

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева –  
Satbayev University

Горно-металлургический институт имени О.А.Байконурова  
Кафедра химические процессы и промышленная экология

Кенжалиева Ризана Курмангазыевна

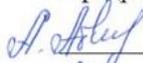
**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра

Название диссертации “Установление закономерностей  
процессов, протекающих на аноде магниевых аккумуляторов”  
Направление подготовки 7M07143 -ХТНВ

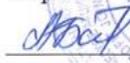
Научный руководитель:  
PhD, ассоц. Профессор

кафедры ХПиПЭ

 Абельдина А.К.  
 2024

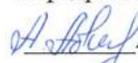
Рецензент

Ст.преподаватель кафедры  
физической химии, катализа и  
нефтехимии КазНУ имени Аль-  
Фараби

 Батырбаева А.А.  
 2024

Нормоконтроль

PhD, ассоц. Профессор  
кафедры ХПиПЭ

 Абельдина А.К.  
 2024

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой  
ХПиПЭ

 Кубекова Ш.Н.  
 2024

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени К.И.САТПАЕВА

Горно-металлургический институт имени О.А.Байконурова  
Кафедра химические процессы и промышленная экология  
7М07143 -Химическая технология неорганических веществ

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой ХПиПЭ

 Кубекова Ш.Н.

17 июня 2024

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Кенжалиевой Ризане Курмангазыевне

Тема: “Установление закономерностей процессов, протекающих на аноде магниевых аккумуляторов”

Утверждена приказом Ректора Университета №408-пот 23 ноября2022г

Срок сдачи законченной диссертации “25” июня 2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Перспективы магниевых аккумуляторов. Раскрытие их возможностей и анализ существующих проблем.
- б) Применение методов для создания электрода на основе висмута интеркалирующие ионы магния
- в)Проведение анализа имеющихся наработок и подведение итогов

Рекомендуемая основная литература:

- 1) Su S. et al. A novel rechargeable battery with a magnesium anode, a titanium dioxide cathode, and a magnesium borohydride/tetraglyme electrolyte //Chemical communications. – 2015. – Т. 51. – №. 13. – С. 2641-2644.
- 2) Yao, Y.Y.; Zhan, Y.; Sun, X.Y.; Li, Z.; Xu, H.; Laine, R.M.; Zou, J.X. Advances in Cathodes for High-Performance Magnesium-Sulfur Batteries: A Critical Review. Batteries 2023, 9, 203. <https://doi.org/10.3390/batteries9040203>
- 3) Li Z. et al. Cathode materials and chemistries for magnesium batteries: challenges and opportunities //Advanced Energy Materials. – 2023. – Т. 13. – №. 27. – С. 2300682.

## ГРАФИК

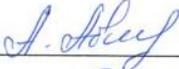
Подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Сбор и изучение научной литературы по теме	Ноябрь 2023	
Проведение лабораторных работ	Февраль 2024	
Анализ данных	Март 2024	

## Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	PhD, ассоц. Профессор кафедры ХПИПЭ Абильдина А.К.		

Научный руководитель  Абильдина А.К.  
Задание принял к исполнению магистрант  Кенжалиева Р.К.  
Дата " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 г.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева – Satbayev University

Горно-металлургический институт имени О.А.Байконурова

Кафедра химические процессы и промышленная экология

**Установление закономерностей процессов, протекающих на аноде  
магниевого аккумулятора**

(научная исследовательская работа студента)

*Выполнила магистрант 2-го года обучения:*

Кенжалиева Р.К.

*Научный руководитель:*

PhD, ассоц. профессор кафедры ХПиПЭ

Абильдина А.К.

Алматы 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	10
1 Основная часть .....	12
1.1 Возобновляемые источники энергии.....	12
1.2 Аккумуляторы и ХИТ.....	15
1.3 Магниевые батареи.....	24
2 Объекты и методы исследований.....	30
2.1 Аппараты и материалы.....	30
2.2 Химикаты и реагенты.....	37
2.3 Методика.....	38
3 Результаты и обсуждение.....	43
4 Заключение.....	56
5 Список литературы.....	57

## **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия

ВИЭ- возобновляемые источники энергии

КПД-коэффициент полезного действия

АБ- аккумуляторные батареи

ХИТ-химический источник тока

КЭ- кулоновская эффективность

RMB-rechargeable magnesium batteries

## **Аннотация**

В данной работе были созданы электроды на основе висмута интеркалирующие ионы магния. Материалом для осаждения является медная пластинка. Рассмотрены свойства электродов, описание основных результатов лабораторных исследований с их дальнейшим анализом. Систематизированы подходы при создании электродов с подбором оптимальных условий и получении наилучших результатов. Были проведены анализы полученных проб и на основании результатов сделаны выводы. Результаты исследования имеют большое практическое значение и могут быть использованы для: разработки новых высокоэффективных магниевых аккумуляторов, создания новых материалов для магниевых аккумуляторов, оптимизации параметров работы магниевых аккумуляторов.

## **Annotation**

In this work, bismuth-based electrodes were created that intercalate magnesium ions. The material for deposition is a copper plate. The properties of the electrodes, a description of the main results of laboratory studies with their further analysis are considered. Systematized approaches to creating electrodes with the selection of optimal conditions and obtaining the best results. Analyzes of the obtained samples were carried out and conclusions were drawn based on the results. The results of the study are of great practical importance and can be used for: developing new highly efficient magnesium batteries, creating new materials for magnesium batteries, optimizing the operating parameters of magnesium batteries.

## АҢДАТПА

Бұл жұмыста магний иондарын интеркаляциялайтын висмут негізіндегі электродтар жасалды. Тұндыруға арналған материал мыс пластина болып табылады. Электродтардың қасиеттері, олардың әрі қарай талдауымен зертханалық зерттеулердің негізгі нәтижелерінің сипаттамасы қарастырылады. Оңтайлы жағдайларды таңдау және ең жақсы нәтижелерді алу арқылы электродтарды құрудың жүйеленген тәсілдері. Алынған үлгілерге талдаулар жүргізілді және нәтижелер бойынша қорытындылар жасалды. Зерттеу нәтижелерінің практикалық маңызы зор және олар: жаңа жоғары тиімді магний батареяларын жасау, магний батареялары үшін жаңа материалдарды жасау, жұмыс режимін оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін. магний батареяларының параметрлері.

## ВВЕДЕНИЕ

*Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы*

В настоящее время в мире Li-ion аккумуляторы являются самым популярным типом аккумуляторных батарей который широко распространён в современной бытовой электронной технике на данный момент. Они имеют свои преимущества, но также не лишены недостатков. Различные факторы влияют на их работу [1].

Основные недостатки Li-ion-аккумуляторов включают в себя обязательную установку защитной схемы, что увеличивает их себестоимость. Эта схема регулирует напряжение и токи подзарядки и разряда для каждого элемента аккумулятора, также обеспечивает защиту от слишком низкого напряжения в процессе разряда и контролирует температуру. Старение Li-ion-аккумуляторов происходит даже при неактивном использовании, приводя к уменьшению емкости спустя год и частой непригодности аккумулятора для использования через два-три года. Для замедления процесса старения рекомендуется хранить аккумулятор заряженным на 40% в прохладном месте, отдельно от устройства. Сравнительно высокая стоимость Li-ion-аккумуляторов по сравнению с NiCd-аккумуляторами также является одним из их недостатков [2].

К числу перспективных альтернативных разрабатываемых аккумуляторных систем относятся магний-ионные аккумуляторы(МИА)[3].

Основание и исходные данные для разработки темы

Магниевые аккумуляторы привлекли значительное внимание как перспективные накопители энергии благодаря своей высокой удельной емкости, низкой стоимости и экологичности. Однако, несмотря на многочисленные исследования, механизмы, лежащие в основе процессов, происходящих на аноде магниевых батарей, до сих пор недостаточно изучены. Анод является одним из ключевых компонентов аккумуляторов, поскольку на нем происходит электрохимическое восстановление магния. Понимание этих процессов имеет решающее значение для оптимизации характеристик аккумуляторов, таких как ёмкость, срок службы и безопасность.

#### Актуальность темы

Актуальность данной темы заключается в том, что магниевые аккумуляторы являются перспективным объектом исследований в области энергосбережения и разработки экологически чистых источников энергии. В связи с постоянно растущим спросом на устройства с высокой энергоемкостью, такие как мобильные устройства, электромобили и накопители энергии, разработка и совершенствование магниевых батарей является основной задачей. Установление стандартов на процессы, происходящие на анодах магниевых аккумуляторов, является ключевым шагом на пути повышения эффективности этих устройств, увеличения их емкости и срока службы. Изучение и понимание процессов, происходящих на аноде, позволяет оптимизировать механическое состояние батареи. В рамках минимальных достижений развития и перехода к низкоуглеродной экономике исследования в области магниевых аккумуляторов имеют большое значение для создания более эффективных и экологически чистых источников энергии. Таким образом, диссертационные исследования по установлению закономерностей процессов в аноде магниевых аккумуляторов открывают новые перспективы развития современных энергоемких технологий и позволяют решить актуальные проблемы в области энергетики и электрохимии. Работа (выполнена по Грантовому финансированию: AP15473167).

**Цель работы:** Исследование процессов интеркаляции/деинтеркаляции на висмутовый электродный материал для получения анода магний-ионных батарей.

#### **Задачи исследования:**

1. Синтез анодного интеркаляционного материала на основе висмута;
2. Оптимизация условий получения электродного материала двумя способами из различных электролитов в различных условиях;
3. Исследование морфологических, структурных характеристик, а также элементного состава поверхности электрода;
4. Внедрение ионов магния в синтезированный электрод для получения анода вторичных химических источников тока;
5. Исследование электрохимических свойств анодного материала.

#### **Объект исследования:**

Висмутовый электрод интеркалированный ионами магния

# 1.ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ И ПАТЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

## 1.1Возобновляемые источники энергии

Энергия из возобновляемых источников - это энергия, получаемая из непрерывных природных процессов на Земле, а также из энергетических ресурсов, происходящих от продуктов жизнедеятельности растительных и животных сообществ. Одной из ключевых особенностей возобновляемых источников энергии является их неограниченность или способность быстро восстанавливать свой потенциал в течение жизни одного поколения. Обычно к этим источникам относят солнечное излучение, ветер, водные потоки, биомассу, тепловую энергию верхних слоев земной коры и океанов [4].

Основные достоинства ВИЭ:

- повсеместная распространенность большинства видов на Земле;
- неограниченность ресурсов (потенциала); – доступность для использования;
- энергия, получаемая от возобновляемых источников, бесплатная;
- отсутствие потребности в воде (солнечные и ветроэлектростанции);
- отсутствие вредных выбросов (экологическая чистота);
- при их использовании сохраняется тепловой баланс на Земле;
- возможность использования земель, не приспособленных [5];

Источники возобновляемой энергии могут быть разделены на несколько категорий в зависимости от типа производимой энергии:

1. Энергия движения, включая силу ветра и водных потоков;
2. Тепловая и световая энергия, генерируемая солнечным светом и земным теплом;
3. Химическая энергия, содержащаяся в органических материалах, таких как биомасса [4].

Солнце — это первоисточник жизненной энергии для Земли. Продолжительность солнечного света является ключевым параметром, характеризующим солнечное излучение. Солнечное излучение разделяется на три области коротковолнового излучения:

- ультрафиолетовое излучение с длиной волны  $< 0,4$  мкм – 9% интенсивности;
- электромагнитное (видимое) излучение с длиной волны, находящейся в пределах  $0,4 < 0,7$  мкм – 45% интенсивности;
- инфракрасное излучение с длиной волны  $> 0,7$  мкм – 46% интенсивности.

Солнечное излучение, достигающее земной поверхности, можно разделить на две основные категории: прямое и диффузное. Прямое солнечное излучение исходит непосредственно от солнечной поверхности и достигает Земли без значительного рассеивания. Интенсивность прямого солнечного света определяется прозрачностью атмосферы, углом подъема солнца над горизонтом, который варьируется в зависимости от географической широты и времени суток, а также ориентацией поверхности относительно солнечных лучей. Диффузное солнечное излучение происходит, когда прямые солнечные лучи рассеиваются в верхних слоях атмосферы. Этот процесс рассеивания зависит от взаимодействия солнечных лучей с земной поверхностью и атмосферными условиями. В результате многократного отражения между снежным покровом и облаками, интенсивность диффузного излучения может быть значительной [5].

Производство электричества с использованием фотоэлектрических элементов основывается на фотовольтаическом эффекте. Этот эффект возникает в полупроводниковых материалах при облучении их солнечным светом, что приводит к генерации электрического тока. Гелиотермальная энергетика включает в себя процессы нагрева поверхностей, которые поглощают солнечные лучи, и последующего распределения и использования полученного тепла [6].

Использование энергии ветра является одним из ключевых направлений в области возобновляемых источников энергии. Этот метод основан на трансформации кинетической энергии, которую несут в себе воздушные потоки в атмосфере, в различные виды энергии, такие как электрическая, механическая или тепловая, которые затем могут быть использованы в быту и промышленности. В качестве технических средств для преобразования энергии ветра применяют такие установки, как ветрогенераторы для получения электрической энергии, ветряные мельницы для преобразования в механическую энергию, паруса для использования в транспортных средствах и др [7]. Как правило ветровые турбины стоят на высоте 80 метров, трубчатые стальные башни поддерживают ступицу с тремя прикрепленными лопастями и «гондолой», в которой размещены вал, коробка передач, генератор и органы управления. Типичная современная турбина начинает вырабатывать электричество, когда скорость ветра достигает 6-9 миль/ч (9,6-14,5 км/ч). Турбина будет отключена, если ветер дует слишком сильно (примерно 88 км/ч), чтобы предотвратить повреждение оборудования. В течение года современные турбины могут генерировать полезное количество электроэнергии более чем в 90 процентах случаев [8]. Конструкция электрогенератора такова: электроустановка состоит из ротора с лопастями, которые преобразовывают кинетическую энергию ветра во вращательную, дальше идёт редуктор, задача которого заключается в повышении скорости вала, потом следует генератор, преобразующий полученную энергию в электрическую. Так же в состав электроустановки входят флюгер и анемометр, их задача собирать информацию о ветре и направлять лопасти в направлении максимальной силы

ветра; башня, которая нужна, чтобы поднять ветрогенератор на достаточную высоту, и трансформатор, преобразующий напряжение [9]. Чем быстрее вращается вал генератора, тем выше напряжение, больше сила тока и больше энергии вырабатывает агрегат. Система накапливает электричество. Аккумуляторы заряжаются, а затем энергию использует потребитель (установка катодной защиты). При этом должны учитываться климатические условия, мощность ветрогенератора и мощность потребителя должны быть сбалансированы. Для решения задачи можно использовать комбинированные альтернативные энергетические схемы. Например, установить рядом солнечные батареи. Тогда вся полученная энергия поступает в аккумуляторы, при этом система генерирует энергию в любую погоду, что может обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии для станций катодной защиты [10].

Биомасса охватывает всю органику, произведенную живыми организмами, как растительными, так и животными. Она подразделяется на две основные категории: первичную, включающую непосредственно живые организмы, и вторичную, состоящую из остатков и побочных продуктов их жизнедеятельности.

Вторичная биомасса делится на:

- Первичные отходы: Это материалы, оставшиеся после обработки первичной биомассы, такие как солома, листья, опилки, и другие органические остатки.
- Вторичные отходы: Это продукты, выделяемые животными и людьми в процессе их жизнедеятельности.

Общий вес биомассы на Земле достигает примерно 2423 миллиардов тонн. Человечество вносит в этот объем лишь небольшой вклад, составляющий около 350 миллионов тонн в живом весе, или приблизительно 100 миллионов тонн в пересчете на сухую массу, что является сравнительно малой долей от общего количества биомассы на планете. Основное количество биомассы нашей планеты находится в лесных массивах. На континентах доминируют растения, тогда как в морских глубинах и в земной коре преобладают животные и микроорганизмы. Тем не менее, темпы увеличения биомассы в морских экосистемах значительно выше, чем на суше.

