

На правах рукописи

Бахин Андрей Николаевич

**РАЗРАБОТКА НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ЩЕЛОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ВОДЫ**

Специальность 05.14.08 – Энергоустановки на основе
возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кулешов Николай Васильевич

Официальные оппоненты: Тазетдинов Рустем Галятдинович,
доктор технических наук, профессор,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), профессор кафедры
"Технология конструкционных материалов"

Борзенко Василий Игоревич,
кандидат технических наук,
Объединенный институт
высоких температур РАН,
старший научный сотрудник
лаборатории «Водородных
энергетических технологий»

Ведущая организация: РИЦ "Курчатовский институт"

Защита состоится «10» июня 2013 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета), 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «__» мая 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
д. т. н., проф.

Ю.В. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В рамках концепции водородной энергетики и технологии в России и за рубежом образовался мощный рынок потребления электролитического водорода, традиционно включающий предприятия энергетики, стекольной, химической, пищевой промышленности и металлургии.

Возникший интерес к электролитическому способу разложения воды на водород и кислород можно объяснить простотой процесса получения водорода, надежностью электролизеров, чистотой генерируемых газов, большими запасами источника водорода, а именно воды.

В настоящее время в ряде стран западной Европы, а также в Японии, Китае, США, рынок потребления водорода стремительно развивается. Появляются новые направления использования водорода, такие как автомобили, работающие на водородном топливе, инфраструктура для них (заправочные станции). В регионах с развитой системой возобновляемых источников энергии (ветровых установок, солнечных батарей, геотермальных источников) водород используют для аккумуляции энергии.

Для электролитического получения водорода в крупных объемах наибольшее распространение получили электролизеры с щелочным электролитом. Популярность щелочных электролизеров связана с большим ресурсом их работы, простотой конструкции, дешевизной материалов, неприхотливостью в обслуживании. Основным недостатком щелочных электролизеров - высокое энергопотребление. Так для российских электролизеров энергопотребление составляет от 5.4 до 5.8 кВт·ч/м³ H₂, а энергопотребление современных щелочных электролизеров разработанных в западных странах от 4.4 до 4.8 кВт·ч/м³ H₂.

На всей территории РФ ОАО «Уралхиммаш» был и остается единственным производителем щелочных электролизеров. Щелочные электролизеры типа СЭУ, ФВ производства ОАО «Уралхиммаш» работают на 1500 предприятий по всей Российской Федерации, странах СНГ. Электролизеры данного производителя представляют собой разработки прошлого века с высоким энергопотреблением, вследствие этого факта отечественные электролизеры проигрывают конкуренцию западным аналогам данного оборудования. Таким образом, Российская Федерация из экспортера электролизных установок превращается в импортера.

Основными производителями щелочных электролизеров, а, следовательно, прямыми конкурентами ОАО «Уралхиммаш» являются:

1. Hydrogenics Co. (Бельгия);
2. Norsk Hydro Electrolysers (Норвегия);
3. Teledyne Inc. (США);
4. Piel (Италия).

Цель настоящей работы заключалась в разработке элементной базы (анодов, катодов и диафрагм) для щелочных электролизеров воды нового поколения, позволяющей снизить энергопотребление российских щелочных электролизеров на 20-25%.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд научно-технических задач:

- разработать диафрагмы используя метод электропрядения, не содержащие асбест, основой которых являются полимерные микро- и нановолокна с гидрофильным наполнителем;
- установить влияние параметров процесса электропрядения на формируемые микро- и нановолокна;
- разработать новые электроды для катодного выделения водорода и анодного выделения кислорода, обладающие низкой поляризацией, высокой каталитической активностью, простотой изготовления;

- провести испытания разработанной элементной базы в лабораторной ячейке.

Научная новизна работы:

1. Разработана лабораторная ячейка (прототип) щелочного электролизера с использованием новой элементной базы.

2. Установлено влияние параметров процесса электропрядения на морфологию формируемых микро- и нановолокон. Проведены экспериментальные исследования, посвященные определению влияния характеристик процесса электропрядения и химического состава диафрагмы на ее свойства (электрохимические и физико-химические). Установлено, что на полимерное волокно оказывают влияние следующие факторы: напряжение высоковольтного источника, скорость подачи полимера, расстояние от электрода до коллектора, состав полимерного раствора, молекулярная масса полимера.

3. Разработана новая полимерная композитная диафрагма для щелочных генераторов водорода, методом электропрядения. Основными компонентами диафрагмы являются полимерные микро- и нановолокна с гидрофильным наполнителем - диоксидом титана.

4. Разработаны новые электроды катодного выделения водорода и анодного выделения кислорода. Получены экспериментальные данные о влиянии состава катализатора на активность электродов. Экспериментально получены поляризационные кривые новых электродов щелочных электролизеров.

На защиту выносятся:

1. Описание процесса формирования полимерных композитных щелочестойких диафрагм полученных методом электропрядения. Основой диафрагмы являются полимерные микро- и нановолокна полисульфидсульфона с гидрофильным наполнителем - диоксидом титана. Экспериментальные характеристики диафрагм.

2. Описание процесса формирования микро- и нановолокон методом электропрядения.

3. Описание метода изготовления новых катализаторов для электродных процессов, характеристики их структуры и электрокаталитической активности.

4. Экспериментальные результаты испытаний новой элементной базы (диафрагмы и электродов) в лабораторном образце щелочного электролизера.

Практическая ценность работы.

Разработана принципиально новая технология формирования диафрагм на основе полимерных и композитных микро- и нановолокон для щелочных электролизеров. Сформированные методом электропрядения диафрагмы обладают высокими рабочими характеристиками, способны заменить асбестовые диафрагмы и диафрагмы, синтезируемые методом фазовой инверсии при использовании в современных щелочных электролизерах.

Разработаны новые каталитические покрытия электродов (анодов и катодов). Данные покрытия отличаются простотой формирования, обладают низкими значениями поляризации.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на: III Международном симпозиуме по водородной энергетике (Москва 2009); 16, 18 и 19 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика» (Москва 2010, 2012, 2013); конференции XIX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии (Волгоград 2011); всероссийской молодежной научно-технической конференции «Энергосбережение в секторе исследований и разработок: существующий потенциал и перспективы развития» (Москва 2012).

Результаты диссертационной работы использованы в НИР по гранту РФФИ 12-08-00375 а, в ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» ГК № 16.552.11.7078 от «11» июля 2012 г.

Достоверность и обоснованность результатов определяется их многократной повторяемостью, использованием высокоточных приборов.

Публикации. Результаты работы представлены в 10 публикациях, в том числе в 3 статьях журнала из перечня ВАК.

