

Обзор

# Последние достижения в области прикладной электрохимии: обзор

Паоло Яммине <sup>1,\*</sup> , Ханна Эль-Накат <sup>1</sup>, Рима Кассаб <sup>1</sup>, Агапи Мансур <sup>1</sup>, Билал Эль Хури <sup>1</sup>, Диала Кумейр <sup>1</sup>, Зейнаб Матар <sup>1</sup> и Айман Чмайсем <sup>1,2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Баламандский университет, факультет искусств и наук, химический факультет, Триполи, а/я 100, Ливан

<sup>2</sup> Electrochemistry Consulting & Services (E2CS), основатель, Триполи, а/я 100, Ливан

\* Переписка: paolo.yammine@balamand.edu.lb (PY); ayman.chmayssem@fty.balamand.edu.lb (AC);  
Тел.: +00961-6-931 952 (доб. 3841) (PY)

**Аннотация:** Прикладная электрохимия (ПЭ) сегодня играет важную роль в широком спектре областей, включая преобразование и хранение энергии, процессы, окружающую среду, (био)аналитическую химию и многие другие. Электрохимический синтез в настоящее время доказан как многообещающий путь, позволяющий избежать всех недостатков с точки зрения высокого энергопотребления и высокого загрязнения, в то время как электрохимическое моделирование становится мощным инструментом для понимания сложных систем, прогнозирования и оптимизации электрохимических устройств в различных условиях, что сокращает время и стоимость исследования. Важнейшая роль электрохимии будет значительно рассматриваться в ближайшие годы с целью сокращения выбросов углекислого газа и поддержки перехода к зеленой и более устойчивой энергетической системе. В этой обзорной статье обобщаются последние достижения в области прикладной электрохимии. Он показывает, как эта область стала незаменимым инструментом инноваций, прогресса, решения проблем в современном мире и решения социальных проблем. проблемы в различных областях.

**Ключевые слова:** электрохимия; декарбонизация; преобразование и хранение энергии; относящийся к окружающей среде устойчивость; производство



Цитирование: Яммин, П.; Эль-Накат, Х.; Кассаб, Р.; Мансур, А.; Эль Хури, Б.; Кумейр, Д.; Матар, З.; Чмайсем,

А. Последние достижения в области прикладных Электрохимия: обзор.  
Химия 2024, 6, 407–434. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030024>

Академический редактор: Майкл Лайонс

Поступила: 29 апреля 2024 г.

Пересмотрено: 16 мая 2024 г.

Принято: 17 мая 2024 г.

Опубликовано: 23 мая 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Введение

Прикладная электрохимия (ПЭ) — ведущая современная наука, которая решает социальные проблемы в различных областях, включая преобразование и хранение энергии, процессы, окружающую среду, (био)аналитическую химию и многие другие [1–3]. В энергетическом секторе электрохимические процессы используются для преобразования и хранения энергии. Это дает возможность развивать производительные и устойчивые технологии, такие как батареи [4,5], топливные элементы [6,7] и электролиз [8,9]. Таким образом, эти достижения помогают в интеграции возобновляемых источников энергии. источников энергии и поддерживать переход к экологически чистым и более устойчивым источникам энергии.

В области охраны окружающей среды электрохимия предлагает новые решения для контроля загрязнения и очистки воды. Для разложения используются электрохимические процессы, такие как процессы прямого и непрямого электрохимического окисления и процессы продвинутого окисления органических загрязнителей [10], удаления тяжелых металлов [11–13] и улучшения очистки сточных вод биоразлагаемость [14,15]. Эти технологии предлагают эффективные и экономичные подходы к решать экологические проблемы, защищать экосистемы и улучшать качество воды.

В производственном секторе электрохимия играет жизненно важную роль в электросинтезе. Производство материалов и модификация поверхности. Электрохимические методы, такие как гальваника [16], гальванопластика [17] и электрохимическая обработка [18] используются для производить функциональные и защитные покрытия и улучшать характеристики материалов и компоненты. Эти процессы позволяют производить высококачественную продукцию с улучшенными свойствами материала и высокой прочностью. Например, электрохимический Обработка поверхностей материалов в металлургической промышленности направлена, во-первых, на создание пористых материалов, имеющих большую геометрическую площадь поверхности и, во-вторых, обеспечить возможность создания толстый слой оксида металла, который защищает и стабилизирует наноструктуру металла или полупроводник [19,20].

The diagram illustrates the interdisciplinary nature of Electrochemistry. At the center is a blue circle labeled "Electrochemistry". Surrounding it are seven other circles, each representing a different field: "Energy storage" (orange), "Material characterization" (gray), "Surface modification" (yellow), "Analysis" (blue), "Processes" (green), "Synthesis" (orange), and "Modeling" (gray). Small icons (a house, a factory, a book, a gear, a flask, a test tube, and a computer monitor) are placed between the central circle and the surrounding ones, indicating the integration of these fields into electrochemistry.

## 2. Область применения

### 2.1. Преобразование и хранение энергии

Энергия окружает нас постоянно, подпитывая нашу деятельность днем и ночью. Мы часто принять как должное удобство доступа к энергии для питания наших гаджетов, бытовой техники, машины и транспортные средства. Однако очень важно подумать о том, как мы храним эту энергию для дальнейшего использования. используйте [55]. В отличие от ископаемого топлива, которое можно легко хранить и транспортировать в его естественном виде.

В штате возобновляемые источники энергии, такие как солнечный свет и ветер, требуют метода промежуточного хранения из-за их прерывистого характера. В результате батареи считаются единственным решением для хранения этой энергии, чтобы ее можно было использовать при необходимости, обеспечивая важнейший мост между производством и потреблением энергии [56,57].

Существует два типа батарей: те, которые хранят энергию для одноразового использования, например, непerezаряжаемые батареи, и те, которые предназначены для многократного использования, например, перезаряжаемые батареи. Наше внимание сосредоточено на батареях, известных своей способностью многократно хранить и выделять энергию, что приводит к экономической эффективности и экологичности в различных приложениях [58]. Области применения аккумуляторов делятся на три основные категории: транспорт и автомобилестроение, включая электромобили (EV); портативная электроника; и стационарные накопители энергии, причем каждый тип требует уникальных характеристик. В таблице 1 представлены различные типы коммерческих аккумуляторов, используемых для хранения энергии, а также их основные применения, преимущества и недостатки.

Фактически, прогресс электромобилей во многом зависит от совершенствования технологии аккумуляторов, которая сталкивается с различными препятствиями, такими как недостаточно развитые батареи и проблемы практического применения [59]. Свинцово-кислотные аккумуляторы (Pb-A) исторически доминировали на рынке аккумуляторных батарей, особенно в автомобильном секторе, благодаря своей значительной доле на рынке с точки зрения продажной стоимости и производства энергии. Однако батареи Pb-A имеют присущие им ограничения, в том числе относительно короткий срок службы, низкую плотность энергии, подверженность расслоению кислоты и утечке в случае повреждения, а также проблемы с уменьшением размеров из-за проблем, связанных с производством свинца. Более того, воздействие свинцово-кислотных аккумуляторов на окружающую среду хорошо документировано [60,61], что требует масштабных усилий по переработке для смягчения их неблагоприятного воздействия. Следовательно, литий-ионные батареи (LIB) стали многообещающей альтернативой, набирающей обороты благодаря своим многочисленным преимуществам, включая высокую эффективность хранения, близкую к 100%, и предлагающий широкий спектр химических веществ, что делает их подходящими для различных устойчивых систем. приложения [62]. В наиболее распространенных конструкциях ЛИА ячейки состоят из отрицательного электрода, называемого анодом, и положительного электрода, называемого катодом, разделенных изолирующим сепаратором и окруженных электролитом. Во время разряда ионы лития переносятся от анода через сепаратор к катоду и связываются с активным материалом. Одновременно электроны высвобождаются и передаются по внешней цепи от анода к катоду. При зарядке ЛИА движение ионов и электронов лития меняется на противоположное с помощью подключенного источника питания [63].

В последние годы особое внимание уделялось развитию катетеризации. оды быть более устойчивыми и безопасными. Эти усилия привели к коммерциализации различных катодных материалов на рынке электромобилей, включая  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$  (NCA),  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO),  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  (LNMO) [64],  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) и  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$  (NMC) на базе аккумуляторов. Каждый из этих материалов предлагает свой набор преимуществ перед другими [65]. Аккумуляторы на основе NCA, LFP и NMC широко используются в электромобилях, производимых такими компаниями, как BMW, Chevrolet, Nissan, Tesla и т. д. [66]. Хотя Li-air и Li-S аккумуляторы уже произведены, они еще не готовы для использования в автомобилях. Однако натрий-ионные батареи становятся потенциальной альтернативой литий-ионным батареям.

С другой стороны, персональные устройства, включая смартфоны, ноутбуки, планшеты, камеры и носимые устройства, в значительной степени зависят от накопителей энергии, чтобы эффективно функционировать в компактных конструкциях. Аккумуляторы служат основным источником питания для этих устройств, требующих относительно небольшой емкости хранения в ограниченных объемах и легких форматах. Среди типов аккумуляторов LIB, особенно те, в которых используются LMO и  $\text{LiCoO}_2$ , особенно хорошо подходят для мелкосерийной электроники. Они служат основным катодом питания в различных устройствах, от смартфонов и компьютеров до электроинструментов. Более того, полезность LIB выходит за рамки питания портативной электроники и транспорта. Теперь они играют жизненно важную роль в поддержке электросетей. Это расширение позволяет интегрировать различные возобновляемые источники энергии, что в конечном итоге повышает эффективность систем передачи и распределения [67].

Таблица 1. Краткое описание устройств накопления энергии (аккумуляторов) с их применением, преимуществами и недостатками.

| Тип батареи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Химия батареи                                                    | Основной<br>Приложение                                                                                         | Специфический<br>Энергия (Втч/кг) | Преимущества                                                                                                                 | Недостатки                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Свинцово-кислотный [58]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Pb-A                                                             | Автомобильная промышленность (EV) и промышленное использование                                                 | 30-50                             | - Бюджетный                                                                                                                  | - Ограниченная плотность энергии                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Хорошо отлаженные производственные процессы и широкая доступность.                                                         | - Короткий срок службы (500-1000 циклов)                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Высокая производительность в различных условиях                                                                            | - Требования к техническому обслуживанию, связанные с такими проблемами, как расслоение кислоты и утечка. |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   |                                                                                                                              | - Экологические проблемы, связанные с использованием свинца (тяжелого металла)                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   |                                                                                                                              | - Ограниченное использование в приложениях, где вес беспокойство                                          |
| Литий-ионные батареи (LIB)<br>(Множество возможных химических реакций), [63,65]<br><br>LIB имеют более высокую плотность энергии, что позволяет создавать более легкие конструкции, более высокую стабильность и долговечность по сравнению с Pb-A.<br><br>Чувствителен к низким температурам, но улучшения продолжают и становятся более конкурентоспособными по мере развития. | Оксид лития и марганца (LMO)                                     | Портативная электроника (например, смартфоны, ноутбуки). Электронные инструменты.                              | 100-150                           | - Более низкая стоимость                                                                                                     | - Более низкая плотность энергии                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Оксид лития и кобальта (LCO)                                     |                                                                                                                | 150-250                           | - Лучшая термическая стабильность и безопасность по сравнению с LCO, что делает их подходящими для некоторых электромобилей. | - Сокращенный срок службы (300-700 циклов)                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Литий-железо-фосфат (LFP)                                        | Электронные инструменты и электромобили                                                                        | 90-120                            | - Более высокая плотность энергии.                                                                                           | - Более высокая стоимость                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Литий Никель Кобальт Оксид алюминия (NCA)                        | Сетевое хранилище и электромобили                                                                              | 155-260                           | - Увеличенный срок службы (500-1000 циклов)                                                                                  | - Экологические проблемы, связанные с добычей кобальта.                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Литий Никель Марганец Кобальт Оксид (NMC)                        | Электронные инструменты, электромобили                                                                         | 150-200                           | - Самый безопасный                                                                                                           | - Самая низкая плотность энергии среди трех катодов                                                       |
| Полимерные аккумуляторы, [68,69]<br><br>Компания: Эвоник<br>- Использовать уникальные методы обработки, такие как печать.                                                                                                                                                                                                                                                        | Редокс-активные полимеры для катода, анода или обоих электродов. | Медицинская и логистическая сферы                                                                              | 50-200                            | - Лучшая термическая стабильность                                                                                            | - Низкая термическая стабильность                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Изготовление тонких и гибких батарей.                                                                                      | - Системы терморегулирования аккумуляторов (BTMS) требования                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Высокая скорость                                                                                                           | - Требования BTMC                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Не содержит металлов и подлежит вторичной переработке                                                                      | - Ограничения по разрядной емкости и выходному напряжению.                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   |                                                                                                                              | - Ограниченная применимость к маломощным системам                                                         |
| Биотопливо [70-74]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Ферментативные топливные элементы                                | Идеально подходит для носимых устройств и имплантатов:<br>- Компактный<br>- Интегрируемый<br>- Биобезопасность | 20-300                            | - Недорогой                                                                                                                  | - Низкая плотность энергии                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Легкий                                                                                                                     | - Кратковременная стабильность (снижение выходной мощности с течением времени)                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  |                                                                                                                |                                   | - Гибкий                                                                                                                     |                                                                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                  | Ориентирован на макромасштабное производство электроэнергии из окружающей среды.                               |                                   | - Экологичный                                                                                                                |                                                                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Микробные топливные элементы                                     | - Подходит для<br><br>Приложения с минимальным энергопотреблением (например, очистка сточных вод)              |                                   | - Биоразлагаемый<br>- Способен генерировать электроэнергию из различных видов органических веществ.                          |                                                                                                           |

Альтернативная стратегия на пороге коммерциализации, помимо разработки катодов, предполагает переход от графитовых анодов к кремниевым анодам. Кремний, распространенный, нетоксичный и экономичный материал, обеспечивает значительно большую емкость хранения.

Первоначальные попытки создать аноды исключительно из чистого кремния не увенчались успехом. Однако более перспективный подход, который в настоящее время разрабатывается в промышленности, предполагает введение в анод пористых или других углеродных добавок [75]. В настоящее время различные производители, такие как Varta, Sila Nanotechnologies, Enox Corporation, Gotion High-Tech и другие, активно работают над композитными анодами с варьирующимися, но увеличивающимися пропорциями кремния и/или SiOx или TiSi [76]. Замена обычных электродов, таких как графит или кремний, на графен может повысить стабильность и срок службы батареи, а также обеспечить более высокую плотность энергии при меньших затратах. Однако структурные ограничения графена ограничивают размер батареи, тем самым ограничивая емкость хранения энергии в первую очередь небольшими устройствами, что делает их непригодными для больших аккумуляторных блоков, в том числе для электромобилей [77,78].

Текущие достижения в области нанотехнологий направлены на миниатюризацию электронных устройств для обеспечения питания по требованию. Микро/нанобатареи на основе литий-ионных аккумуляторов являются отличными кандидатами для этой цели: они отличаются небольшими размерами, легким весом, высокой емкостью и длительным сроком службы, а также обеспечивают стабильность и безопасность, что делает их пригодными для хранения энергии в микроустройствах и носимые приложения [79]. Помимо разработки батарей на металлической основе, органические батареи, также известные как батареи на полимерной основе, имеют ряд преимуществ перед своими обычными аналогами на металлической основе: они не содержат токсичных и редких тяжелых металлов, их органическое сырье потенциально может быть получено из возобновляемых ресурсов, а в конце жизненного цикла их можно утилизировать путем сжигания без токсичных остатков. В начале 2000-х годов были изучены различные потенциальные возможности применения этих батарей, которые более экологичны. Тем не менее, эти системы до сегодняшнего дня не нашли коммерческого применения, при этом Evonik Industries в настоящее время находится на переднем крае поставок материалов для печатных батарей на основе полимеров, которые можно использовать в тонких и гибких устройствах [69,80]. Биобатареи на основе биотопливных элементов также становятся решением с нулевым уровнем выбросов CO<sub>2</sub>. Хотя эти биобатареи все еще находятся на стадии разработки, они обеспечивают чистое, безопасное, долговечное и эффективное хранение энергии, что соответствует будущим климатическим целям. Они используют ферменты, органеллы или микроорганизмы в качестве экологически чистых биокатализаторов для преобразования химической или биологической энергии в электрическую, обеспечивая устойчивое производство электроэнергии для портативных, носимых, имплантируемых или проглатываемых устройств, а также предлагая долгосрочные решения для необслуживаемой экологической электроники. [70,81].

Компания BeFC (Bioenzymatic Fuel Cells) разработала первые экономичные и эффективные бумажные биотопливные элементы. Эти элементы не содержат металлов, органичны, пригодны для вторичной переработки, компостирования, безопасны и устойчивы.

Учитывая ожидаемый рост спроса на аккумуляторы к 2050 году, компания Verkor со штаб-квартирой во Франции запустила гигафабрику по производству аккумуляторов. Их цель — производство низкоуглеродистых высокопроизводительных электрических батарей, в первую очередь LIB, для поддержки усилий по устойчивой мобильности. Эта инициатива направлена на снижение зависимости от китайских производителей аккумуляторов и создание большего количества рабочих мест.