Оборот биомассы: Если рассмотреть прирост биомассы к уже имеющейся массе, то получаются такие показатели:

- Древесная растительность лесов - 1,8 %
- Растительность лугов, степей, пашни - 67 %
- Комплекс растений озёр и рек - 14 %
- Морской фитопланктон - 15 %

В качестве альтернативы ископаемым видам топлива, первичная биомасса находит применение в энергетике, особенно в форме топлива из отходов лесозаготовок и сельского хозяйства, таких как солома и сено. Энергетическая ценность сухой древесины весьма значительна, достигая в среднем 20 ГДж/т, в то время как теплотворность пшеничной соломы составляет приблизительно 17,4 ГДж/т. Сжигание биомассы считается процессом, не увеличивающим концентрацию углекислого газа в атмосфере, поскольку растения в процессе фотосинтеза поглощают CO<sub>2</sub>, который затем высвобождается при их сгорании. Таким образом, лесные насаждения и энергетические культуры служат источниками энергии, не способствующими накоплению углекислого газа в атмосфере. Растения, растущие на суше и в водной среде, представляют собой первичную биомассу, которая формируется благодаря фотосинтезу — процессу, преобразующему солнечную энергию в химическую энергию, накапливаемую в растительной массе. Фотосинтез характеризуется энергетическим КПД около 5%, что влечет за собой различную продуктивность растений в зависимости от их вида и климатических условий их произрастания [11].

Как мы можем заметить из всех перечисленных источников энергии основную роль занимает накопитель образуемой энергии а точнее тока. Без правильного накопителя возможность использования собранной будет более сложным. За счет накопителей мы сможем полностью раскрыть потенциал ВИЭ.

## **1.2 Аккумуляторы и ХИТ**

Аккумулятор – это устройство, предназначенное для сохранения электрической энергии, причем энергия в этом устройстве хранится в химической форме. Принцип работы аккумулятора заключается в том, что два металла находятся в растворе кислоты и одновременно генерируют электричество. Аккумуляторы характеризуются подобными ключевыми характеристиками, как: емкость, внутреннее сопротивление, ток саморазряда, время службы [12].

Емкость аккумулятора - количество энергии, которое может быть сохранено в аккумуляторной батарее (АБ), называется ее емкостью. Она измеряется в ампер-часах. Одна АБ емкостью 100 Ач может питать нагрузку током 1А в течение 100 часов, или током 4А в течение 25 часов, и т.д., хотя емкость батареи снижается при увеличении разрядного тока. На рынке продаются батареи емкостью от 1 до 2000 Ач [13].

Внутреннее сопротивление также является достаточно значительным параметром аккумулятора. Единица внутреннего сопротивления — миллиом (МОм). Сопротивление, в свою очередь, зависит от емкости одного компонента аккумулятора, числа этих ячеек, типа аккумулятора, срока службы и условий эксплуатации. Внутреннее сопротивление определяется с помощью анализаторов. По мере службы аккумулятора сопротивление мало-помалу увеличивается. Если аккумулятор обладает сопротивлением целых 500 Ом, то можно сделать вывод, что он очень старый или просто использовался неправильно [12].

Батареи делятся на два вида: гальванические (одноразовые) и аккумуляторные (многозарядные). Первые используются при работе с не мощной техникой (детские игрушки, часы, пульты), вторые применяются в более мощных приборах (фототехника, аккумуляторы мобильных телефонов, ноутбуков). Среди аккумуляторных батарей наиболее часто используют никель-кадмиевые, однако среди их недостатков можно отметить высокую массу и большой размер, кроме того, они относительно быстро выходят из строя. Также в промышленности популярны современные литий-ионные батареи, которые имеют меньший вес, больший срок службы, однако стоят дороже и выходят из строя при низких температурах, в отличие от никель-кадмиевых [1]. Следует отметить тот факт, что все виды батарей являются токсичными для объектов окружающей среды [14].

Классификация химических источников тока представлена на (рис 1)

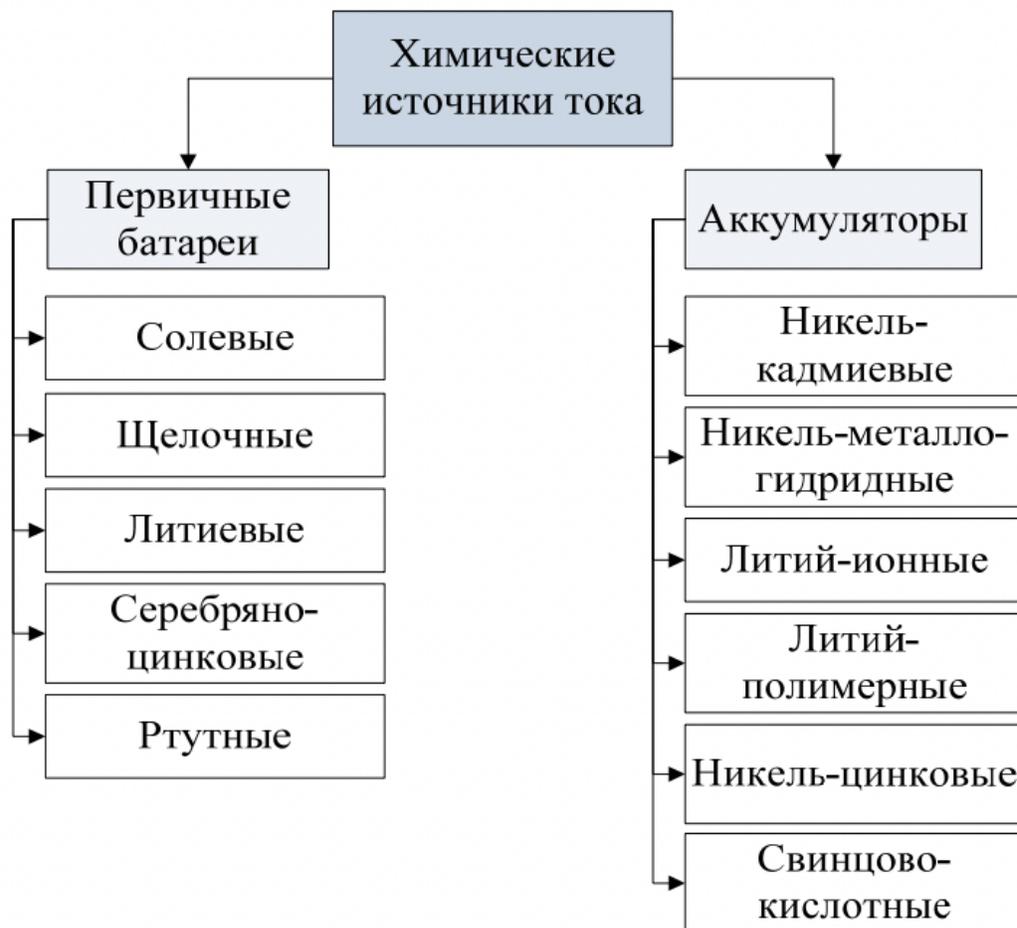


Рисунок 1-классификация химических источников тока [15]

Батареиные модули для электрораздаточных средств предназначаются для комплектации батарей, которые используются в качестве источников энергии для электрических транспортных средств, машин с электрическим приводом, подъемно-

транспортного оборудования и электрических дорожных средств. Характерной особенностью эксплуатации батарейных модулей является постоянная нагрузка, и часто батареи подвергаются ежедневному циклу зарядки и разрядки при использовании. Аккумуляторные блоки, применяемые на станциях и подстанциях для оперативного постоянного тока, то есть как источники питания на объектах энергетики и связи, называются стационарными аккумуляторами [16].

В целях стандартизации, были созданы глобальные стандарты для ХИТ, которые классифицируют источники энергии согласно их физическим характеристикам и химическому составу. Международная электротехническая комиссия (МЭК) организует классификацию химических источников энергии на основе их формы, размера и электрохимической системы. Стандартные обозначения первичных ХИТ определяются на основании цифр (число последовательно соединенных элементов, типоразмер) и букв (электрохимическая система). Например, на батарее указана следующая маркировка: LR20. Первая буква обозначает электрохимическую систему (совокупность активных веществ и электролита, на основе которых создан химический источник тока):

первичные ХИТ: L – для щелочных батарей, S – для серебряно:цинковых, C – для литиевых и первая буква отсутствует – для солевых батарей;

вторичные ХИТ: K – для никель:кадмиевых аккумуляторов, H – для никель:металлогидридного, SR – для серебряно: цинкового аккумулятора.

Вторая буква определяет форму: R – цилиндрическая, F – плоская, S – призматическая. Цифровое значение указывает на: ра: диус (размер) источника питания в миллиметрах. В обозначениях ХИТ могут указываться варианты исполнения: S – со стандартной емкостью, C – с повышенной емкостью (на 20–25 % выше, чем у S) и P – с большей мощностью (по сравнению с мощностью C и S при емкости, примерно равной емкости варианта C) [15].

Свинцово-кислотные аккумуляторы:

Основой функционирования свинцово-кислотных батарей являются электрохимические процессы между свинцом на катоде и диоксидом свинца на аноде, происходящие в среде серной кислоты. Когда к электродам батареи подсоединяется нагрузка, запускается реакция, в ходе которой происходит взаимодействие диоксида свинца с серной кислотой, в результате чего свинец превращается в сульфат свинца, что характерно для традиционных аккумуляторов [17]. В свинцовых аккумуляторах протекает множество реакций, число которых превышает 60. Однако ключевая реакция, которая лежит в основе процессов зарядки и разрядки, и соответствует теории двойной сульфатации, может быть представлена следующим образом:



Это уравнение демонстрирует, как при заряде и разряде аккумулятора свинец и диоксид свинца взаимодействуют с серной кислотой, образуя сульфат свинца и воду. Эти

процессы обратимы, что позволяет аккумулятору многократно накапливать и отдавать энергию.

Сульфат свинца который образуется на катоде и аноде во время разряда аккумулятора и отличается низкой растворимостью, является ключевым продуктом реакции, что и послужило основанием для названия процесса как теории двойной сульфатации. Во время зарядки аккумулятора происходит обратный процесс: из сульфатов, находящихся на электродах, серная кислота высвобождается обратно в электролит, что приводит к увеличению плотности электролита и напряжения батареи. Под конец процесса зарядки, особенно при высоком токе и критических концентрациях сульфата свинца, может происходить электролиз воды, в результате которого у катода образуется водород, а у анода - кислород [18].

#### Никель-кадмиевые аккумуляторы:

Никель-кадмиевые батареи состоят из следующих компонентов: корпус с никелевым покрытием, наборы анодных и катодных пластин, шайбы из эбонита и разделители из пластика. Анодные пластины включают в себя гидроксид никеля, который служит активным веществом, а также лепестковый никель и графит для улучшения проводимости. В процессе использования батареи гидроксид никеля преобразуется в чистый никель. Катодные пластины сформированы из стальных оснований, содержащих активное вещество, состоящее из порошка кадмия и его оксидов, которое при разряде превращается в гидроксид кадмия. На тяговом подвижном составе никель-кадмиевые аккумуляторы выполняют две функции: электроснабжение при выходе из строя вспомогательных преобразователей и питание низковольтных цепей управления. Замена никель-кадмиевых аккумуляторных батарей осуществляется при капитальном, текущем и среднем ремонтах. Батареи, снятые с эксплуатации, являются отходами 1-го класса опасности из-за содержания в них гидроксида кадмия. Из-за интенсивной эксплуатации никель-кадмиевых аккумуляторов происходит выкипание электролита. В результате необходимо чаще доливать дистиллированную воду в аккумуляторы. При кипении, кроме того, образуется аэрозоль гидроксида кадмия. Микрокапли аэрозоля осаждаются на поверхности подвагонных ящиков и аккумуляторных батарей, загрязняют перроны вокзалов. Содержание кадмия в почвах вблизи вокзалов превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) более чем в 3 раза. При плановом техническом обслуживании никель-кадмиевых аккумуляторов:

- при зарядке выделяющийся аэрозоль загрязняет воздух (превышение ПДК в 1,5 раза), стены помещений аккумуляторных отделений вагонных депо;
- при переливах дистиллированной воды в аккумуляторы загрязняется пол помещений аккумуляторных отделений, далее загрязнения гидроксидом кадмия разносятся работниками по территории депо и прилегающим участкам земли (превышение ПДК в почвах вблизи депо до 40 раз);

• при снятии никель-кадмиевых аккумуляторов с эксплуатации электролит сливают в бочки, иногда в канализационные системы (превышение ПДК в канализации до 200 раз)

Преимущества Ni – Cd аккумуляторов:

1. Быстрый заряд (Ni – Cd аккумулятор имеет значительно больший возможный ток заряда по сравнению со своими конкурентами, а также выделяет значительно меньше тепла).

2. Количество циклов (Ni – Cd аккумуляторы имеют значительно большее количество циклов заряда / разряда)

3. Простой заряд (нет необходимости подбирать сложные методы заряда и осуществлять постоянный контроль за параметрами аккумулятора)

4. Низкий саморазряд

5. Цена

Недостатки Ni – Cd аккумуляторов:

1. Не экологичность (Ni – Cd аккумулятор был первым типом аккумуляторов и об экологичности в то время никто не задумывался. В связи с этим в ряде стран этот тип аккумуляторов запрещен для эксплуатации)

2. Эффект памяти (В соответствии с этим требовалось намного чаще проводить полную разрядку / зарядку аккумулятора для устранения данного эффекта)

3. Емкость (По сравнению с последователями показатель емкость / размер небольшой) [19]

Никель – металлгидридные аккумуляторы:

Общие сведения о никель - металлгидридных аккумуляторах

Никель – металлгидридные (далее - Ni –МН) аккумуляторы разработаны в 80 - х годах прошлого века. Они пришли на смену Ni – Cd аккумуляторам и успешно выполняют свои функции. Их использование на данный момент продолжается, но наблюдается постепенный уход от этого типа батарей. Это связано прежде всего с появлением новых типов аккумуляторов.

Разберем плюсы и минусы данных аккумуляторов. Они по сути обратны плюсам и минусам Ni – Cd аккумуляторов.

Преимущества Ni – МН аккумуляторов:

1. Емкость (в среднем на 40 % больше, чем у Ni – Cd)

2. Эффект памяти (меньше, чем у предшественника)

3. Экологичность

Недостатки Ni – МН аккумуляторов:

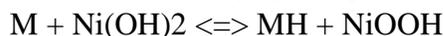
1. Число циклов (значительно меньше, чем у предшественника)

2. Скорость заряда (Ni – МН аккумуляторы выделяют больше тепла и требуют использования специальных методов заряда. В связи с этим ток заряда сильно ограничен)

3. Большой саморазряд

4. Цена[19]

В основе работы классического Ni-MH аккумулятора лежат процессы:



Эффективность Ni-MH аккумулятора зависит от свойств гидридообразующих сплавов, используемых в качестве электродных материалов. В настоящее время в коммерческих аккумуляторах в качестве анода используются сплавы AB5-типа, представляющие собой модифицированные интерметаллиды на основе LaNi<sub>5</sub> с частичным замещением основных элементов, например MmNi<sub>3.55</sub>Co<sub>0.75</sub>Mn<sub>0.4</sub>Al<sub>0.3</sub>. Однако низкая удельная емкость (280–300 мАч/г) таких материалов ограничивает их использование. Сплавы AB2-типа, состоящие из гидридообразующего (Ti или V) и негидридообразующего (Ni, Cr, Mn или Fe) металла, имеют более высокую емкость (~350 мАч/г), однако эти сплавы нуждаются в длительной активации и обладают низкой стабильностью. В последнее время в качестве наиболее перспективных электродных материалов для Ni-MH аккумуляторов активно изучаются сплавы AB3-типа, состоящие из чередующихся слоев AB5 и AB2 и обладающие высокой удельной емкостью (~400 мАч/г). Пока исследованные сплавы AB3 имеют невысокую циклическую стабильность и нуждаются в дальнейшем улучшении. Добавка Nd способствует образованию микроструктуры, улучшающей электро-химические характеристики сплавов (La,Mg)Ni<sub>3</sub>. Предполагается, что Nd может увеличить срок службы сплавов за счет повышения тока обмена водородной реакции и скорости диффузии водорода, а также улучшить стойкость к окислению. Производительность MH электродов можно повысить наноструктурированием исходных сплавов с помощью равноканального углового прессования [20].