Личный вклад. Все основные экспериментальные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы. Материал диссертации изложен на 174 страницах, содержит 55 рисунков и 25 таблиц. Список использованной литературы состоит из 121 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертации, в котором приведен анализ современного состояния разработок посвященных созданию элементной базы щелочных электролизеров. Продемонстрировано, что наиболее перспективными для использования в щелочных электролизерах являются полимерные диафрагмы на основе полисульфидсульфона с гидрофильным наполнителем - диоксидом титана, сформированные методом электропрядения. Описаны наиболее активные каталитические покрытия электродов (катодов и анодов) для щелочных электролизеров. На основании анализа полученной информации из отечественной и зарубежной литературы были сформулированы задачи дальнейшего исследования.

Во **второй главе** описаны основные методики экспериментов, которые были проведены в ходе выполнения работы, используемые реактивы и экспериментальное оборудование, в том числе стенды и установки. Исследования проводились на оборудовании ЦКП “Водородная энергетика и электрохимические технологии”.

Структуру электродов исследовали методом эталонной контактной порометрии на установке Porotech 3.1 (Канада) и на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6380(Япония), состав исследовали методом энергодисперсионной спектрометрии на установке EX-54165 JMN (Япония). Активность электродов была исследована методом вольтамперометрии на потенциостате Solartron 2273 (Англия).

Изучение структуры полимерных диафрагм производили методом эталонной контактной порометрии на установке Porotech 3.1 (Канада), электропроводность и газопроницаемость сформированных диафрагм исследовалась на описанных в разделе стендах.

В третьей главе приведено описание экспериментальной установки, позволяющей формировать полимерное нановолокно методом электропрядения. Даны основные характеристики данной установки и принцип работы.

Четвертая глава посвящена описанию способов формирования полимерных диафрагм методом электропрядения и каталитических покрытий электродов.

В ходе выполнения диссертационной работы была разработана принципиально новая технология формирования диафрагм на основе полимерных и композитных микро- и нановолокон для щелочных электролизеров методом электропрядения. Основными проблемами, которые возникают в процессе формирования микро- и нановолокон, а также материалов на их основе являются: морфологическая неоднородность волокон, выражающаяся в неравномерной толщине и/или образовании локальных утолщений значительного диаметра, т.н. «бисерный эффект»; отсутствие волокна (разбрызгивание капель); постоянные разрывы волокон; слипание влажного волокна на коллекторе. Следствием указанных дефектов являются недостаточная газоплотность и/или механическая прочность, низкая удельная электропроводность диафрагменных материалов. Разработка метода формирования бездефектных микро- и нановолокон с контролируемой морфологией и составом представляет собой достаточно сложную задачу с

большим числом варьируемых и взаимосвязанных параметров, таких как природа полимера, состав растворителя, концентрация полимера, напряжение процесса электропрядения, расстояние между капилляром и коллектором, скорость подачи раствора полимера, температура и т.д. Были проведены серии экспериментов позволяющие установить влияние перечисленных параметров на процесс формирования полимерных микро- и нановолокон (рис. 1 - 4). Полученные данные были использованы для формирования диафрагменного материала.

В целях увеличения смачиваемости и повышения удельной электропроводности диафрагменного материала, существует возможность формирования композитных волокон. Основой диафрагмы является полимерное волокно (в качестве полимера был использован полисульфидсульфон) его модифицирование проводили тремя способами:

1. Формирование волокон из суспензии диоксида титана в растворе полимера;
2. Формирование волокна из раствора прекурсора диоксида титана в растворе полимера;
3. Формирование коаксиального волокна.

Формирование волокон из суспензии диоксида титана осуществлялось следующим образом. В отдельных объемах готовили суспензию диоксида титана (прекурсора диоксида титана) и раствор полимера. Полученные препараты смешивали и проводили формирование волокон методом электропрядения. Формирование коаксиального волокна производили с помощью разработанного коаксиального капилляра, позволяющего вести процесс формирования композитных волокон на армирующем слое, улучшающем механические характеристики диафрагмы. По окончании процесса, полученные материалы гидролизуют и сушат.

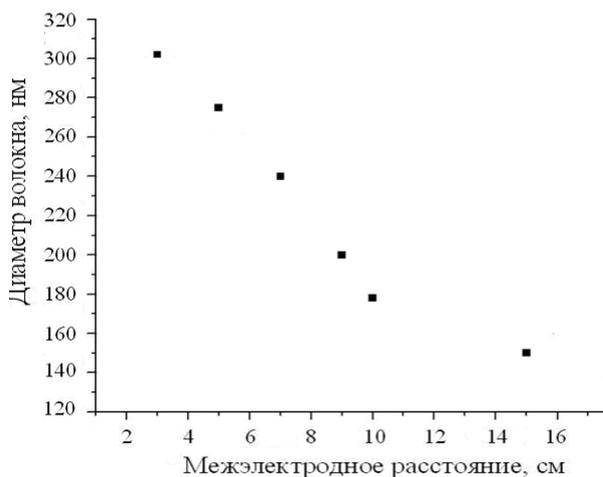


Рисунок 1 - График зависимости диаметра волокон от межэлектродного расстояния при следующем составе полимерного раствора и характеристиках процесса: ПСФ = 2 г., ТГФ = 4 г., ДМА = 8 г., напряжение = 25 кВ, T = 45 °C

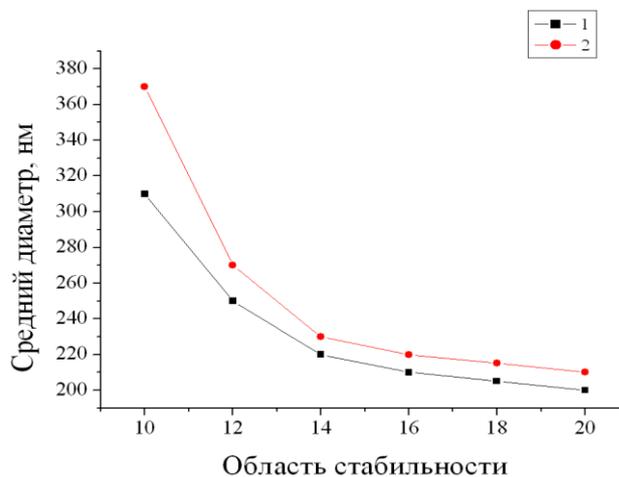


Рисунок 2 - Зависимость диаметра волокон от напряжения. Межэлектродное расстояние 15 см. 1- концентрация 15 масс.%, 2 – концентрация 20 масс.%