Помимо использования батарей с нулевым чистым выбросом CO<sub>2</sub>, решающее значение имеет утилизация батарей [58]. Поскольку большинство материалов для аккумуляторов подлежат вторичной переработке, инвестиции в устойчивые методы производства необходимы для смягчения воздействия на окружающую среду и удовлетворения растущих потребностей в энергии. Признавая эту необходимость, были созданы шведская компания по производству аккумуляторов NorthVolt и ее дочерняя компания Revolt, которая занимается переработкой отходов. Эти предприятия предназначены не только для производства высококачественных батарей, но и для реализации комплексных стратегий переработки. Эти компании играют ключевую роль в минимизации истощения ресурсов и сокращении выбросов углекислого газа, связанных с производством и утилизацией аккумуляторов, от первоначального выбора компонентов (батарейки, не содержащие Li или Co) до процесса переработки по окончании срока службы (рис. 2).

anes recycling, ave een estaise. Эти предприятия направлены не только на производство высококачественных аккумуляторов, но и на реализацию комплексных стратегий переработки. Эти компании играют ключевую роль в минимизации истощения ресурсов и сокращении выбросов углекислого газа, связанных с производством и утилизацией аккумуляторов, от первоначального выбора компонентов (батарейки, не содержащие Li или Co) до процесса переработки по окончании срока службы (рис. 2).

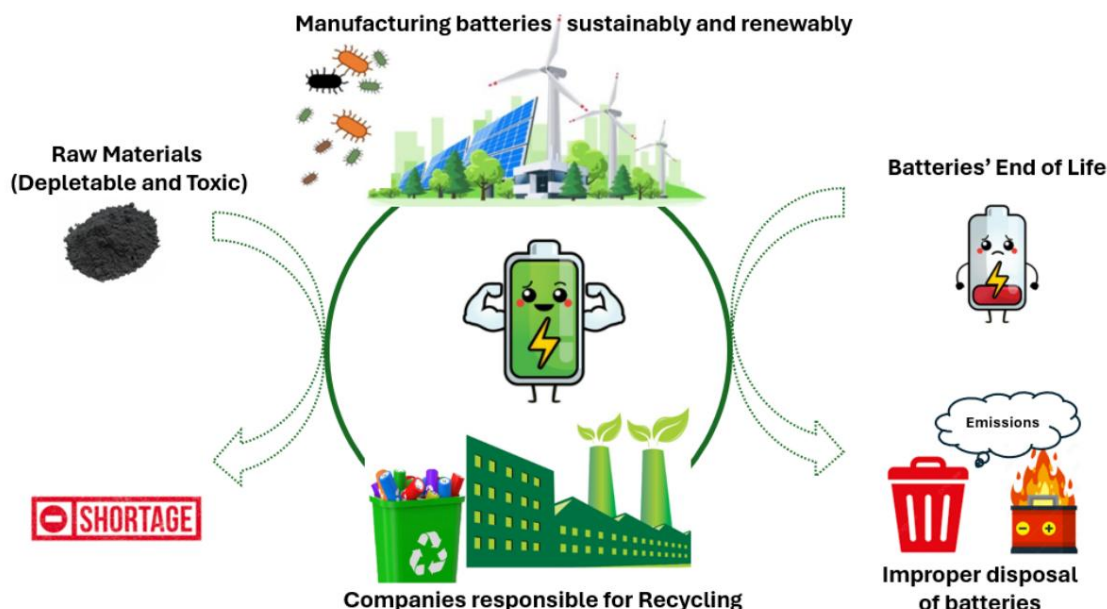


Рисунок 2. Иллюстрация изготовления батарей с использованием сырья, такого как Pb, Li и Co, и Рисунок 2. Иллюстрация изготовления батарей с использованием сырья, такого как Pb, Li и Co, и их тенденции к нехватке в долгосрочной перспективе (левая сторона), за которой следует фаза конца срока службы, после использования и неправильной утилизации, представляющая опасность (правая сторона). В центре – тенденция недавние и будущие компании – это переработка батарей и производство новых экологически устойчивыми методами; следовательно, будущие компании – это переработка батарей и производство новых экологически устойчивыми методами. Пер, используя возобновляемые ресурсы, такие как солнечная энергия, энергия ветра, бактерии и ферменты. образом, используя возобновляемые ресурсы, такие как солнечная энергия, энергия ветра, бактерии и ферменты.

## 2.2. Характеристика материала

Электрохимическая характеристика указывает на ряд методов в области электрохимической характеристики, указывает на ряд методов в области электрохимии, которая используется для анализа и понимания свойств и поведения электрохимии, которая используется для анализа и понимания свойств и поведения материалов или систем. Эти методы включают применение электрических стимулов и измерение результирующие электрические или электрохимические сигналы для понимания различных свойств, такие как проводимость, поверхностная реакционная способность [82], коррозионная стойкость [83], каталитическая активность [84], и ионный транспорт [85]. Методы электрохимической характеристики являются ценными инструментами для анализ обоих видов в растворе и твердом состоянии.

Для веществ, растворенных в растворе, применяются обычные методы, такие как циклическая вольтамперометрия. хроноамперометрия, потенциометрия и импедансная спектроскопия используются для электрохимическая характеристика. Однако для твердых материалов полостные микроэлектроды обычно используется. Чтобы охарактеризовать электроактивные частицы, твердые вещества помещают в полость микроэлектрод и проводят электрохимическую характеристику. В этой части каждый Кратко описана методика и приведены примеры.

Циклическая вольтамперометрия (ЦВ) — мощный и популярный электрохимический метод, обычно используется для изучения процессов восстановления и окисления молекулярных частиц. резюме также ценен для изучения химических реакций, инициируемых переносом электрона, включая катализ, предоставление информации о каталитических процессах и облегчение понимания окислительно-восстановительного процесса. механизмы в различных системах [27]. Циклическая вольтамперометрия характеризует электрохимические систем путем измерения токового отклика ( $i$ ) как функции приложенного напряжения ( $E$ ) ( $i$  vs.  $E$ ), предоставляя информацию об окислительно-восстановительных реакциях, кинетике переноса электронов и стабильности электроактивные частицы [86]. Этот метод включает в себя линейное и циклическое сглаживание напряжение, одновременно отслеживая результирующий ток, допуская пиковые потенциалы, пиковые токи и другие электрохимические параметры, подлежащие определению [87]. В резюме дворецкий – Уравнение Фольмера (уравнение (1)) часто используется для моделирования кинетики переноса электронов на интерфейс электрода следующий:

$$j = i_0 \left( \exp \frac{\alpha n F \eta}{RT} - \exp \left( -\frac{(1 - \alpha) n F \eta}{RT} \right) \right) \quad (1)$$

где  $i$  — плотность тока,  $i_0$  — плотность тока обмена (в А/м<sup>2</sup>),  $\alpha$  — коэффициент переноса заряда (безразмерный),  $n$  — число электронов, участвующих в электродной реакции,  $R$  и  $F$  — соответственно идеальный газ и константы Фарадея,  $T$  — температура, а  $\eta$  — перенапряжение, определяемое как разность между приложенным электродным потенциалом и равновесным потенциалом электродной реакции.

С другой стороны, хроноамперометрия — это электрохимический метод, который измеряет электрический ток ( $i$ ) как функцию времени ( $i$  в зависимости от  $t$ ), когда к электроду прикладывается постоянный электрический потенциал ( $E$ ). В отличие от циклической вольтамперометрии, которая предполагает приложение потенциала, который циклически меняется, хроноамперометрия поддерживает постоянный потенциал и измеряет результирующий электрический ток с течением времени в соответствии с законом Коттрелла (уравнение (2)). Этот метод часто используется для изучения электрохимических реакций с конкретными электродными материалами и для определения кинетических констант электрохимических реакций [88,89].

$$i = \frac{nFAD^{1/2}C}{\pi^{1/2}t^{1/2}} \quad (2)$$

где  $i$  — ток,  $n$  — количество электронов, участвующих в электрохимической реакции,  $F$  — постоянная Фарадея,  $A$  — площадь электрода,  $D$  — коэффициент диффузии электроактивных частиц,  $C$  — концентрация электроактивных частиц,  $t$  — время (в секундах).

Широко распространено мнение, что стационарная амперометрия с использованием микроэлектродов и на основе потенциальных пошаговых экспериментов обеспечивает превосходную точность для мониторинга состояния заряда (SOC) в электролитах окислительно-восстановительных проточных батарей (RFB). Был разработан новый аналитический метод для измерения амперометрического состояния заряда (SOC) и состояния здоровья (SOH) в отдельных электролитах окислительно-восстановительных проточных батарей (RFB), ориентированный на сигналы переходного тока, полученные в ступенчатых экспериментах с хроноамперометрическим потенциалом [90].

С другой стороны, потенциометрическое измерение — это метод, используемый для определения концентрации ионов в растворе путем измерения разницы электрических потенциалов ( $E$ ) между электродом сравнения (обычно Ag/AgCl) или псевдоэлектродом сравнения и рабочим электродом. электрода [91–93] в зависимости от времени ( $E$  в зависимости от  $t$ ). Этот метод основан на уравнении Нернста (уравнение (3)), которое связывает измеренный потенциал с концентрацией ионов в растворе. Он отличается простотой и чувствительностью; однако присутствие различных ионов в растворе позволяет измерить смешанный потенциал, который пропорционален концентрации ионов.

$$E_{\text{Cell}} = E^0_{\text{ин}} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Бык}]}{[\text{Красный}]} \quad (3)$$

где  $R$  и  $F$  — идеальный газ и константы Фарадея соответственно,  $n$  — число электронов,  $T$  — температура, а  $E^0$  — стандартный потенциал целевого аналита.

В области аккумуляторов коэффициент энтропии ( $dUOC/dT$ ) служит важнейшим параметром для прогнозирования тепловыделения в литий-ионных батареях (LiB), особенно в условиях низкой мощности. Хотя потенциометрический метод обычно используется для измерения коэффициента энтропии, его точность достигается за счет времени. Следовательно, существует острая необходимость в эффективном и точном методе измерения энтропии. Предложенный быстрый и точный улучшенный потенциометрический метод, известный как положительная регулировка (ПА), сокращает время релаксации до 10 мин. Для проверки метода ПА используются коммерческие литий-ионные элементы 18650. Сравнение профилей энтропии, полученных методом ПА и традиционным потенциометрическим методом (КПМ), показывает сопоставимую точность со средней ошибкой  $\pm 0,01$  мВ/К. Даже по сравнению с недавними альтернативными методами метод ПА демонстрирует заметные преимущества в эффективности измерений [94].

И наоборот, измерение импеданса ( $Z$ ) — это метод, используемый для характеристики электрического поведения системы в ответ на переменный электрический сигнал (для фиксированного диапазона частот) [95]. Импеданс является мерой сопротивления электрической цепи переменному току (согласно закону Ома) и может включать в себя компоненты сопротивления, емкости

индуктивность. Существует несколько методов измерения импеданса, например электрохимический импедансная спектроскопия (EIS), которая широко используется для изучения электрохимических процессов в батареях [96,97], датчиках [98,99] и других электрохимических системах (рис. 3). Метод измерения во временной области, использующий заранее заданную модель эквивалентной схемы, включающий в себя многочисленные последовательно соединенные резисторы и конденсаторы, параллельные элементы, были исследованы как средства измерения спектра электрохимического импеданса литий-ионного аккумулятора, исключая при этом кажущиеся импедансы, возникающие в результате изменений напряжения холостого хода в низкочастотный диапазон. Первоначально было проведено обширное экспериментальное исследование, чтобы определить оптимальные условия подаваемого сигнала, подходящие для данной методики. Это Установлено, что спектр импеданса находится в пределах от нескольких десятков микрогерц до несколько десятков миллигерц можно точно измерить, выбрав подходящий низкочастотный и длительный заряд или разряд постоянным током в качестве приложенного сигнала. Впоследствии спектры импеданса, исключая кажущиеся импедансы, возникающие в результате напряжения холостого хода изменения были измерены в различных условиях с использованием этой методики. Фундаментальные характеристики импедансов, связанные с твердофазными диффузионными процессами лития в соответствующем низкочастотном диапазоне. Выяснилось, что спектр импеданса, исключая кажущиеся импедансы, возникающие в результате разомкнутой цепи изменения напряжения в низкочастотном диапазоне (от нескольких десятков микрогерц до несколько десятков миллигерц), можно разумно разделить на два Варбурга конечной длины импедансы. Эти импедансы можно четко охарактеризовать различиями в значениях их постоянных времени диффузии и зависимостью их диффузионных сопротивлений от состояния заряда. Кроме того, для обоих из них была подтверждена температурная зависимость аррениусовского типа. диффузионные сопротивления. Метод измерения во временной области с использованием заранее установленного эквивалента. Модель цепи (ЕСМ) была исследована для анализа спектра электрохимического импеданса в литий-ионные аккумуляторы (ЛИБ). Экспериментальные исследования определили оптимальные условия сигнала, позволяющие проводить точные измерения в низкочастотном диапазоне. Были проанализированы спектры импеданса, исключая кажущиеся импедансы от изменений напряжения разомкнутой цепи, и выявили различные характеристики, связанные с SOC и температурой батареи. Эта техника позволила разделить двух импедансов Варбурга конечной длины с четкой постоянной времени диффузии значения и зависимости SOC. Минимальные изменения наблюдались в постоянных времени импеданса, следовательно, их потенциал для определения SOC. Импедансы Варбурга конечной длины и их потенциальные взаимодействия с другими параметрами, такими как температура, SOC и напряжение, могут быть использованы для мониторинга состояния батареи и диагностики неисправностей. Электрохимический импеданс является одним из наиболее распространенных методов для исследования электрохимических систем. Импеданс является комплексной величиной, состоящей из действительной и мнимой частей. Действительная часть импеданса (Z') связана с сопротивлением, а мнимая часть (Z'') связана с индуктивностью. Спектр импеданса (EIS) представляет собой зависимость импеданса от частоты. Временная область измерения импеданса (EIS) позволяет измерять импеданс в широком диапазоне частот. Временная область измерения импеданса (EIS) позволяет измерять импеданс в широком диапазоне частот. Временная область измерения импеданса (EIS) позволяет измерять импеданс в широком диапазоне частот.

Химия 2024, 6, НА ЭКСПЕРТНУЮ РЕЦЕНЗИЮ

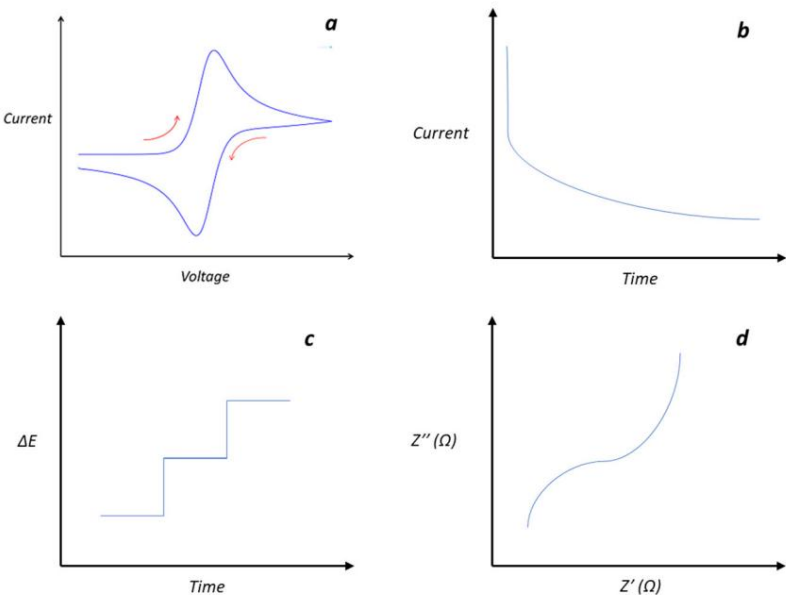


Рисунок 3. Типичные электрохимические методы, обычно используемые для определения характеристик материалов. А – циклическая вольтамперометрия, Б – хроноамперометрия, В – ступенчатая потенциометрия, Г – импедансная спектроскопия. Троскопия.

Резонаторные микроэлектроды (CME) используются в различных областях научных исследований [100], включая электрофизиологию, нейробиологию, материаловедение [101,102], аналитическую химию и даже в батареях [103]. Обычно они изготавливаются из проводящего материала, часто металлического, с небольшой полостью на конце (глубиной десятки микрон и больше). Эти микроэлектроды используются для

Резонаторные микроэлектроды (СМЕ) используются в различных областях научных исследований [100], включая электрофизиологию, нейробиологию, материаловедение [101,102], аналитическую химию и даже в батареях [103]. Обычно они изготавливаются из проводящего материала, часто металлического, с небольшой полостью на конце (глубиной десятки микрон и больше). Эти микроэлектроды используются для измерения электрических сигналов в очень небольших масштабах. Полость на конце электрода обеспечивает лучшую электропроводность между электродом и средой.

который он вставляет. Эта функция повышает чувствительность электрофизиологических или электрохимических измерений. В аккумуляторах для изучения электрохимических процессов, происходящих внутри аккумулятора, используются полостные микроэлектроды. Они позволяют точно измерять электрические токи и электрохимические потенциалы в очень мелких масштабах, тем самым способствуя пониманию производительности и долговечности батарей. Полостные микроэлектроды в области аккумуляторов характеризуются небольшими размерами, высокой плотностью энергии, быстрым откликом, стабильностью и долговечностью, а также способностью обеспечивать точный контроль электрохимических процессов. Они открывают потенциал для новых архитектур аккумуляторов, которые могут привести к повышению производительности и энергоэффективности. Полостные микроэлектроды (СМЕ) обеспечивают ценную платформу для оценки электрокаталитических характеристик материалов из микро- и наночастиц. Необходимо учитывать технические факторы и физико-химические процессы, влияющие на электрохимический отклик ХМЭ, особенно доступность окислительно-восстановительных соединений на поверхности электрокатализатора. Вольтамперометрический отклик полостных микроэлектродов (СМЕ) исследуется с использованием комбинированного экспериментального и теоретического подхода. Это включает в себя сравнительное изучение методов циклической вольтамперометрии и прямоугольной вольтамперометрии (КВВ). Результаты демонстрируют искажение емкостного отклика, увеличивающееся с увеличением площади поверхности порошка, но с фарадеевским откликом, аналогичным отклику встроенных микродисков, что указывает на то, что электрохимические реакции происходят преимущественно в первом слое порошкового наполнителя. Кроме того, показано, что SWV хорошо подходит для дискриминации фарадеевских процессов на КВМ, и представлены точные математические выражения для его описания. Эти результаты дают рекомендации по разработке и анализу вольтамперометрических измерений КВМ [104].