Никель-цинковые аккумуляторы:

Никель-цинковый аккумулятор схож с никель-кадмиевым в том, что он использует щелочной электролит и никелевый электрод, но отличается по показателю напряжения; NiZn аккумулятор обеспечивает 1,65 В, а не 1,20 В, как у NiCd и NiMH аккумуляторов. NiZn аккумуляторы заряжаются при постоянном токе до 1,9 В. Никельцинковые аккумуляторы не поддерживают подзарядку импульсным током, также известным как заряд для технического обслуживания. Удельная энергия составляет 100 Втч / кг и рассчитана на 200–300 циклов. NiZn аккумуляторы не имеют тяжелых токсичных материалов и могут быть легко переработаны. Система из перезаряжаемых никель-цинковых аккумуляторов устанавливалась в железнодорожных вагонах в 1932-1948 года. Но NiZn аккумуляторы страдали от высокого саморазряда и короткого срока службы, но улучшения свойств электролита уменьшили эту проблему, и NiZn снова стал рассматриваться для коммерческого использования. Низкая стоимость, высокая выходная мощность и хороший рабочий диапазон температур делают этот вид никелевых аккумуляторов конкурентоспособным [21].

Никель-цинковый аккумулятор, содержащий корпус, сепараторы, щелочной электролит, отрицательный электрод, состоящий из токоподводящей металлической решетки с напессованным слоем активной массы из порошка цинка.

Недостатками этого никель-цинкового аккумулятора являются возможность отслаивания активных масс от металлических токоподводящих решеток, возможность замыкания электродов накоротко вследствие роста дендритов при зарядке и неравномерное медленное растворение порошка цинка при разрядке.

Методика изготовления активной массы для электродов, в основном используемых в никель-цинковых батареях, предусматривает отдельное создание слоистых композитов на основе цинка и никеля с добавлением графита. Процесс начинается с индивидуального подогрева смесей хлорида цинка и хлорида никеля с графитом до температурного диапазона от 85 до 150 градусов Цельсия. После этого, к предварительно нагретым компонентам применяют обработку концентрированной азотной кислотой с концентрацией от 85% до 95%, в течение временных интервалов от 1,5 до 5 часов для цинка и от 2 до 6 часов для никеля. В получаемых слоистых структурах содержание цинка и никеля варьируется от 2,75 до 4,75 и от 2,8 до 4,2 раза больше, чем графита соответственно. Затем слоистые композиты цинка и никеля с графитом подвергаются тщательной промывке до достижения нейтральности реакции, после чего их обезвоживают. Эти обезвоженные слоистые материалы в дальнейшем используются для создания активных масс, предназначенных для использования в качестве анода или катода [22].

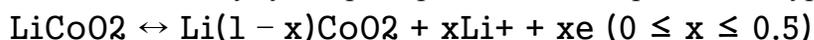
Литий-ионные аккумуляторы:

В начале 70-х годов двадцатого века был совершен прорыв в области электрохимии с появлением литиевых батарей, которые использовали не содержащий протонов электролит. Это открытие стало воплощением замысла ученых о создании электрохимического источника энергии с использованием одного из самых активных реагентов — щелочного металла. Применение лития в качестве восстановителя значительно увеличило рабочее напряжение и удельную энергию таких источников тока [23].

В процессе разряда литий-ионного аккумулятора литий выходит из структуры углерода на аноде и встраивается в оксидный материал на катоде. При зарядке аккумулятора эти процессы протекают в обратном направлении. В результате, в системе аккумулятора отсутствует свободный металлический литий, а циклы заряда-разряда основаны на перемещении литиевых ионов между электродами. Это послужило основанием для названия таких аккумуляторов "литий-ионными". Иногда их также называют "аккумуляторами типа качающегося кресла" из-за аналогии с движением ионов, напоминающим качание. В коммерчески доступных литий-ионных аккумуляторах анод традиционно изготавливается из углеродных материалов, и электрохимические реакции на нём можно описать следующим уравнением:



где прямая реакция соответствует заряду, а обратная — разряду аккумулятора. На катоде первых литий-ионных аккумуляторов процесс можно представить уравнением:



Помимо оксида кобальта, в литий-ионных аккумуляторах также используются литированный оксид никеля и литий-марганцевые шпинели, где электрохимические процессы аналогичны тем, что происходят на катоде с оксидом кобальта.

Цена литий-ионных аккумуляторов во многом зависит от стоимости кобальта. Хотя в случае использования малых аккумуляторов в мобильных устройствах стоимость не является ключевым фактором, экономические аспекты становятся критически важными при разработке больших аккумуляторных систем, таких как те, что применяются в электротранспорте или для выравнивания пиковых энергетических нагрузок [24].

Основными недостатками Li-ion-аккумуляторов являются:

- Встроенная схема защиты: Действительно, для предотвращения перезаряда, глубокого разряда и перегрева, литий-ионные аккумуляторы требуют сложных схем защиты. Это увеличивает их стоимость и сложность, а также может ограничивать производительность.
- Старение аккумулятора: Литий-ионные аккумуляторы подвержены естественному старению, что приводит к постепенному снижению емкости даже при отсутствии использования. Хранение аккумулятора в заряженном состоянии и при низких температурах может замедлить этот процесс, но не остановить его полностью.
- Высокая стоимость: Сравнение с никель-кадмиевыми (NiCd) аккумуляторами показывает, что литий-ионные аккумуляторы дороже, что может быть значительным фактором при масштабных применениях, таких как в электротранспорте или стационарных энергетических системах.

Эти недостатки являются предметом активных исследований, и многие компании и научные группы работают над разработкой новых типов аккумуляторов, которые могли бы предложить более долгий срок службы, более низкую стоимость и улучшенную безопасность [2].

Пожароопасность литий-ионных аккумуляторов обусловлена наличием в аккумуляторе катода из оксида лития-кобальта  $\text{LiCoO}_2$ . При достаточно малом нагревании (не более 90 °C)  $\text{LiCoO}_2$  начинает разлагаться с выделением кислорода, который окисляет полимерный электролит. Температура увеличивается еще больше, процесс начинается в соседних ячейках батареи. Происходит цепная реакция, которая продолжается до тех пор, пока аккумулятор не сгорит полностью. Этот процесс называется тепловым разгоном батареи. Оно может начаться из-за малейшего пустяка, например, перезаряда аккумулятора, вызывающего его нагрев [25].

Литий-ионные батареи демонстрируют ограниченную толерантность к избыточной зарядке. Это связано с тем, что при значительном превышении заряда на углеродном аноде может происходить накопление металлического лития в форме мелкодисперсного пористого нароста, который вступает в активную реакцию с электролитом (рис 2). На катоде в таких условиях начинается интенсивное выделение кислорода. Эти процессы могут привести к тепловому ускорению, увеличению внутреннего давления и, как следствие, к нарушению герметичности элемента [26].



Рисунок 2- короткое замыкание

#### Литий-полимерный аккумулятор

В литий-полимерных аккумуляторах в качестве электролита применяется полимер, модифицированный проводящими включениями, являющимися соединениями лития. Применение полимеров-электролитов позволяет также обеспечить высокие токи разрядки, недостижимые при использовании обычных литиевых аккумуляторов, и многообразие форм и конфигураций батарей.

Основой функционирования таких батарей является способность некоторых полимеров приобретать свойства полупроводников при модификации ионами электролитов. В результате эффективность батареи возрастает, что также позволяет уменьшить ее габариты по сравнению с обычным литиевым аккумулятором.

Для получения литий-полимерных аккумуляторов могут применяться различные типы электролитов:

1. Гелеобразный гомогенный электролит, получаемый вследствие модификации борорганического полимера солями лития;
2. Сухой электролит представляет собой полиэтиленоксид, модифицированный солями лития;

3. Электролит в виде микропористой полимерной матрицы, сорбирующей раствор литиевой соли.

В настоящее время сухие электролиты практически не используются вследствие плохой ионной проводимости и недостаточной селективности переноса катиона лития. Наиболее часто применяются гелеобразные борорганические электролиты, характеризующиеся высокой селективностью переноса, проводимостью и способностью к растворению солей лития.

Однородность применяемого полимера зависит, главным образом, от температуры полимеризации и соотношения реагентов и является определяющей характеристикой для стабильности работы литий-полимерных аккумуляторов [27].

Как химическую основу электролита используют соли лития, которые находятся, между анодом и катодом, в полимерной прокладке.

Плюсы литий-полимерных батарей:

- 1) Устойчивость к перегрузкам тока, внешним воздействиям;
- 2) Эластичность, компактность, малый вес и прочность;
- 3) Многообразие форм;
- 4) Минимальный риск утечки электролита;
- 5) Малый саморазряд;
- 6) Невыраженный эффект памяти;
- 7) Стабильность напряжения в процессе разряда;
- 8) Безопасность выше чем у литий-ионных аккумуляторов;
- 9) Внешние температуры от -20 до +40 °C;

Минусы литий-полимерных батарей:

- 1) При использовании в низких температурах эффективность снижается;
- 2) Более высокая цена по сравнению с литий-ионным аккумулятором;
- 3) Долгое время заряда [28];

### **1.3 Магниевые батареи**

Открытие магния было результатом алхимических исследований и началось в 1695 году, когда при выпаривании воды из источника в Эпсоме (Англия), Н. Гроу выделил соль с горьким вкусом, обладающую слабительным эффектом. Спустя некоторое время

было обнаружено, что взаимодействие этой соли с "постоянной щелочью" (термин, использовавшийся тогда для обозначения соды и поташа) приводит к образованию белого порошка. Аналогичный порошок получали и при обжиге минерала, найденного возле греческого города Магнезии [29].

Магниево-первичные батареи были впервые коммерциализированы в 1943 году (рис.3) имеют стабильное напряжение 1,6 В и широко используются в военных и аэрокосмических резервных источниках питания. Грегори и его коллеги из Dow Inc. начали исследования электролитов RMB с высокой кулоновской эффективностью, начиная с 1990 года. В начале 2000 года Аурбах и его коллеги использовали фазу Chevrel Mo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> в RMB, достигнув более 2000 циклов, что означает прорыв в технологии RMB. Второй прорыв произошел с открытием Аурбахом и его сотрудниками полностью фенилкомплексного (APC) электролита. В 2011 году Ким и Малдун и др. впервые предложил экспериментальную батарею Mg-S с ненуклеофильным электролитом MgCl<sub>2</sub>(HMDS)-AlCl<sub>3</sub>, с высокой разрядной емкостью 1200 мАч·г<sup>-1</sup> и 2484 мАч·см<sup>-3</sup>. С тех пор исследования Mg-S-батарей вызывают растущий интерес из-за естественного содержания исходных материалов (например, Mg 23 000 частей на миллион, S 953 частей на миллион), теоретической 1680 Вт·ч·кг<sup>-1</sup> и 3220 Вт·ч·л<sup>-1</sup> плотности энергии, подходящее потенциальное окно в электролитах на основе эфира и повышенная безопасность за счет осаждения без дендритов [30-33]

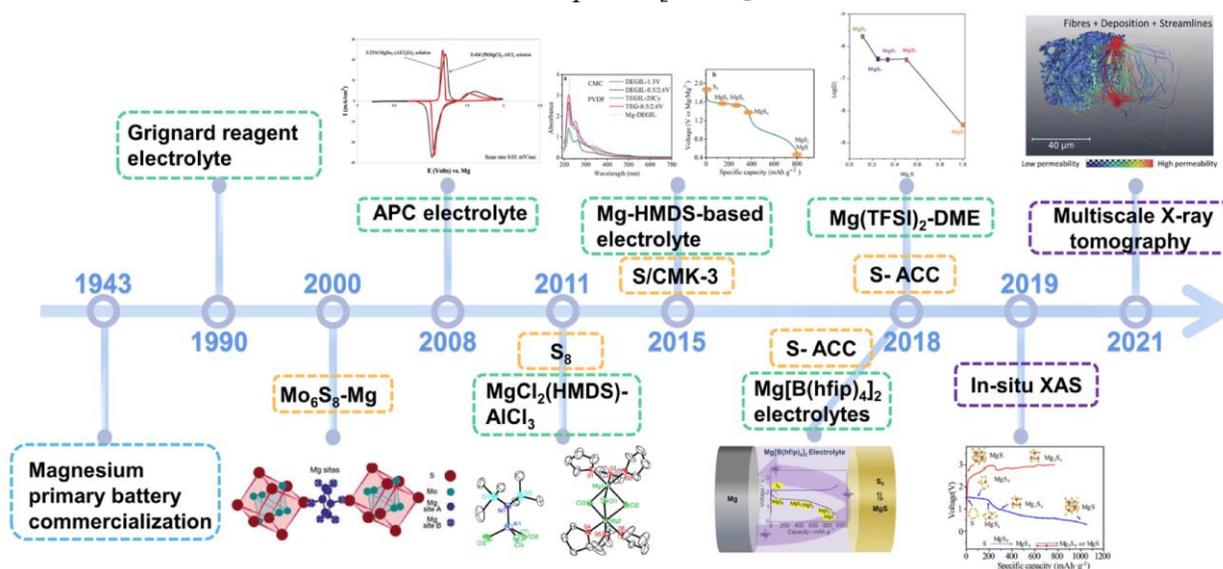


Рисунок 3-история развития магниевых батарей

Перезаряжаемые магниевые батареи, состоящие из металлического магниевого анода, катода с фазой Шевреля Mo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> и органического магниевое-галогеналюминатного электролита Mg(AlCl<sub>2</sub>BuEt)<sub>2</sub>/тетрагидрофуран (ТГФ), показали впечатляющий срок службы и низкую емкость, снижающуюся при длительной циклической работе. Однако батареи страдают от кинетически торпидного внедрения/экстракции ионов Mg<sup>2+</sup> и диффузии на катоде из-за сильного поляризационного эффекта двухвалентного Mg<sup>2+</sup>.

Кроме того, батареи демонстрируют довольно низкую общую плотность энергии из-за большого веса формулы и низкого напряжения вставки MoS<sub>2</sub> катоды. Таким образом, они рассматриваются только как замена [34].

Магниевые электролиты должны удовлетворять требования: КЭ процесса осаждение / растворение магния - 100%; высокое окно электрохимической стабильности электролита- выше 3В относительно  $Mg^{+2}/Mg^0$ ; обеспечение высокой коррозионной стойкости конструкционных материалов; совместимость с катодным материалом при условии обратимого магнезирования с высоким КЭ [35].

Ионы Mg обладают низкой подвижностью в твердых телах из-за их сильного взаимодействия с полярными группами основной решетки, которые создают пути диффузии. Следовательно, для определения благоприятной геометрии для миграции ионов Mg необходимо всестороннее понимание кристаллографической структуры, а также электронной структуры межузельных соединений. Между тем, полученные знания позволяют точно настроить локальную структуру с помощью стратегий кристаллической инженерии, которые еще больше снижают энергетический барьер для миграции. Кроме того, ион-дипольные взаимодействия также могут быть смягчены, если двойной заряд иона Mg должным образом экранирован [36].

При сравнении с литием и натрием, магний обладает значительно более высокой теоретической емкостью на единицу объема: для магния это значение составляет 3833 мА·ч·см<sup>-3</sup>, тогда как для лития и натрия - 2061 и 1128 соответственно. Удельная емкость (мА·ч·г<sup>-1</sup>) также различается: для магния это 2205, для лития - 3861, для натрия - 1161. Ионные радиусы (нм) составляют: для магния - 0,065, для лития - 0,065, для натрия - 0,095. Отмечается значительная сложность формирования пассивирующей пленки на поверхности магниевого анода при его циклическом использовании в органических растворителях [37]. Исследования поведения магния в апротонных средах и характеристики катодных материалов для магниевых источников тока, а также их энергетические характеристики рассматриваются в источнике [38]. Для предотвращения пассивации магниевого анода, переход на магниевые ионные аккумуляторы является эффективным решением. Эти аккумуляторы работают по принципам, аналогичным литий-ионным и натрий-ионным батареям, где ионы магния реверсивно интегрируются в структуру анодных и катодных материалов. Взаимодействие магния с этими материалами приводит к сдвигу анодного потенциала в диапазон, исключающий образование оксидов магния. Исследования, проведенные в [39], показали процессы интеркаляции и деинтеркаляции магниевых ионов с использованием висмута и сурьмы, а также их сплавов. Сплавы Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> были получены методом электроосаждения. Оптимальные результаты были достигнуты с использованием чистого висмута, который после 100 циклов показал удельную емкость в 222 мА·ч·г<sup>-1</sup>. Еще более высокие показатели были зафиксированы при использовании наноструктурированных

висмутовых электродов [40], где обратимая удельная емкость достигла  $350 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$  ( $3430 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{см}^{-3}$ ). Аноды продемонстрировали высокую эффективность работы.

