; 0,4; 0,8  $\text{A/дм}^3$ , суммарная концентрация металлов 100 мг/л, массовое соотношение 1:1:1.

Из рисунка 3 видно, что при низкой концентрации ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 1 \text{ г/л}$ ) наблюдается максимальная суммарная эффективность извлечения (92–97%) при всех исследованных плотностях тока. При более высокой концентрации  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (100 г/л) эффективность извлечения значительно снижалась.

При концентрации  $\text{NaCl}$  -100 г/л электрофлотационный процесс показал высокую эффективность при умеренном токе (94% при 0,4 А/л), при более высоком токе эффективность процесса снизилась из-за снижения выхода по току кислорода в результате побочной реакции выделения хлора.

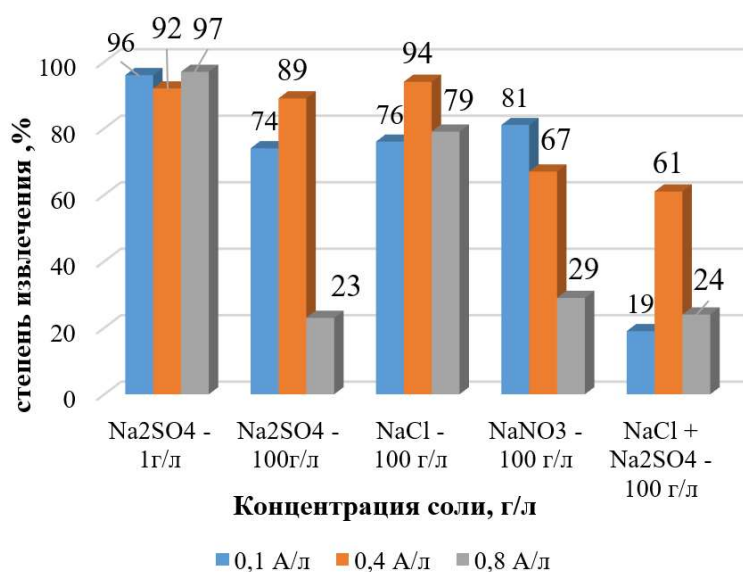


Рисунок 3 – Влияние  $i_{об}$  и природы фонового раствора на среднее арифметическое значение степени извлечения малорастворимых соединений  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Zn}$  на аноде  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  ( $\tau = 5$  мин),  $C_{\Sigma\text{Me}} = 100 \text{ мг/л}$ ,  $[\text{Cu}]:[\text{Ni}]:[\text{Zn}] = 1:1:1$ ,  $i_{об} \text{ (А/л)} = 0,1, 0,4, 0,8$ ;  $i_a \text{ (А/дм}^2\text{)} = 1, 2, 4$

В присутствии  $\text{NaNO}_3$  электрофлотационный процесс наименее эффективен в результате подавления катодного процесса выделения водорода. Электрофлотационный процесс в смеси солей  $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$  протекает неэффективно, что обусловлено протеканием побочных реакций с участием хлорид-ионов и повышенным перенапряжением выделения кислорода. В целом, результаты показывают, что как состав электролита, так и плотность тока существенно влияют на извлечение малорастворимых соединений металлов методом электрофлотации с электродами на основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ . Наиболее благоприятные условия обеспечиваются в растворах 1 г/л  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , что характерно для промывных вод промышленных предприятий.

Была изучена эффективность использования анода из диоксида свинца в процессе электрохимического получения гипохлорита и хлората с анодом на основе модифицированного диоксида свинца  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  из минерального сырья «Галит».

На рисунке 4 продемонстрировано, что максимальный выход по току гипохлорита натрия (45%) наблюдается при анодной плотности 5 А/дм<sup>2</sup>, а хлората натрия – 89% при 1 А/дм<sup>2</sup> в безмембранном электролизе с добавлением дихромата натрия. Дихромат натрия способствует большей селективности процесса в результате затруднения электровосстановления продуктов электролиза на катоде и смещая кинетику электрохимических процессов в сторону образования хлорат-ионов.