Таким образом, хотя циклическая вольтамперометрия, импедансная спектроскопия, потенциометрия и хроноамперометрия — все это электрохимические методы, используемые в исследованиях батарей, каждый из них имеет свои собственные принципы, приложения, преимущества и ограничения. Выбор метода зависит от конкретных аспектов изучаемого поведения батареи и желаемого уровня детализации и сложности анализа.

### 2.3. Модификация

поверхности. Модификация поверхности электрохимическими методами принимает различные формы с помощью различных процессов, таких как гальваника, электроосаждение, анодирование, травление поверхности и электрохимическая функционализация. В этом разделе кратко излагается концепция каждого из вышеупомянутых процессов и основное внимание уделяется основным приложениям, связанным с каждым методом.

Процессы гальваники и электроосаждения иногда используются как взаимозаменяемые. Однако в техническом контексте они относятся к разным процессам. Гальваника – это процесс нанесения тонкого слоя металла на поверхность подложки с помощью электрохимической реакции [16,105]. Он широко используется в металлургической промышленности, такой как автомобилестроение, электроника и ювелирное производство (например, никелевые покрытия, платиновые покрытия [106], золотые покрытия [107], медные покрытия [108] и т. д.) с целью производства защитных покрытий для предохранения поверхностей от агрессивных воздействий, тем самым повышая эксплуатационные характеристики материалов и улучшая физические свойства деталей (яркость, форма и т. д.). И наоборот, электроосаждение относится к процессу нанесения любого материала на поверхность подложки с использованием электрохимических методов. Электроосаждение позволяет получать высококачественные изделия с улучшенными свойствами материала и высокой долговечностью. Он позволяет проводить электроосаждение сплавов, композитов или неметаллических материалов (например, осаждение стекол [109], кремния [110] и проводящих полимеров типа полипир-

компонентов (яркость, форма и т. д.). И наоборот, электроосаждение относится к процессу нанесения любого материала на поверхность подложки с использованием электрохимических методов. Электроосаждение позволяет получать высококачественные изделия с улучшенными свойствами материала и высокой прочностью. Он позволяет выполнять электроосаждение сплавов, композитов и неметаллических материалов (например, осаждение стекол [109], силикона [110] и проводящих полимеров, таких как полипиррол [111], полианилин [112, 113], PEDOT [114], и т. д.). Подводя итог, можно сказать, что электроосаждение является эффективным методом нанесения металлических покрытий.

Не менее перспективным направлением можно считать использование для изготовления твердых тел и наноструктур. Этот метод включает в себя нанесение танса, твердости и адгезии подложки [115]. Эта технология позволяет получать материалы с заданными свойствами, что важно для создания стабильного и долговечного покрытия. В основном используются следующие материалы: полимеры, металлы, керамика, композиты и т. д. Улучшение свойств поверхности и обеспечение различных преимуществ (долговечность, улучшение адгезии, защита от коррозии и т. д.) является основной задачей при создании таких покрытий. Влияние на свойства поверхности и ее структуру (например, на пористость, шероховатость и т. д.) является важным фактором при выборе материала и метода нанесения. При этом необходимо учитывать и другие факторы, такие как стоимость, экологичность и т. д. (рис. 4).

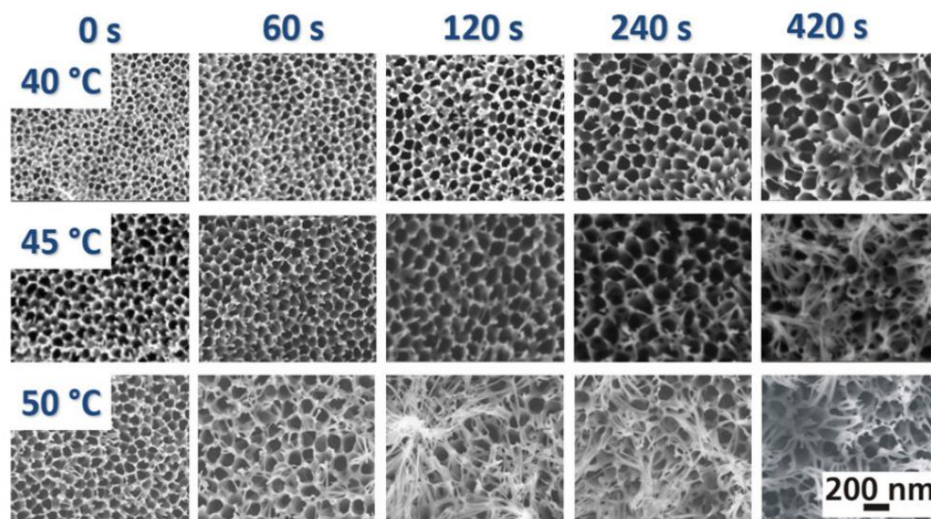


Рис. 4. СЭМ-изображения морфологии поверхности оксидных слоев, анодированных в фосфорной кислоте при 50 В. в зависимости от времени выдержки и температуры ванны (воспроизведено с разрешения издательство под номером лицензии 5777000505982) [120].

Электрохимическое травление или мокрое травление (также известное как электрохимическая обработка) — это процесс, в котором используется электрический ток и раствор электролита для избирательного удаления материалов с проводящей подложки (металла или полупроводника) для выполнения травления [121,122]. Это можно использовать для создания текстур поверхности, узоров или микроструктур для различных применений. Это каким-то образом обратимый процесс электроосаждения, при котором тонкий слой металла имеет покрытие. В большинстве случаев процесс заключается в погружении металла (или полупроводника) в воду. в кислотных ваннах (электролите) в течение определенного времени для создания сначала пористых наноструктур на поверхности подложки и, во-вторых, обеспечить создание тонкого слоя оксида металла (путем анодирования), которое защищает и стабилизирует наноструктуры [19,20]. При этом площадь поверхности увеличивается по мере преобразования структуры подложки из 2D-поверхностей в 3D-поверхности [123]. Концептуально, многие параметры влияют на процесс и должны контролироваться, например, концентрация кислотных растворов, температура ванн, наличие катализатора, который играет важную роль в иницировании зародышеобразования материала (например, ионов меди), и, наконец, толщина подложки. С другой стороны, травление может повлиять на механические свойства. свойства протравленной подложки. По этой причине многие физические свойства контролируются. во время процесса, полагаясь на рутинные испытания основания (например, прочность на разрыв тестер для фольгированных подложек и др.). Для достижения наилучшего компромисса между травлением поверхности сохраняя при этом хорошие и приемлемые физические свойства, время контакта (время пребывания субстрата в электролитах) следует учитывать [124,125]. Травление поверхности может принимать различные формы в зависимости от состава ванны. Следовательно, он может создать туннели, пересекающие поверхности материала [126,127], и могут создавать нанопоры (также называемые зарождение пор) на поверхности подложек за счет увеличения площади поверхности [128].

Широкое применение электрохимическое травление находит при подготовке исходных материалов. материалы (анодные и катодные компоненты), используемые при изготовлении электрохимических приборов.

пацитеры, также известные как суперконденсаторы [129]. В этом процессе алюминиевая фольга (высокой чистоты 99%) обрабатывается электрохимическим травлением, а затем формируется. В зависимости от измерений емкости листы можно классифицировать и использовать для различных применений, например, в качестве конденсатора высокого напряжения постоянного тока, запуска двигателя с конденсатором переменного тока и т. д. Более высокие значения емкости могут указывать на определенные желательные свойства, такие как увеличенная площадь поверхности или улучшенный электрод. производительность [130]. Поэтому их следует интерпретировать в сочетании с другими методами определения характеристик и показателями производительности, чтобы точно оценить общее качество фольги.

#### 2.4. Электроанализ

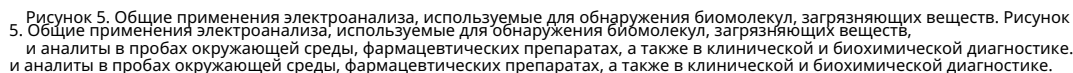
Электрохимический анализ (или электроанализ) основан на использовании электрохимических методов для количественного определения концентрации аналита в образце. Обычно к таким методам относятся вольтамперометрия [27], амперометрия [28], потенциометрия [29] и импедансная спектроскопия [131] (принцип этих методов подробно изложен в п. 2.2). Эти методы используются для измерения антиоксидантной активности [21,22] и анализа [24], характеристики различных соединений и материалов [25,26], а также для разработки эталонных методов [132].

Электрохимические датчики и биосенсоры являются одними из наиболее распространенных применений электроанализа. Они используются для обнаружения биомолекул [30,133], загрязнителей [31] и аналитов в пробах окружающей среды [32,33], пищевых продуктах [134], фармацевтических препаратах [34,35], а также для клинической и биохимической диагностики [23,36,135]. Эти устройства обеспечивают быстрые, чувствительные и относительно избирательные измерения, что делает их ценными инструментами для исследований, контроля качества и мониторинга процессов в реальном времени (рис. 5).

В этом разделе исследуются два примера электроанализа с учетом их важности и широкого применения: pH-электрод и биосенсор глюкозы. Фактически, мониторинг pH представляет большой интерес во многих химических и биохимических процессах. Термин pH обозначает потенциал водорода и позволяет ему выразить свою силу. Измерения pH определяют кислотность и щелочность растворов и паров и помогают контролировать и оптимизировать промышленные процессы. Измерение pH с помощью окислительно-восстановительного электрода-зонда заключается в потенциометрическом определении концентрации ионов водорода ( $H^+$ ) в растворе на основе уравнения Нернста [136, 137]. Недавно в литературе сообщалось о многих миниатюрных pH-электродах. Эти устройства спроектированы так, чтобы быть небольшими и компактными, и они чрезвычайно важны во многих приложениях, которые требуют небольших систем для интеграции (например, системы «лаборатория на чипе» [23,30], диагностика на месте оказания медицинской помощи и т. д.) или предназначен для портативных устройств (для физиологического мониторинга или портативных трекеров здоровья) [138,139].

Биосенсор глюкозы представляет собой устройство, которое включает в себя элемент биологического распознавания в качестве чувствительного компонента (ферменты, например, глюкозооксидаза (GOx) или глюкозодегидрогеназа (GDH) и ее кофактор). Побочные продукты ферментативной реакции диффундируют через чувствительную мембрану и затем окисляются или восстанавливаются на поверхности электрода при фиксированном потенциале, который зависит от материала электрода [140, 141]. Обычно в случае ферментативных биосенсоров глюкозы первого поколения ферментативное окисление глюкозы под действием GOx приводит к образованию перекиси водорода ( $H_2O_2$ ), которая окисляется при положительном потенциале +0,7 В по сравнению с электродом сравнения Ag/AgCl. или снижается при отрицательных потенциалах (между -0,2 и 0 В) с использованием медиаторов, которые снижают потенциалы обнаружения и предотвращают. Биосенсоры глюкозы представляют собой устройства, обычно используемые для мониторинга уровня глюкозы в крови у пациентов с диабетом, и представляют собой одно из наиболее широко используемых приложений для мониторинга уровня глюкозы во всем мире [143].

418



Обеспечение чистой воды для промышленности и жилищных нужд является сложной задачей, поскольку контроль качества минеральных веществ, производимых и используемых на регулярной основе, и следовательно, водопользователи (144). При этом загрязнение окружающей среды является серьезной проблемой для экономики хозяйства.

Мировые ресурсы пресной воды являются ограниченными, в то время как спрос на воду продолжает расти. Известно, что крупнейшими загрязнителями являются производители синтетических органических химических веществ (145).

3 миллиона тонн в год) и использование удобрений (200 миллионов тонн в год) и использование пестицидов (3 миллиона тонн в год) (145). Управление загрязнением воды, в первую очередь, заключается в том, чтобы обеспечить, чтобы вода пригодная для использования пресной воды на Земле используется для промышленных процессов, энергетики, производство и сельское хозяйство.

Электродеионизация представляет собой комбинацию двух процессов опреснения: электродиализа и ионный обмен, что приводит к еще большей степени деминерализации. Емкостная деионизация позволяет одновременно опреснять воду и восстанавливать электроэнергию в эффективном способе. Electro-Fenton позволяет генерировать катализаторы на месте, тем самым снижая образование осадка. Помимо очистки воды, микробные топливные элементы позволяют производить электрические энергия, которую необходимо восстановить, тем самым снижая затраты на техническое обслуживание, необходимые для этого процесса. увеличение разделения носителей заряда и подавление электрон-дырочной рекомбинации

в электрическом поле фотоэлектродкатализ обеспечивает более высокую эффективность удаления, чем один фотокатализатор. Соноэлектродкатализ увеличивает скорость переноса реактивных веществ, подавляет поляризацию электродов и играет важную роль в производстве гидроксильных радикалов, повышая эффективность очистки по сравнению с окислением одним электролитом.

Примером старейшей отрасли промышленности со сложными процессами и высоким потреблением химикатов является текстильная промышленность. В связи с постоянно растущим спросом на одежду со стороны населения мира и изменениями в индустрии моды ее разнообразие и количество продолжают расти [153]. Это может способствовать экономической выгоде населения, но часто сообщается о негативном воздействии на окружающую среду, в частности, из-за сброса сточных вод [154]. Из-за потенциальной токсичности и риска для здоровья человека сточные воды текстильной промышленности вызывают беспокойство и должны быть очищены перед сбросом в систему водоснабжения.

При обработке текстильных отходов чаще всего применяются традиционные процессы, такие как сочетание химических, биологических или физических методов. Сульфат алюминия, сульфат железа и ПАЦ (хлорид полиалюминия) обычно используются в качестве коагулянтов при очистке сточных вод текстильной промышленности [155]. Эти коагулянты легко агрегируются с загрязняющими веществами и образуют в сточных водах мельчайшие твердые частицы и флокулянты. Флокулянты, в свою очередь, улучшают размер и свойства хлопьев, в частности, их стабильность [156]. Однако для сточных вод красителей этот процесс имеет ограниченную степень удаления ХПК (химического потребления кислорода) - 10%, что может привести к образованию осадка. Для повышения эффективности очистки после коагуляции-флокуляции обычно используют активный ил, движущиеся биореакторы (МБР) и биофильтры. Однако качество стоков зачастую не соответствует требуемым стандартам качества. Таким образом, требуется финишная обработка (осаждение). Сообщается, что физические процессы, такие как адсорбция, могут быть использованы в качестве окончательной обработки. Однако он имеет относительно короткий срок службы (менее устойчивый) и в качестве побочного продукта может образовывать отработанный адсорбент. Интеграция химических, биологических и физических процессов обычно требует больше места, более длительного времени хранения (1–4 дня), более высоких эксплуатационных затрат и требует системы очистки. В качестве самостоятельной технологии или в сочетании с аэробными процессами часто используются биологические процессы. Интегрированная система анаэробных и аэробных процессов стала вариантом из-за большого количества ила, образующегося в химических процессах [153]. С другой стороны, эффективность удаления цвета, достигаемая в этом процессе, относительно невелика. Кроме того, сточные воды текстильной печати характеризуются высоким содержанием аммония, цветом и неразлагаемыми ХПК. В качестве последнего шага в удалении стойких загрязнителей, включая красители, и повышении производительности установок биологической очистки сточных вод в большинстве текстильных производств используется обесцвечивающий агент (DCA) [157]. DCA - катионный органический полимер на основе дициандиамидоформальдегидной смолы с высокой эффективностью адсорбции и осаждаемостью, способностью нейтрализовать электрический заряд поверхности частиц, более стабильными хлопьями, способностью удалять растворенные красители, такие как прямые, реактивные, дисперсионные. Однако DCA часто не является подходящим решением в каждой ситуации из-за его высокой стоимости, низкой доступности и необходимости утилизации осадка. Стоит также отметить тот факт, что ил, образующийся в качестве побочного продукта в этом случае, может оказывать значительное воздействие на окружающую среду и представлять высокий риск для человека и экосистемы.

За последнее десятилетие проводились интенсивные исследования по удалению цвета в современных процессах окисления. Его можно создать с помощью фотокатализаторов [159], озонирования, реактива Фентона [160] и электрокаталитических процессов [161]. Очевидными преимуществами фотокаталитического окисления являются низкие требования к температуре и давлению, а также биологическая инертность и растворимость в воде, которая широко доступна, обладает высокой фотоактивностью, менее токсична и экологически безопасна. Однако остаются серьезные ограничения с точки зрения потенциала применения в отношении морфологии и кристалличности катализатора  $\text{TiO}_2$ , требований к легированию металлами, высокой селективности к специфическому характеру загрязняющих веществ и тесного контакта с источниками света.

Электрокаталитическое окисление, широко известное как EAOP (процесс электрохимического усовершенствованного окисления), использует электрическую энергию для разложения загрязняющих веществ. Эти процессы основаны на образовании *in situ* гидроксильных радикалов ( $\text{OH}^\bullet$ ), которые, как известно, неселективно атакуют и окисляют загрязняющие вещества до достижения биоразлагаемости или полной минерализации.

