

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2024, Том 7, № 4 / 2024, Vol. 7, Iss. 4 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.03

DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-25-36

Исследование химических источников тока на автоматизированной электронной нагрузке с контролируемыми параметрами

¹ Лебедева М.В. *,

¹ Головачева В.А.,

¹ Копылова Н.А.,

¹ Дулина О.А.,

¹ Бакеева И.В.,

¹ Яштулов Н.А.,

¹ МИРЭА – Российский технологический университет,

* Ответственный автор E-mail: lebedevamv2030@yandex.ru

Аннотация: гибридные установки преобразования энергии топлива в электроэнергию являются перспективным способом обеспечения человечества доступными энергоресурсами. Однако вопрос получения реагентов (водорода и кислорода) высокой степени чистоты остается одним из наиболее актуальных. В данной работе были исследованы энергетические характеристики водородно-кислородного топливного элемента в сочетании с электролизером воды. Были сформированы мембранно-электродные блоки, состоящие из модифицированной мембраны на основе политетрафторэтилена с платина-содержащим компонентом (Pt(30%)/C), а также анода и катода, изготовленных из углеродной ткани и пористого никеля, легированных техническим углеродом и графеном. Структурные характеристики материала были изучены с помощью метода растровой электронной микроскопии. Исследование энергетических характеристик водородно-кислородных мембранно-электродных блоков впервые проводилось на автоматизированной электронной нагрузке АКИП-1375/1Е со встроенным программным обеспечением. В разработанном водородно-кислородном топливном элементе в качестве твердого полимерного электролита вместо мембраны Nafion была использована более доступная коммерческая мембрана на основе политетрафторэтилена, что значительно снизило стоимость разработки МЭБ. В результате проведенных испытаний было установлено, что максимальную удельную мощность демонстрируют элементы, сконструированные на основе анода и катода из пористого никеля, модифицированного графеном.

Ключевые слова: нанокompозитные электроды, пористый никель, реакция окисления водорода, электронная нагрузка, вольтамперные характеристики

Для цитирования: Лебедева М.В., Головачева В.А., Копылова Н.А., Дулина О.А., Бакеева И.В., Яштулов Н.А. Исследование химических источников тока на автоматизированной электронной нагрузке с контролируемыми параметрами // Chemical Bulletin. 2024. Том 7. № 4. С. 25 – 36. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-25-36

Поступила в редакцию: 5 июня 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 15 августа 2024 г.; Принята к публикации: 24 сентября 2024 г.

Investigation of chemical power sources on an automated electronic load with controlled parameters

¹ *Lebedeva M.V. **,

¹ *Golovacheva V.A.,*

¹ *Kopylova N.A.,*

¹ *Dulina O.A.,*

¹ *Bakeeva I.V.,*

¹ *Yashtulov N.A.,*

¹ *MIREA – Russian Technological University,*

* Corresponding author E-mail: lebedevamv2030@yandex.ru

Abstract: hybrid installations for converting fuel energy into electricity are a promising way to provide humanity with affordable energy resources. However, the issue of obtaining reagents (hydrogen and oxygen) with high purity remains one of the most urgent. In this work, the energy characteristics of a hydrogen-oxygen fuel cell in combination with a water electrolyzer were investigated. Membrane-electrode assemblies were formed consisting of a modified membrane based on polytetrafluoroethylene with a platinum-containing component (Pt(30%)/C), as well as an anode and cathode made of carbon fabric and porous nickel doped with technical carbon and graphene. The structural characteristics of the material were studied using the scanning electron microscopy method. For the first time the investigation of hydrogen-oxygen membrane-electrode assemblies energy characteristics was carried out on an automated electronic load AKIP-1375/IE with embedded software. In the developed hydrogen-oxygen fuel cell, a more affordable commercial polytetrafluoroethylene-based membrane was used as a solid polymer electrolyte instead of the Nafion membrane, which significantly reduced the cost of developed MEA. As a result of the tests carried out, it was found that the maximum specific power is demonstrated by elements constructed on the basis of an anode and a cathode made of porous nickel modified with graphene.

Keywords: nanocomposite electrodes, porous nickel, hydrogen oxidation reaction, electronic load, voltage characteristics

For citation: Lebedeva M.V., Golovacheva V.A., Kopylova N.A., Dulina O.A., Bakeeva I.V., Yashtulov N.A. Investigation of chemical power sources on an automated electronic load with controlled parameters. Chemical Bulletin. 2024. 7 (4). P. 25 – 36. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-25-36

The article was submitted: June 5, 2024; Approved after reviewing: August 15, 2024; Accepted for publication: September 24, 2024.