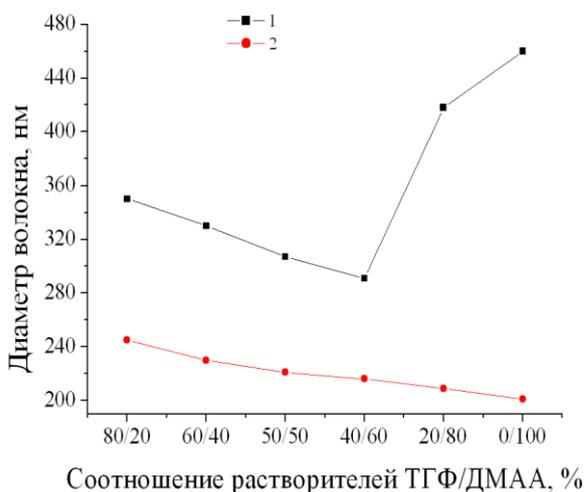


Рисунок 3 - Зависимость толщины полимерного волокна от соотношения растворителей: 1 - максимальный диаметр, 2 - минимальный

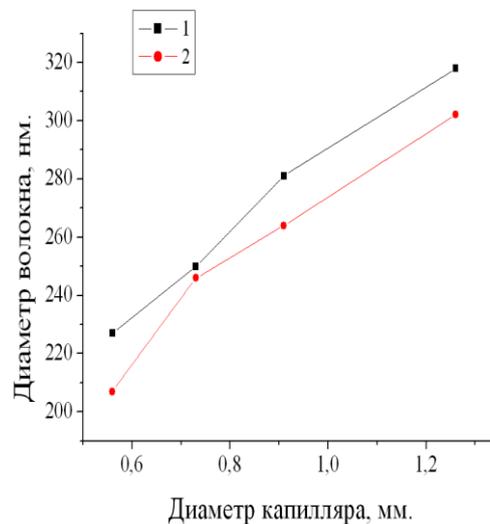


Рисунок 4 - График зависимости диаметра волокон от диаметра капилляра: 1 - ПСФС (ММ =37.500); 2 - ПСФС (ММ =140.000)

Для создания никелевого каталитического покрытия применяли метод электролитического осаждения никелевого порошка *in situ*. Основные стадии формирования никелевого каталитического покрытия:

- обезжиривание и травление подложки электрода;
- приготовление электролитического раствора;
- нанесение покрытия.

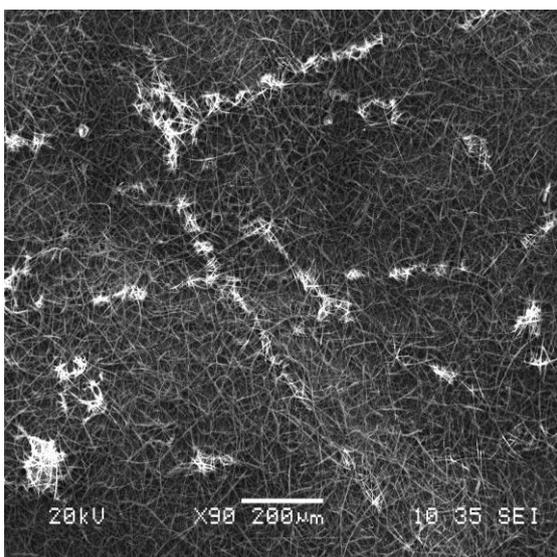
Для формирования покрытия подложки выдерживали в растворе 10 - 15 минут в отсутствии тока, после подводили электрический ток (анодами служили никелевые пластины расположенные параллельно сетке) и медленно добавляли водный раствор боргидрида натрия к поверхности никелевой подложки по каплям, через специальный капилляр. Процесс проводили при плотности тока до 3 А/дм^2 при интенсивном перемешивании (перемешивание необходимо для равномерного распределения частиц восстановленного никеля по всему объему ванны). Перемешивание раствора обеспечивалось благодаря помещению емкости с электролитом в ультразвуковую ванну. На последнем этапе формирования покрытия, электрод с покрытием отмывали деионизованной водой, помещали в сушильный шкаф для осушки и далее либо производили их исследования (физико-химические или электрохимические), либо подвергали их модифицированию соответствующими катализаторами катодных и анодных процессов.

Разработанное покрытие обладает высокой каталитической активностью и открывает широкие возможности для дальнейшего модифицирования соответствующими катализаторами катодных и анодных процессов.

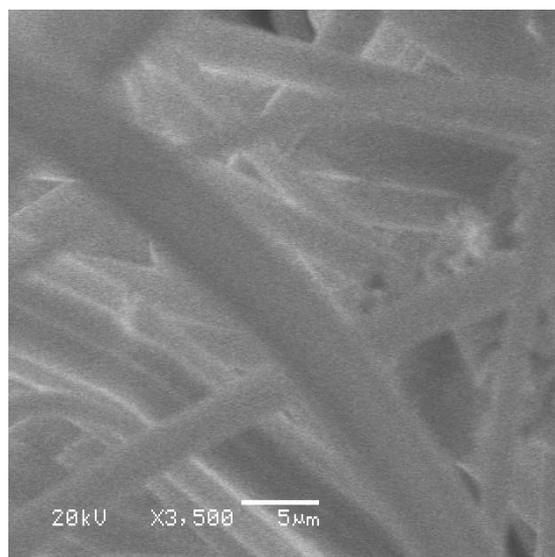
Были предложены модификации покрытия системой типа шпинель и системой типа NiP_x . Никель-кобальтовую шпинель наносили на поверхность электрода термическим разложением спиртовой смеси нитратов.

Пятая глава посвящена исследованию полимерных диафрагм и электродов для щелочных электролизеров.

Диафрагмы были сформированы методом электропрядения, позволяющим в широких пределах варьировать свойства диафрагм (рис.5).



а



б

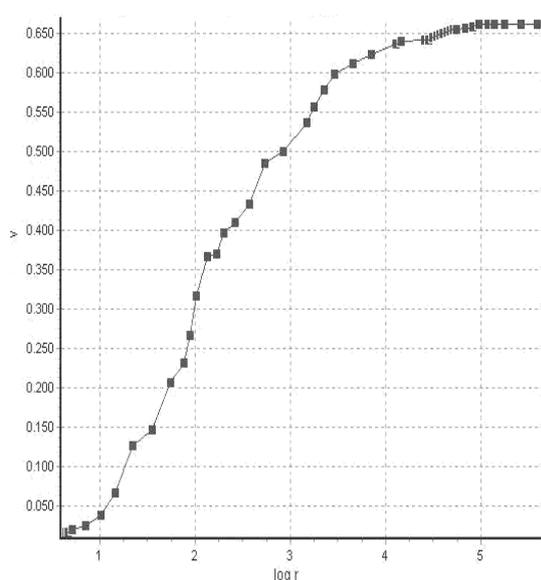
Рисунок 5 - Микрофотография армирующего слоя (а) и (б) диафрагмы сформированной электропрядением, увеличение: а - x90; б - x3500

Выбор условий формирования диафрагмы и содержания гидрофильного наполнителя производился, основываясь на результатах исследования процесса формирования микро- и нановолокон.