сточные воды. Сообщалось о его высоких характеристиках по удалению цвета и ХПК при окрашивании сточных вод текстильной промышленности и при печати сточных вод текстильной промышленности [162]. Новая гибридная электрохимическая система и реактор Фентона предлагается стать эффективным вариантом последующей очистки текстильных и многих других отходов [10,163]. С точки зрения цвета, ХПК и удаления аммиака этот процесс очень эффективен. В качестве электродов использованы сетка  $\text{TiRuO}_2$  и углеродно-графитовые стержни, поскольку они дешевле  $\text{TiPtIr}$  и экономически выгоднее углерода ГДЛ (газодиффузионного слоя) [164].

Применяемая в промышленном секторе уникальная система с цилиндрическим реактором из нержавеющей стали с парами электродов (сетчатый цилиндр  $\text{Ti/RuO}_2$ /анод и графит-углеродный стержень -катод) может быть предложена для разложения сложных загрязнителей реальных сточных вод текстильной промышленности. Система внутренней циркуляции дает значительные преимущества при работе этой системы, например, увеличение объемной нагрузки до 400%. Этот метод может быть многообещающей альтернативой очистке сточных вод текстильной промышленности, поскольку загрязняющие вещества разлагаются одновременно с использованием электрофентонового окисления. За короткое время удаление цвета, ХПК и аммиака было значительным. Из-за более длительного контакта между образующимися химически активными веществами и загрязнителями в сточных водах циркуляционная система была более выгодной, чем нециркуляционная. Эффективность удаления загрязняющих веществ, цвета и ХПК, индекс окисляемости и эксплуатационные расходы подтвердили и поддерживают этот метод. Потребление электроэнергии составляло около 3 кВтч/м<sup>3</sup> или 4200 рупий/м<sup>3</sup> для нециркуляционной системы, и оно было значительно снижено до 1,1 кВтч/м<sup>3</sup> или 1,540 рупий/м<sup>3</sup> для циркуляционной системы. Высокопотенциальную систему можно найти в гибридном электрохимическом аппарате Фентона, и ее можно исследовать с помощью масштабного реактора с прямой интеграцией в существующую анаэробно-аэробную единицу текстиля [165].

Наконец, из-за разнообразия и сложности химических загрязнителей воды потребуются различные методы очистки, такие как биологическая очистка, физико-химическая обработка и электрохимические методы, такие как электрохимическое / электрокаталитическое восстановление, окисление и электрокоагуляция. Использование электрокаталитической очистки загрязненной воды становится все более распространенным в связи с падением стоимости возобновляемых источников энергии и растущей необходимостью преобразования вредных веществ в безвредные или полезные соединения. В то время как электрокаталитическое восстановление может обрабатывать потоки, содержащие окисленные соединения, такие как нитраты и нитриты, образующиеся в результате стоков удобрений, электрокаталитическое окисление может обрабатывать различные потоки промышленных отходов, включая текстильные и пищевые сточные воды. Благодаря этим преимуществам и возможности применения в небольших масштабах электрокаталитические процессы идеально подходят для децентрализованной очистки воды. Электрокатализ может оказать устойчивое воздействие на преобразование вредных загрязнителей воды в ценные или безвредные вещества с увеличением доступности дешевой электроэнергии из возобновляемых источников.

## 2.6. Электросинтез

Электрохимический органический синтез (или электросинтез) теперь стал инструментом синтеза новых соединений посредством зеленой химии [166]. Они могут функционировать при комнатной температуре и давлении и в основном не требуют вспомогательных химикатов. Обычно процесс электросинтеза основан на использовании электрохимического реактора с источником питания [167].

Два параметра являются ключевыми для получения высокой эффективности электросинтеза. Во-первых, конструкция реактора имеет решающее значение для получения высокого выхода продукции. Во-вторых, характеристики электродов (материал, количество, размер, геометрия и площадь поверхности) являются важным фактором для количества электрогенерируемых соединений, поскольку электроды являются местом, где происходят электрохимические реакции [168].

Альтернативно, использование электрического тока в реакции активации органических молекул посредством добавления или удаления электронов обладает рядом преимуществ, таких как простота и высокая селективность реакций, а также доступность синтетических материалов (низкая стоимость, простота использования), безыгольный для метода разделения и т. д.). Кроме того, электросинтез может быть модульным и масштабируемым, что обеспечивает гибкость производственных мощностей [169]. Методики электроокисления и электросинтеза были разработаны для селективной функционализации органических молекул, включая активацию C-H, связь C-C.

образование и асимметричный синтез. Эта область важна во многих крупных промышленных процессах, таких как производство хлора [170], производство алюминия [171], производство декарбонизированных азотных удобрений [172], синтез лекарств [173] и многих других [174].

В этой части показано несколько примеров, касающихся синтеза новых органических молекул электрохимическими путями. Первый пример посвящен синтезу азотных удобрений (НБФ) электрохимическими методами. Синтез НБФ, таких как аммиак и мочевины, был успешно реализован с использованием отходов соединений, таких как диоксид углерода и нитраты [175]. Работа в основном была сосредоточена на понимании каталитически активных центров электросинтеза мочевины. Фактически была обнаружена зависимость селективности и активности от относительного состава оксидного медного и цинкового катализатора, что связано с синергетическим электронным эффектом. С другой стороны, аморфные наноматериалы использовались в качестве катализаторов, при этом реакция включала электрохимический синтез N-содержащих соединений из множества обильных N-содержащих малых молекул ( $N_2$ , NO,  $NO_3^-$  и т. д. . .). Результаты показывают, что эти материалы могут упрощать (разрывать) связь взаимодействия CN, что приводит к синтезу мочевины [176].

Практически производство обезуглероженных азотных удобрений (НБФ) было разработано технологиями CASFER путем объединения нанотехнологий и электрохимической науки.

Фактически, они смогли разработать точные, коммерческие NBF из потоков отходов. Они использовали органический синтетический подход (OSA) для производства NBF с предсказуемостью и надежностью ингредиентов, предназначенными для стимулирования роста растений [177].

Более того, хлор-щелочной электролиз является одним из старейших и наиболее реализованных процессов и имеет наиболее важные применения электрохимии в промышленности. Этот процесс заключается в производстве хлора и гидроксида натрия (NaOH), которые являются товарными химикатами, необходимыми для промышленности. Здесь электролиз был идентифицирован как экологически чистый метод молекулярного переноса. Электроны в этих электрохимических реакциях не содержат отходов, если они генерируются солнечной энергией и ветром.

Важность электросинтеза также была реализована для устойчивой функционализации молекул, сводя к минимуму использование токсичных реагентов и побочных продуктов. Это реализуется путем дифункционализации алкенов, стереоселективного гетероциклического синтеза и реакции карбоксилирования [178].

Кроме того, недавнее исследование Талеби и компании. описал электрохимический синтез производных сульфонамидов, известных среди наиболее широко используемых антибиотиков в мире [179]. Изучены условия электросинтеза и пути реакций. Оценены оптимальные значения рабочих параметров (pH, растворитель, электроды... ). За счет оптимизации условий многообещающим было управление реакцией кинетически и термодинамически с использованием электродного потенциала (рис. 6). Фактически, этот метод смог продемонстрировать селективность окисления или восстановления данного соединения, предотвращая затем окисление /восстановление промежуточных соединений. Этот электрохимический метод синтеза сульфаниламидов по сравнению с классическими способами имеет множество преимуществ: - позволяет использовать зеленые окислители, что снижает использование токсичных соединений/растворителей и предотвращает экологические риски; - Использование электрификации как источника энергии, что снижает количество и стоимость потребляемой энергии; - Предотвратить использование дополнительных катализаторов; - Для простоты технической процедуры положитесь на менее сложную установку.

Перекись водорода ( $H_2O_2$ ) также можно синтезировать с помощью электрохимии. Фактически, катодная двухэлектронная ( $2e^-$ ) реакция восстановления кислорода (ORR) проводит электросинтез  $H_2O_2$ . Эта реакция обычно протекает в щелочных условиях и требует подходящего катализатора для повышения эффективности процесса. С этой целью были исследованы различные катализаторы, в том числе металлокомплексы и оксиды металлов. Некоторые исследования показывают важность электрокатализатора на основе мотива свободного железа для синтеза перекиси водорода [180]. Такое использование изолированного Fe привело к высокой активности, селективности и стабильности благодаря высокой энергии связи с промежуточными соединениями для разрыва пероксильной связи с образованием  $H_2O$  [181].

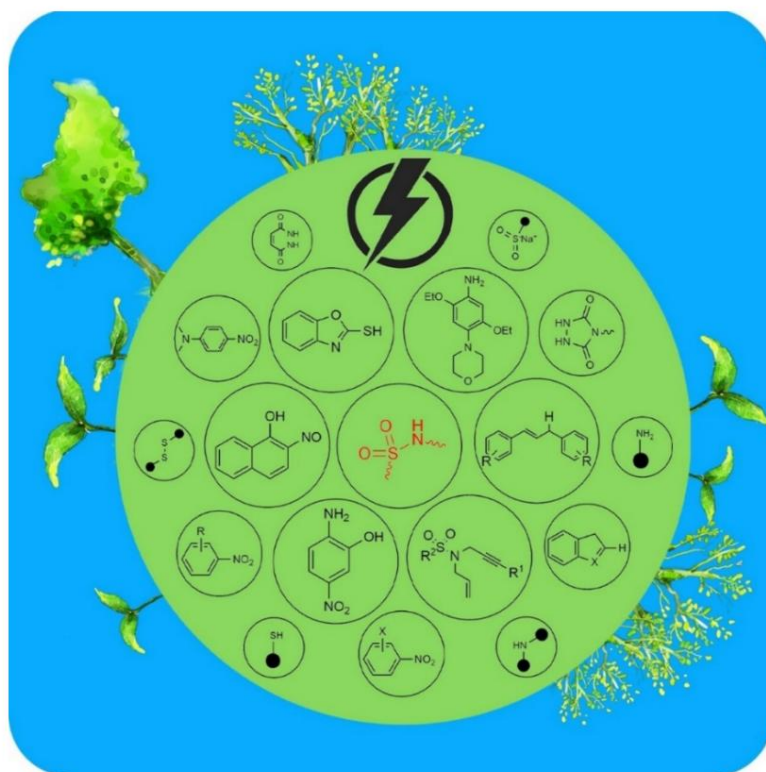


Рисунок 6. Электрохимический синтез производных сульфаниламидов по электрохимическому пути (Creative Commons CC по лицензии) [179].

Перекись водорода ( $H_2O_2$ ) также можно синтезировать с помощью электрохимии. Фактически, в заключение, электрохимический синтез в настоящее время доказан как многообещающий путь к катодной двухэлектронной ( $2e^-$ ) реакции восстановления кислорода (ORR) проводит электрохимический синтез, избегая всех недостатков, связанных с высоким потреблением энергии и большим количеством создаваемого  $H_2O_2$ . Эта реакция обычно протекает в щелочных условиях и требует катодной защиты.

Способный катализатор для повышения эффективности процесса. Различные катализаторы, в том числе металлические [27]. Электрохимическая защита

важностью электрокатализатора на основе митоза свободной энергии для синтеза пероксида водорода. К высоким связям и т.д. следует относиться с осторожностью, поскольку это может привести к длительному и безопасному

операции [112]. Электрохимическая защита перекиси водорода от образования  $H_2O_2$  [181].

подводный. В этой части мы обсудим защиту от электрохимической коррозии металлов для предотвращения коррозии на морских газовых платформах и подводных металлических трубопроводах [183,184].

Электрохимическая защита металлов от коррозии является наиболее подходящим методом. и включает анодную и катодную защиту. Оба метода основаны на манипулировании электрохимические реакции на поверхности металла для предотвращения коррозии и продления срока службы. стальных конструкций в суровых морских условиях [185].

Система анодной защиты (AP) поддерживает поверхность в активно окислительном состоянии. состояние. Этот метод предполагает подачу внешнего электрического тока на металл, что делает Это анод в электрохимической ячейке, который поляризует поверхность в более положительную сторону. потенциал, тем самым ингибируя и предотвращая коррозионные реакции [186,187]. Другой путь применить этот метод можно путем прикрепления жертвенных анодов из более химически активных металлов. которые имеют более высокие электрические потенциалы, такие как цинк или магний, по отношению к металлической структуре. Жертвенные аноды корродируют преимущественно, защищая конструкцию от коррозии за счет жертвуя собой. В некоторых системах для максимизации уровня защиты можно использовать оба способа. используются вместе [188].

Системы катодной защиты (CP) являются еще одним важным методом снижения или прекращения коррозии металлических конструкций путем понижения потенциала металла с помощью катодного тока подается с помощью анодной системы [189,190]. Широко используются два основных типа систем CP: катодная защита жертвенного анода (SACP) и катодная защита по наложенному току (ИККП). Катодная защита с жертвенным анодом (SACP) в основном используется на небольших морских объектах.

конструкции или места со скоростью коррозии от низкой до умеренной. В системах SACP защищаемая структура становится катодом электрохимической ячейки, а жертвенные аноды из более реакционноспособных металлов, таких как цинк или алюминий, прикрепляются к стальным монопилам [191]. Эти жертвенные аноды преимущественно корродируют, эффективно жертвуя собой ради защиты стальной конструкции, обеспечивая источник электронов, подавляющий окисление стали. В результате расходные аноды необходимо периодически заменять, поскольку они со временем изнашиваются. Однако системы ICCP используются на крупных морских сооружениях или расположены в зонах с высокой скоростью коррозии. Фактически инертные аноды, состоящие из смешанных оксидов металлов или платинированного титана, подключаются к внешнему источнику питания [192]. Этот источник питания подает контролируемый электрический ток на стальную конструкцию, создавая защитный катодный потенциал, подавляющий коррозию [193]. Системы ICCP обеспечивают точный контроль над процессом катодной защиты.

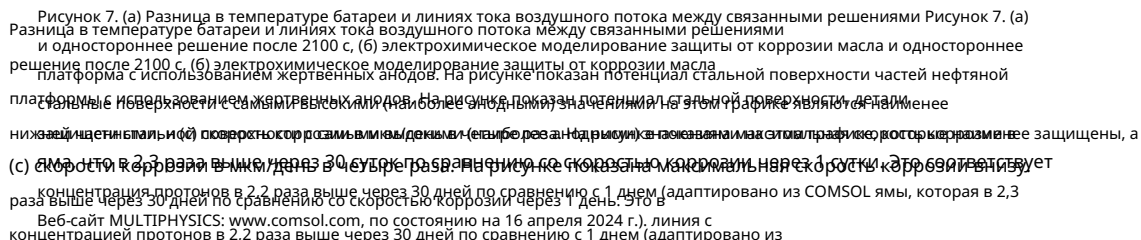
## 2.8. Инструменты для электрохимического

моделирования. В области электрохимического моделирования наблюдается постоянный прогресс за счет усовершенствований вычислительных методов, программных инструментов и методологий. Примеры этого включают COMSOL MULTIPHYSICS [194], MATLAB с Simulink [195], Battery Design Studio [196], Canton, DigiElch [197,198], Python [199] и другие. Эти достижения имеют решающее значение для разработки батарей, сенсоров и биосенсоров, топливных элементов и многих других электрохимических применений [200]. В последние годы электрохимическое моделирование стало востребованным и стало мощным инструментом для исследователей и ученых.

Фактически, это позволяет понять сложные системы и помогает прогнозировать и оптимизировать электрохимические устройства в различных условиях и, как следствие, сокращает время исследования и стоимость (рис. 7). Кроме того, электрохимическое моделирование позволяет создавать виртуальные прототипы устройств и систем, позволяя инженерам моделировать производительность, устранять потенциальные проблемы и повторять проекты перед физическим изготовлением. Недавно, чтобы сократить испытания на животных, стало обязательным моделировать (био)медицинские устройства (включая биоэлектрохимические устройства) для получения одобрения Управления по контролю за продуктами и лекарствами (FDA), что еще раз подчеркивает важность электрохимического моделирования [203–205].

В этой части мы приведем несколько примеров недавних исследований электрохимического моделирования, разделенных по областям применения. В области органической электрохимии Сигман и др. внедрили инструменты статистического моделирования для создания редокс-активных органических молекул для применения в качестве электролитов в неводных окислительно-восстановительных проточных батареях [206]. В области электрохимических реакторов моделирование электрохимических реакторов (ECR) с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) имело решающее значение из-за их основных применений: электросинтез химических веществ и лекарств, электровыделение металлов, хлор-щелочь, окислительно-восстановительные проточные батареи, очистка воды и топливные элементы [207]. В области наноконфайнмента Лонг и др. изучили три наноэлектрохимических метода, включающие моделирование для изучения многофазной химии в условиях наноконфайнмента: электрохимия стохастических столкновений, электрохимия одиночных нанокпель и электрохимия нанопор [208]. В области производства водорода с использованием электролизера с протонообменной мембраной (ПЭМ) использовался инструмент моделирования, основанный на программном обеспечении вычислительной гидродинамики (CFD), ANSYS/Fluent [209]. В области топливных элементов, которые являются многообещающим источником экологически чистой энергии, COMSOL Multiphysics использовался для учета ряда физических явлений для моделирования производительности твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [210]. В другом исследовании было построено численное моделирование трехмерной модели с одним каналом потока. Он обеспечивает научную основу для стратегии управления и структурного проектирования ТОТЭ [211]. В области аккумуляторов исследование показывает, как текущая реализация модели Дойла в COMSOL для электродов литий-ионных аккумуляторов может улучшить электрохимическую динамику этих аккумуляторов [212].