В исследовании [41] описывается динамика процессов интеркаляции магниевых ионов в оловянные и висмутовые аноды, что приводит к формированию соединений  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  и  $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$ . Результаты показали, что олово и висмут эффективны в качестве анодных материалов для магниевых-ионных батарей, с незначительным диффузионным барьером. При сравнении этих материалов висмут оказался более предпочтительным.

#### Чистый магний

Производительность разряда чистого  $\text{Mg}$  весьма важна и часто рассматривается как эталон. Поскольку не существует конкретной публикации, посвященной характеристикам сброса чистого  $\text{Mg}$ , это обсуждение основано на отчетах, использующих чистый  $\text{Mg}$  в качестве эталона. Однако необходима некоторая осторожность, поскольку чистый  $\text{Mg}$  может включать материал со значительным содержанием примесей и высокими скоростями коррозии. Выброс чистого  $\text{Mg}$  (без каких-либо примесных частиц) включает только анодное растворение (без ускорения микро-гальванической коррозии частицами, богатыми железом, и частицами второй фазы). Чистый магний обычно имеет низкий потенциал коррозии (около  $-1,76 \text{ V}$ ) и низкую скорость коррозии. Показано, что чистый  $\text{Mg}$  имеет стабильные кривые разряда и высокую анодную эффективность при низкой плотности тока ( $10 \text{ mA cm}^{-2}$ ), но плохую производительность при больших плотностях тока ( $180$  и  $300 \text{ mA cm}^{-2}$ ). Показано, что продукт разряда чистого  $\text{Mg}$  представлял собой  $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$  и присутствовал на поверхности электрода в виде крупных плотных микроблоков (как показано на рис. 4), которые невозможно было быстро отделить, что приводило к уменьшению площади реакционного электрода и слабому разряду [42].

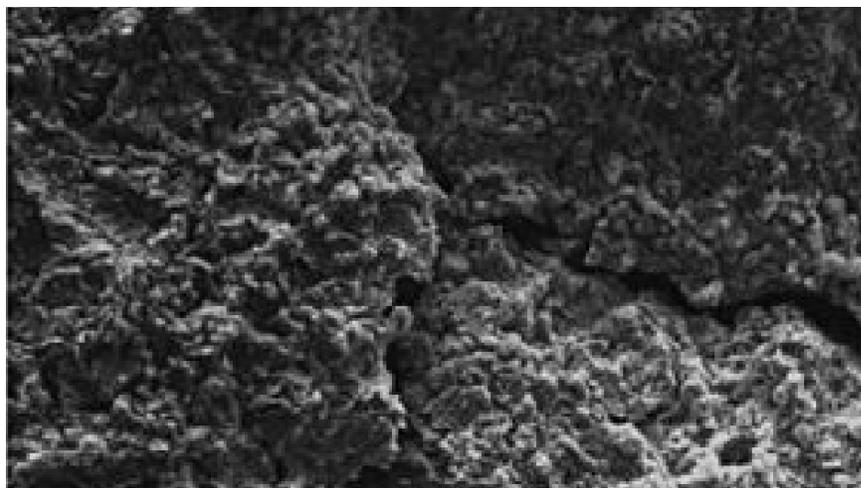


Рисунок 4- изображение полученное при анализе СЭМ электрода на основе  $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$

Предполагается, что перезаряжаемые магниевые батареи (RMB) станут возможными конкурентами для замены литий-ионных батарей в качестве устройств хранения энергии следующего поколения. Тем не менее, применение РМБ по-прежнему сдерживается ограниченным выбором высокоэффективных катодных материалов. Благодаря впечатляюще высокой теоретической емкости халькогениды меди привлекли заметное внимание в качестве перспективного электродного материала. Однако создание халькогенидов меди с высокой плотностью энергии и быстрой кинетикой внедрения/экстракции  $Mg^{2+}$  пользуется серьезным спросом. В частности, выделены пять стратегий проектирования и модификации катодов из халькогенида меди с макроскопических и микроскопических аспектов, уделяя особое внимание размеру, морфологии и структуре, составу материала, кристаллической структуре и атомному замещению. В конечном итоге этот обзор предлагает практические рекомендации и потенциальные направления для будущей разработки катодов из халькогенида меди для систем магниевых аккумуляторов [43].

Улучшение электрохимической обратимости ионов Mg на границе раздела анода и электролита является важной задачей для создания практических систем MgB. Было предпринято множество попыток преодолеть плохое кинетическое поведение на поверхности Mg, и в большинстве подходов использовались химические компоненты для конкретных задач в электролитах, которые эффективно разрушают изолирующий слой MgO на поверхности Mg во время работы элемента. Например, группа Грегори сообщила, что использование бор-органического электролита и галогенида эффективно для повышения эффективности осаждения и растворения ионов Mg в системе MgB, в то время как группа Малдуна продемонстрировала, что борорганические комплексы (R3B) в сочетании с кислотой Льюиса ( $AlCl_3$ ) в эфирном растворителе улучшает кинетическое поведение Mg-анода и повышает анодную стабильность MgB-электролита. Группа Аурбаха совершила важный прорыв в разработке электролитов MgB: они систематически оптимизировали электрохимические свойства семейства реактивов Гриньяра в эфирных растворителях ( $RMgX$ , R: алкильный или арильный заместитель, X: галогенид), изменяя классы заместитель, галогенид, растворитель и кислота Льюиса. Предлагаемые электролиты на основе реагента Гриньяра резко облегчают вялые реакции на магниевом аноде, и на сегодняшний день исследования систем MgB резко возросли [44].

Несмотря на то, что обычные электролиты, такие как  $Mg(ClO_4)_2$ , несовместимы с магниевым анодом из-за образования блокирующего слоя, большинство исследователей предпочитают искать новый электролит, а не новую анодную систему, совместимую с существующими электролитами. Циклическая работа магниевых батарей по-прежнему далека от идеала, и от разработки анодов магния во многом зависит будущее этой технологии. Использование сверхмалых наночастиц магния в качестве анодного материала является перспективной стратегией, поскольку это увеличивает диффузию ионов за счет уменьшения толщины пассивирующей пленки. Кроме того, механические свойства чистого магния могут быть значительно улучшены путем добавления алюминия

и цинка (например, 3% и 1% соответственно). Поэтому использование сплава магния в качестве анода также заслуживает внимания. Со временем анод из металлического магния преобразуется в анод с магниевой вставкой. Это происходит из-за уменьшения пассивирующих пленок на поверхности анода из чистого магния. В качестве материалов для вставки ионов магния в аноды обычно используются висмут и олово. Впервые висмут и олово были исследованы как анодные материалы для магний-ионных батарей. Это связано с тем, что оба они образуют с магнием интерметаллические соединения, обладающие высокой объемной емкостью. Биодан показал очень хорошие рециклируемые свойства. Он сохранил удельную емкость 222 мАч·г<sup>-1</sup> (при скорости 1 С) даже после 100 циклов, но при низком рабочем напряжении. Олово в тех же условиях продемонстрировало менее удовлетворительные результаты, однако он показал более высокое рабочее напряжение по сравнению с висмутом.

## 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Аппараты и материалы

#### 1. Потенциостат-гальваностат ИПС

Компактный универсальный потенциостат-гальваностат ИПС предназначен для электрохимических исследований жидкостных и твердотельных систем (рис 5). Прибор работает как в потенциостатическом, так и в гальваностатическом режимах, и позволяет использовать основные электрохимические методы:

- циклическая вольтамперометрия
- линейная вольтамперометрия
- дифференциально-импульсная вольтамперометрия
- инверсионная вольтамперометрия
- хроноамперометрия
- хронопотенциометрия
- кулонометрические измерения[45]



Рисунок 5- Потенциостат-гальваностат ИПС

Функциональные возможности программного обеспечения:

- Планирование и управление экспериментами:
  - Создание и редактирование подробных программ-алгоритмов для проведения различных электрохимических исследований.

- Настройка параметров экспериментов, таких как потенциал, ток, время и рабочие диапазоны.
- Автоматизированное управление ходом эксперимента в соответствии с заданной программой.
  - Визуализация и анализ данных:
    - Отображение результатов измерений в режиме реального времени в виде динамичных графиков и кривых.
    - Сохранение данных в различных форматах для дальнейшего анализа и обработки.
    - Преобразование данных в форматы, совместимые с популярными пакетами программного обеспечения, такими как Excel и Origin.
      - Обработка и анализ кривых:
        - Применение различных методов сглаживания кривых для повышения точности и наглядности данных.
        - Автоматическое определение площадей волн и пиков для количественной оценки электрохимических процессов.
        - Дополнительные возможности:
          - Расширенные функции анализа, такие как вычисление производных и интегралов.
          - Создание пользовательских скриптов для автоматизации рутинных задач.
          - Экспорт данных в различные форматы для дальнейшего использования в научных исследованиях.

Преимущества использования программного обеспечения:

- Простота использования: Интерфейс программы интуитивно понятен и не требует специальных знаний программирования.
- Универсальность: Подходит для решения широкого спектра задач в области электрохимии.
- Точность и надежность: Обеспечивает точные и достоверные результаты измерений.
- Эффективность: Автоматизирует рутинные задачи, экономя время и ресурсы.
- Совместимость: Поддерживает различные форматы данных и интегрируется с другими программными пакетами.

Данное программное обеспечение является ценным инструментом для исследователей, занимающихся электрохимическими исследованиями, и позволяет оптимизировать процесс проведения экспериментов, повысить точность и эффективность анализа данных.

## 2. Quanta 200i 3D:

Quanta 200i 3D – это высокотехнологичный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), оснащенный двумя пучками: электронным и ионным (рис 6). Это позволяет ему проводить комплексный анализ структуры, состава и морфологии материалов на различных масштабах. Сердце микроскопа – электронная пушка с термоэмиссионной оптикой, двойным анодом и внутрилинзовой дифференциальной откачкой.

- Ускоряющее напряжение электронного пучка может регулироваться в диапазоне от 200 В до 30 кВ, что обеспечивает получение изображений с разрешением до 2,5 нм в режиме высокого вакуума.

Ионная колонна микроскопа обладает высокой скоростью травления, что позволяет проводить прецизионную модификацию поверхности образцов.

- Ускоряющее напряжение ионного пучка может достигать 30 кВ, а разрешение при этом составляет 10 нм.

Вакуумная система Quanta 200i 3D дифференциальная и работает с переменным давлением (безмасляная). Она поддерживает три режима: высокий вакуум, низкий вакуум и естественную среду.



Рисунок 6- изображение аппарата Quanta 200i 3D

Система детекторов микроскопа включает в себя:

- 3 детектора вторичных электронов (SED, LF-GSED и GSED), работающих во всех вакуумных режимах.
- Детектор обратно-отраженных электронов.

- STEM-детектор для получения изображений в просвечивающем режиме.

Для микроанализа материалов Quanta 200i 3D оснащен системой энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDAX).

- Она позволяет определять элементы в диапазоне от В до U с разрешением по энергии 132 эВ (Mn K $\alpha$ ).

Дополнительно микроскоп оснащен:

- Модулями нагрева образца до +1000°C.
- Модулем газовой химии для нанесения платины и вольфрама.
- Газовым модулем для электронной и ионной литографии, позволяющим инициировать химические реакции из газовой фазы.

Quanta 200i 3D – это универсальный инструмент для исследователей в различных областях, включая материаловедение, нанотехнологии, электронику, биологию и медицину. Он позволяет получать высококачественные изображения и точные данные о структуре, составе и морфологии материалов, что открывает широкие возможности для научных исследований и разработки новых технологий [46].

### 3. Энергодисперсионный рентгеновский спектрометр (EDX) Rigaku Miniflex 600ge.

MiniFlex – это многофункциональный настольный рентгеновский дифрактометр 5-го поколения, предназначенный для проведения качественного и количественного фазового анализа поликристаллических материалов. Он идеально подходит как для начинающих пользователей, так и для опытных исследователей, предлагая широкий спектр возможностей и высокую производительность (рис 7).

Модели MiniFlex:

- MiniFlex-600: Мощная модель с рентгеновской трубкой 600 Вт, вдвое мощнее других настольных аналогов. Обеспечивает более быстрое сканирование и высокую производительность.
- MiniFlex-300: Экономичная модель с рентгеновской трубкой 300 Вт, не требующая внешней системы охлаждения.

# MiniFlex



Рисунок 7 Энергодисперсионный рентгеновский спектрометр (EDX) Rigaku Miniflex 600ge.

## Ключевые преимущества MiniFlex:

- **Быстрота и чувствительность:** Инновационные технологии, такие как высокоскоростной D/teX детектор (опция) и новый 600 Вт источник рентгеновского излучения, обеспечивают высокую скорость сканирования и чувствительность.
- **Точность:** Графитовый монохроматор (опция) в сочетании со стандартным сцинтилляционным счетчиком оптимизирует соотношение сигнал-фон, повышая точность измерений.
- **Разрешение:** Варьируемые щели на падающий и дифрагированный пучок позволяют добиться желаемого разрешения.
- **Пропускная способность:** Автоматический загрузчик образцов обеспечивает высокую пропускную способность, что делает MiniFlex идеальным для серийных исследований.
- **Простота использования:** Компактный размер, прочная конструкция и интуитивно понятное программное обеспечение PDXL делают MiniFlex простым в работе и обслуживании.
- **Доступность:** Низкая стоимость владения делает MiniFlex доступным решением для исследователей с ограниченным бюджетом.

## Программное обеспечение PDXL:

Каждый дифрактометр MiniFlex поставляется с последней версией программного обеспечения PDXL, разработанного компанией Rigaku. PDXL – это

полнофункциональный пакет программ для обработки данных порошковой дифрактометрии, который включает в себя:

- Метод Фундаментальных Параметров: Обеспечивает более точное определение положения пика.
- Автоматизированный качественный рентгенофазовый анализ: Использует открытую кристаллографическую базу данных (COD) для автоматической идентификации фаз.
- Интерфейс для расшифровки структуры исходя из первых принципов (*ab initio*): Позволяет моделировать структуру неизвестных материалов.

MiniFlex – это универсальный инструмент, который может быть использован для:

- Определения фазового состава материалов
- Количественного определения фаз
- Исследования кристаллической структуры
- Определения микроструктуры
- Изучения дефектов материалов
- Контроля качества

MiniFlex – это надежный и доступный инструмент, который может помочь исследователям в различных областях, включая материаловедение, химию, фармацевтику, геологию и археологию. Новый MiniFlex 5-го поколения – это идеальное решение для исследователей, которым нужен высокопроизводительный, универсальный и простой в использовании настольный рентгеновский дифрактометр[47].

4. D8 DISCOVER Bruker: Универсальный дифрактометр для научных исследований и промышленности

D8 DISCOVER – это высокопроизводительный рентгеновский дифрактометр 5-го поколения, основанный на платформе D8 Bruker (рис 8). Он обладает открытой модульной архитектурой, что позволяет легко адаптировать его к широкому спектру задач

Особенности D8 DISCOVER:

Настроенные под задачу: Спектрометр D8 DISCOVER может быть настроен специально для проведения рефлектометрии, точных исследований и контроля качества в промышленности.

- Высокая интенсивность излучения: Уникальная оптика с зеркалами Гёбеля обеспечивает высокую интенсивность рентгеновского излучения, необходимую для анализа тонких пленок.

- Простота использования: Автоматический поглотитель и сменные монохроматоры упрощают процесс съемки и обеспечивают возможность работы с различными материалами.

- Универсальность: Разнообразные аксессуары, такие как столики для образцов, подвески Эйлера и специальные держатели, делают D8 DISCOVER универсальным инструментом для микродифракционных измерений, анализа остаточных напряжений и текстуры.



Рисунок 8-D8 DISCOVER Bruker: Универсальный дифрактометр

- Модульность: Спектрометр D8 DISCOVER может быть расширен различными дополнительными модулями, такими как Ultra GID для изучения нанометровых эпитаксиальных слоев, VANTEC-1 для ускорения съемки обратных карт и аналитические пакеты LEPTOS и MULTEX Area для анализа полученных данных измерений.

D8 DISCOVER – это мощный и универсальный инструмент, который может быть использован для решения широкого спектра задач в различных областях, включая материаловедение, химию, физику, фармацевтику, геологию и другие [48].

5 Медные пластинки

Рабочий электрод имеет диаметр 10 мм.

6 Сепаратор «Watmann GF/D»

## 7 Резак (рис 9)

Для нашей ячейки оптимально подходит круглый электрод диаметром 10 мм (площадь 0,785 см<sup>2</sup>). Подготовка электрода осуществлялась с помощью резака.