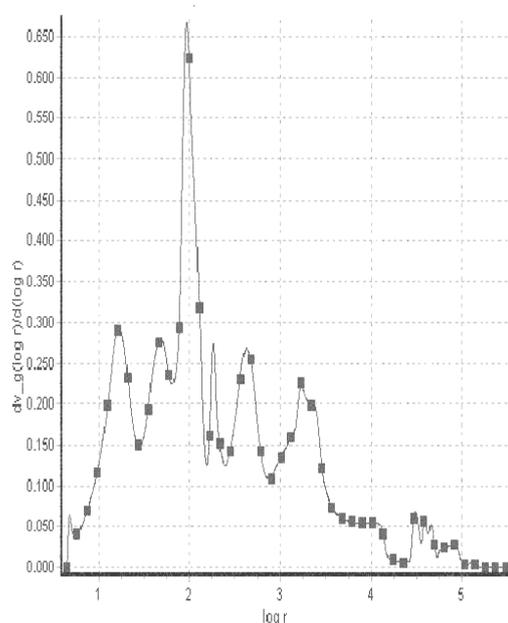
На рис. 6 приведена интегральная и дифференциальная кривая распределения пор композитной полисульфидсульфоновой диафрагмы с гидрофильным наполнителем диоксидом титана. Из анализа кривой можно сделать вывод о том, что при синтезе диафрагм электропрядением происходит развитие пористости за счет пор среднего радиуса. Интегральное распределение пор по радиусам принимает вид восходящей кривой, свидетельствующей о достаточно равномерном распределении пор во всем диапазоне радиусов от малых до больших. Диафрагмы указанного способа формирования и элементного состава имеют более высокую пористость и равномерность распределения пор по радиусам, по сравнению с асбестовой диафрагмой, причем дальнейшие исследования электропроводности и работы диафрагм в электролитической ячейке подтверждают полученные результаты.

Таблица 1 - Электропроводность диафрагм (удельная, раствор 6М КОН)

Материал диафрагмы	Удельная электропроводность в 6М растворе КОН, $\sigma \cdot 10 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	
	T = 18 °C	T = 80 °C
6М щелочной раствор КОН	5,65	13,7
Асбестовая диафрагма	0,68	2,69
Полисульфидсульфон+TiO ₂ (электропрядение)	0,75	2,97
Полисульфон+TiO ₂ (фазовая инверсия)	0,72	2,92



а



б

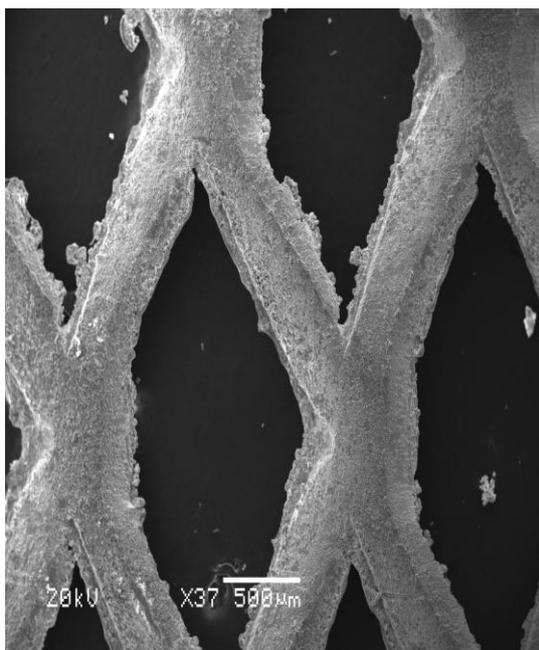
Рисунок б - Кривые распределения пор полимерной диафрагмы следующего состава: полисульфидсульфон 20 масс. %, TiO₂·nH₂O 10 масс. %: а - интегральная кривая распределения пор, б - дифференциальная кривая распределения пор

Основываясь на результатах электропроводности исследуемых диафрагм (табл. 1), можно сделать следующий вывод: полимерная диафрагма, сформированная методом электропрядения, обладает значением удельной

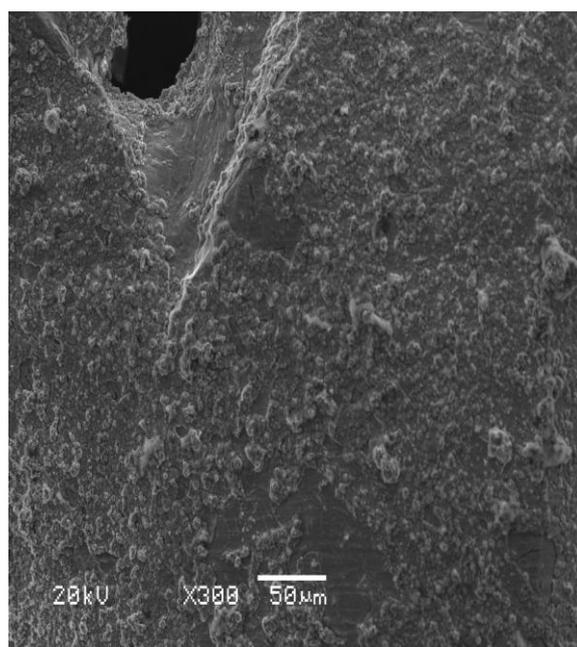
электропроводности не ниже чем у асбестовых диафрагм и диафрагм, полученных методом фазовой инверсии.

На первом этапе исследований **электродов** производили изучение поверхности каталитического покрытия методом эталонно-контактной порометрии и растровой электронной микроскопии. На рис. 7 приведены микрофотографии никелевых электродов с каталитическим покрытием.

На рис. 8 представлены интегральная и дифференциальная порограммы Ni катализатора, нанесенного на никелевую сетку. Как видно из рис. 8 покрытие характеризуется большим количеством пор лежащих в нано и макро диапазоне. Данное распределение пор свидетельствует о наличии бипористой структуры покрытия, чем частично можно объяснить высокую эффективность данного электрода в процессе выделения водорода. Наличие большого количества пор наноразмера объясняет высокое значение площади поверхности образца.