Потенциостаты имеют решающее значение для развития исследований в области электрохимии, но их стоимость основной недостаток их массового использования. С целью предоставить доступную альтернативу



разделенных по областям применения. В области органической электрохимии моделирование Сигмана также использовалось для развития многих других электрохимических приложений, и другие. Внедрив инструменты статистического моделирования для проектирования окислительно-восстановительно-активных органических молекул термoeлектрохимических ячеек, мультифизическая модель TES создана для обеспечения способов применения в качестве электролитов в неводных проточных окислительно-восстановительных батареях [206]. В более глубоком понимании взаимодействия между тепломассопереносом и электрохимическим полем электрохимических реакторов, моделировании и моделировании реакций электрохимических реакторов с целью преобразования отработанного тепла в электричество [213,214]. В газовых (ECR) методах вычислительной гидродинамики (CFD) решающее значение имели имидифузионные электроды, при выполнении которых использовались моделирование и численные исследования.

Актуальность обусловлена их основными применениями: электролизом химических веществ и лекарств, электрохимическое восстановление углекислого газа в метанол. Была построена модель для инвестиций в производство металлов, хлор-щелочных, проточных окислительно-восстановительных батарей, водоочистки и топливных элементов, что позволяет оценить роль газодиффузионных электродов на основе Cu<sub>2</sub>O/ZnO в повышении восстановления. [207]. В области наноконфаймента Лонг и др. изучил три нанoeлектрохимические технологии превращения углекислого газа в метанол внутри электрохимической ячейки. Модель была смоделирована

Методы моделирования для изучения многофазной химии в условиях наноконфаймента: сохранены с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics и подтверждены экспериментальными результатами хастической электрохимии столкновений, электрохимия одиночных наноканаль и нанопоры. При электрохимической обработке (ECM) для оптимизации электрохимии [208]. В области производства водорода с использованием протонного обмена существует множество параметров [216].

## 2.9. Электрохимия в образовании

Для сообществ с ограниченными ресурсами в аспирантуре и научных исследованиях была принята недорогая портативная электрохимическая рабочая станция, объединяющая потенциостат с открытым исходным кодом на базе Arduino и приложение для смартфона. Он может выполнять наиболее используемые электрохимические методы циклической и линейной вольтамперометрии и хроноамперометрии [218].

С другой стороны, электрохимию трудно изучить из-за ее абстрактных концепций, включающих макроскопический, микроскопический и символический уровни представления. Исследования показали, что учащиеся могут визуализировать и улучшить свое понимание химии с помощью интерактивной компьютерной анимации и моделирования. В этом исследовании сообщается о влиянии модуля интерактивной компьютерной анимации и моделирования под названием «Интерактивный электролиз водного раствора» (IEAS), который был разработан, чтобы помочь студентам в изучении электролиза [218]. Таким образом, можно сделать вывод, что IEAS оказывает влияние на улучшение понимания студентами концепции электролиза, и студенты более мотивированы к изучению электрохимии.

Наконец, практические эксперименты с электрохимическими ячейками, электродами, электролитами и измерительными устройствами остаются лучшим выбором для предоставления студентам практического опыта и закрепления теоретических концепций. Сегодня существует множество производителей, которые могут поставить и обеспечить академические учреждения «Учебным комплектом». Он содержит электроды, электролиты и учебные материалы, что облегчает преподавателям включение электрохимии в свою учебную программу (см. подраздел, чтобы узнать о компаниях, которые могут поставлять эти наборы). Эти наборы часто включают эксперименты с четкими процедурами, которые облегчают интеграцию изучения прикладной электрохимии в образовательную систему. При этом стоит отметить, что в регионе MENA наблюдается нехватка учебных заведений, предлагающих программы высшего образования в области электрохимии, несмотря на наличие разнообразных академических предложений. Этот дефицит вызывает особую тревогу, учитывая растущий спрос во многих секторах рынка труда на специалистов, обладающих электрохимическими знаниями. Поскольку отрасли все больше признают важность электрохимии в различных приложениях, отсутствие соответствующих образовательных возможностей подчеркивает серьезный пробел, который необходимо устранить. В ближайшие годы интеграция знаний в области электрохимии в образовательные программы по всему региону будет крайне необходима для удовлетворения растущих потребностей рынка труда и содействия инновациям и росту в ключевых секторах.

## 2.10. Электрохимические компании

Многие электрохимические компании расположены по всему миру. Мы представляем некоторые из них в зависимости от их местонахождения.

Электрохимическая промышленность Европы характеризуется ориентацией на устойчивое развитие и экономику замкнутого цикла со значительными инвестициями в экологически чистую энергетику, аккумуляторные технологии и процессы переработки. Ключевые игроки и инициативы включают Northvolt (Стокгольм, Швеция), Umicore (Брюссель, Бельгия), BASF (Людвигсхафен, Германия), ITM Power (Шеффилд, Великобритания), SOLVAY (Брюссель, Бельгия) и др. Электрохимический сектор в США является разнообразной страной, в которой особое внимание уделяется инновациям и развитию технологий, особенно в области батарей и решений по хранению возобновляемой энергии. Некоторые ключевые игроки и направления деятельности включают Tesla Inc. (Техас, США), 3M (Мейплвуд, США), Dow Chemical Company (Мичиган, США), General Electric (Бостон, США), Albemarle Corporation (Северная Каролина), США и т. д. Участие региона MENA в электрохимическом секторе растет, особенно в возобновляемых источниках энергии и связанных с ними технологиях, таких как производство экологически чистого водорода. Некоторыми ключевыми игроками являются ACWA Power (Эр-Рияд, Саудовская Аравия), MASDAR (Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты), SABIC (Эр-Рияд, Саудовская Аравия), OQ (Маскат, Оман) и т. д.

С другой стороны, есть несколько компаний, которые поставляют инструменты и аксессуары для электрохимических экспериментов, такие как потенциостаты мини- и стандартного типа (одно- или многоканальные устройства и портативные устройства), электроды (классические, электроды с вращающимся диском, экранные электроды), печатные, электрохимические элементы, учебные наборы и т. д. Ключевыми игроками являются Metrohm (Херисау, Швейцария), приборы Bio-Logic Sciences (Seyssinet-Pariset, Франция), PalmSens (Хаутен, Нидерланды), Solartron (Богнор Реджис, Франция), Великобритания), Hanna Instruments (Смитфилд, Вирджиния, США), Gamry Instruments (Уорминстер, Пенсильвания).

Химия 2024. 6. НА ЭКСПЕРТНУЮ РЕЦЕНЗИЮ

| Список поставщиков электрометрической продукции<br>Инструменты и аксессуары | Сайт провайдера                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Метром                                                                      | <a href="http://www.metrohm.com">www.metrohm.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                                 |
| Приборы для биологических наук                                              | <a href="http://www.biologic.net">www.biologic.net</a> , доступ 16 мая 2024 г.                               |
| ПалмСенс                                                                    | <a href="http://www.palmsens.com">www.palmsens.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                               |
| Солартрон                                                                   | <a href="http://www.solartronmetrology.com">www.solartronmetrology.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.           |
| Ханна Инструменты                                                           | <a href="http://www.hannainst.com">www.hannainst.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                             |
| Гамри инструменты                                                           | <a href="http://www.gamry.com">www.gamry.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                                     |
| Сциоспек                                                                    | <a href="http://www.sciospec.com">www.sciospec.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                               |
| Принстонские прикладные исследования                                        | <a href="http://www.ameteksi.com">www.ameteksi.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                               |
| ИССЛЕДОВАНИЯ СОСНЫ                                                          | <a href="http://www.ti.com">www.ti.com</a> по состоянию на 16 мая 2024 г.                                    |
| Инструменты Техаса                                                          | <a href="http://www.pineresearch.com">www.pineresearch.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                       |
| Канопитек                                                                   | <a href="http://www.kanopytech.com">www.kanopytech.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                           |
| Ивиум Технологии                                                            | <a href="http://www.ti.com">www.ti.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                                           |
| Канопитек                                                                   | <a href="http://www.ivium.com">www.ivium.com</a> по состоянию на 16 мая 2024 г.                              |
| Коррестовые инструменты                                                     | <a href="http://www.kanopytech.com">www.kanopytech.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                           |
| Ivium Technologies                                                          | <a href="http://www.corrtest.com.cn">www.corrtest.com.cn</a> , доступ 16 мая 202 г.                          |
| Коррестовые инструменты                                                     | <a href="http://www.xiamen-tob.com">www.xiamen-tob.com</a> по состоянию на 16 мая 2024 г.                    |
| Сямнь Тоб Новая энергетическая энергия                                      | <a href="http://www.tobmachine.com">www.tobmachine.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.                           |
| Инструменты Фадке                                                           | <a href="http://www.corrtest.com.cn">www.corrtest.com.cn</a> , доступ 16 мая 2024 г.                         |
| Инструменты Фадке                                                           | Доступ к <a href="http://www.phadkeinstruments.com">www.phadkeinstruments.com</a> осуществлен 16 мая 2024 г. |
|                                                                             | <a href="http://www.phadkeinstruments.com">www.phadkeinstruments.com</a> , доступ 16 мая 2024 г.             |

Недавно компания Electrochemistry Consulting and Services (E2CS) (Триполи, Ливан) запустила как новую и развивающуюся организацию в регионе Ближнего Востока и Северной Африки, которая предоставляет консультации и техническую поддержку широкому кругу клиентов в области химии и промышленности, в том числе в энергетическом секторе. Электрохимия является основой для быстрого роста, движимым тр

Наконец, электрохимия имеет ряд преимуществ, обеспечивая быстрый рост, удовлетворенный спрос, энергетическую эффективность, устойчивую и стабильную работу, а также низкие затраты на обслуживание. Входящие в состав E2CS компании инновации в области материаловедения, биохимии, фармацевтики, химии, а также в области энергетики, включая использование возобновляемых источников энергии, являются ключевыми для ближайшего будущего. Однако успех будет зависеть от способности компаний в ближайшие годы; одна из проблем заключается в том, что рынок не имеет достаточной информации и решает возникающие проблемы; адаптироваться к меняющейся динамике рынка и эффективно решать возникающие проблемы.



### 3. Выводы

Прикладная электрохимия играет важную роль в развитии технологий, обеспечении устойчивости и решении социальных проблем в различных областях. Это универсальность, эффективность и надежность делают его незаменимым инструментом для инноваций, прогресса и решения проблем в современном мире. Ожидается, что в течение следующих нескольких лет эле-

### 3. Выводы

Прикладная электрохимия играет важную роль в развитии технологий, обеспечении устойчивости и решении социальных проблем в различных областях. Его универсальность, эффективность и надежность делают его незаменимым инструментом для инноваций, прогресса и решения проблем в современном мире. Ожидается, что в ближайшие несколько лет электрохимия займет прочные позиции во многих отраслях и станет справочной наукой для многих исследователей. Это требует особого внимания к интеграции знаний в области электрохимии в образовательные программы во всем мире, чтобы удовлетворить растущие потребности рынка труда и способствовать инновациям и росту в ключевых секторах. С другой стороны, будущее электрохимических компаний выглядит обнадеживающим; однако компаниям следует адаптироваться к изменениям рынка и эффективно решать возникающие проблемы, чтобы следить за развитием электрохимических технологий.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования.

Конфликты интересов: Автор Айман Чмайссем является основателем компании Electrochemistry Consulting & Services (E2CS). Остальные авторы заявляют, что исследование проводилось при отсутствии каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

### Рекомендации

1. Сингх, В.Г. Прикладная электрохимия; Nova Science Publisher Inc.: Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 2010 г. [\[CrossRef\]](#)
2. Рэгг А.А. Журнал прикладной электрохимии; Springer Nature: Берлин, Германия, 2009 г.; Том 39, с. 467. [\[ПерекрестнаяСсылка\]](#)
3. Беван, К.Х.; Фунг, Ю.В.; Ширани, Дж.; Юань, С.; Аби Фаррадж, С. Физика в применении к электрохимии: туннельные реакции. Дж. Прил. Физ. 2021, 129, 090901. [\[CrossRef\]](#)
4. Дуань Дж.; Тан, Х.; Дай, Х.; Ян, Ю.; Ву, В.; Вэй, Х.; Хуанг Ю. Создание безопасных литий-ионных аккумуляторов для электромобилей: обзор. Электрохим. Energy Rev. 2020, 3, 1–42. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
5. Бринкерт, К.; Мандин, П. Основы и будущие применения электрохимического преобразования энергии в космосе. prj Микрогравитация 2022, 8, 52. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
6. Санторо, К.; Арбиццани, К.; Эрабль, Б.; Иеропулос И. Микробные топливные элементы: от основ к применению. Обзор. Дж. Пауэр Источники 2017, 356, 225–244. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
7. Сазали, Н.; Саллах, ЗСЗ; Джамалудин, А.С.; Разали, MNM Новые перспективы технологии топливных элементов: краткий обзор. Мембраны 2020, 10, 99. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
8. Эспозито, Д.В. Безмембранные электролизеры для недорогого производства водорода в будущем возобновляемой энергетики. Джоуль 2017, 1, 651–658. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
9. Аббаси Р.; Зетцлер, ВР; Лин, С.; Ван, Дж.; Чжао, Ю.; Сюй, Х.; Пивовар, Б.; Тиан, Б.; Чен, Х.; Ву, Г.; и другие. Дорожная карта по производству дешевого водорода с помощью электролизеров с гидроксидообменной мембраной. Адв. Матер. 2019, 31, e1805876. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
10. Чмайссем, А.; Таха, С.; Хаушар, Д. Увеличенный электрохимический реактор с трехмерным катодом с неподвижным слоем для процесса электрофентона: применение для обработки бисфенола А. Электрохимия. Акта 2017, 225, 435–442. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
11. Ю, Ю.; Чжун, Ю.; Сан, В.; Се, Дж.; Ван, М.; Го, З. Новый процесс электрокоагуляции с центробежными электродами для очистки сточных вод: электрохимическое поведение анода и кинетика удаления тяжелых металлов. Хемосфера 2023, 310, 136862. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
12. Тран, Т.К.; Чиу, К.Ф.; Лин, С.; Леу, Х.Дж. Электрохимическая очистка сточных вод: селективность удаления тяжелых металлов. Процесс. Межд. Дж. Водородная энергетика, 2017, 42, 27741–27748. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
13. Шреста, Р.; Бан, С.; Девкота, С.; Шарма, С.; Джоши, Р.; Тивари, АР; Ким, Хай; Джоши, МК Технологические тенденции в области тяжелых металлов. Удаление из промышленных сточных вод: обзор. Дж. Энвайрон. хим. англ. 2021, 9, 105688. [\[CrossRef\]](#)
14. Юэ, Х.; Сюэ, Л.; Чен Ф. Эффективное электрохимическое удаление нитритных загрязнений с помощью стабильных электродов RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/Ti. Прил. Катал. Б 2017, 206, 683–691. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
15. Дао, КЦ; Ян, СС; Чен, К.Ф.; Цай, Ю. П. Последние тенденции в удалении фармацевтических препаратов и средств личной гигиены с помощью электрохимического окисления и комбинированные системы. Вода 2020, 12, 1043. [\[CrossRef\]](#)
16. Бхат, RS; Шетти, С.М.; Кумар, Н. А. Гальваническое покрытие из сплава Zn-Ni на мягкую сталь и его электрохимические исследования. Дж. Матер. англ. Выполнять. 2021, 30, 8188–8195. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
17. Чжан Х.; Чжан, Н.; Гилкрист, М.; Фанг, Ф. Достижения в области прецизионного микро/нано-электроформования: современный обзор. Дж. Микромехан. Микроинж. 2020, 30, 103002. [\[CrossRef\]](#)
18. Сюй, З.; Ван, Ю. Электрохимическая обработка сложных компонентов авиационных двигателей: разработки, тенденции и технологические достижения. Подбородок. Дж. Аэронавт. 2019, 34, 28–53. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
19. Чжан Ю.; Лан, Дж.; Сюй, Ю.; Ян, Ю.; Лю, В.; Лю, Х.; Гу, С.; Чжоу, Дж.; Ван, М. Сверхтонкий сплав PtCo, полученный пиролизным травлением в ограниченном пространстве. Пиролиз для ускоренного выделения водорода. Дж. Коллоид. Наука интерфейса. 2024, 660, 997–1009. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