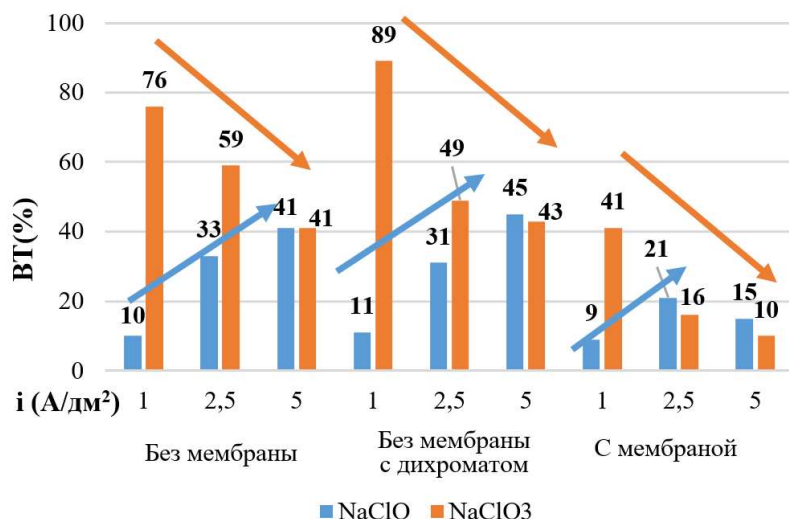


Рисунок 4 – Зависимость ВТ (%) NaClO и NaClO<sub>3</sub> от анодной плотности тока при проведении электролиза в различных условиях. Анод - PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>.

$i_a = 1, 2,5, 5$  А/дм<sup>2</sup>,  $V_{\text{электролита}} = 500$  мл,  $V_{\text{анолита и католита}} = 250$  мл (с мембраной), NaCl = 200 г/л, катод - СТ 08Х18Н10Т

Сравнение процесса, проведённого с использованием электродов PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> и ОРТА позволило установить, что использование электродов PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> в безмембранном электролизе с добавлением дихромата натрия позволяет достичь максимально возможного разделения продуктов электролиза и выделить наиболее ценный из них - NaClO<sub>3</sub> с ВТ 89% (анодная плотность тока 1 А/дм<sup>2</sup>), ВТ NaClO – 11%. В аналогичных условиях с электродом ОРТА ВТ NaClO<sub>3</sub> не превышает 63%, NaClO – 45%.

Проведена оценка использования электрода на основе диоксида свинца, модифицированного оксидом титана в процессах электрокоррекции рН и обессоливания жидких техногенных отходов методом мембранного электролиза.

В ходе электрокоррекции рН использовали модельные растворы с различной концентрацией солей Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl и NaNO<sub>3</sub> (10 г/л, 50 г/л и 150 г/л). Эксперименты были проведены в диафрагменном электрокорректоре, обеспечивающем эффективное разделение анодной и катодной областей. В течение 30 минут через раствор пропускали электрический ток ( $i = 1$  А/дм<sup>2</sup>) и измеряли значения рН. На рисунке 5 (а) и (б) представлены диаграммы изменений рН.