а



б

Рисунок 7 - Микрофотографии электродов с каталитическим покрытием: Напряжение ускоряющих электронов - 20 кВ. Увеличение: а - х37; б - х300

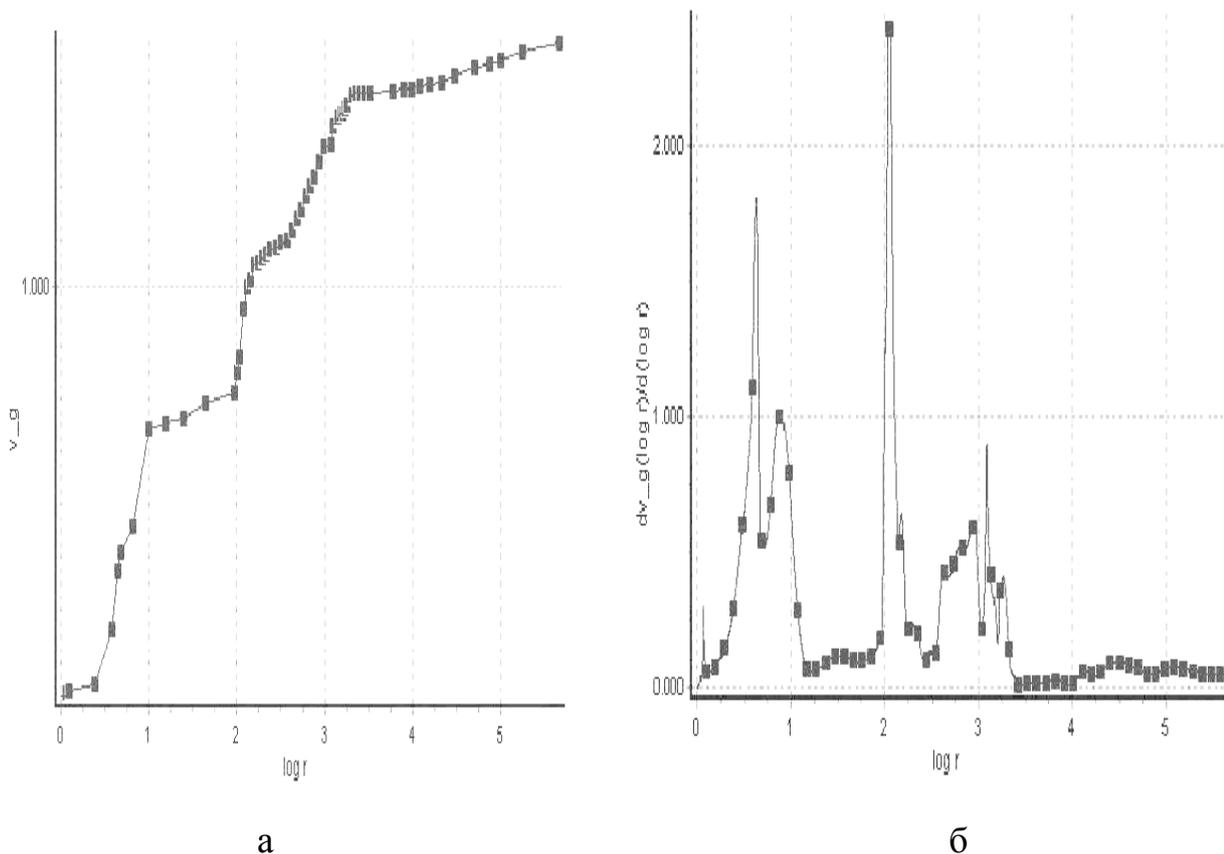


Рисунок 8 - Интегральная (а) и дифференциальная (б) порограммы распределение пор никелевого покрытия

Электрохимическую активность никелевого покрытия оценивали по стационарным поляризационным кривым (рис. 9), полученным на основе гальваностатических зависимостей до установления постоянного потенциала с помощью потенциостата Solartron 2273 в трехэлектродной ячейке.

Как видно из рис. 9, перенапряжение выделения водорода на сформированном покрытии меньше на 260 - 280 мВ, чем на никелевой сетке при идентичных плотностях тока и температуре. Увеличение температуры процесса с 20°С до 80°С приводит к снижению перенапряжения еще на 60 – 74 мВ. Тафелевский наклон составляет порядка 38 мВ.

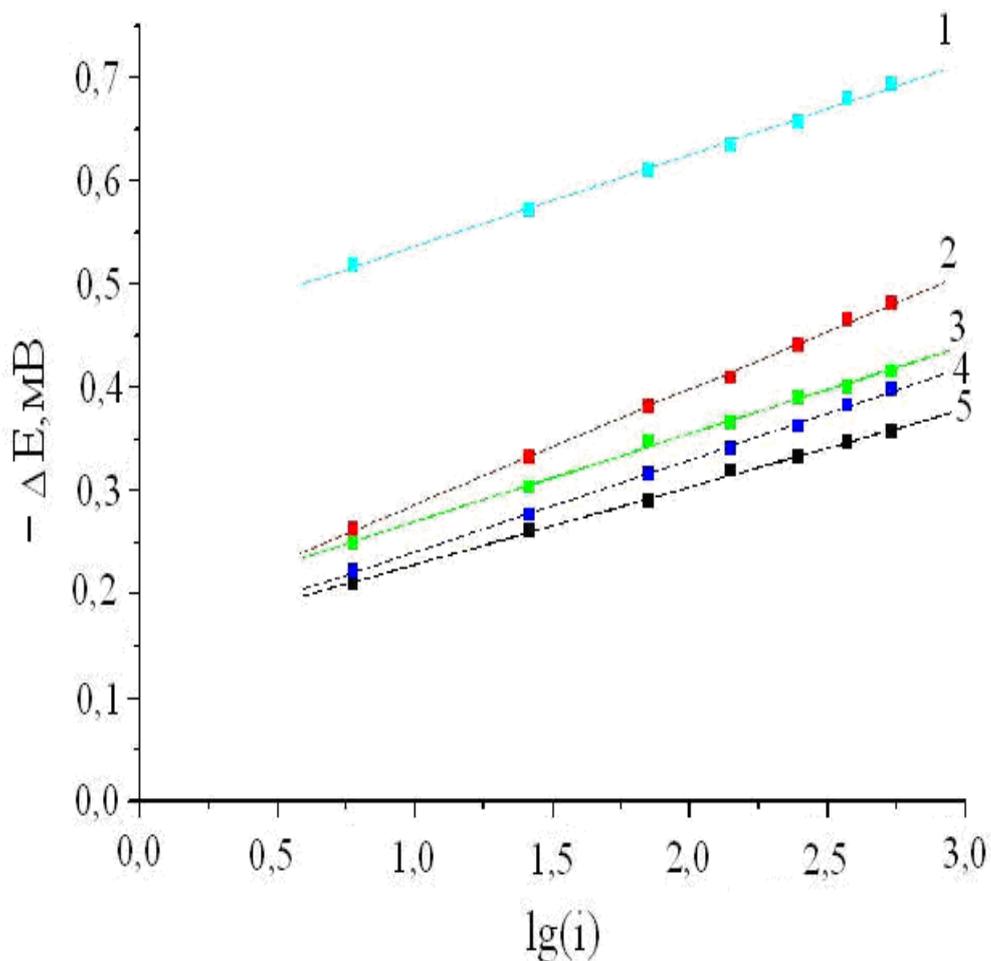
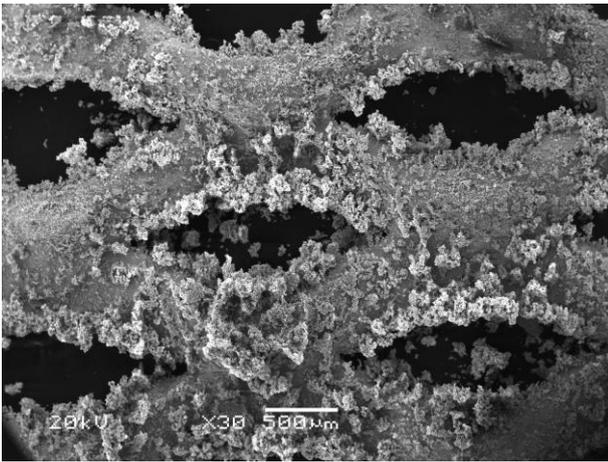
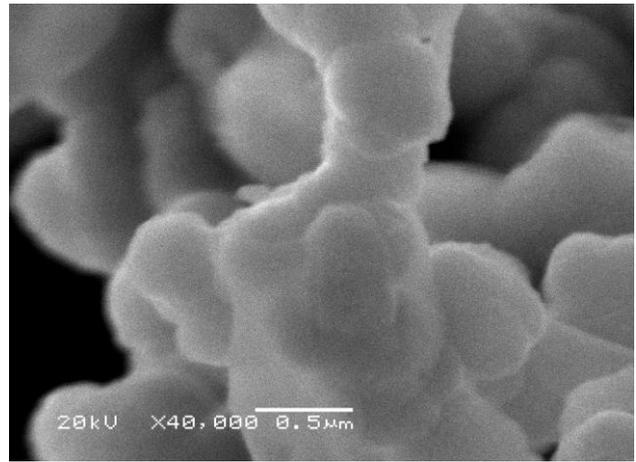