20. Жан Ю.; Чжан, Г.; Шен, Дж.; Чжоу, Б.; Чжао, К.; Го, Дж.; Вэнь, М.; Тан, З.; Чжэн, Л.; Лу, Дж.; и другие. Простое электрохимическое легирование поверхности и травление алюминиевых проволок для создания высокоэффективных подложек для усиленного комбинационного рассеяния света на поверхности. *Нано Матер. наук.* 2023. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
21. Рене, А.; Абаск, МЛ; Хаушар, Д.; Хапиот, П. Как фенольные соединения реагируют на ион супероксида? Простой электрохимический метод оценки антиоксидантной способности. *Анальный. хим.* 2010, 82, 8703–8710. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
22. Кейруз Р.; Абаск, МЛ; Ле Бурвельек, К.; Блан, Н.; Одибер, Л.; Аргалл, Э.; Хаушар, Д. Общее содержание фенолов, удаление радикалов и циклическая вольтамперометрия морских водорослей Бретани. *Пищевая хим.* 2011, 126, 831–836. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
23. Чмайсем, А.; Верпланк, Н.; Бойзо, Ф.; Алессо, М.; Сантос, Л.; Мурье, В.; Виньо, С.; Наварро, Ф.; Мэйли, П. Микрофлюидная платформа электрохимических биосенсоров для приложений «орган-на-чипе». В материалах MicroTAS 2021 — 25-й Международной конференции по миниатюрным системам для химии и наук о жизни, Палм-Спрингс, Калифорния, США, 10–14 октября 2021 г.
24. Чмайсем, А.; Хошар, Д. Новый метод обнаружения следов алкилфенолов в воде на основе встроенного электрохимического датчика. *Преподобный учёный. l'Eau* 2015, 28, 35–40. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
25. Ошар, Д.; Кассир, М.; Чивот, Дж.; Бодри, Д.; Эфритихин М. Электрохимическое исследование металлоорганических соединений урана (IV) и (III) в тетрагидрофуране с помощью обычных микроэлектродов и ультрамикроэлектродов. Часть II. Применение к боргидридным соединениям – исследование стабильности CP2U(BH4)2. *Дж. Электроанал. хим.* 1993, 347, 399–407. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
26. Тербуш, А.; Ламече, С.; Айт-Рамдан-Тербуш, К.; Герниш, Д.; Лерари, Д.; Бачари, К.; Хаушар, Д. Новый электрохимический датчик на основе комплекса электродов из углеродной пасты/Ru(III) для определения нитрита: измерения электрохимического импеданса и циклической вольтамперометрии. *Измерение* 2016, 92, 524–533. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
27. Шин, Кентукки; Оум, В.; Ю, диджей; Канг, С.; Ким, Е.Б.; Ким, Х.В. Основы циклической вольтамперометрии. *J. Sens. Sci. Technol.* 2021, 30, 384–387. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
28. Инзельт Г. Хроноамперометрия, хронокулонометрия и хронопотенциометрия. В *Энциклопедии прикладной электрохимии*; Springer Nature: Берлин/Гейдельберг, Германия, 2014 г. [\[CrossRef\]](#)
29. Баккер Э.; Претч, Э. Современная потенциометрия. *Энджью. Хим.— Межд. Эд.* 2007, 46, 5660–5668. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
30. Чмайсем, А.; Верпланк, Н.; Танасе, СЕ; Коста, Г.; Монсальве-Грихальба, К.; Амигес, С.; Псевдоним, М.; Гужис, М.; Мурье, В.; Виньо, С.; и другие. Разработка многопараметрической (био)сенсорной платформы для непрерывного мониторинга метаболитов стресса. *Таланта* 2021, 229, 122275. [\[CrossRef\]](#)
31. Чмайсем, А.; Хаушар, Д. Прямое ультра-следовое обнаружение алкилфенолов в воде с использованием полостного микроэлектродного датчика с углеродной пастой. *Опреснительная обработка воды.* 2017, 83, 321–326. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
32. Лю, Ю.; Сюэ, К.; Чанг, К.; Ван, Р.; Лю, З.; Он, Л. Недавний прогресс в области электрохимических датчиков для обнаружения типичных загрязнителей в водной среде. *Анальный. наук.* 2022, 38, 55–70. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
33. Картик, В.; Сельвакумар, П.; Сентил Кумар, П.; Сатискумар, В.; Годвин Виджейсандер, М.; Харихаран, С.; Энтони, К. Последние достижения в разработке электрохимических датчиков для обнаружения новых загрязнителей в водной среде. *Хемосфера* 2022, 304, 135331. [\[CrossRef\]](#)
34. Бумя, В.; Тауфик, Н.; Ачак, М.; Бессбус, Х.; Эльхалил, А.; Барка, Н. Электрохимические сенсоры и биосенсоры для определения диклофенака в фармацевтических, биологических пробах и пробах воды. *Talanta Open* 2020, 3, 100026. [\[CrossRef\]](#)
35. Сохраби, Х.; Дежакам, Э.; Хатаи, А.; Нозохури, Э.; Маджиди, МР; Мохсени, Н.; Трофимов Е.; Юн, Ю. Последние тенденции в области электрохимических и оптических (био)сенсоров на основе слоистых двойных гидроксидов для скрининга новых фармацевтических соединений. *Окружающая среда. Рез.* 2022, 211, 113068. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
36. Мальзан, К.; Виндмиллер-младший; Вальдес-Рамирес, Г.; Шенинг, МЮ; Ван, Дж. Носимые электрохимические датчики для анализа in situ в морской среде. *Аналитик* 2011, 136, 2912–2917. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
37. Европейская комиссия. Стратегия ЕС по использованию потенциала морских возобновляемых источников энергии для климатически нейтрального будущего; Европейская комиссия: Брюссель, Бельгия, 2020 г.
38. Донг, Дж.; Цзэн, Дж.; Ян, Ю.; Ван, Х. Обзор законодательства и политики в области декарбонизации судоходства. *Передний. март. наук.* 2022, 9, 1076352. [\[CrossRef\]](#)
39. Мадурай Элаварасан, Р.; Пугаженди, Р.; Ирфан, М.; Михет-Попа, Л.; Хан, Айова; Кампана, Ч.П. Современные устойчивые подходы к более глубокой декарбонизации в Европе — вклад в климатически нейтральное видение. *Обновить. Поддерживать. Energy Rev.* 2022, 159, 112204. [\[CrossRef\]](#)
40. Беккарелло, М.; Ди Фоджа, Г. Обзор и перспективы ключевых факторов декарбонизации до 2030 года. *Energy* 2023, 16, 1345. [\[CrossRef\]](#)
41. Нестеренко Н.; Медейрос-Коста, IC; Клатворси, Э.Б.; Кручейд, Х.; Коннов С.В.; Дат, JP; Гилсон, JP; Минтова, С. Метан-к-Химические вещества: путь к декарбонизации. *Натл. наук. Ред.* 2023, 10, pwad116. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
42. Пападис Э.; Цацаронис, Г. Проблемы декарбонизации энергетического сектора. *Энергия* 2020, 205, 118025. [\[CrossRef\]](#)
43. Таурат, П.; Лалин, Б.; Шмидт, Т.С.; Штеффен, Б. Направления инноваций для декарбонизации производства цемента и стали. *Анализ на основе тематического моделирования. Дж. Чистый. Прод.* 2023, 407, 137055. [\[CrossRef\]](#)
44. Зир, М.; Стензель, П.; Коцур, Л.; Столтен, Д. Обзор вариантов декарбонизации стекольной промышленности. *Конверторы энергии. Менеджер. X* 2021, 10, 100083. [\[CrossRef\]](#)
45. Гисольфи, В.; Тавасси, Луизиана; Коррейя, GHdA; Чавес, GdLD; Рибейро, GM Декарбонизация грузового транспорта: систематический подход Обзор литературы по моделям системной динамики. *Устойчивое развитие* 2022, 14, 3625. [\[CrossRef\]](#)
46. Раза, М.Ю.; Чжунпан, К.; Пенджу, В. Потребление энергии в сельском хозяйстве, продовольственная политика и сокращение выбросов CO<sub>2</sub>: Новые идеи из Пакистана. *Передний. Окружающая среда. наук.* 2023, 10, 1099813. [\[CrossRef\]](#)

47. Палу-Ривера, И.; Грико, В. Роль электрохимических процессов в борьбе за промышленную декарбонизацию. *ECS Встреча*. Абстр. 2022, MA2022-01, 2338. [\[CrossRef\]](#)
48. Гриффитс, С.; Совакул, БК; Ким, Дж.; Базилиан, М.; Уратани, Дж. М. Промышленная декарбонизация с помощью водорода: критический и систематический обзор событий, социально-технических систем и вариантов политики. *Энергия Рез. Соц. наук*. 2021, 80, 102208. [\[CrossRef\]](#)
49. Шиффер, З.Дж.; Мантирам, К. Электрификация и декарбонизация химической промышленности. *Джоуль* 2017, 1, 10–14. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
50. Маллапрагада, Д.С.; Дворкин Ю.; Модестино, Массачусетс; Эспозито, Д.В.; Смит, Вашингтон; Ходж, Б.М.; Гарольд, член парламента; Доннелли, ВМ; Нуз, А.; Блумквист, К.; и другие. Декарбонизация химической промышленности посредством электрификации: барьеры и возможности. *Джоуль* 2023, 7, 23–41. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
51. Браннстрем, К. Развивающееся энергетическое будущее возобновляемой энергетики и электрохимии: продвижение или подрыв энергетической демократии? В «Энергетических демократиях ради устойчивого будущего»; Academic Press: Кембридж, Массачусетс, США, 2022 г. [\[CrossRef\]](#)
52. Ся, Р.; Овера, С.; Цзяо, Ф. Новые электрохимические процессы для декарбонизации химической промышленности. *JACS Au* 2022, 2, 1054–1070. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
53. Бримли, П.; Альмаджед, Х.; Алсунни, Ю.; Альгерц, АW; Бэйр, ZJL; Смит, Вашингтон; Масгрейв, СВ. Электрохимическое восстановление CO<sub>2</sub> на графеновых одноатомных катализаторах, легированных металлом/азотом, смоделированное с использованием великой канонической теории функционала плотности. *АСУ Катал.* 2022, 12, 10161–10171. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
54. Львов, С.Н.; Бек, младший; Лабарбера, М.С. Электрохимическое восстановление CO<sub>2</sub> в топливе. В углеродно-нейтральных топливах и энергоносителях; CRC Press: Бока-Ратон, Флорида, США, 2020 г. [\[CrossRef\]](#)
55. Померанцева Е.; Бонаккорсо, Ф.; Фэн, Х.; Цюи, Ю.; Гогоци, Ю. Хранение энергии: будущее, основанное на наноматериалах. *Наука* 2019, 366, eaan8285. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
56. Канг, Х.; Юнг, С.; Ли, М.; Хонг, Т. Как лучше распределять энергию для создания города с нейтральным уровнем выбросов углерода? Обзор стратегий применения аккумуляторной системы хранения энергии в городе. Обновить. Поддерживать. *Energy Rev.* 2022, 157, 112113. [\[CrossRef\]](#)
57. Суфян, М.; Рахим, Н.А.; Аман, ММ; Тан, СК; Райхан, SRS Определение размеров и применение технологий аккумуляторного хранения энергии в системе Smart Grid: обзор. Дж. Обновить. Поддерживать. *Энергия* 2019, 11, 014105. [\[CrossRef\]](#)
58. Дехгани-Санич, Арканзас; Тарумалингам, Э.; Дюссо, МБ; Фрейзер, Р. Исследование систем хранения энергии и экологических проблем, связанных с батареями. Обновить. Поддерживать. *Energy Rev.* 2019, 104, 192–208. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
59. Ли, Ю.; Ян, Дж.; Сонг, Дж. Модель структуры проектирования и технология возобновляемых источников энергии для аккумуляторных батарей на пути к более экологичному и Более экологичный электромобиль. Обновить. Поддерживать. *Energy Rev.* 2017, 74, 19–25. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
60. Рид, К.Дж. Экологическая оценка окислительно-восстановительных и свинцово-кислотных батарей ванадия для стационарного хранения энергии. Дж. Источники энергии 1999, 80, 21–29. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
61. Ван, З.; Ян, Дж.; Цюй, Р.; Сяо, Г. Оценка воздействия демонтированной батареи на окружающую среду: практический пример энергосистемы Завод свинцово-кислотных аккумуляторов в Китае. *Процессы* 2023, 11, 2119. [\[CrossRef\]](#)
62. Дивья, К.К.; Остергаард, Дж. Технология аккумуляторного хранения энергии для энергосистем – обзор. *Электр. Система питания Рез.* 2009, 79, 511–520. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
63. Абрахам К.М. Перспективы и пределы хранения энергии в батареях. Дж. Физ. хим. Летт. 2015, 6, 830–844. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
64. Хуан Ю.; Донг, Ю.; Ли, С.; Ли, Дж.; Ван, К.; Чжу, З.; Сюэ, В.; Ли, Ю.; Ли, Дж. Литий-марганцево-шпинельные катоды для литий-ионных батарей. *Адв. Энергетическая Материя*. 2020, 11, 2000997. [\[CrossRef\]](#)
65. Видьянтара, РД; Зулайка, С.; Хуангса, ФБ; Будиман, бакалавр наук; Азиз, М. Обзор стратегий проектирования аккумуляторных батарей для компании Superior Управление температурой в электромобилях. *Аккумуляторы* 2022, 8, 287. [\[CrossRef\]](#)
66. Шеберл, Дж.; Анк, М.; Шрайбер, М.; Василиадис, Н.; Лиенкамп, М. Распространение термического неуправляемого движения в автомобильных литий-ионных аккумуляторах с катодами NMC-811 и LFP: требования безопасности и влияние на системную интеграцию. *Электронный транспорт* 2024, 19, 100305.
67. Трэйи, Л.; Брушетт, Франция; Бальсара, штат Северная Каролина; Седер, Г.; Ченг, Л.; Чанг, Ю.М.; Хан, Северная Каролина; Ингрэм, Би Джей; Минтир, SD; Мур, Дж. С.; и другие. Появление систем хранения энергии: взгляд Объединенного центра исследований в области хранения энергии. Учеб. Натл. акад. наук. США 2020, 117, 12550–12557. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
68. Барбоза, Дж. К.; Фидальго-Мариуан, А.; Диас, Дж.К.; Гонсалвес, Р.; Саладо, М.; Коста, СМ; Лансерос-Мендес, С. Молекулярный дизайн Функциональные полимеры для органических радикальных батарей. *Материал по хранению энергии*. 2023, 60, 102841. [\[CrossRef\]](#)
69. Хагер, доктор медицины; Эссер, Б.; Фэн, Х.; Шуман, В.; Теато, П.; Шуберт, Американские полимерные батареи — гибкая и тонкая энергия Системы хранения. *Адв. Матер.* 2020, 32, e2000587. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
70. Чой, С. Биотопливные элементы и биобатареи: заблуждения, возможности и проблемы. *Аккумуляторы* 2023, 9, 119. [\[CrossRef\]](#)
71. Патра, С.; Верма, Дж.; Мишра, Ю.К.; Куринец, С.; Ван, К.; Сювярви, М.; Тивари, А. Позиционирование биобатарей на основе биотопливных элементов для будущего с нулевой энергией. *J. Energy Storage* 2023, 72, 107919. [\[CrossRef\]](#)
72. Нгун, ТН; Фрайван, А.; Чой, С. Батареи на бумажной основе: обзор. *Биосенс. Биоэлектрон.* 2014, 54, 640–649. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
73. Язди, А.А.; Прейт, Р.; Милтон, РД; Хикки, ДП; Минтир, SD; Сюй, Дж. Перезаряжаемая безмембранная глюкозная биобатарея: на пути к Твердотельные катоды для имплантируемых ферментных устройств. Дж. Источники питания 2017, 343, 103–108. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
74. Гарленд, Северная Каролина; Кавети, Р.; Бандодкар, А. Дж. Биотопливные элементы, батареи и суперконденсаторы, активируемые биожидкостью: комплексный подход Обзор. *Адв. Матер.* 2023, 35, e2303197. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
75. Ли, П.; Ким, Х.; Мьюнг, СТ; Сан, Ю.К. Практическое изучение кремниевого анода: обзор, посвященный кремний-графитовому композиту для литий-ионных батарей. *Материал по хранению энергии*. 2020, 35, 550–576. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
76. Фихтнер, М. Последние исследования и прогресс в области аккумуляторов для электромобилей. *Баттер. Суперкапсы* 2022, 5, e20210022. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