Введение

Водородная энергетика является одним из основных направлений развития устойчивых экологически чистых энергетических систем в мире [1, 2]. Она предполагает широкомасштабное использование топливных элементов (ТЭ), электрический КПД которых составляет более 50% [3]. В то же время возникает вопрос о получении водорода. В настоящее время водород получают в основном из природного газа путем каталитической конверсии с паром. Водород можно извлекать из биогаза или из бытовых отходов. Однако наиболее подходящим с точки зрения чистоты получаемого водорода и экологичности процесса является электролиз воды в специальных установках – электролизерах с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) [4, 5]. Основными преимуществами таких систем являются высокая эффективность и экологическая чистота, высокий ресурс, а также достаточно высокий уровень взрыво-пожаробезопасности. В системах электролиза воды с ТПЭ и ТЭ используются электрокатализаторы на основе металлов платиновой группы [4, 6-11].

Для работы мембранно-электродного блока (МЭБ) топливного элемента с прямым окислением водорода и восстановлением кислорода основной проблемой является получение исходных газообразных реагентов с высокой степенью чистоты. Решение проблемы заключается в разработке гибридных силовых установок, которые включают в

себя электролизер и топливный элемент с ТПЭ. В предыдущих публикациях авторского коллектива водородно-кислородные топливные элементы были исследованы на специализированной установке 850С (Scribner, LLC, США) [7-11]. Основными недостатками такой установки, работающей при комнатной температуре, являются: а) сложность проектирования технологического процесса; б) взрывоопасность (из-за подключения баллонов с газообразным водородом); в) специальная многоуровневая разработка мембранных электродных узлов и большой размер ячейки (10*10 см).

В данной работе данные проблемы были решены путем подключения к системе электролизера воды с ТПЭ, который разлагал дистиллированную воду и подавал в элемент чистый водород и кислород. В данной работе в качестве одной из матриц для функционирования водородно-кислородных топливных элементов был использован коммерческий пористый никель (ПН) с развитой системой пор [4, 9]. Для оценки эффективности различных матриц-носителей также использовалась углеродная ткань (УТ), а в качестве углеродных наполнителей технический углерод (VXCR-72) и графен [8, 12, 13].

Таким образом, цель данной работы состояла в разработке и исследовании мембранно-электродных блоков водородно-кислородных топливных элементов и изучение их вольт- и ватт-амперных характеристик на специализированной

электронной нагрузке с управляемыми параметрами.

Материалы и методы исследований

Для формирования анода и катода (электродов) ТЭ было использовано два типа подложек: углеродная ткань (УТ) CeTech Wos1009 толщиной 0,32 мм (FuelCellStore, США) и пористый никель (ПН) толщиной 0,3 мм (ILS «Metox», РФ). Размер носителя составляет 23*23 мм. Для модификации поверхности электродов были использованы технический углерод VXC72R (Cabot, США) и графеновый порошок (Гр) ("Особо чистые вещества", РФ) чистотой 99,6%. Для разделения анода и катода была использована пленка из политетрафторэтилена (ПТФЭ) толщиной 0,03 мм (PolymerMe, РФ). Катализатор Pt(30%)/C готовили в соответствии со стандартной процедурой, подробно описанной в работе [14], для модификации поверхности ПТФЭ. Перфторированную смолу Nafion® (водная дисперсия, 10 мас. % в H₂O, Sigma Aldrich, США) использовали для приготовления углеродных и каталитических суспензий.

Морфология поверхности нанокompозитов была определена с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan Mira LMU в комплекте с энергодисперсионным рентгеновским детектором Oxford X-MAX 50 (TESCAN, Чехия).

Для получения газообразных водорода и кислорода в работе использовался компактный электролизер с ТПЭ (Horizon, США). Нижняя часть электролизера представляет собой МЭБ: анод и

катод состояли из углеродной ткани (размеры аналогичны МЭБ ТЭ), модифицированной с помощью VXC72R. В качестве ТПЭ использовали анионообменную мембрану Fumasep FAP-PK-130 (Sigma Aldrich, США) с содержанием Pt(30%)/VXC72R.

Впервые вольт-амперные и ватт-амперные испытания, а также исследования разрядных характеристик водородно-кислородных ТЭ были проведены на специализированной электронной нагрузке АКПП-1375/1E (Siglent-AKIP, РФ) со встроенным программным обеспечением EasySDL.

Результаты и обсуждения

Для разработки водородно-кислородных МЭБ ТЭ на начальном этапе были изучены исходные матрицы-носители. На рис. 1 показаны РЭМ исходных матриц-носителей – ПН (рис. 1а) и УТ (рис. 1б), а также матрицы, модифицированные графеном и техническим углеродом. Пористый никель (рис. 1а) представляет собой функциональную металлическую основу с развитой системой пор с широким распределением пор от 50 до 400 мкм. Модифицирование углеродной ткани и пористых никелевых поверхностей техническим углеродом и графеном (рис. 1а) проводилось в соответствии с описанной выше процедурой. При пропитке матриц техническим углеродом (рис. 1б) на поверхности образуется слой сферических и эллипсоидальных углеродных частиц размером от 30 до 100 мкм.