Рисунок 9 - Поляризационные кривые выделения водорода для различных типов катодных катализаторов: 1 - никелевая сетка (20°C), 2 - электрод с пористым никелевым покрытием (20°C), 3 - сетка с композиционным каталитическим никелевым покрытием (20°C), 4 - электрод с пористым никелевым покрытием (80°C), 5 - сетка с композиционным каталитическим никелевым покрытием (80°C)

Хотя композиционное никелевое покрытие обладает достаточно высокой активностью в катодной зоне, было предложено модифицировать его системой типа NiP_x . Исследование характеристик электрода модифицированного системой типа NiP_x производили аналогично исследованиям электродов с нанесенным каталитическим никелевым покрытием.



а



б

Рисунок 10 - Микрофотографии электродов с Ni каталитическим покрытием модифицированном системой типа NiP_x : Напряжение ускоряющих электронов - 20 кВ. Увеличение: а - x30; б - x40000

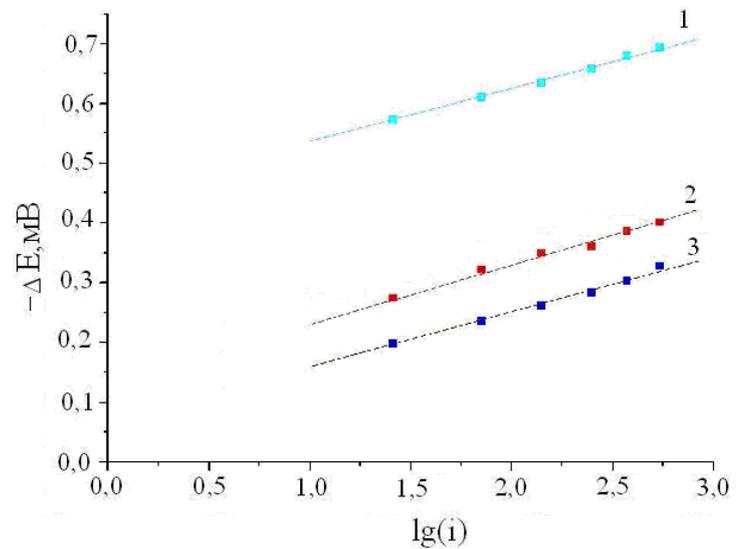
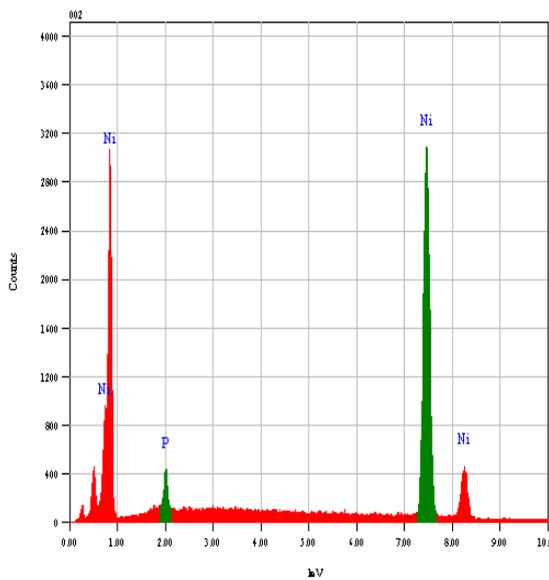


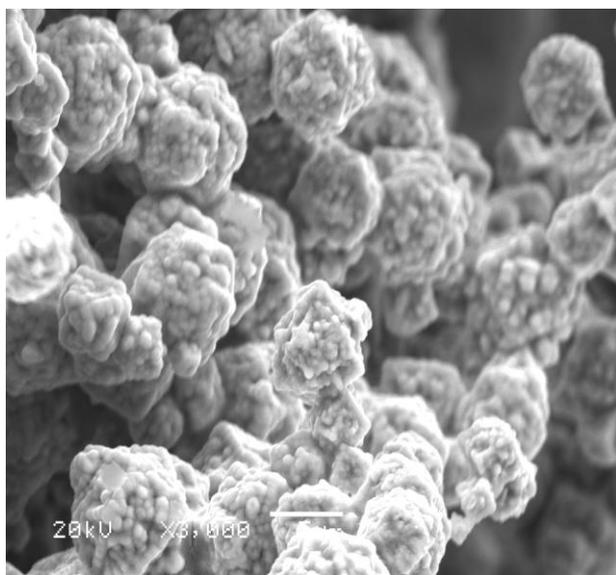
Рисунок 11 - Результаты ЭДС исследования Ni каталитического покрытия модифицированного системой типа NiP_x