Рисунок 9- Резак

## 7 Аналитические весы «Sartorius AX224»

## 2.2 Химикаты и реагенты

### 1.1 Раствор электролита:

- Соль висмута:
  - Хлорид висмута (BiCl<sub>3</sub>) - наиболее распространенный выбор.
  - Концентрация: 0,1 - 1,0 М.
  - Нитрат висмута ((BiNO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)
  - Концентрация: 0,1 - 1,0 М.
- Растворитель:
  - Дистиллированная вода.
  - Азотная кислота

### 1.2 Раствор электролита:

- Соль магния:
  - Хлорид магния(MgCl<sub>2</sub>)
  - Концентрация 1,0 М.
- Растворитель:
  - Дистиллированная вода.

### 1.3 Раствор для электрода:

- Соль KCl
- Концентрация 3 M

## 2.3 Методика

Принципиальная схема изготовления электрода показана на рисунке 10.

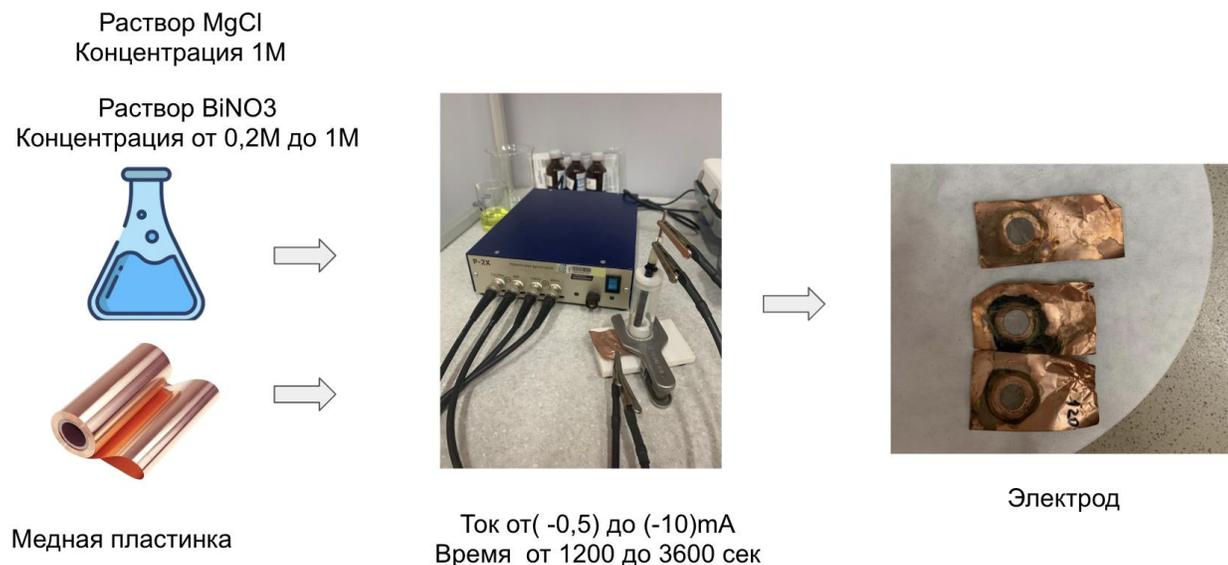


Рисунок 10-Схема изготовления электрода для магний-ионного элемента

Эксперимент начинается с подготовки растворов нитрата висмута и хлорида висмута с заданной концентрацией (0,2 M - 1 M). Это позволяет ускорить ход исследований. Сложную соль висмута растворяют в азотной кислоте, добавляя небольшое количество чистой кислоты. Чистый раствор кислоты необходим для полного растворения осадка на дне колбы. Только после этого можно приступать к работе с раствором. Далее готовится раствор хлорида магния с концентрацией 1 M. Одновременно с этим подготавливается медная пластинка. Перед использованием медную пластинку необходимо промыть в растворе кислоты. Это удалит поверхностный слой, образовавшийся в результате взаимодействия с окружающей средой, и снизит загрязнение. Затем пластинку промывают дистиллированной водой и сушат. В ходе исследований осаждения магния-висмута применялись электрохимические ячейки с тремя электродами. Эта конфигурация обеспечивает более точный контроль процесса осаждения и его параметров. В системе один электрод служит для осаждения магния-висмута. В качестве него выбрана чистая медь. Она обладает высокой электропроводностью, устойчива к химическим реагентам, что делает ее идеальным выбором для подобных экспериментов.

Диаметр рабочего электрода составляет 10 мм. Противозлектрод представлен платиновой сеткой с большой площадью поверхности. Это обеспечивает эффективную диффузию реагентов и продуктов реакции, что важно для равномерного осаждения на рабочем электроде. Контрольным электродом служит К/КСl электрод. Он используется для измерения потенциала в системе и обеспечения его стабильности на рабочем электроде (рис 11). Наливаем растворы в нашу ячейку в соотношении 1:1. Эксперимент проводят от 20 минут до 120 мин с подачей тока от (-0,5)mA до (-10)mA в гальваностатическом режиме. После получаем готовый магниевый-висмутовый электрод который необходимо промыть водой и просушить. Ниже приведена таблица 1 и таблица 2 показывая вариаций электродов которые были получены.



Рисунок 11 Электроды

<i>Номер №</i>	<i>Раствор</i>	<b>Концентрация</b>	<b>mA</b>	<b>Время</b>
<b>1</b>	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	<b>0,2 моль/л</b>	<b>-5</b>	<b>3600</b>
	MgCl <sub>2</sub>	<b>1 моль/л</b>		
<b>2</b>	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	<b>0,2 моль/л</b>	<b>-5</b>	<b>1200</b>
	MgCl <sub>2</sub>	<b>1 моль/л</b>		

3	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,5 моль/л	-1	3600
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		
4	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,5 моль/л	-1	1200
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		
5	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,2 моль/л	-1	3600
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		
6	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,2 моль/л	-1	1200
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		
7	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,5 моль/л	-5	3600
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		
8	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,5 моль/л	-5	1200
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		
9	Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,2 моль/л	-0,5	1200
	MgCl <sub>2</sub>	1 моль/л		

Таблица 1 изготовленных электродов из магния и висмута

Самые лучшие пробы отобранные качественным путем и были отданы на анализ. После получения результатов будем работать только с лучшими пробами.

<i>Раствор</i>	<b>Концентрация</b>	<b>mA</b>	<b>Время</b>
Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,1 моль/л	- 1	7200
Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,2 моль/л	-1	7200
BiCl <sub>3</sub>	0,1 моль/л	-1	7200
Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,1 моль/л	-5	7200
Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,2 моль/л	-5	7200

BiCl <sub>3</sub>	0,1 моль/л	-5	7200
Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,1 моль/л	-10	7200
BiCl <sub>3</sub>	0,1 моль/л	-10	7200

Таблица 2 изготовленных электродов из чистого висмута

# Методика

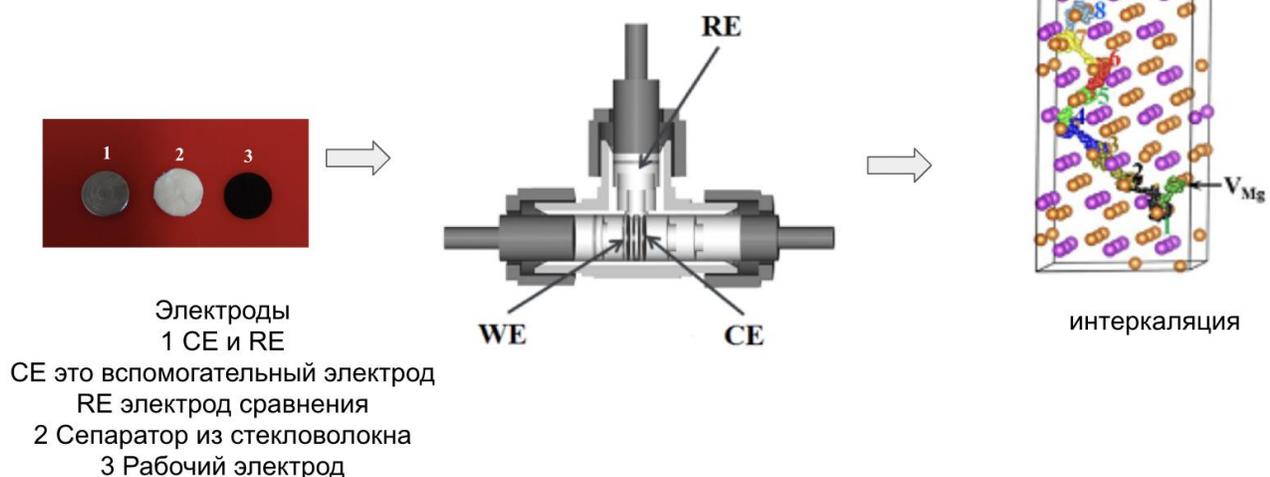


Рисунок 12 Методика интеркаляции ионов магния в электрод

В данном методе (рис 12) будем работать с висмутовыми электродами и попытаемся интеркалировать в их структуру частички магния. Которые мы получили используя первый метод и посмотрим на то какой результат мы получим.

Перед началом измерений электроды необходимо подготовить. Металлический магниевый электрод подвергается двум важным процедурам: механическому полированию с применением мелкой наждачной бумаги (5–7 мкм) и пропитыванию этанолом. Эти этапы играют ключевую роль в подготовке электрода к измерению различных характеристик. Давайте более подробно рассмотрим эти процессы:

- Устранение неровностей: Механическое полирование с использованием мелкой наждачной бумаги позволяет исключить поверхностные дефекты, загрязнения и неровности, что необходимо для обеспечения надлежащего контакта электрода с реагентами и обеспечения точности измерений.
- Очистка поверхности: Пропитка электрода этанолом дополнительно очищает его поверхность от остатков наждачной бумаги, а также удаляет примеси и масла. Это

способствует формированию чистой поверхности, что важно для обеспечения надежного контакта с реагентами и точных результатов измерений.

- Применение наждачной бумаги: Мелкая наждачная бумага определенной зернистости используется для шлифовки поверхности электрода, что позволяет устранить мельчайшие неровности и придать поверхности более гладкий вид.
- Применение этанола: Пропитка электрода этанолом, легким органическим растворителем, способствует растворению остатков наждачной бумаги и удалению их, а также очищает поверхность от примесей и загрязнений, что также важно для обеспечения качественного контакта с реагентами и точности измерений.

Полученные электроды первым методом из висмута необходимо вырезать резакром для получения пластинки диаметр которой 10 мм.

В исследовании проводили циклические измерения и гальваностатические циклирования с использованием специальной ячейки «Swagelok sell». Для проведения экспериментов использовался висмутовый электрод в качестве рабочего, металлический магний (99,999%) как электрод сравнения и вспомогательный электрод. В качестве сепаратора использовался сепаратор «Watmann GF/D», а электролитом был раствор 0,5M Mg(TFSI)<sub>2</sub> в растворителе AN (ацетонитрил).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования по электроосаждению магния-висмута и висмута проводились на плоских медных подложках с применением растворов различной концентрации  $MgCl_2$ ,  $Bi(NO_3)_3$  и  $BiCl_3$  в 1,0 моль/л  $HNO_3$ . Процесс осаждения проходил в гальваностатическом режиме при различных токах осаждения (-0,5 мА, -1мА, -5мА и -10мА относительно К/КCl). Эти условия были подобраны для изучения влияния концентрации веществ и тока осаждения на структуру и морфологию полученных пленок.

На изображениях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и представленных на рисунке 3, показана поверхность электроосажденных образцов магния-висмута с разрешением 50 мкм. Полученные пленки магния-висмута характеризуются хорошей адгезией и образованием непрерывного покрытия.

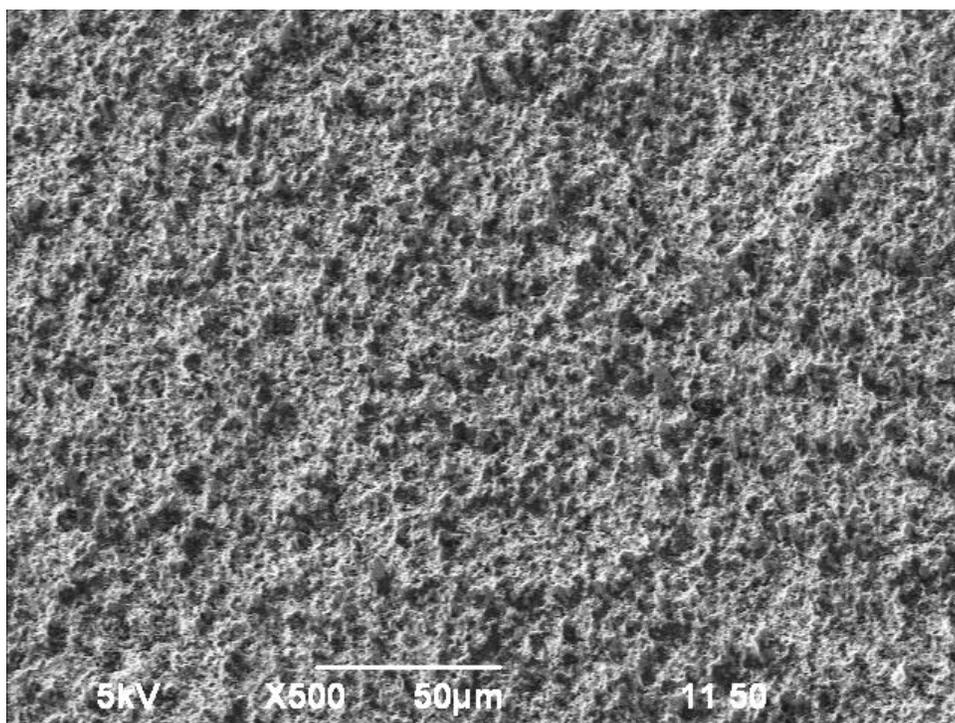


Рисунок 13.1 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X500  $Bi(NO_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $MgCl_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА

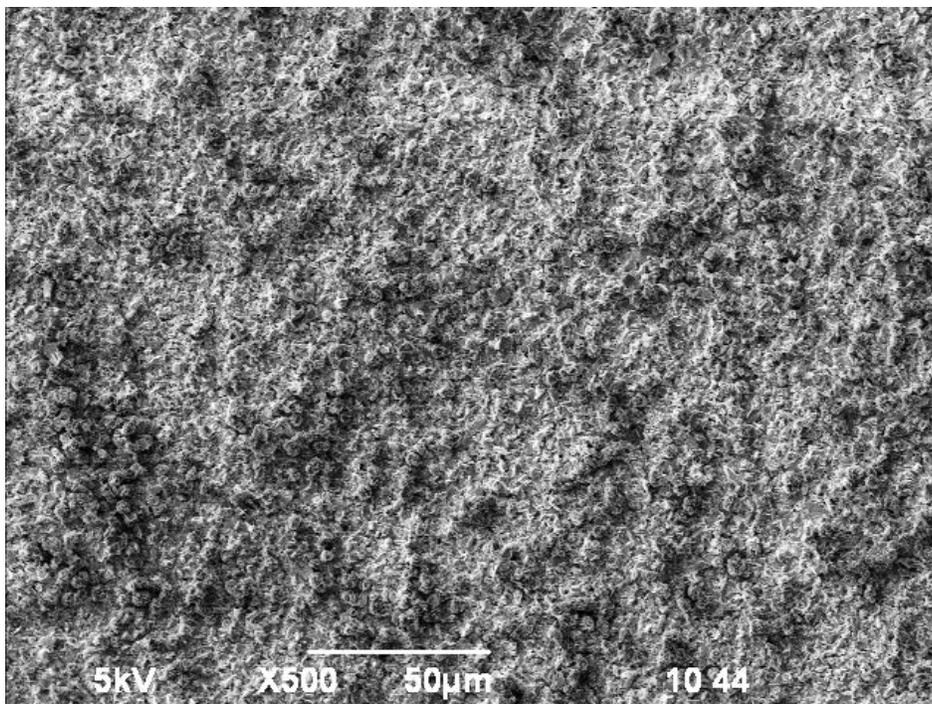


Рисунок 13.2 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X500  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА

На рисунка 13.2 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X500  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА. На рисунке 13.1 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X500  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА.

На рисунка 14.1 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X 350  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА. На рисунке 14.2 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X 350  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА.