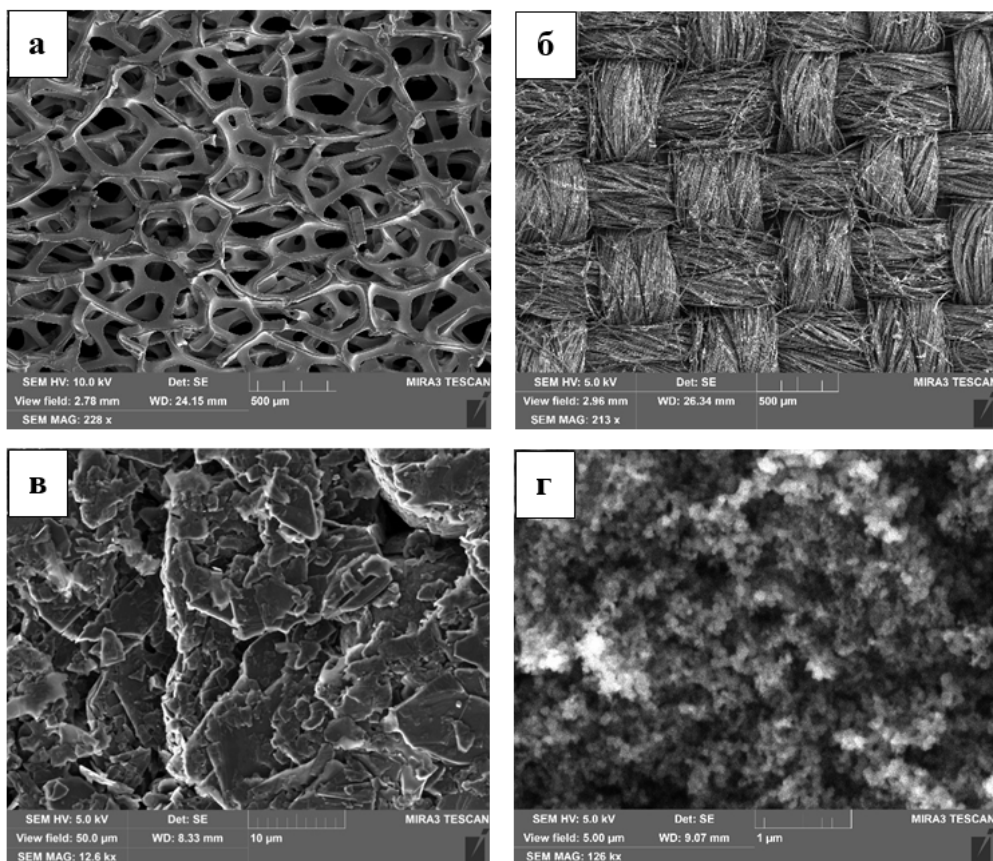


Рис. 1. Пористый никель (а), углеродная ткань (б), никель, модифицированный графеном (в), углеродная ткань, модифицированная сажей VXC72R (г).

Fig. 1. Porous nickel (a), carbon fabric (b), nickel modified with graphene (c), carbon fabric modified with VXC72R carbon black (d).

Для конструирования МЭБ ТЭ матрицы на основе ПН и УТ помещаются в биполярные металлические пластины таким образом, чтобы сторона с нанесенным функциональным слоем была обращена внутрь МЭБ (рис. 2). Анодная и катодная

части разделены мембраной из ПТФЭ, на обе стороны которой нанесен слой углерода с частицами платины для контакта как с анодным, так и с катодным материалами.

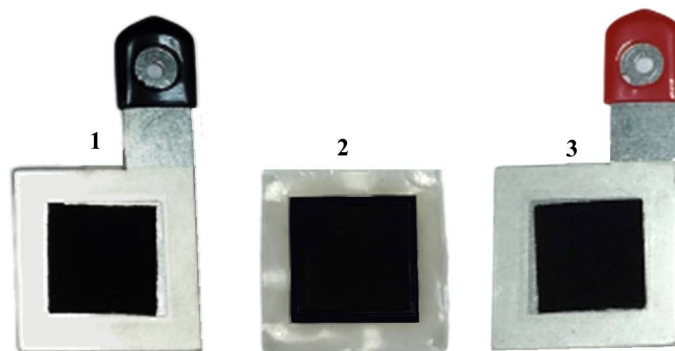


Рис. 2. Компоненты МЭБ ТЭ: 1 – анод, 2 – мембрана с Pt/C, 3 – катод.