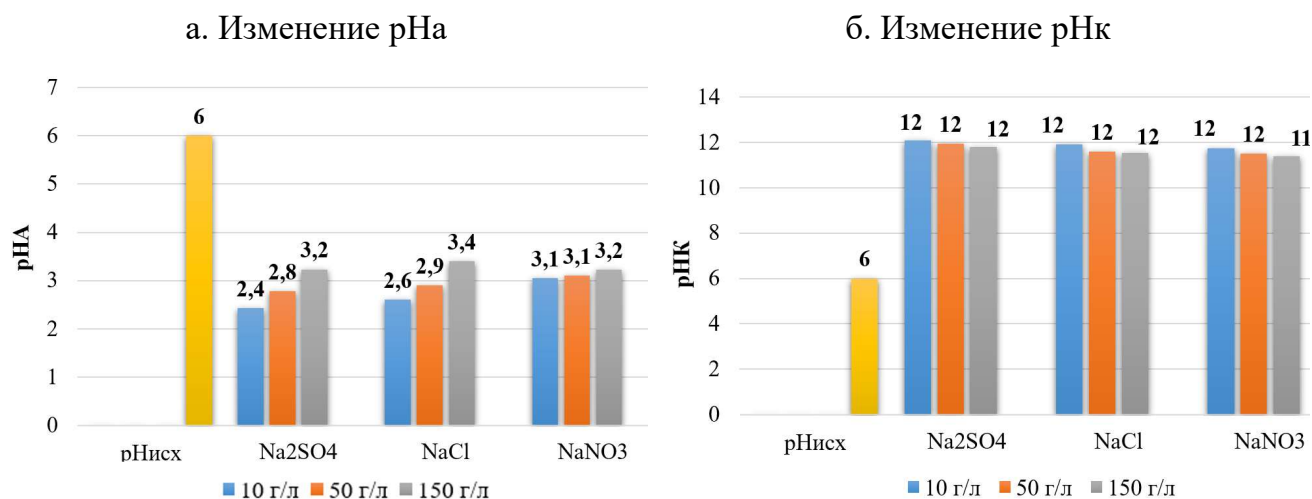


Рисунок 5 – Сравнения влияния концентрации электролита на изменение pHa (а) и pНк (б) с использованием анода PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> ( $i = 1 \text{ А/дм}^2$ ,  $\tau = 30 \text{ мин}$ )

Установлено, что вне зависимости от природы солей, в катодной области pH за 30 минут возрастает с 6 ед до 11-12 ед, в анодной области падает до 2,5 - 3,5 ед.

Проведены исследования эффективности применения электродов на основе диоксида свинца, модифицированных диоксидом титана на титановой подложке (PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>), 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Были проведены серии экспериментов с использованием раствора сульфата натрия Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (40, 120 г/л, центральная камера) при различных плотностях тока. Изучено влияние изменения анодной плотности тока на выход по току основных продуктов электролиза – NaOH и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Выход по току обоих продуктов определяли методом кислотно-основного титрования по индикатору фенолфталеину.

При концентрации соли 120 г/л достигались высокие выходы по продуктам электролиза (таблица 2). Максимальные значения ВТ NaOH (78%) и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (77%) были зафиксированы при плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup>. Таким образом, электрод из диоксида свинца, модифицированного диоксидом титана на титановой подложке PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> является потенциально эффективным для процессов обессоливания жидких отходов, особенно при низких анодных плотностях тока, что снижает общие энергозатраты процесса.

Таблица 2 – Результаты мембранного электролиза раствора Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (120 г/л)

$i_a$ , A/дм <sup>2</sup>	$U_y$ , В	$t$ , °С	ВТ(NaOH), %	ВТ(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), %	$\tau$ , ч
1,0	6,4	22	74	65	2,5
2,0	9	25	77	75	2,5
3,0	10,2	30	78	77	2,5

Примечание:  $i_a$  – анодная плотность тока, A/дм<sup>2</sup>;  $U_y$  – напряжение на электролизёре, В;  $t$  – температура раствора, °С; ВТ – выход по току;  $\tau$  – время проведения электролиза, ч.

Была проведена оценка устойчивости анодов на основе модифицированного диоксида свинца (PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>) в условиях электрохимических процессов получения неорганических веществ и обессоливания, электрофлотации и электрокоррекции pH (рисунок 6). Измерения потери толщины покрытия проводились при различных плотностях тока, соответствующих технологическим режимам исследованных процессов. Исходная толщина покрытий 190-210 мкм.

Получение NaClO и NaClO<sub>3</sub>:

$C_{\Sigma NaCl}$ (галит) = 200 г/л, pH = 6,5

Обессоливание (получ. NaOH и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):

$C_{\Sigma Na_2SO_4}$  = 120 г/л, pH = 10

Электрокоррекция pH:

$C_{\Sigma NaCl}$  = 100 г/л, pH = 6,5

Электрокоррекция pH:

$C_{\Sigma Na_2SO_4}$  = 100 г/л, pH = 6,5

Электрокоррекция pH:

$C_{\Sigma NaNO_3}$  = 100 г/л, pH = 6,5

Электрофлотация:  $C(Cu^{2+}-Ni^{2+}-Zn^{2+})$  =

100 мг/л, NaCl = 100 г/л, pH = 10

Электрофлотация:  $C(Cu^{2+}-Ni^{2+}-Zn^{2+})$  =

100 мг/л, NaNO<sub>3</sub> = 100 г/л, pH = 10

Электрофлотация:  $C(Cu^{2+}-Ni^{2+}-Zn^{2+})$  =

100 мг/л, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 100 г/л, pH = 10

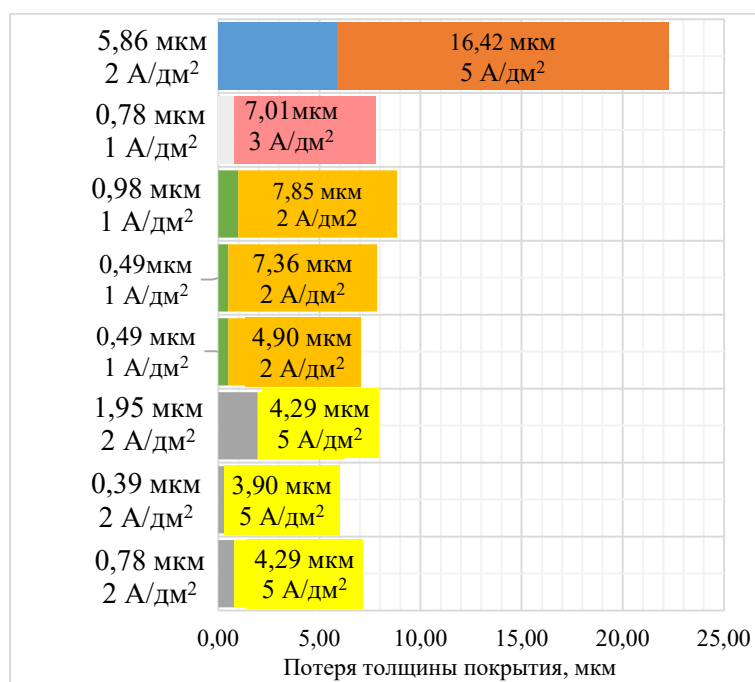


Рисунок 6 – Изменение толщины покрытия PbO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> испытанный в различных электрохимических процессах.  $\tau_{\Sigma}$  – 600 ч. (300 ч. при  $i_{\min}$  + 300 ч. при  $i_{\max}$ )

Суммарная продолжительность испытаний 600 часов для каждого электрохимического процесса. Вначале процесс проводился 300 часов при низкой плотности тока, потом 300 часов при высокой. Согласно данным рисунка 6 можно сделать следующие выводы об устойчивости разработанного анодного материала в различных электрохимических процессах.

1. Электрофлотация:  $C_{\Sigma Me}(Cu^{2+}-Ni^{2+}-Zn^{2+}) = 100$  мг/л, pH = 10,. Сравнительный анализ потерь покрытия в средах с различными солями ( $Na_2SO_4$ ,  $NaNO_3$ ,  $NaCl$  при одинаковой концентрации 100 г/л) показал наибольшую агрессивность хлоридной среды. Это согласуется с известной способностью ионов хлора ускорять процессы анодного растворения и провоцировать образование активных форм хлора, что, в свою очередь, усиливает деградацию и разрушение покрытия. Минимальные потери массы покрытия были зафиксированы при использовании нитратной среды ( $NaNO_3$ ).

2. Электрокоррекция pH (pH = 6,5,  $C_{соли} = 100$  г/л). Потери покрытия в этом процессе оставались относительно низкими при плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup>, но при увеличении до 2 А/дм<sup>2</sup> различия между средами становятся более выраженными. Наименьшая стойкость, как и при исследовании процесса электрофлотации, была отмечена в хлоридной среде. При использовании  $Na_2SO_4$  наблюдалась относительно стабильная картина с умеренными потерями. В присутствии  $NaNO_3$  наблюдалось значительное усиление коррозии с увеличением плотности тока.

3. Обессоливание (pH = 10,  $C_{Na_2SO_4} = 120$  г/л). При обессоливании в сульфатной среде с высокой концентрацией солей были зафиксированы умеренные потери покрытия даже при изменении плотности тока с 1 до 3 А/дм<sup>2</sup>. Это подчеркивает относительно низкое воздействие сульфатов на материал электродов и подтверждает их применимость при длительной эксплуатации оборудования.