77. Ли, Ю.; Ян, Дж.; Сонг, Дж. Модель наноэнергетической системы и наномасштабный эффект графеновой батареи в возобновляемой энергетике. Транспортное средство. Обновить. Поддерживать. Energy Rev. 2016, 69, 652–663. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
78. Рачкичини, Р.; Варци, А.; Пассерини, С.; Скросати, Б. Роль графена в электрохимическом хранении энергии. Нат. Матер. 2015, 14, 271–279. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
79. Ху, Б.; Ван, Х. Достижения в области микролитий-ионных аккумуляторов для встроенных и носимых устройств. Дж. Микромехан. Микроинж. 2021, 31, 114002. [\[CrossRef\]](#)
80. Мюнхен, С.; Берджен, Р.; Лекс-Бальдуччи, А.; Брендель, Дж.К.; Ягер, М.; Фрибе, К.; Уайлд, А.; Шуберт, США Адаптация электродов и гелевых полимерных электролитов для печати для оптимизированных полностью органических батарей. Дж. Полим. наук. 2021, 59, 494–501. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
81. Зима, М.; Бродд, Р.Дж. Что такое батареи, топливные элементы и суперконденсаторы? хим. Ред. 2004, 104, 4245–4270. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
82. Иса, ННК; Можд, Ю.; Заки, МХМ; Мохаммад, SAS: Характеристика медного покрытия, электроосажденного на нержавеющую сталь Субстрат. Межд. Дж. Электрохим. наук. 2017, 12, 6010–6021. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
83. Трентин А.; Паксершт, А.; Дюрбан, А.; Кастро, Ю.; Галусек Д. Электрохимические характеристики полимерных покрытий для защиты от коррозии: обзор достижений и перспектив. Полимеры 2022, 14, 2306. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
84. Молина Дж.; Эстевес, МФ; Фернандес Дж.; Бонастр, Дж.; Чехлы, Ф. Проводящие ткани с полианилиновым покрытием. Химическая и электрохимическая Кал. характеристика. Евро. Полим. Дж. 2011, 47, 2003–2015 гг. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
85. Штангл, А.; Муньос-Рохас, Д.; Бурриэль, М. Методы определения характеристик in situ и Operando для твердооксидных электрохимических элементов: последние достижения. Дж. Физ. Энергия 2021, 3, 012001. [\[CrossRef\]](#)
86. Рафи, М.; Абрамс, диджей; Кардинале, Л.; Госс, З.; Ромеро-Аренас, А.; Шталь, С.С. Циклическая вольтамперометрия и хроноамперометрия: механистические инструменты для органического электросинтеза. хим. Соц. Ред. 2024 г., 53, 566–585. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
87. Эльгриши, Н.; Раунтри, Кей Джей; Маккарти, Б.Д.; Раунтри, ES; Эйзенхарт, ТТ; Демпси, Дж. Л. Практическое руководство для начинающих по циклической вольтамперометрии. Дж. Хим. Образование. 2018, 95, 197–206. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
88. Гузиевский, Д.; Стоянов Л.; Звезак, З.; Комптон, Род-Джеймс; Мирчески, В. Кинетика электродов в одном эксперименте: многоамплитудный анализ в прямоугольной хроноамперометрии. Физ. хим. хим. Физ. 2022, 24, 24419–24428. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
89. Ли, Дж.И.; Парк, Дж.Х.; Чанг, Ю.В.; Чо, С.; Канг, М.; Пьюн, Дж. К. Окислительно-восстановительный цикл на основе хроноамперометрии для применения в Иммуноанализы. ACS Sens. 2018, 3, 106–112. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
90. Володин И.А.; Штольце, К.; Касас Меса, К.; Хааген, У.; Терчин, К.; Хагер, доктор медицины; Шуберт, США. За пределами стационарных условий: хроноамперометрические измерения состояния заряда и состояния работоспособности электролитов проточных батарей. Сенсорные актуаторы В Chem. 2024, 403, 135101. [\[CrossRef\]](#)
91. Паррия, М.; Куартеро, М.; Креспо, Джорджия Носимые потенциометрические датчики ионов. TrAc — Анализ тенденций. хим. 2019, 110, 303–320. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
92. Дюзюн, А.; Зелада-Гильен, Джорджия; Креспо, Джорджия; Махо, С.; Риу, Дж.; Риус, Ф.Х. Наноструктурированные материалы в потенциометрии. Анальный. Биоанал. хим. 2011, 399, 171–181. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
93. Дин, Дж.; Цинь, В. Последние достижения в области потенциометрических биосенсоров. TrAc — Анализ тенденций. хим. 2020, 124, 115803. [\[CrossRef\]](#)
94. Лин З.; Ву, Д.; Ду, К.; Рен, З. Усовершенствованный потенциометрический метод измерения коэффициента энтропии литий-ионного аккумулятора. Батарея на основе положительной регуляции. Energy Rep. 2022, 8, 54–63. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
95. Чмайсем, А.; Танасе, СЕ; Верпланк, Н.; Гужис, М.; Мурье, В.; Зебда, А.; Гаемагами, АМ; Мэйли, П. Новая микрофлюидная система для электрохимической импедансной спектроскопии, оценка эффективности клеточных культур: проектирование и разработка нового электродного материала. Биосенсоры 2022, 12, 452. [\[CrossRef\]](#)
96. Чжан, М.; Лю, Ю.; Ли, Д.; Кюи, Х.; Ван, Л.; Ли, Л.; Ван, К. Электрохимическая импедансная спектроскопия: новая глава в быстрой и точной оценке состояния здоровья литий-ионных батарей. Энергии 2023, 16, 1599. [\[CrossRef\]](#)
97. Чой, В.; Шин, ХК; Ким, Дж. М.; Чой, Ю; Юн, В.С. Моделирование и применение электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) для литий-ионных аккумуляторов. Дж. Электрохим. наук. Технол. 2020, 11, 1–13. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
98. Бретт, Электрохимическая импедансная спектроскопия КМА при определении характеристик и применении модифицированных электродов для Электрохимические сенсоры и биосенсоры. Молекулы 2022, 27, 1497. [\[CrossRef\]](#)
99. Магар, Х.С.; Хасан, РЯА; Мулчандани, А. Электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС): принципы, конструкция и Биосенсорные приложения. Датчики 2021, 21, 6578. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
100. Каше-Вивье, К.; Кеддам, М.; Вивье, В.; Ю. Л.Т. Разработка резонаторных микроэлектродных устройств и их применение в различных Области исследований. Дж. Электроанал. хим. 2013, 688, 12–19. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
101. Трамбле, МЛ; Мартин, Миннесота; Лебуэн, К.; Лася, А.; Гуай, Д. Определение реальной площади поверхности порошкообразных материалов в резонаторных микроэлектродах методом электрохимической импедансной спектроскопии. Электрохим. Акта 2010, 55, 6283–6291. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
102. Каше-Вивьера, К.; Вивье, В.; Ча, CS; Неделец, Ю; Ю. Л.Т. Электрохимия порошковых материалов, изученная с помощью метода Резонаторный микроэлектрод (СМЕ). Электрохим. Акта 2001, 47, 181–189. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
103. Вивье, В.; Каше-Вивье, К.; Ча, CS; Неделец, Ю; Ю. Л.Т. Резонаторный микроэлектрод для исследования аккумуляторных материалов: применение в Полианилиновый порошок. Электрохим. Коммун. 2000, 2, 180–185. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
104. Хасэгава, Н.; Сёдзи, К. Регулирование объема микрополостей на кончике электродов Ag/AgCl для стабильных измерений тока канала биологических нанопор. Аналитик 2022, 147, 1191–1198. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
105. Хуан, Х.; Ши, Х.; Цзэн, Х. Насколько эффективно восстанавливается медь/никель при практическом применении в гальванике? Сточные Воды? Ресурс. Консервировать. Переработка. Адв. 2023, 19, 200170. [\[CrossRef\]](#)

106. Мохаджери, Р.; Алипур, Э.; Хаджихоссеини, С.; Мирзаи, С.И.; Фардманеш, М. Характеристика электродов с платиновым покрытием, инкапсулированных в микрофлюидный канал, для импедансометрии. В материалах 28-й национальной и 6-й Международной иранской конференции по биомедицинской инженерии (ICBME 2021) 2021 г., Тегеран, Иран, 25–26 ноября 2021 г. [\[CrossRef\]](#)
107. Солонин, д.м.н.; Аснис, Северная Каролина; Григорян, Н.С.; Ваграмян Т.А. Очистка тонкой вольфрамовой проволоки перед гальванопокрытием золота. Цветные Встретил. 2023, 2023, 58–63. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
108. Менк, Луизиана; Бака, Эд; Холлоуэлл, А.Э. Электроосаждение меди в слепых мезомасштабных сквозных отверстиях кремния. ECS Встреча. Абстр. 2018, MA2018-02, 823. [\[CrossRef\]](#)
109. Мотидзуки, К.; Сенга, Т.; Шибата, М. Электроосаждение пленок металлического стекла Pd-Ni-P. Электрохимия 2011, 79, 249–251. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
110. Кривко-Цендровска А.; Стравски, М.; Шклярчик, М. Низкотемпературное электроосаждение фотоактивных пленок SiOx в водном растворе. Электрохим. Акта 2013, 108, 112–117. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
111. Лю, А.С.; Оливейра, МАС Электроосаждение полипиррольных пленок на алюминии из водного раствора тартрата. Ж. Браз. хим. Соц. 2007, 18, 143–152. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
112. Сая, А.; Хабельхеймс, Ф.; Бахлул, А.; Буджиди, А. Влияние приложенного потенциала электроосаждения на электрохимический процесс. Производительность полианилиновых пленок. Дж. Матер. наук. Матер. Электрон. 2021, 32, 10692–10701. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
113. Лата, С.; Батра, Б.; Кумар, П.; Пундир, К.С. Создание амперометрического биосенсора D-аминокислоты на основе оксидазы d-аминокислот/карбоксилированной многостенной углеродной нанотрубки/медных наночастиц/золотого электрода, модифицированного полиалинином. Анальный. Биохим. 2013, 437, 1–9. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
114. Джи, Дж.; Чжу, Х.; Рука, Ли, М.; Чжан, К.; Шу, Ю.; Ченг, Э.; Чжан, В.; Хуа, Э.; Санг, С. АС Электроосаждение пленок PEDOT в протонных ионных жидкостях для долговременно стабильных органических электрохимических транзисторов. Молекулы 2019, 24, 4105. [\[CrossRef\]](#)
115. Мартинес-Виademonte, член парламента; Авраами, ST; Хак, Т.; Бурхардт, М.; Террин, Х. Обзор анодирования аэрокосмического алюминия Сплавы для защиты от коррозии. Покрытия 2020, 10, 1106. [\[CrossRef\]](#)
116. Ивасаки М. Анодирование титана. Дж. Серф. Заканчивать. Соц. Япония. 2022, 73, 28–32. [\[Перекрестная ссылка\]](#) 117. де Соуза Араужо, СР; да Силва, RMP; Кламп, Р.Э.; Коста, И. Процесс анодирования алюминия и его сплавов: исторический опыт. и электрохимический подход. Ким. Нова 2021, 44, 999–1011. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
118. Шнайдер, М.; Фюрбет, В. Анодирование: поры имеют значение. Матер. Коррос. 2022, 73, 1752–1765. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
119. Цангаракис-Капаланоглу И.; Теохари, С.; Димогеронтасис, Т.; Ван, Ю.М.; Куо, Х.Х.; Киа, С. Влияние типов сплавов на Процесс анодирования алюминия. Серфинг. Пальто. Технол. 2006, 200, 2634–2641. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
120. Шнайдер, М.; Креммер, К.; Вайдманн, СК; Фюрбет, В. Взаимодействие между изменением параметров и структурой оксида Модифицированный процесс PAA. Серфинг. Интерфейс Анал. 2013, 45, 1503–1509. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
121. Кунтый О.; Зозуля Г.; Шепида, М. Формирование пористого кремния методом электрохимического травления. Адв. Матер. наук. англ. 2022, 2022, 1482877. [\[CrossRef\]](#)
122. Чжан Л.; Лу, Д.; Дэн, Х. Исследование механизмов удаления материала при полировке GaN, усиленной электрохимическим травлением. Дж. Производитель Процесс 2022, 73, 903–913. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
123. Фючек Н.; Савица, М.; Федюевич-Змуда, А.; Секач, М.; Зак, М.; Новаковски-Шкударек, К.; Музиол, Г.; Вольни, П.; Келли, Джей-Джей; Скербишевски, К. Электрохимическое травление GaN Р-типа с использованием туннельного перехода для эффективного введения дырок. Акта Матер. 2022, 234, 118018. [\[CrossRef\]](#)
124. Сан, В.; Шах, ЮАР; Чен, Ю.; Тан, З.; Гао, Х.; Хабиб, Т.; Радович, М.; Грин, М.Дж. Электрохимическое травление Ti2AlC до Ti2CT:X (MXene) в растворе соляной кислоты низкой концентрации. Дж. Матер. хим. Матер. 2017, 5, 21663–21668. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
125. Цзян Ю.; Ван, Л.; Менье, М.; Мирсаидов У. Пути формирования пористых наночастиц сплавов с помощью селективных химикатов и электрохимическое травление. Small 2021, 17, 2006953. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
126. Пэн, Н.; Привет.; Ян, Х. Влияние содержания H2SO4 на электрохимическую активацию протравленных туннелей на алюминиевой фольге. Коррозия 2018, 74, 75–82. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
127. Пэн, Н.; Вэнь, Ю.; Он, Ю. Улучшение распределения протравленных туннелей на алюминиевой фольге при обработке силаном. Прог. Орг. Пальто. 2019, 127, 151–156. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
128. Кая, Д.; Кечечи, К. Обзор — трековые нанопористые полимерные мембраны в качестве сенсоров: обзор. Дж. Электрохим. Соц. 2020, 167, 037543. [\[CrossRef\]](#)
129. Чен Ю.; Ага; Чжун, Ю.; Донг, С.; Хоу, М.; Лю, Х.; Чен, Х.; Гао, Дж.; Вонг, К.-П. Обзор: Прогресс в области электрохимического травления полупроводников третьего поколения. ECS J. Наука о твердом теле. Технол. 2023, 12, 045004. [\[CrossRef\]](#)
130. Лин, Дж. К.; Лю, ЮК; Лу, Ш.; Йена, HN; Сетту, К. Повышение удельной емкости конденсатора на основе пористого кремния путем внедрения графена в сочетании с трехмерным электрохимическим травлением. Электрохим. Коммун. 2023, 154, 107555. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
131. Лазанас, АС; Продромидис, М.И. Электрохимическая импедансная спектроскопия — учебное пособие. АСУ Измер. наук. Аи 2023, 3, 162–193. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
132. Чмайсем, А.; Монсальве-Грихальба, К.; Псевдоним, М.; Мурье, В.; Виньо, С.; Скомацон, Л.; Мюллер, К.; Барт, Ж.; Врана, Северная Каролина; Мэйли, П. Эталонный метод автономного анализа оксидов азота в средах для культивирования клеток с помощью хемилюминесцентного детектора на основе озона. Анальный. Биоанал. хим. 2021, 413, 1383–1393. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
133. Чмайсем, А.; Пети, Л.; Верпланк, Н.; Мурье, В.; Виньо, С.; Врана, Северная Каролина; Мэйли, П. Характеристика влияния классической среды для клеточных культур на реакцию электрохимических сенсоров. Электроанализ 2022, 34, 1201–1211. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

134. Эскарпа, А. Пищевой электроанализ: смысл и простота. хим. Рек. 2012, 12, 72–91. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
135. Буссуа, А.; Таббс, Э.; Револь-Кавалер, Ф.; Чмайсем, А.; Алессо, М.; Коснье, М.-Л.; Верпланк, Н. Мониторинг уровня кислорода в режиме реального времени в термопластичных устройствах «орган-на-чипе». ССРН Электрон. J. 2022, 11, 4090175. [\[CrossRef\]](#)
136. Бюльманн, П.; Претч, Э.; Баккер, Э. Ионоселективные электроды на основе носителей и объемные оптоды. 2. Ионофоры для потенциометрического и оптические датчики. хим. Ред. 1998, 98, 1593–1688. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
137. Лонсдейл, В. Разработка, производство и применение твердотельного датчика pH с использованием оксида рутения; Университет Эдит Коуэн: Джоондалуп, Вашингтон, Австралия, 2018 г.
138. Лю, Ю.; Фарр, М.; Сальваторе, Джорджия. «Лаборатория на коже»: обзор гибкой и растягивающейся электроники для портативного мониторинга здоровья. АСУ Нано 2017, 11, 9614–9635. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
139. Гао, В.; Эмаминеджад, С.; Ньейн, НУУ; Чалла, С.; Чен, К.; Пек, А.; Фахад, Его Величество; Ота, Х.; Ширази, Х.; Кирия, Д.; и другие. Полностью интегрированные носимые сенсорные матрицы для мультиплексного анализа пота на месте. Природа 2016, 529, 509–514. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
140. Сорансо, Т.; Бен Тахар, А.; Чмайсем, А.; Зельсманн, М.; Вадгама, П.; Ленорман, JL; Синкин, П.; Мартин, ДК; Зебда, А. Электрохимическое биосенсирование глюкозы на основе ферментативного восстановления глюкозы. Датчики 2022, 22, 7105. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
141. Чмайсем, А.; Шалаэль, И.; Маринеско, С.; Зебда, А. Исследование стабильности GOx в матрице хитозана: приложения для Ферментативные электроды. Датчики 2023, 23, 465. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
142. Чмайсем, А.; Надольска, М.; Таббс, Э.; Садовска, К.; Вадгма П.; Шитанда, И.; Цудзимура, С.; Латтах, Ю.; Пикок, М.; Тингри, С.; и другие. Понимание непрерывного мониторинга уровня глюкозы: от медицинских основ к коммерческим устройствам. Микрохим. Acta 2023, 190, 177. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
143. Йоу, ЭХ; Ли, С.Ю. Биосенсоры глюкозы: обзор использования в клинической практике. Датчики 2010, 10, 4558–4576. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
144. Сингх, Н.; Голдсмит, Б.Р. Роль электрокатализа в устранении загрязнений воды. АСУ Катал. 2020, 10, 3365–3371. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
145. Найдю, Р.; Бисвас, Б.; Уиллетт, ИК; Крибб, Дж.; Кумар Сингх, Б.; Пол Натанаил, К.; Кулон, Ф.; Семпл, КТ; Джонс, КК; Барклай, А.; и другие. Химическое загрязнение: растущая опасность и потенциальный катастрофический риск для человечества. Окружающая среда. Межд. 2021, 156, 106616. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
146. Исарайн-Чавес, Э.; Де Ла Роса, К.; Годинес, Луизиана; Брилла, Э.; Перальта-Эрнандес, Дж. М. Сравнительное исследование процессов электрохимической очистки сточных вод кожевенных заводов. Дж. Электроанал. хим. 2014, 713, 62–69. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
147. Фэн, А.; Фэн, Дж.; Син, В.; Цзян, К.; Тан, В. Универсальные применения электрохимических проточных систем в процессах очистки воды. хим. англ. J. 2023, 473, 145400. [\[CrossRef\]](#)
148. Альварардо, Л.; Чен, А. Электродеионизация: принципы, стратегии и приложения. Электрохим. Acta 2014, 132, 583–597. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
149. Салари, К.; Зарафшан, П.; Хашехчи, М.; Чегини, Г.; Этезади, Х.; Карамии, Х.; Шульжик-Чеплак, Ю.; Лагод, Г. Знания и технологии, используемые при емкостной деионизации воды. Мембраны 2022, 12, 459. [\[CrossRef\]](#)
150. Ван, К.; Ли, Х.; Ян, Ю.; Ван, П.; Чжэн, Ю.; Сонг, Л. Повышение эффективности катодных композитов для электрофентона и Био-электро-фентоновые системы: обзор. Сентябрь Пуриф. Технол. 2022, 304, 122302. [\[CrossRef\]](#)
151. Он, Л.; Ду, П.; Чен, Ю.; Лу, Х.; Ченг, Х.; Чанг, Б.; Ван З. Достижения в области микробных топливных элементов для очистки сточных вод. Обновить. Поддерживать. Energy Rev. 2017, 71, 388–403. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
152. Силланпя, М.; Шестакова М. Новые и комбинированные электрохимические методы. Электрохимические методы очистки воды: основы, методы и полномасштабные приложения; Elsevier Inc.: Амстердам, Нидерланды, 2017 г.; Глава 3, стр. 131–225. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
153. Азанав, А.; Бирли, Б.; Тешоме, Б.; Джембери, М. Методы очистки сточных вод текстильной промышленности и экологически чистое решение текстильной промышленности. Сточные Воды. Корпус Стад. хим. Окружающая среда. англ. 2022, 6, 100230. [\[CrossRef\]](#)
154. Винета, С.; Сильвана, З.; Саня, Р.; Голомеова С.С. Методы очистки сточных вод текстильной промышленности. В материалах Международная научная конференция «UNITECH 2014», Габрово, Болгария, 21–22 ноября 2014 г.
155. Бехера, М.; Наяк, Дж.; Банерджи, С.; Чакраборти, С.; Трипати, СК. Обзор очистки сточных вод текстильной промышленности на пути к разработке эффективной стратегии смягчения последствий: подход к проектированию интегрированной системы. Дж. Энвайрон. хим. англ. 2021, 9, 105277. [\[CrossRef\]](#)
156. Самсами, С.; Мохамеди, М.; Саррафаде, МХ; Рене, скорая помощь; Фирозбар, М. Последние достижения в очистке содержащих красители сточных вод текстильной промышленности: обзор и перспективы. Процесс Саф. Окружающая среда. Прот. 2020, 143, 138–163. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
157. Лабиди, А.; Салаберрия, АМ; Фернандес, СКМ; Лабиди, Дж.; Абдеррабба, М. Функциональное производное хитозана и хитин как материалы для обесцвечивания метиленового синего и метилоранжа из водного раствора. Материалы 2019, 12, 361. [\[CrossRef\]](#)
158. Мэн, XL; Не, Ю.; Сан, Дж.; Ченг, В.Г.; Ван, JQ; Он, НУ; Чжан С.Дж. Функционализированные дициандиамидоформальдегидные полимеры как эффективные гетерогенные катализаторы конверсии CO<sub>2</sub> в органические карбонаты. Зеленый. хим. 2014, 16, 2771–2778. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
159. Алинеси А.; Эвену, Ф.; Абдулкарим, ЕМ; Понс, Миннесота; Захраа, О.; Бенхамму, А.; Якуби, А.; Неджмеддин А. Лечение Сточные воды текстильной промышленности методом поддерживаемого фотокатализа. Красители Пигменты 2007, 74, 439–445. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
160. Ильхан, Ф.; Улухан-Алтунтас, К.; Доган, К.; Курт У. Очистка необработанных текстильных сточных вод с использованием процесса Фентона и его сравнение с химической коагуляцией. Опреснительная обработка воды. 2019, 162, 142–148. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
161. Каур, П.; Кушвах, Япония; Сангал В.К. Электрокаталитическая окислительная очистка реальных текстильных сточных вод в реакторе непрерывного действия: путь разложения и исследование возможности утилизации. Дж. Хазард. Матер. 2018, 346, 242–252. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