Рисунок 12 - Поляризационные кривые выделения водорода для различных катодных катализаторов: 1 - никелевая сетка, 2 и 3 - сетка с каталитическим никелевым покрытием, модифицированным системой NiP_x при температуре 20 и 80°C

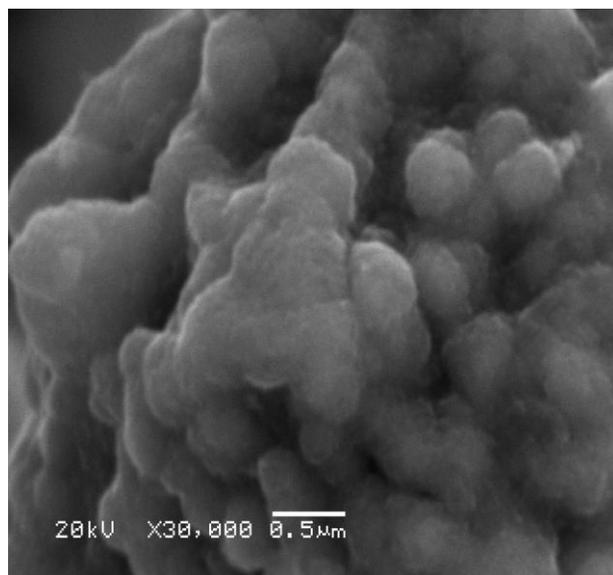
Из рис. 12 следует, что модификация никелевого покрытия системой NiP_x приводит к снижению катодной поляризации на 40 - 60 мВ. Наклон тафелевской кривой равен 45 мВ. При повышении температуры процесса с 20 до 80 °С величина перенапряжения падает еще на 45 мВ.

Никель-кобальтовую шпинель (рис.13) наносили на поверхность электрода термическим разложением спиртовой смеси нитратов. Из сопоставления поляризационных кривых, приведенных на рис. 14, следует, что пористое покрытие обладает собственной каталитической активностью в анодной области, позволяя снизить перенапряжение выделения кислорода. Дополнительное модифицирование шпинелью снижает перенапряжение на 310 – 350 мВ при плотности тока 250 мА/см².

Как следует из рис. 15, применение новых модифицированных никелевых электродов с каталитическими покрытиями позволяет снизить напряжение при рабочих плотностях тока на 570 - 590 мВ, а использование новой полимерной диафрагмы, сформированной методом электропрядения позволяет снизить напряжение дополнительно на 50 - 60 мВ, при рабочих плотностях тока.



а



б

Рисунок 13 - Микрофотографии электродов с каталитическим покрытием модифицированном системой типа шпинели: Напряжение ускоряющих электронов - 20 кВ. Увеличение: а - х3000, б - х30000

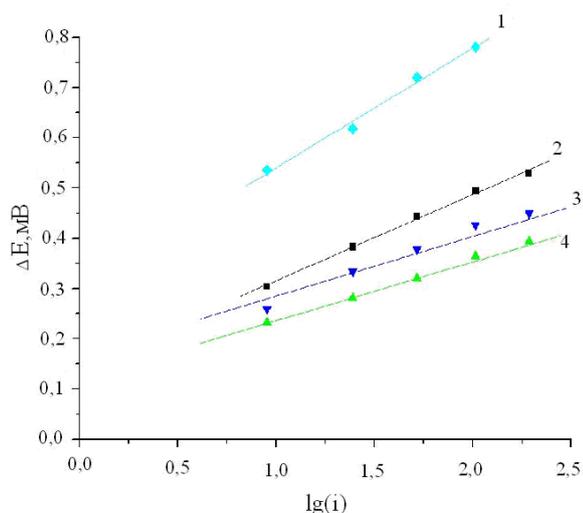


Рисунок 14 - Поляризационные кривые катализаторов анодного выделения кислорода в 6 М КОН на электродах:

- 1 – гладкая никелевая фольга (20 °С);
 2 – никелевая сетка с нанесенным каталитическим никелевым покрытием (20°С); 3 - никелевая сетка с нанесенным каталитическим никелевым покрытием модифицированная шпинелью (20 °С);
 4 - никелевая сетка с нанесенным каталитическим никелевым покрытием модифицированная шпинелью (80 °С)

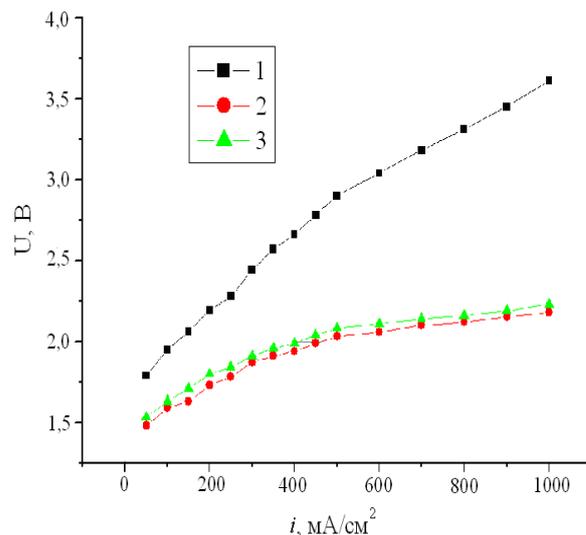
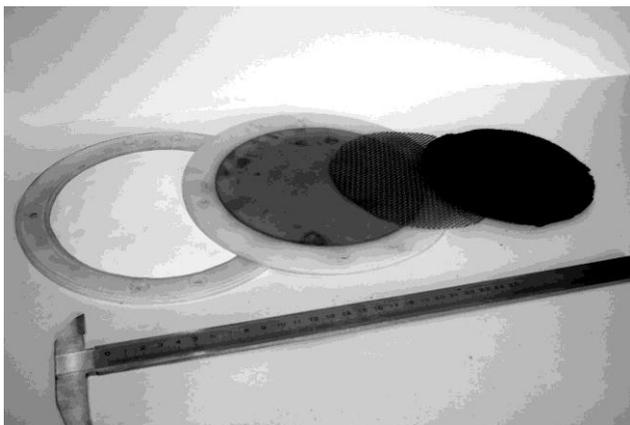


Рисунок 15 - ВАХ ячейки щелочного генератора водорода:

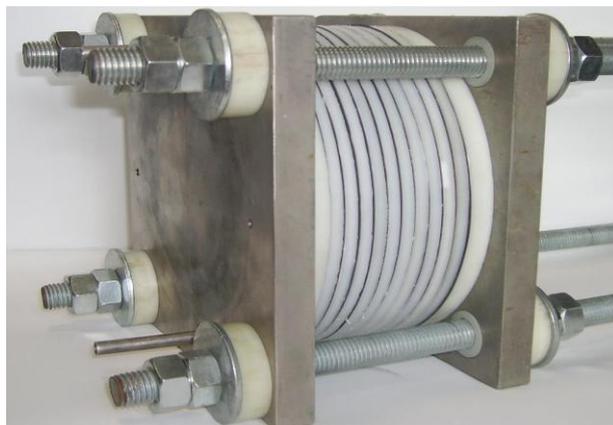
- 1 - диафрагма из асбеста, стальные электроды покрытые гладким Ni; 2 - диафрагма из полисульфидсульфона с TiO₂ синтезированной электропрядением, новое Ni композиционное каталитическое покрытие модифицированные NiP_x на катоде и шпинелью на аноде; 3 - диафрагма из полисульфидсульфона с TiO₂ синтезированной фазовой инверсией, новое Ni композиционное каталитическое покрытие модифицированные NiP_x на катоде и шпинелью на аноде

В **шестой главе** приведены результаты разработки и исследования лабораторной модели щелочного электролизера. Приведены описания разработанного ряда новых оригинальных конструкционных элементов, которые позволяют

значительно снизить толщину и массогабаритные характеристики батареи щелочного электролизера при сохранении прежней производительности.



а



б

Рисунок 16 - Лабораторная модель батареи щелочного электролизера: а - новая элементная база: диафрагменная и биполярная рамы с диафрагмой и биполярной пластиной, электрод, сетка газоотводящая; б - батарея щелочного электролизера

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны образцы композитных пористых полимерных диафрагм методом электропрядения. Основой диафрагмы являются полисульфидсульфоновые (ММ 140.000) волокна диаметром от 200 нм, содержащие гидрофильный наполнитель TiO_2 . В результате проведенных исследований было установлено, что полученные диафрагмы обладают высокой удельной электропроводностью, высокой пористостью, химической и физической устойчивостью.

2. Установлено влияние параметров процесса электропрядения на физико-химические свойства композитных диафрагм. Показано, что основными факторами, влияющими на структуру и морфологию полимерного волокна, а также физико-химические свойства диафрагмы являются природа полимера, свойства растворителя, концентрация полимера, напряжение, диаметр капилляра и межэлектродное расстояние. Наилучшие характеристики имеют образцы диафрагм сформированные из полисульфидсульфона ММ = 140.000

при напряжении – 20 кВ, межэлектродном расстоянии – 15 см, концентрации полимера -15 масс.%, растворители ТГФ/ДМАА – 40/60%.

3. Показано, что использование диафрагм полученных методом электропрядения и новых электродов снижает напряжение на ячейке на 650 – 670 мВ по сравнению асбестовыми диафрагмами и электродами из гладкого никеля. Использование диафрагм полученных методом электропрядения снижает напряжение на ячейке на 40 – 50 мВ по сравнению с диафрагмами полученными методом фазовой инверсии (при рабочих плотностях тока 0,25-0,3 А/см²).

4. Разработаны новые никелевые каталитические покрытия электродов щелочных электролизеров. Данное покрытие позволяет снизить перенапряжение на катоде на 260 - 280 мВ. Дополнительная модификация покрытия системой NiP_x позволяет снизить перенапряжение выделения водорода на 40 - 60 мВ. Нанесенное никелевое покрытие позволяет упростить в технологическом плане процесс формирования катализаторов анодного выделения кислорода со структурой типа шпинели. Установлено, что модифицирование электродов покрытием типа шпинели позволяет снизить перенапряжение выделения кислорода на 310 - 350 мВ при плотности тока 0,25-0,3 А/см².

5. Замена элементной базы на новую позволила снизить энергопотребление электролизной батареи на 20-25% и улучшить ее массогабаритные характеристики.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- 1. Кулешов Н.В., Кулешов В.Н., Бахин А.Н., Ибрагимова А., Славнов Ю.А. “Разработка новой элементной базы для щелочных электролизеров воды” // Естественные и технические науки. - М. - 2011 г. - № 6. - С. 75-79.**
- 2. Кулешов Н.В., Коровин Н.В., Удрис Е.Я., Кулешов В.Н., Бахин А.Н. “Разработка новых электрокатализаторов для низкотемпературного электролиза воды” //Электрохимическая энергетика. - 2012. - Т.12. - №2.**

-С. 51-58.

3. Кулешов Н.В., Кулешов В.Н., Бахин А.Н., Довбыш С.А. “ Разработка новых диафрагменных материалов для низкотемпературного электролиза воды” // Научные технологии. - М. - 2012 г. - С. 39 - 48.

4. Бахин А.Н., Кулешов В.Н., Карев С.А., Борновалов С.А. “ Новые диафрагменные материалы для низкотемпературного электролиза воды ” // 19 международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”. -М.: МЭИ, - 2013 г. - С. 205.

5. Бахин А.Н., Довбыш С.А. , Кулешов В.Н. “Разработка нетканых наноматериалов для щелочных электролизеров нового поколения” // XIX Менделеевский съезд. - Волгоград. - 2011. - Т.4. - С. 121.

6. Бахин А.Н., Кулешов В.Н., Кулешов Н.В. “ Разработка нановолокон и материалов на их основе для электрохимических устройств нового поколения ” // 16 международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”. - М.: МЭИ, - 2010 г. - С. 197.

7. Кулешов Н.В., Кулешов В.Н., Удрис Е.Я., Бахин А.Н. “Разработка и исследование элементной базы нового поколения для щелочных электролизеров воды”// Труды III Международного симпозиума по водородной энергетике. - М.:МЭИ, 2009 г. - С. 118-122.

8. Бахин А.Н., Кулешов В.Н., Кулешов Н.В. “ Наноструктурные материалы для низкотемпературных электрохимических устройств”//18 международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”. - М.:МЭИ, - 2012 г. - С. 336.

9. Кулешов В.Н., Бахин А.Н., Довбыш С.А. “Энергоэффективные водородные технологии”// Энергосбережение теория и практика. - М.:МЭИ, 2012 г. - С. 190 - 193.

10. Бахин А.Н., Кулешов В.Н., Кулешов Н.В., Довбыш С.А. “Разработка полимерных диафрагм для щелочных электролизеров воды”// Труды 8 Международной конференции “Фундаментальные проблемы электрохимической энергетике”. - 2011. - С. 50-52.