4. Получение гипохлорита и хлората натрия (pH = 6,5,  $C_{NaCl} = 200$  г/л). Процесс сопровождается наиболее выраженной коррозией, особенно при максимальной плотности тока (5 А/дм<sup>2</sup>). Высокое содержание хлоридов, а также образование активных форм хлора и других окислителей приводит к интенсивному разрушению электрода.

Представлены сравнительные результаты коррозионных испытаний трёх электродов на основе диоксида свинца  $PbO_2$ ,  $PbO_2-TiO_2$  и  $PbO_2-SnO_2$ , проведенных с использованием циклической вольтамперометрии (ЦВА). Исследованы два раствора ( $Na_2SO_4$ ,  $NaCl$ ) в которых проводились циклические вольтамперометрические испытания. Основное внимание уделено изменению анодного и катодного токов, а также устойчивости материала при многократном циклировании. В обоих электролитах наблюдается устойчивое поведение  $PbO_2$ , модифицированного оксидом титана в диапазоне потенциалов до ~2000–2500 мВ. Отсутствие значительных изменений между 1-м и 50-м проходами указывает на относительную стабильность материала в этих

условиях. Слабо выраженный или отсутствующий катодный пик восстановления  $\text{PbO}_2$  свидетельствует о незначительной деградации электрода.

На рисунке 7 проведён сравнительный анализ испытаний полученных электродов на коррозионную стойкость методом ЦВА в 1 М растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Чистый  $\text{PbO}_2$  демонстрирует высокую активность, но его характеристики ухудшаются при длительном циклировании. Электрод  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  обладает наилучшими электрохимическими характеристиками и стабильностью, что связано с улучшенными механическими свойствами. В то же время добавление  $\text{SnO}_2$  к  $\text{PbO}_2$  приводит к незначительному снижению активности, но значительно улучшает стабильность, замедляя деградацию. Таким образом, электрод  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  удовлетворителен с точки зрения требований к активности и долговечности. Электрод  $\text{PbO}_2\text{-SnO}_2$  стабилен, а чистый  $\text{PbO}_2$  не рекомендуется для длительного использования в электрохимических процессах.

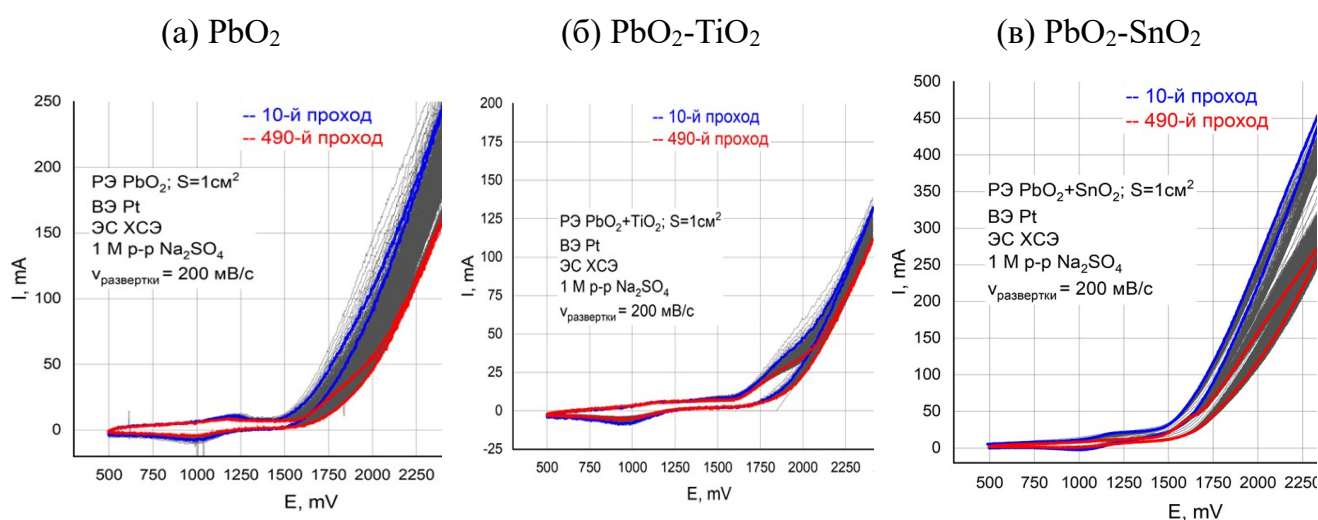


Рисунок 7 – Циклические вольтамперограммы, на электродах: а -  $\text{PbO}_2$ , б -  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ , в -  $\text{PbO}_2\text{-SnO}_2$  в 1 М растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $V = 200$  мВ/с,  $\tau = 180$  мин, ВЭ=Pt, ЭС=ХСЭ)