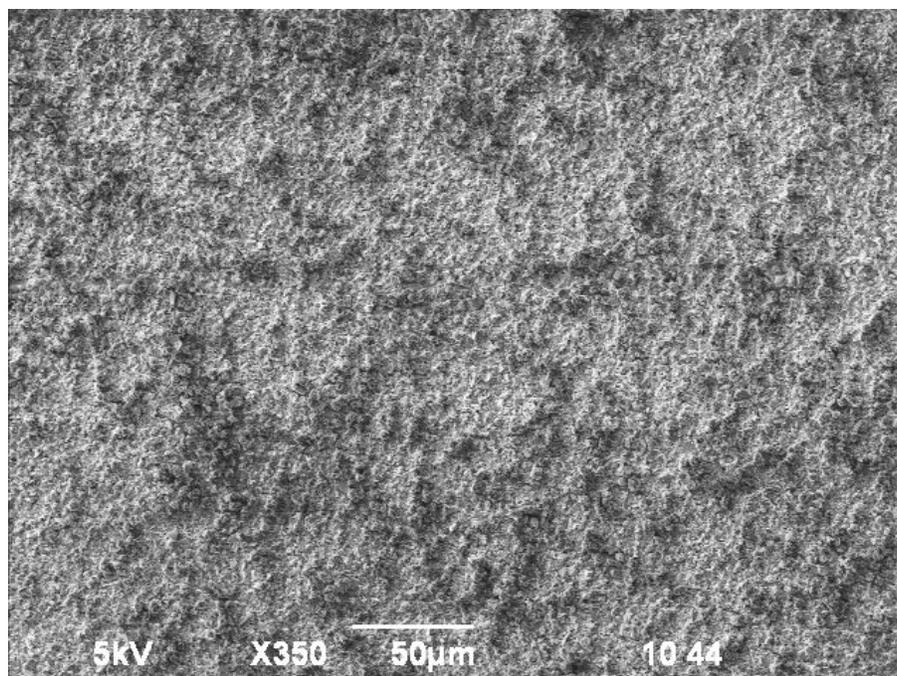


Рисунок 14.1 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X 350  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА

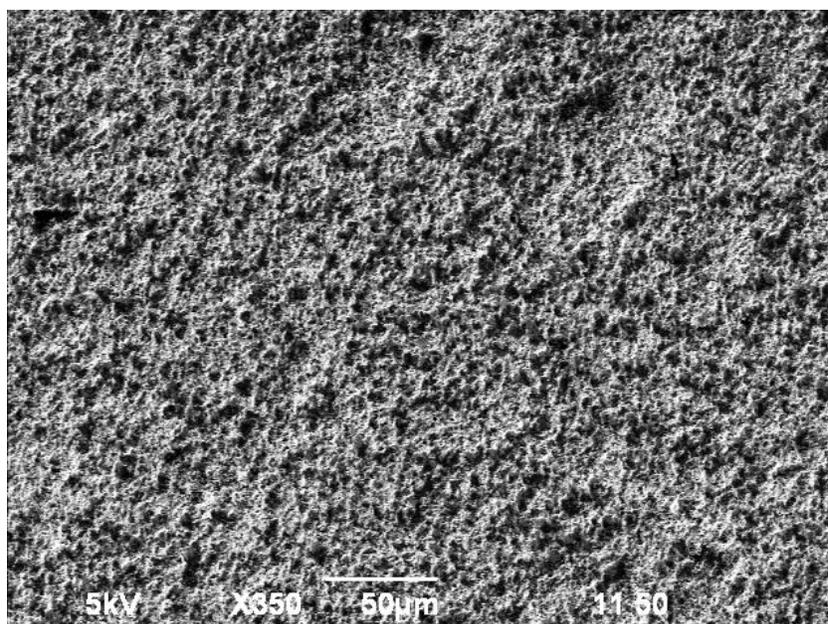


Рисунок 14.2 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X 350  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА

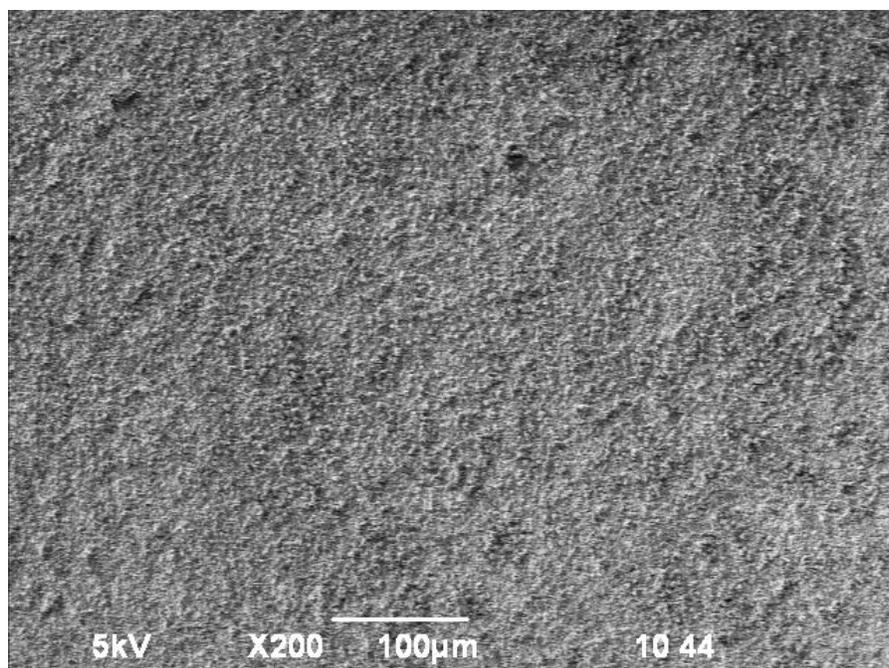


Рисунок 15.1 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X200  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА

На рисунка 15.1 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X 350  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА. На рисунке 15.2 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X 350  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА.

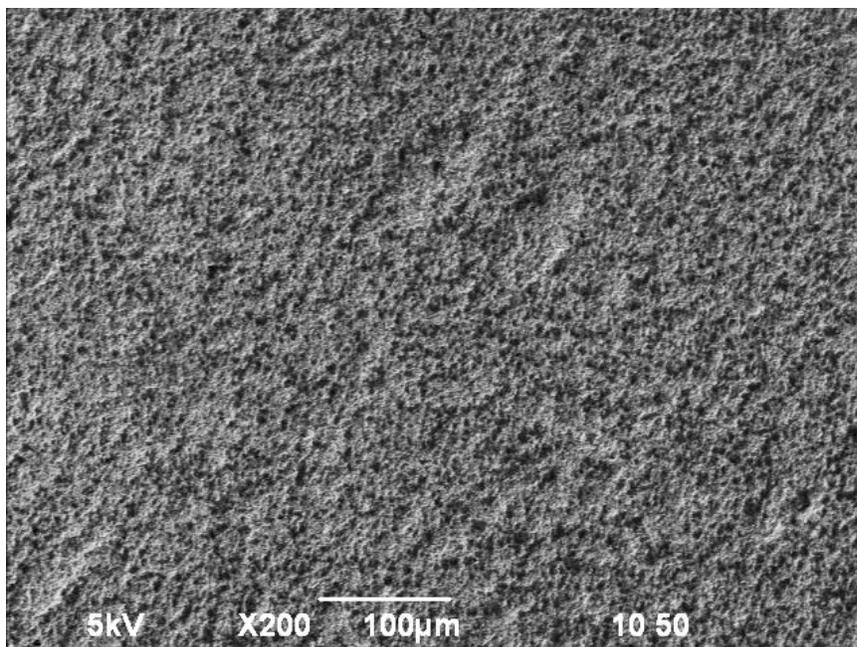


Рисунок 15.2 изображение полученное при анализе СЭМ с увеличением X200  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА

После проведенного анализа и получения рентгенограммы продемонстрируем данные графики и рисунки в которых было зафиксировано наличие магния.

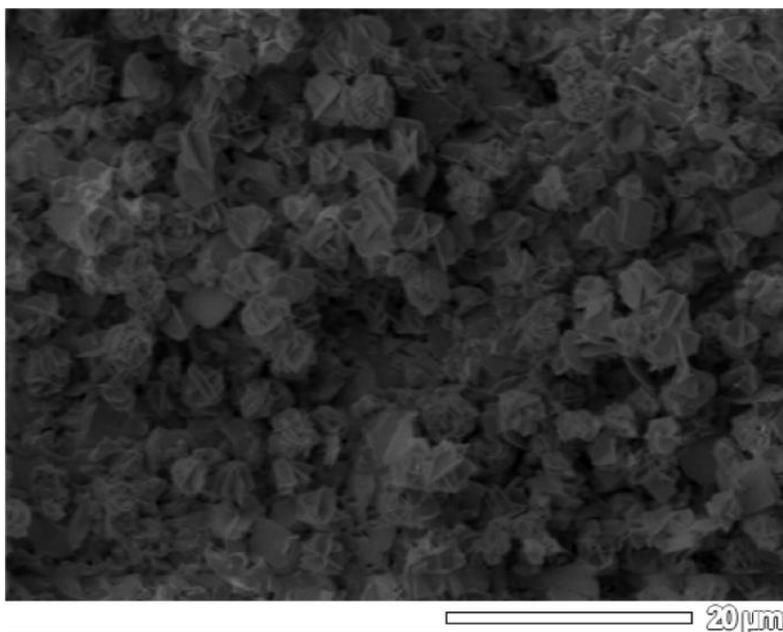


Рисунок 16.1а изображение полученное при анализе СЭМ  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА

На изображениях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и представленных на рисунке 16.1а, показана поверхность электроосажденных образцов магния-висмута  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА с разрешением 20 мкм. На рисунке 16.1 б представлен рентген-фазовый анализа . Медная подложка видна под слоем висмута, что подтверждает успешное осаждение висмута на поверхность меди.

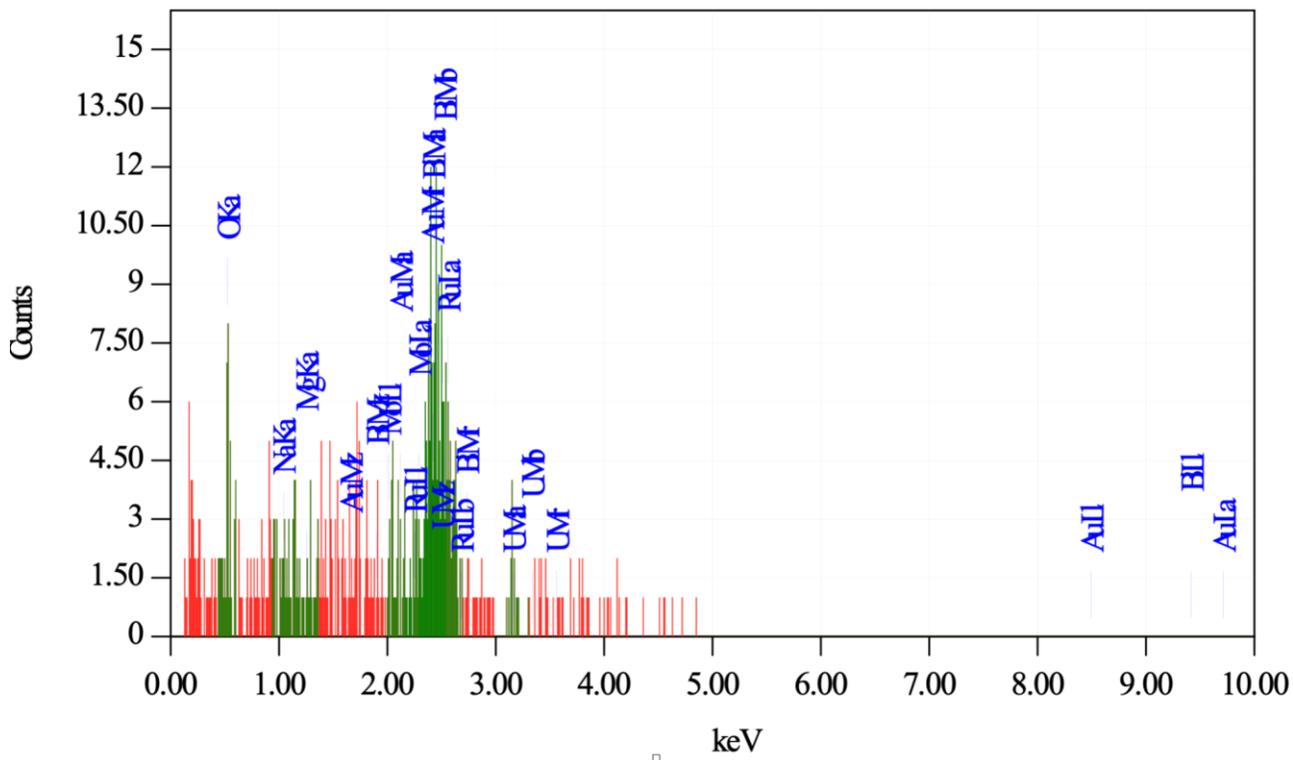
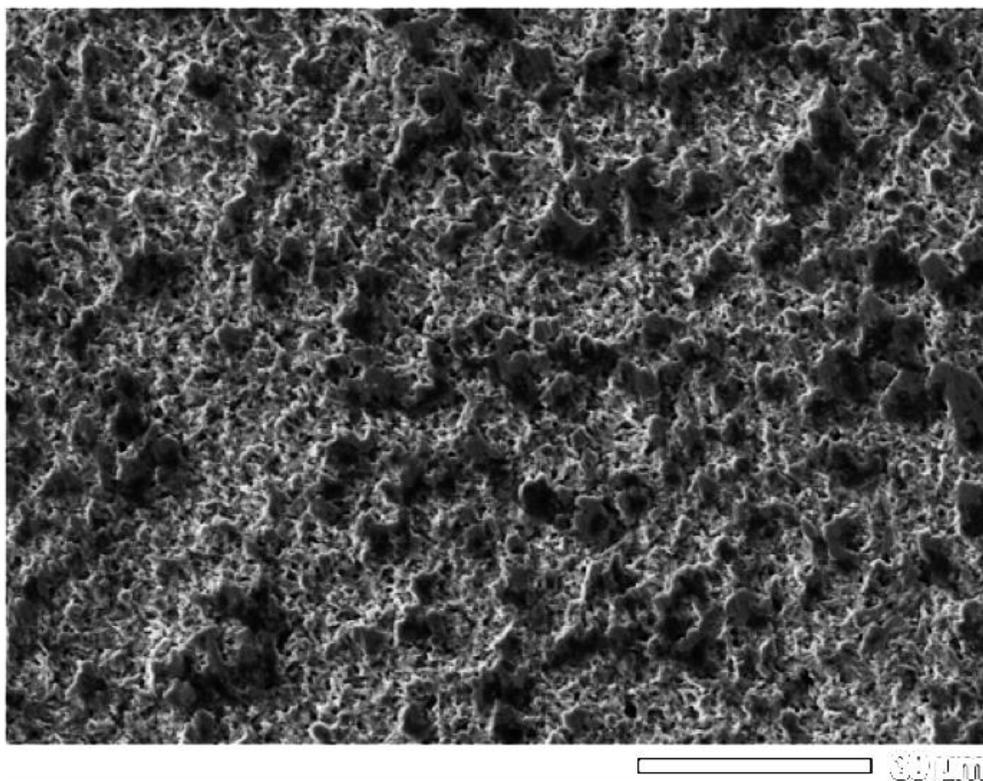


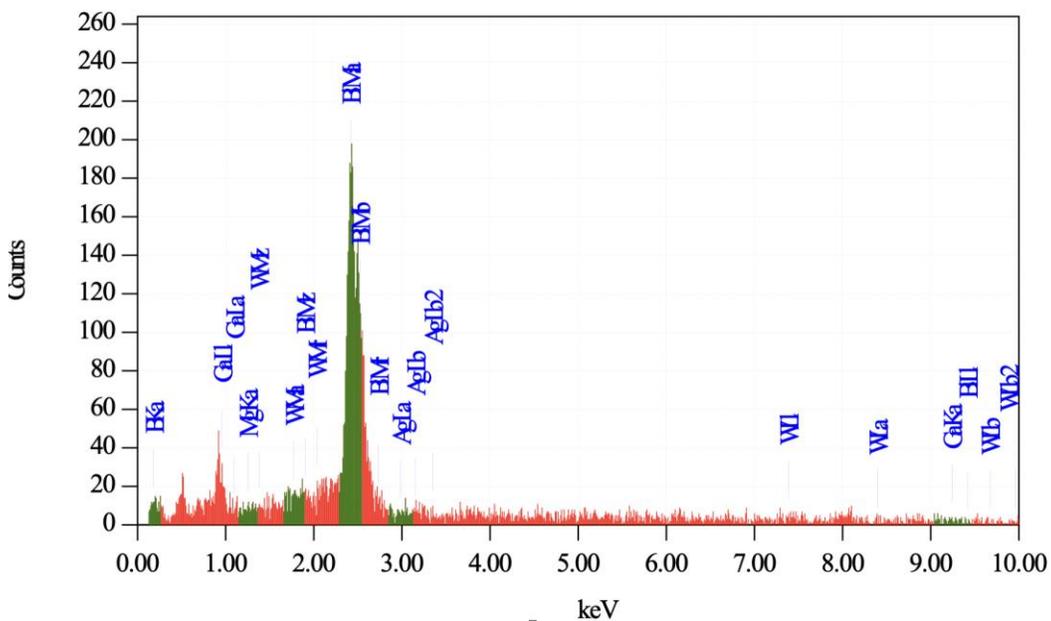
Рисунок 16.1 б рентгенофазовый анализа  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -1мА

Данные рентгено-спектрального и рентгенофазового анализов свидетельствуют о том, что содержание магния в исследуемом образце составляет около 0,01%.