162. Мукин А.; Виджая, К.; Кункаа, А. Окисление ремазола бриллиантового синего r (RB.19) электрогенерируемым активным веществом in situ. Хлор с использованием электрода Ti/PbO<sub>2</sub>. Сентябрь Пуриф. Технол. 2012, 95, 1–9. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
163. Чмайсем, А.; Аль Шубаси, Г.; Таха, С.; Хаушар, Д. Электрофентоновый процесс в полуплотном масштабе. Исследование по масштабированию реактора для промышленного применения. Рез. кв. 2023. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
164. Парк, С.; Ли, Дж.В.; Попов Б.Н. Обзор газодиффузионного слоя в топливных элементах с ФЭМ: материалы и конструкции. Межд. Дж. Водородная энергетика 2012, 37, 5850–5865. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
165. Мукин А.; Вистанти, Х.; Харихастути, Н.; Сетянингсх, Н.И.; Джаянти, С.; Нилавати; Астути, Ю. Гибридный фентон-электрохимический реактор и система для последующей очистки текстильных сточных вод. J. Водный процесс, инженер. 2024, 59, 105028. [\[CrossRef\]](#)
166. Чжу, К.; Анг, Северо-Западная Юг; Мейер, ТН; Цю, Ю.; Акерманн, Л. Органическая электрохимия: молекулярный синтез с потенциалом. СКУД Цент. наук. 2021, 7, 415–431. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
167. Лич, МС; Лам, К. Практическое руководство по электросинтезу. Нат. Преподобный Хим. 2022, 6, 275–286. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
168. Ботте Г.Г. Электрохимическое производство в химической промышленности. Электрохим. Соц. Интерфейс 2014, 23, 49–55. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
169. Ван, Ф.; Ли, В.; Ван, Р.; Го, Т.; Шэн, Х.; Фу, ХК; Шталь, СС; Джин, С. Модульный электрохимический синтез с использованием окислительно-восстановительного потенциала. Резервуар в паре с независимыми полуреакциями. Джоуль 2020, 5, 149–165. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
170. Кюи, Б.; Ши, Ю.; Ли, Г.; Чен, Ю.; Чен, В.; Дэн, Ю.; Ху, В. Проблемы и возможности электролиза морской воды: мини-обзор современных материалов в электрохимии с участием хлора. Ули Хуасюэ Сюэбао/Acta Phys.—Chim. Грех. 2022, 38, 2106010. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
171. Ли, К.; Дженсен, Дж.О.; Бьеррум, Нью-Джерси Химия, электрохимия и электрохимические применения | Алюминий. В Энциклопедии Электрохимические источники энергии; Elsevier Inc.: Амстердам, Нидерланды, 2009 г. [\[CrossRef\]](#)
172. Комер, Б.М.; Фуэнтес, П.; Димкла, Колорадо; Лю, Ю.Х.; Фернандес, Калифорния; Арора, П.; Реальф, М.; Сингх, У.; Хатцелл, МС; Медфорд, Эй Джей Перспективы и проблемы солнечных удобрений. Джоуль 2019, 3, 1578–1605. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
173. Фу, Н.; Зауэр, Г.С.; Лин, С. Общий электрокаталитический подход к синтезу вицинальных диаминов. Нат. Протокол. 2018, 13, 1725–1743. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
174. Чжэн, С.; Ян, Дж.; Ван, К. Прогресс инженерных исследований в области технологии электрохимических микрореакций — новый метод Электросинтез органических химических веществ. Техника 2021, 7, 22–32. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
175. Анастасиаду, Д. Электроды на основе меди для электросинтеза аммиака и мочевины. Кандидат наук. Диссертация, Технологический университет Эйндховена, Эйндховен, Нидерланды, 2023 г.
176. Чен, Х.; Льв, С.; Су, З.; Ян, Х.; Кюи, Х.; Ян, З.; Сюй, З.; Теобальди, Г.; Канг, Дж.; Лю, Л.-М.; и другие. Современные достижения в области аморфных наноматериалов для электрохимического синтеза N-содержащих соединений. хим. Катал. 2024, 100871. [\[CrossRef\]](#)
177. Ботте, Г.Г. Переход электрохимических технологий в сельское хозяйство через Национальный научный фонд инженерных исследований. Модель Центра. Электрохим. Соц. Интерфейс 2023, 32, 69–73. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
178. Мейер, ТН; Цой, И.; Тиан, К.; Акерманн, Л. Энергия будущего: как электрохимия может изменить ситуацию в органике Синтез? Химия 2020, 6, 2484–2496. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
179. Талеби, МR; Нематолахи, Д. Электрохимический синтез производных сульфонамидов: условия электросинтеза и пути реакции. ХимЭлектроХим 2024, 11, e202300728. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
180. Цзо, С.; Сюэ, В.; Чжан, Ю.; Чен, Дж.; Лин З. Передняя обложка: Электрокатализаторы водорода на основе атомно-дисперсных мотивов Fe Пероксидный синтез (ХимНаноМат 2/2024). ChemNanoMat 2024, 10, 202400093. [\[CrossRef\]](#)
181. Цзо, С.; Сюэ, В.; Чжан, Ю.; Чен, Дж.; Лин, З. Атомно-дисперсные электрокатализаторы на основе мотива железа для синтеза перекиси водорода. ChemNanoMat 2024, 10, 202300476. [\[CrossRef\]](#)
182. Шремп Ф.В. Предотвращение коррозии морских платформ. JPT Дж. Пет. Технол. 1984, 36, 605–612. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
183. Чен, Ю.; Он, М.; Зонг, Ю.; Донг, С.; Ян, Ю.; Чжан, Ю.; Лю, Х.; Цао, Дж. Прогресс в исследованиях видов отказов несвязанных гибких материалов Трубы и меры борьбы с ними. Нат. Газ. Индиана, 2021 г., 41, 122–131. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
184. Махаджанам, SPV; Йостен, М.В. Рекомендации по выбору присадочного материала для минимизации преимущественной коррозии сварных швов в трубопроводных сталях. Проект SPE. Удобство. Констр. 2011, 6, 5–12. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
185. Эрдоган, К.; Суэйн, Г. Концептуальный проект катодной защиты жертвенного анода для морских ветряных моносвай. Океан англ. 2021, 235, 109339. [\[CrossRef\]](#)
186. Попов Б. Н. Коррозионная техника: основы и решаемые проблемы; Elsevier: Амстердам, Нидерланды, 2015 г. [\[CrossRef\]](#)
187. Ахмад З. Принципы коррозионной техники и контроля коррозии; Elsevier: Берлингтон, Массачусетс, США, 2006 г. [\[CrossRef\]](#)
188. Чичек, В. Коррозионная инженерия; Уайли: Хобокен, Нью-Джерси, США, 2014 г.; ISBN 9781118720899. [\[CrossRef\]](#)
189. Пюн, С.-И. Стратегии защиты металлов от коррозии. ChemTexts 2020, 7, 2. [\[CrossRef\]](#)
190. Дюкасс-Лапейрус, Ж.; Бутейллер, В.; Мари-Виктуар, Э.; Буйшу, М.; Дэмиен, Г.; Мартине, В.; Аннед-Вилло, К.; Лесьетр, О. Оценка системы катодной защиты по току после 4 лет эксплуатации: пример виадука Сен-Клу (Франция). Корпус Стад. Констр. Матер. 2023, 18, e02023. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
191. Сюй, Дж.; Ян, М.; Ли, С.; Кайнума, С.; Джи, Б.; Мураяма, С. Применение метода катодной защиты на стальных конструкциях с использованием жертвенного анода и гидрогелевого электролита полиакрилата натрия и карбоксиметилцеллюлозы натрия (ПАНА-КМЦ). Корпус Стад. Констр. Матер. 2024, 20, e02742. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
192. Раманавасу, Р.; Виджаякумар, К.; Фернандес, SG Интегрированная наносетка для системы катодной защиты наложенным током на опреснительных установках. Устойчивое развитие 2023, 15, 7088. [\[CrossRef\]](#)

193. Яо, Г.; Он, Х.; Лю, Дж.; Го, З.; Чен, П. Испытательное исследование механизма защиты мостового кабеля от коррозии на основе впечатлений Текущая катодная защита. Смазочные материалы 2023, 11, 30. [\[CrossRef\]](#)
194. Дикинсон, Е.Ф.; Экстрем, Х.; Фонтес, Э. COMSOL Multiphysical®: Программное обеспечение конечных элементов для электрохимического анализа. А Мини-обзор. Электрохим. Коммун. 2014, 40, 71–74. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
195. Джалалванд, Арканзас; Рушани, М.; Гойкозчеа, ХК; Ратледж, Д.Н.; Гу, НВ MATLAB в электрохимии: обзор. Таланта 2018, 194, 205–225. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
196. Узддл, П.; Винсент, Т.; Ки, Р.Дж. Идентификация и применение моделей в пространстве состояний, полученных на основе высокоточных физических моделей литий-ионных батарей. ECS Встреча. Абстр. 2017, MA2017-01. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
197. Беннетт, Б.; Чанг, Дж.; Бард, А.Дж. Механизм окислительно-восстановительной реакции Вг-/Вг2 на платиновых и стеклогуглеродных электродах в нитробензоле методом циклической вольтамперометрии. Электрохим. Акта 2016, 219, 1–9. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
198. Хабекост А. Моделирование и аппроксимация кривых циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии электрохимических реакций с различными механизмами - дидактическая перспектива. Мир Дж. Хим. Образование. 2019, 7, 53–64. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
199. Ван, Х.; Ван, З. Анимированные модули электрохимического моделирования. Дж. Хим. Образование. 2022, 99, 752–758. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
200. Яугштеттер, М.; Блан, Н.; Крац, М.; Чулик, К. Электрохимия в условиях конфайнмента. хим. Соц. Ред. 2022 г., 51, 2491–2543. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
201. Вайс, ЛЖК; Любинс, Г.; Музыка, Э.; Ринклин, П.; Банзе, М.; Пэн, Х.; Теркан, К.; Майер, Д.; Вольфрум, Б. Электрохимия одиночного удара в микрофлюидике на основе бумаги. ACS Sens. 2022, 7, 884–892. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
202. Чжоу, Ю.; Ци, Дж.; Энгельберг Д.Л. О применении биполярной электрохимии для моделирования поведения гальванической коррозии Разнородные нержавеющие стали. Электрохим. Коммун. 2021, 126, 107023. [\[CrossRef\]](#)
203. Тетти, Ф.; Парупелли, СК; Десаи, С. Обзор биомедицинских устройств: классификация, нормативные требования, человеческий фактор, Программное обеспечение как медицинское устройство и кибербезопасность. Биомед. Матер. Приборы 2023, 2, 316–341. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
204. Маркус, Н.; Пейн, С.; Хьюз-Халлетт, А.; Маркус, АР; Ян, Г.З.; Дарзи, А.; Нанди, Д. Нормативное одобрение новых медицинских препаратов Устройства: поперечное исследование. БМЖ 2016, 353, i2587. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
205. Вагнер, М.В.; Шанце, Т. Сравнение процедур утверждения медицинских изделий в Европе и США. Курс. Реж. Биомед. англ. 2019, 5, 605–608. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
206. Робинсон, С.Г.; Сигман, МS Интеграция инструментов электрохимического и статистического анализа для молекулярного дизайна и понимания механизмов. Акк. хим. Рез. 2020, 53, 289–299. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
207. Ривера, ФФ; Перес, Т.; Кастаньеда, Л.Ф.; Нава, Дж. Л. Математическое моделирование электрохимических реакторов: критический обзор. хим. англ. наук. 2021, 239, 116622. [\[CrossRef\]](#)
208. Лу, С.-М.; Ванной, К.Дж.; Дик, Дж. Э.; Лонг, Ю.-Т. Многофазная химия в условиях наноконфайнмента: электрохимическая перспектива. Дж. Являюсь. хим. Соц. 2023, 145, 25043–25055. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
209. Ма, З.; Виттеман, Л.; Врубель, Дж.А.; Бендер, Г. Метод комплексного моделирования электролизера с протонообменной мембраной Разработка. Межд. Дж. Водородная энергетика 2021, 46, 17627–17643. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
210. Илиев И.К.; Гиззатуллин, АР; Филимонова А.А.; Чичирова, Н.Д.; Белолев И.Х. Численное моделирование процессов в электрохимической ячейке с использованием COMSOL Multiphysical. Энергии 2023, 16, 7265. [\[CrossRef\]](#)
211. Ясюань, Ц.; Ченг, Ф.; Кенинг, С. Мультифизическое моделирование твердооксидного топливного элемента на основе метода Comsol. В сети E3S Конференции; EDP Sciences: Париж, Франция, 2021 г.; Том 245. [\[CrossRef\]](#)
212. Гоэль, В.; Торнтон, К. Возможность электрохимического моделирования электродов литий-ионных аккумуляторов с анизотропной извилистостью в COMSOL Мультифизика®. MethodsX 2021, 8, 101425. [\[CrossRef\]](#)
213. Салазар, П.Ф.; Кумар, С.; Кола, Б.А. Проектирование и оптимизация термоэлектрохимических ячеек. Дж. Прил. Электрохим. 2013, 44, 325–336. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
214. Ян, В.; Сан, Л.; Бао, Дж.; Мо, З.; Ду, М.; Сюй, Ю.; Чжан Дж. Мультифизическое моделирование массо- и теплопереноса в термо-Электрохимическая ячейка. Индийский англ. хим. Рез. 2023, 62, 12345–12355. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
215. Эль-Шафи, ОА; Эль-Маграби, РМ; Альбо, Дж.; Фатин, шведская крона; Абдельгани, А. Моделирование и численное исследование эффективности газодиффузионных электродов для электрохимического восстановления углекислого газа до метанола. Индийский англ. хим. Рез. 2020, 59, 20929–20942. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
216. Ян, Ф.; Чжан, Дж.; Го, К.; Чжао, С. Исследование электрохимической обработки для постепенного изменения глубокой спирали специальной формы Дыра на базе COMSOL. Межд. Дж. Адв. Производитель Технол. 2020, 108, 2717–2725. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
217. Кордова-Хуаман, А.В.; Хауя-Ккана, VR; Ла Роза-Торо, А. Недорогой потенциостат, управляемый смартфоном, на базе Arduino для обучения основам и приложениям электрохимии. Гелион 2021, 7, e06259. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
218. Ахмад, Нью-Джерси; Якоб, Н.; Буныамин, МАН; Винарно, Н.; Акмаль, В.Х. Влияние интерактивной компьютерной анимации и моделирования на успеваемость и мотивацию учащихся при изучении электрохимии. Дж. Пендидик. IPA Индонезия. 2021, 10, 311–324. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.