Проведена оценка энергопотребление для основных рассмотренных электрохимических процессов при использовании анодов  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  и ОРТА (таблица 3). Следует отметить, что использование разработанных анодов в процессе обессоливания методом мембранного электролиза, а также в процессе получения  $\text{NaClO}$  и  $\text{NaClO}_3$  безмембранным методом в присутствии дихромата натрия позволяет снизить энергопотребления процессов по сравнению с использованием электродов ОРТА.

Таблица 3 – Сравнение энергопотребления электрохимических процессов при использовании анодов  $PbO_2-TiO_2$  и ОРТА

Процесс	Соли, (г/л)	$U_y, В$			$\tau$ , мин	Энергия, кВт·ч( $\cdot 10^{-5}$ )		
		PbO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> / ОРТА				PbO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> / ОРТА		
$i_a, А/дм^2$		0,5	2	4	15	0,5	2	4
Электрофлотация	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (100)	3/2,8	3,7/3,7	4,4/4,7		4,6/4,3	22,7/22,7	53,9/ 57,6
	NaCl (100)	2,6/2,5	3,1/3	3,5/3,5		3,9/3,8	18,9/18,4	42,9/ 42,9
	NaNO <sub>3</sub> (100)	2,7/2,6	3,3/3,1	4/3,7		4,1/3,9	20,2/18,9	49/45
$i_a, А/дм^2$		1	2,5	5	30	1	2,5	5
Получение NaClO и NaClO <sub>3</sub>	NaCl (200) б/м <sup>1</sup>	2,9/2,9	3,6/3,6	4,5/4,6		52/52	162/162	405/ 414
	NaCl (200) мем <sup>2</sup>	3,1/3,5	4,1/4	5,3/5,5	53/63	185/180	477/ 495	
$i_a, А/дм^2$		1	2	3	150	1	2	3
Обессоливание	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : (20, 120)	7,8/9,4	15,2/18,7	20,1/24		702/846	2736/ 3366	5427/ 6480
		6,4/6,7	9/9	10,2/11		576/603	1620/ 1620	2754/ 2970

Примечание: площадь анодов 0,0036 м<sup>2</sup>; 1 – безмембранный электролиз; 2 – мембранный электролиз

Приведены укрупнённые технико-экономические показатели получения электродов  $PbO_2-TiO_2$  по сравнению с электродом ОРТА в ценах 2025 г. (таблица 4).

Таблица 4 – Укрупнённые технико-экономические показатели получения электродов  $PbO_2-TiO_2$  и ОРТА.

№	Материал	Толщина	PbO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub>	ОРТА
			Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , тыс. руб	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , тыс. руб
1	Ti-основа (BT1-0)	3 мм	10	10
2	98% PbO <sub>2</sub> + 2% TiO <sub>2</sub>	0,2 мм	17,512	-
	65% TiO <sub>2</sub> + 35% RuO <sub>2</sub>	0,2 мм	-	250,50
Всего за 1 м <sup>2</sup>			27,512	260,50

Показано, что стоимость получения электродных материалов на основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  ниже стоимости электрода ОРТА приблизительно в 10 раз. Материалы, применяемые для получения электродов, являются доступными, процесс изготовления прост. При этом, электрохимическое поведение анодов во многом схоже. Это делает разработанный электродный материал перспективным для использования в развивающихся странах, в частности, в Республике Союз Мьянма, с учётом выбранных областей применения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения научного исследования получены основные экспериментальные результаты, характеризующие процесс электроосаждения покрытий диоксида свинца из щелочных электролитов с композиционными добавками ( $\text{TiO}_2$  и  $\text{SnO}_2$ ). Показано, что электроды на основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  можно рекомендовать для использования в качестве дешёвой и простой в получении альтернативы дорогостоящих анодных материалов на основе металлов платиновой группы для различных электрохимических процессов с плотностью тока не выше  $5 \text{ А/дм}^2$ , в том числе в электрофлотационном процессе, процессе 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  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  могут заменить анод ОРТА, что в некоторых случаях приводит к повышению выхода целевых продуктов и экономической эффективности процессов в целом.