На изображениях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и представленных на рисунке 17.1а, показана поверхность электроосажденных образцов магния-висмута  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА с разрешением 30 мкм. На рисунке 17.1 б представлен рентген-фазовый анализа .



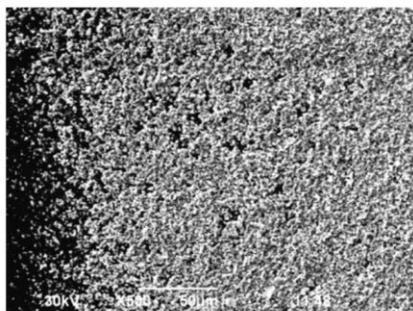
17.1 а изображение полученное при анализе СЭМ  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА



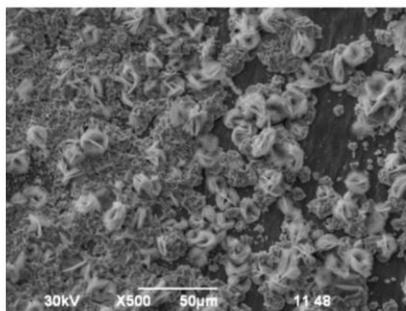
17.1 б рентгенофазовый анализа  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,5 М и  $\text{MgCl}_2$  с концентрацией 1 М время проведения осаждения 1200 сек при подаче тока -5мА

Данные рентгено-спектрального и рентгенофазового анализов свидетельствуют о том, что содержание магния в исследуемом образце составляет около 0,1%. Как мы можем заметить содержание магния в электродах небольшое по этой причине мы решили пойти другим способом и для этого были изготовлены электроды из чистого висмута. планируется внедрить в структуру висмута частички магния используя ячейку «Swagelok sell». Для начала мы выберем самый лучший образец из висмутовых электродов сделаем мы это ориентируясь на результаты рентгеноспектрального и рентгенофазового анализов и рисунки СЭМ.

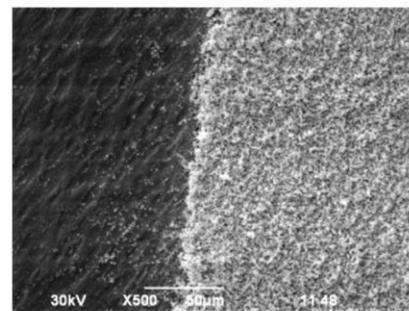
На рисунке 18 даны фотографии образцов, сделанные в разрешении пятидесяти микрометров в разных концентрациях различных электролитов, такие как хлорид висмута и нитрат висмута при разных значениях заданного тока. Все фотографии были сняты в разрешении 50 мкм.



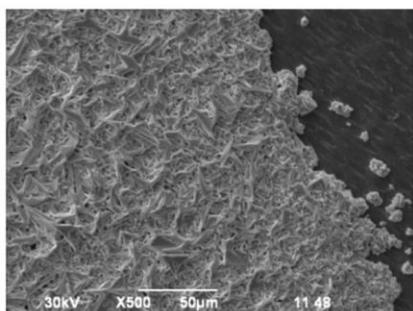
а)



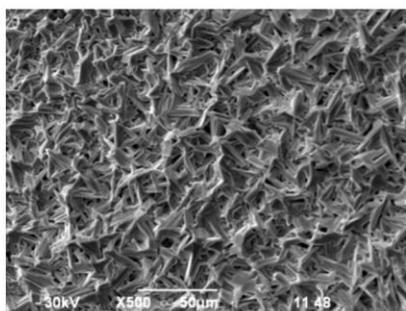
б)



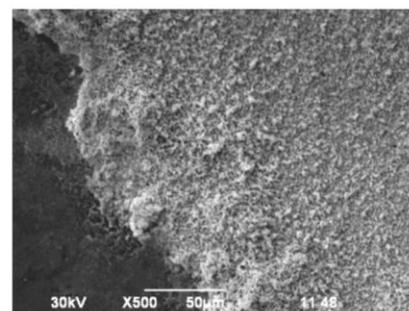
в)



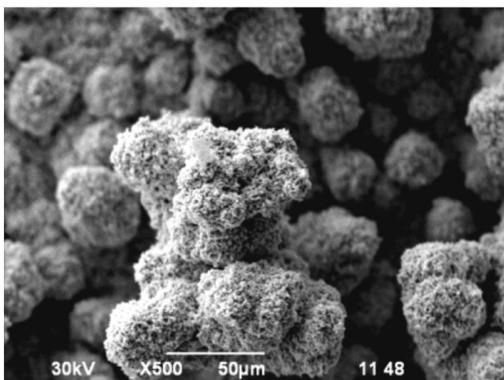
г)



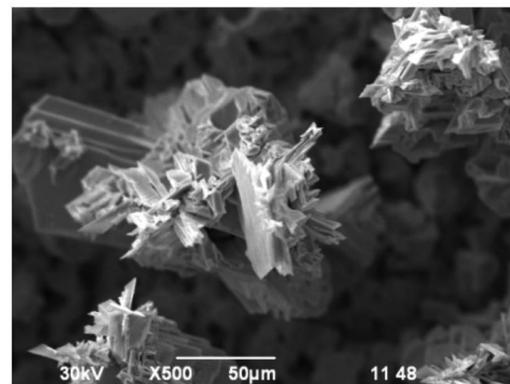
д)



ж)



к)



з)

Рисунок 18. Микрофотографии поверхности восстановленного висмута на медную подложку из различных электролитов: а) 0,1 моль/л  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  -1mA; б) 0,2 моль/л  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  -1mA; в) 0,1 моль/л  $\text{BiCl}_3$  -1mA; г) 0,1 моль/л  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  -5mA; д) 0,2 моль/л  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  -5mA; ж) 0,1 моль/л  $\text{BiCl}_3$  -5mA; з) 0,1 моль/л  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  -10mA; к) 0,1 моль/л  $\text{BiCl}_3$  -10mA.

При электроосаждении висмута на границах его зерен иногда наблюдаются небольшие пустоты. Это явление, известное как "узловой рост", характерно для многих электрохимических процессов осаждения.

Суть проблемы:

- Неполное заполнение: В процессе роста кристаллов висмута межзерновые области не всегда заполняются полностью.
- Образование пустот: В местах неполного заполнения остаются пустоты.

Причины:

- Диффузионные ограничения: Ионы висмута могут не успевать диффундировать к межзерновым границам с достаточной скоростью, чтобы заполнить все пространство.
- Конкурентные процессы: На рост кристаллов могут влиять другие процессы, такие как растворение и рекристаллизация, что приводит к образованию дефектов.

Последствия:

- Снижение механической прочности: Пустоты на границах зерен могут сделать материал более хрупким.

- Ухудшение электропроводности: Пустоты могут препятствовать потоку электронов, что приводит к снижению электропроводности.

Решение:

- Оптимизация параметров осаждения: Подбор оптимальных условий (температура, плотность тока, состав раствора) может помочь уменьшить количество пустот.

- Использование модифицирующих добавок: Добавление в раствор специальных веществ (модификаторов) может улучшить структуру и свойства осаждаемого покрытия.

По анализируемой поверхности данных на фотографии 6 образцов был сделан элементный анализ рентгеноспектральным методом. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 3. Результаты элементного анализа RSA поверхности образцов восстановленных из различных электролитов

<i>Электролит</i>	<i>(-) mA</i>	<i>%</i>
0,1 моль/л $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$	1	68,95
0,2 моль/л $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$	1	75,73
0,1 моль/л $\text{BiCl}_3$	1	71,35
0,1 моль/л $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$	5	69,29
0,2 моль/л $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$	5	59,36
0,1 моль/л $\text{BiCl}_3$	5	72,60
0,1 моль/л $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$	10	68,27
0,1 моль/л $\text{BiCl}_3$	10	67,37

Оптимальные параметры для осаждения висмута:

- Концентрация раствора: 0,2 моль/л  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$
- Ток осаждения: -1 мА

При этих условиях удалось осадить 75,73% висмута из раствора, что является наилучшим результатом таблица 3. Данный результат подтверждает эффективность выбранных параметров процесса электроосаждения для получения максимального количества висмута на электроде.

Варианты:

- Максимальное осаждение висмута (75,73%) было достигнуто при использовании раствора  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 моль/л и токе осаждения -1 мА.
- Оптимальные параметры электроосаждения висмута:
  - Концентрация раствора  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ : 0,2 моль/л
  - Ток осаждения: -1 мА
  - Эффективность осаждения: 75,73%
- Результаты исследования показали, что использование раствора  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  с концентрацией 0,2 моль/л и тока осаждения -1 мА приводит к максимальному осаждению висмута (75,73%).

После была проведена интеркаляция ионов магния в электрод с содержанием висмута 75%. Далее на необходимо проверить насколько данная процедура эффективна. Проверить эффективность мы можем используя рентгенофазовый анализ.

Результат анализа подтвердили наши предположения магнезации висмута с образованием сплава висмутита магния (рис 19).

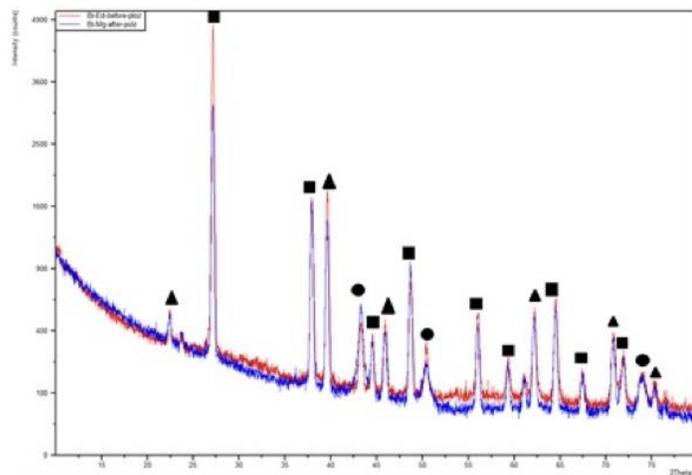
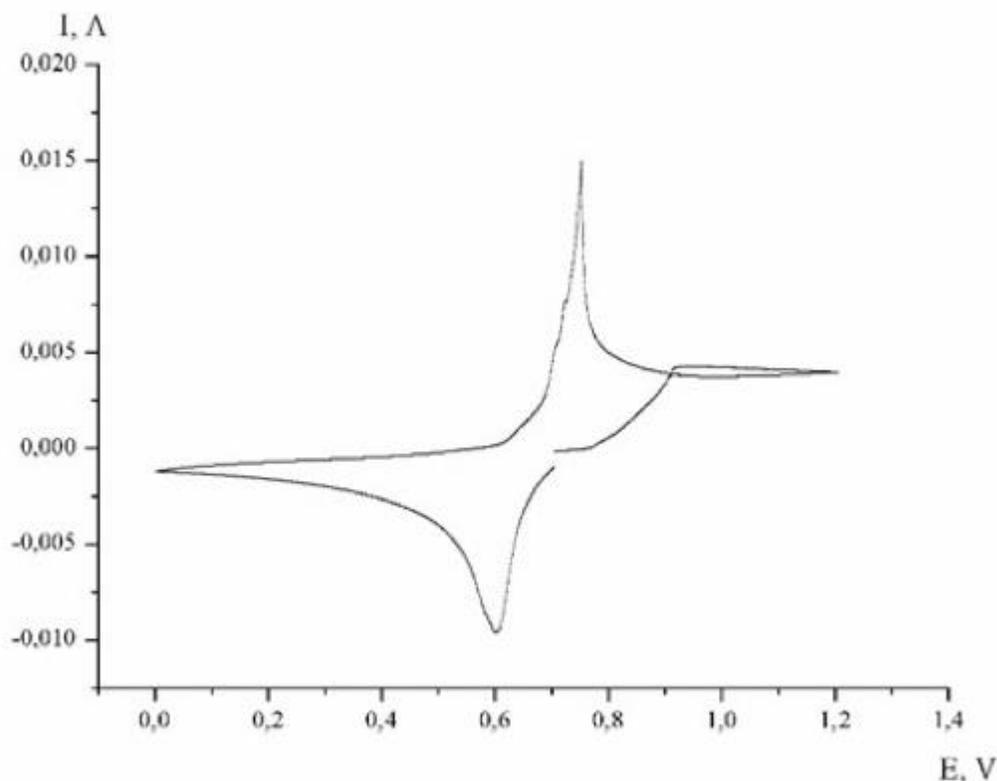


Рисунок 19- XRD поверхности висмутового электрода после внедрения иона магния

Предыдущие исследования указывают на то, что связь иона магния с другими металлами группы p в таблице Менделеева сильнее, чем связь в соединении  $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$ . Это свидетельствует о том, что более прочная связь играет ключевую роль в электрохимических свойствах извлечения  $\text{Mg}^{2+}$ . Это делает процесс извлечения ионов

магния из сплава висмут-магний более эффективным, чем из других сплавов, широко применяемых в качестве анодов. В циклической вольтамперограмме отражаются все особенности электрохимических реакций, происходящих в ячейке. Если реакции возле электродов обратимы, то среднее значение напряжений соответствует электродному потенциалу данного элемента. В случае частично или полностью необратимых реакций это равенство не соблюдается, и пики обратного тока могут быть отсутствовать. На обратном ходе происходит анодный пик, а потенциал восстановления составляет 0,6 В. Также есть пик окисления на обратном ходе циклической вольтамперометрии (рис 20).



*Рисунок 20- Циклическая вольтамперограмма разряда-ионизации висмута в растворе 0,5M Mg(TFSI)<sub>2</sub>/AN при скорости развертки 1mV/sec*

Между значением потенциала анодного и катодного пика имеется разница в 0,15 В. Отличие в потенциалах пиков восстановления и окисления является характеристикой электроактивного компонента, в данном случае – иона магния. Для обратимых электродных процессов этот параметр не зависит от скорости сканирования и составляет постоянное значение, равное  $-0,057/n$  (В). В данном исследовании разность между потенциалами составляет  $-0,075/n$  (В), что указывает на обратимый электродный процесс.

Для оценки эффективности циклического сканирования проводились циклические вольтамперограммы в зависимости от числа циклов (см. рисунок 21).