В дальнейшем проведение научных исследований планируется в части расширения перечня электрохимических процессов, в которых допустимо использование разработанных электродов, а также перечня модифицирующих добавок для электродов на основе  $\text{PbO}_2$ , в т.ч.:  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и т.д.

### Выводы:

1. Подобраны оптимальные условия для электроосаждения  $\text{PbO}_2$  из щелочного электролита (1 н  $\text{NaOH}$ ,  $\text{PbO}$  – до насыщения): анодная плотность  $1 - 3 \text{ А/дм}^2$ , температура  $60^\circ\text{C}$  и перемешивание добавка  $\text{TiO}_2$  (0,5–1 г/л), ВТ ( $\text{PbO}_2$ ) 98%. Модификация диоксида свинца оксидом титана ( $\text{TiO}_2$ ) значительно улучшает адгезионные свойства покрытия

( $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ ), обеспечивая стабильно высокие показатели адгезии (0,7-1,0 МПа) и твёрдости (369 HV).

2. Изучены закономерности электрофлотационного извлечения труднорастворимых соединений цинка, меди и никеля из концентрированных растворов в электрофлотаторе с анодами на основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$ . Фоновые соли влияют на скорость и эффективность процесса: комбинация хлорида и сульфата натрия суммарной концентрацией 100 г/л резко снижает степень извлечения металлов в диапазоне объёмных плотностей тока 0,1-0,8 А/л. В растворах, содержащих ионы  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{NO}_3^-$  наиболее эффективно процесс электрофлотации протекает при объёмных плотностях тока 0,1 и 0,4 А/л. Показано, в рабочих интервалах плотностей тока (0,1 и 0,4 А/л) и концентрациях солевого фона ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{NaCl}$ ) до 50 г/л, перенапряжение анодных реакций на электроде  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  ниже, чем на ОРТА, что способствует повышению газонасыщения раствора.

3. Процесс электрохимического синтеза гипохлорита и хлората натрия с анодами на основе  $\text{PbO}_2\text{-TiO}_2$  позволяет получить продукты с высоким ВТ и провести их разделение за счёт использования безмембранного электролиза с добавлением дихромата натрия. Выход по току  $\text{NaClO}_3$  достигает 89% (анодная плотность тока 1 А/дм<sup>2</sup>).

4. Установлен оптимальный диапазон мембранной плотности тока для проведения электролиза процесса обессоливания раствора 120 г/л  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : 1 – 3 А/дм<sup>2</sup>. Средний выход по току  $\text{NaOH}$  в трёхкамерном мембранном электролизёре с мембраной МК-40Л составил около 76% (катодная камера), а средний выход по току  $\text{H}_2\text{SO}_4$  на мембране МА-41 – 72% (анодная камера).

5. Анод на основе  $\text{PbO}_2$  с добавлением  $\text{TiO}_2$  демонстрирует существенное преимущество в себестоимости по сравнению с ОРТА – его производство обходится почти в 10 раз дешевле. При этом энергозатраты на электроосаждение покрытия минимальны. Использование разработанных электродных материалов позволяет повысить энергоэффективность электрохимических процессов, в частности, процессов мембранного обессоливания и получения гипохлорита и хлората натрия в широком диапазоне анодных плотностей тока.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

### 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 электродиализа 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 электродиализа 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. Ньеин, 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. Ньеин Ч.М. Получение новых анодных материалов на основе диоксида свинца с введением композиционных добавок в их структуру / Ч.М. Ньеин, 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. Ньеин, 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. Ньеин // *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. Ньеин Ч.М. Влияние состава среды на эффективность извлечения гидроксидов тяжелых металлов из сточных вод методом электрофлотации / Ч.М. Ньеин, В.А. Бродский // *Материалы Международного молодежного 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 имени 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 С25В 1/28, С25В 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».