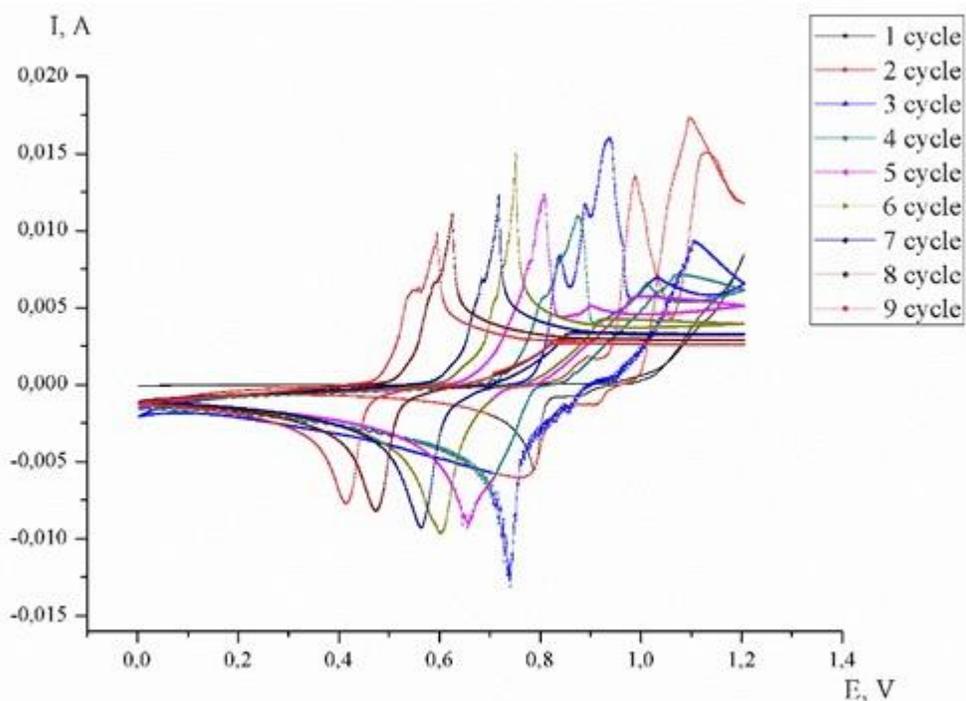


Рисунок 21-Циклические вольтамперограммы от числа циклирования разряда-ионизации висмута в растворе 0,5 моль/л  $\text{Mg}(\text{TFSI})_2/\text{AN}$  при скорости развертки 1мВ/сек

Анализируя циклические вольтамперограммы, можно увидеть, что с увеличением числа циклов потенциал смещается в более отрицательном направлении, а токи анодных и катодных пиков уменьшаются. Это указывает на то, что происходит процесс не внедрения магния, а его восстановление, что может привести к образованию нестабильных соединений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Синтезирован электродный интеркалиционный материал на основе висмута двумя способами из электролитов разных концентраций нитрата висмута и хлорида висмута при подаче тока от (-1) до (-10) мА.

2. Оптимизировано условие процесса восстановления висмута на медную подложку и подобраны концентрации, состав электролита. По массовой доле атомарного висмута наилучшим результатом стал нитрат висмута с концентрацией 0.2 моль/л и током (-1) мА, время проведения 2 часа. По результатам элементного анализа концентрация висмута в данном электроде равна 75,72%.

3. Изучены морфологические, структурные характеристики оптимизированного анодного материала. Методом сканирующей электронной микроскопии. Определено, что морфология электродного материала на основе висмута - пористая, а структура соответствует кристаллической фазе.

4. Проведен процесс интеркаляции ионов магния в синтезированный электрод на основе висмута методом циклической вольтамперометрии. Образование  $Mg_3Bi_2$  при взаимодействии электродного материала на основе висмута с ионом магния подтверждено результатами рентгенофазового анализа. Также по РФА установлено, что параметры кристаллической решетки имеют гексагональную структуру, что соответствует теоретическим значениям  $Mg_3Bi_2$ .

5. По результатам циклической вольтамперометрии при скорости сканирования 10 мВ/с, с увеличением циклов сканирования величина пиков восстановления/окисления тока пропорционально уменьшаются со сдвигом в отрицательную область потенциала, что говорит о квазиобратимости процесса. Данные результаты совпадают с результатами СЭМ поверхности анодного материала после интеркаляции ионов магния. По микроснимкам видно, что поры висмута забиваются «межфазным слоем твердого электролита» (SEI), который образуется в основном в течение первого цикла работы аккумулятора в результате восстановления электролита, что уменьшает количество циклов и приводит к необратимой потере емкости

## Список литературы

- 1 Грызункин С.С. , Прокопчук И.С. Li-ion аккумуляторы. Способы увеличения их эффективности //Наука и образование сегодня, 2020
- 2 А. В. Садовников, В. В. Макаручук. Литий-ионные аккумуляторы // Молодой ученый. — 2016. — № 23 (127). — С. 84-89.
- 3 Apostolova, R.. (2017). Magnesium batteries as alternative to lithium ones. Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. 47-62.
- 4 Лукутин Б. В., Ушаков В. Я. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение-важные составляющие в обеспечении энергетической и экологической безопасности России //Alma mater (Вестник высшей школы). – 2008. – №. 8. – С. 38-41.
- 5 Возобновляемые источники электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов [и др.]. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2012. – 272 с. – ISBN 978-5-94672-581-1. – EDN QCEJJJ.
- 6 Коротков Д.В., Рясков Н.Н. НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
- 7 Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии : Учебное пособие / С. Н. Удалов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 460 с. – ISBN 978-5-7782-2358-5.
- 8 Касатов А. Д., Ключев В. В. Возобновляемые источники энергии. – 2019.
- 9 Нечаев И. С., Шонина Д. Е. Особенности и проблемы развития ветровой энергетики //Молодой ученый. – 2019. – №. 15. – С. 44-46.
- 10 Чернов А. В. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ //Современные технологии в электроэнергетике и теплоэнергетике. – 2018. – С. 83-85.
- 11 Биогаз и биомасса / А. М. у. Кучкоров, А. Мамаюсупова, Б. Х. Каримов, З. Мирзажонов // Точная наука. – 2019. – № 40. – С. 13-17. – EDN CREIMK.
- 12 Кашкаров А. Аккумуляторы. Справочник. – Litres, 2021.
- 13 Морачевский А. Г., Попович А. А. Магний-ионные аккумуляторы-новое направление исследований //Глобальная энергия. – 2019. – Т. 25. – №. 3. – С. 133-139.
- 14 Дергунова Л. А., Хайруллова Р. М., Ваганова Е. С. БАТАРЕИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ //Актуальные вопросы энергетики. – 2022. – С. 37-40.
- 15 Польшгалов С. В. и др. Анализ распределения отработанных химических источников тока по типоразмерам, электрохимическим системам и степени опасности для окружающей среды //Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика.-2015.- №. – 2015. – С. 100-114.
- 16 КОЛЕСОВ И. Н., СКИДАН А. А., БОГАЧЕВ А. Э. ВИДЫ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ //БУДУЩЕЕ НАУКИ-2022. – 2022. – С. 407-409
- 17 Красильников А. Д. СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫЙ АККУМУЛЯТОР //Актуальные научные исследования: от теории к практике. – 2021. – С. 60-63.

18 Гуревич В. Свинцово-кислотные аккумуляторы: устройство, принцип действия, применение //Силовая электроника. – 2012. – Т. 5. – №. 38. – С. 68-74.

19 Кирилюк А. А., Ноздрачев А. В. НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫЕ И НИКЕЛЬ-МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, СПОСОБЫ ЗАРЯДА, ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ //ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ. – 2021. – С. 38-42.

20 Володин А. А. Наноматериалы для никель-металлогидридных аккумуляторов //ОРГАНИЧЕСКИЕ И ГИБРИДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ. – 2017. – С. 84-87.

21 Чувашов И. А., Кузнецов Р. О., Киселёв Г. Ю. АККУМУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ //Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук. – 2018. – С. 8-11.

22 Поюров Н. В., Таленский О. Н. НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫЙ АККУМУЛЯТОР И СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ МАСС ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ДЛЯ ЕГО ЭЛЕКТРОДОВ. – 2009.

23 Скундин А. М., Ефимов О. Н., Ярмоленко О. В. Современное состояние и перспективы развития литиевых аккумуляторов //Успехи химии. – 2002. – Т. 71. – №. 4. – С. 378..

24 Цивадзе, А. Ю. Фундаментальные проблемы литий-ионных аккумуляторов / А. Ю. Цивадзе, Т. Л. Кулова, А. М. Скундин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 149. – DOI 10.7868/S0044185613020083.

25 . ДаниловИ. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. – М.: Высшая школа, 1998. – 751 с. 2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с

26 Сперанский А. А., Лобов Д. А., Мамагин С. В. Определение огнетушащей эффективности азота при возгорании литий-ионных аккумуляторов //НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. – 2019. – С. 32.

27 Аракелян А. Г. Литий-полимерные аккумуляторы //Научные исследования. – 2018. – №. 3 (22). – С. 20-21.

28 Кебеков Т. В., Гобозов М. Д. Литиевые вторичные химические источники тока, анализ и сравнение литий-ионных аккумуляторов и литий-полимерных аккумуляторов //Научное обозрение. – 2021. – С. 80-83.

29 Буланова Е. Л., Буланов А. Ю., Красносельский М. Ю. Калия и магния аспарагинат-инфузионный раствор с антиаритмическими свойствами //Трудный пациент. – 2012. – Т. 10. – №. 10. – С. 14-19.

30 Го, З.; Чжао, С.; Ли, Т.; Су, Д.; Го, С.; Ван, Г. Последние достижения в области перезаряжаемых батарей на основе магния для высокоэффективного хранения энергии. Adv. Энергетическая Материя. 2020 , 10 , 1903591.

31 Битенч, Дж.; Доминко, Р. Возможности и проблемы в разработке катодных материалов для перезаряжаемых магниевых аккумуляторов. *Передний. хим.* 2018 , 6 , 634.

32 Сюй, Х.; Ли, Ю.; Чжу, Д.; Ли, З.; Сан, Ф.; Чжу, В.; Чен, Ю.; Чжан, Дж.; Рен, Л.; Чжан, С.; и другие. Спектроскопические исследования синхротронного излучения механизмов накопления  $Mg^{2+}$  в высокопроизводительных магниевых аккумуляторных батареях с кобальтированными катодами  $FeS_2$ . *Адв. Энергетическая Материя.* 2022 , 12 , 2201608.

33 Ли, З.; Яо, Ю.; Ли, Б.; Ван, Л.; Сюй, Х.; Чонг, Л.; Цзоу, Дж. Магниевые аккумуляторные батареи: развитие, возможности и проблемы. Подбородок. *Ж. Цветные металлы Met.* 2021 , 31 , 3192–3216. )

34 Su S. et al. A novel rechargeable battery with a magnesium anode, a titanium dioxide cathode, and a magnesium borohydride/tetraglyme electrolyte // *Chemical communications.* – 2015. – Т. 51. – №. 13. – С. 2641-2644.

35 Yao, Y.Y.; Zhan, Y.; Sun, X.Y.; Li, Z.; Xu, H.; Laine, R.M.; Zou, J.X. Advances in Cathodes for High-Performance Magnesium-Sulfur Batteries: A Critical Review. *Batteries* 2023, 9, 203. <https://doi.org/10.3390/batteries9040203>

36 Li Z. et al. Cathode materials and chemistries for magnesium batteries: challenges and opportunities // *Advanced Energy Materials.* – 2023. – Т. 13. – №. 27. – С. 2300682.

37 P. Novak, R. Imhof, O. Haas, Magnesium insertion electrodes for rechargeable nonaqueous batteries — a competitive alternative to lithium? *Electrochim. Acta*, 45 (1999) 351—367.

38 D. Aurbach, I. Weissman, Y. Cofer, E. Levi, Nonaqueous magnesium electrochemistry and its application in secondary batteries, *Chem. Record*, 3 (2003) 61—73.

39 T.S Arthur., N. Singh, M. Matsui, Electrodeposited Bi, Sb and  $Bi_{1-x}Sb_x$  alloys as anodes for Mg-ion batteries, *Electrochem. Commun*, 16 (2012) 103—106.

40 Y. Shao, M. Gu, X. Li, Z. Nie, P. Zuo, G. Li, T. Liu, J. Xiao, Y. Cheng, C. Wang, J.-G. Zhang, J. Liu, Highly reversible Mg insertion in nanostructured Bi for Mg-ion batteries, *Nano Lett*, 14 (2014) 255—260.

41 W. Jin. Z. Li, Z. Wang, Y.Q. Fu. Mg ion dynamics in anode materials of Sn and Bi for Mg-ion batteries, *Mater. Chemistry and Physics*, 182 (2016) 167—172.

42 Li Z. et al. Cathode materials and chemistries for magnesium batteries: challenges and opportunities // *Advanced Energy Materials.* – 2023. – Т. 13. – №. 27. – С. 2300682.

43 Liu X. et al. Current material design strategies on the copper chalcogenide cathodes for rechargeable magnesium batteries: a review // *Materials Chemistry Frontiers.* – 2023.

44 Yim T. et al. Magnesium anode pretreatment using a titanium complex for magnesium battery //ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2017. – T. 5. – №. 7. – С. 5733-5739.

45 <http://volta.spb.ru/>

46 <http://www.nnlot.kz/RU/inst1.html>

47 <http://xrayinstruments.ru/>

48 <https://pharma-se.ru/>

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Кенжалиева Ризана

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Установление закономерностей процессов протекающих на аноде магниевых аккумуляторов \_2024

**Научный руководитель:** Айназ Абильдина

**Коэффициент Подобия 1:** 2.7

**Коэффициент Подобия 2:** 2.5

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 2

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

#### После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата 12.08.2024г.

Заведующий кафедрой  
Кудекова Л.М.

## РЕЦЕНЗИЯ

на диссертацию Кенжаливой Р.К.

на тему “Установление закономерностей процессов, протекающих на аноде  
магниевого аккумулятора”

представленную на соискание степени магистра

по специальности 7М07143 -ХТНВ

Рецензируемая работа посвящена созданию электродов на основе висмута интеркалирующие ионы магния. Материалом для осаждения является медная пластинка. Рассмотрены свойства электродов, описание основных результатов лабораторных исследований с их дальнейшим анализом. Систематизированы подходы при создании электродов с подбором оптимальных условий и получении наилучших результатов. Были проведены анализы полученных проб и на основании результатов сделаны выводы. Результаты исследования имеют большое практическое значение и могут быть использованы для: разработки новых высокоэффективных магниевого аккумулятора, создания новых материалов для магниевого аккумулятора, оптимизации параметров работы магниевого аккумулятора.

В первой главе автор показывает теоретическое обоснование проблем с которыми сталкиваются классические виды аккумулятора. Расписано об альтернативном виде аккумулятора и его эффективности. Вторая глава посвящена методике получения электродов и описаны используемые аппаратура. В данной работе использовалось 2 методики получения электродов что позволяет провести сравнительный анализ.

По результатам анализов автор достиг поставленных перед ним целей. Прделаная работа выполнена на высоком уровне и заслуживает высокую оценку. Выбранный подход заслуживает одобрения т.к. соответствует имеющимся мировым практикам и методологиям.

Магистерская диссертация по теме: «Установление закономерностей процессов, протекающих на аноде магниевого аккумулятора» имеет научно практическую значимость и рекомендуется к защите.

Рецензент

 Батырбаева А.А.

Ст.преподаватель кафедры физической химии, катализа и нефтехимии



## ОТЗЫВ

научного руководителя на магистерскую диссертацию  
Кенжалиевой Ризаны «Установление закономерностей процессов,  
протекающих на аноде магниевых аккумуляторов»

В Казахстане, являющейся индустриальной страной проблема производства химических источников тока весьма актуальна и исследования в этой области наиболее перспективны. Поэтому замена коррозионно-активного металлического магния на интеркаляционный композитный материал представляет практическую значимость.

Магистерская диссертация Кенжалиевой Ризаны посвящена разработке метода синтеза модифицированного анодного материала на основе интеркалированного магния и исследованию физико-химических параметров полученного материала, а также испытаниям магний-ионных элементов (типа «swagelock cell») на основе синтезированного анодного материала. Для решения поставленной задачи автором предложены и оптимизированы два метода получения электродного материала. Проведено сравнение морфологических и структурных характеристик полученных анодов.

За время обучения в магистратуре Кенжалиева Ризана овладела современными методами физической химии и техникой эксперимента, принятой для исследования процессов в химических источниках тока, проявила трудолюбие, творческий подход и самостоятельность при решении поставленных задач, совмещая их с консультациями у научного руководителя по ключевым вопросам.

Все исследования проведены впервые, результаты оформлены в виде одного тезиса в Международной научной конференции «XXIV Сатпаевские чтения», посвященной 125-летию академика Каныша Сатпаева.

В целом магистерская работа представляет собой законченный структурированный научный труд, оформленный согласно существующим нормативам и заслуживает оценки «отлично», а Кенжалиева Ризана – присвоению ей квалификации магистра по специальности «7М07143 – Химическая технология неорганических веществ».

ассоциированный профессор  
кафедры ХПиПЭ, PhD



Абильдина А.К.