Fig. 2. Components of the MEA FC: 1 – anode, 2 – membrane with Pt/C, 3 – cathode.

Для исследований ВАХ МЭБ ТЭ было разработано 4 варианта моделей макетов:

Модель №1: анод и катод из пористого никеля, модифицированного сажей VXC72R;

Модель №2: анод и катод из пористого никеля, модифицированного суспензией графена;

Модель №3: анод и катод из углеродной ткани, модифицированной сажей VXC72R;

Модель №4: анод и катод из углеродной ткани, модифицированной суспензией графена.

Общая схема гибридной установки для получения энергетических характеристик ТЭ включала источник питания, электролизер, собранный макет МЭБ и электронную нагрузку. Работа установки

заключалась в следующем: 1) к электролизеру подавалось напряжение 2,5 В с помощью лабораторного импульсного источника питания; 2) клеммы электролизера подсоединялись ко входам МЭБ с помощью силиконовых трубок; 3) с помощью проводов к МЭБ подключалась электронная нагрузка, а экспериментальные данные записывались в программу.

Исследования проводились в режиме постоянного сопротивления (CR) с изменением приложенного сопротивления от 9000 Ом (ток разомкнутой цепи) до 0,3 Ом. На рис. 3 представлено окно программы и вид полученных экспериментальных зависимостей во времени.

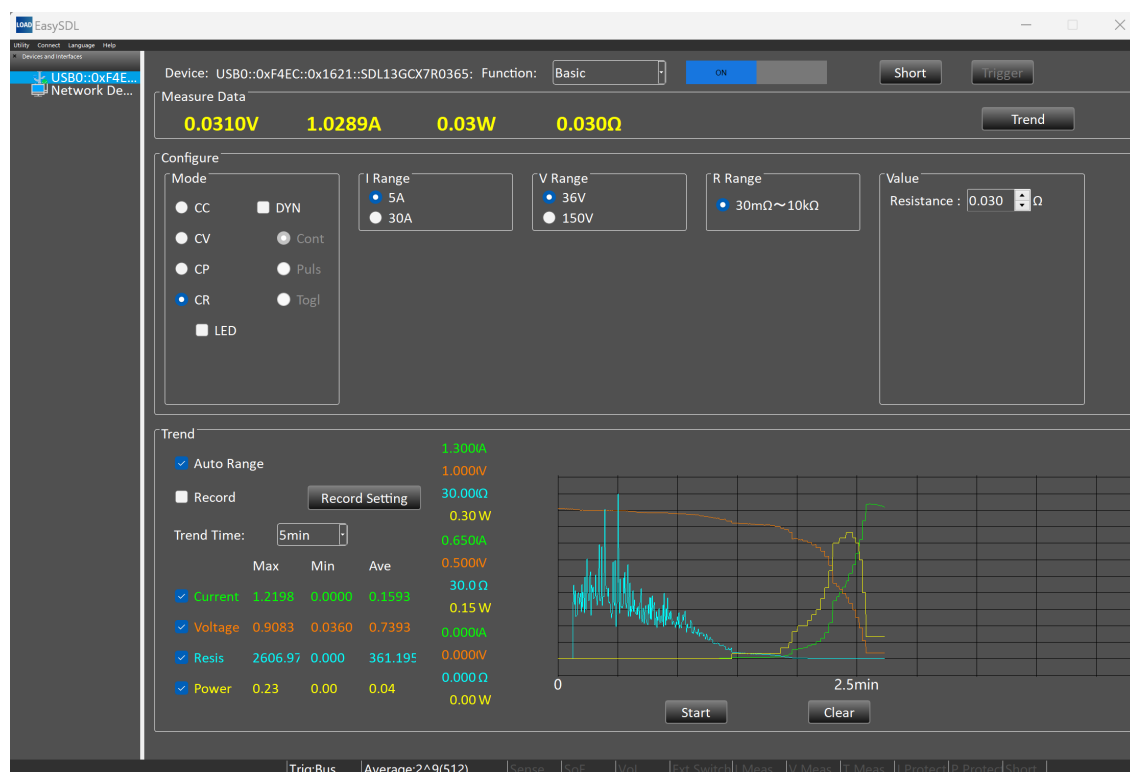


Рис. 3. Окно программы после измерений.

Fig. 3. Program window after measurements.

Полученные данные были обработаны в программе Microsoft Excel и в результате построены ВАХ макетов МЭБ (рис. 4). Программное

обеспечение прибора позволяет фиксировать значения времени, силы тока, напряжения, сопротивления и мощности ячейки.

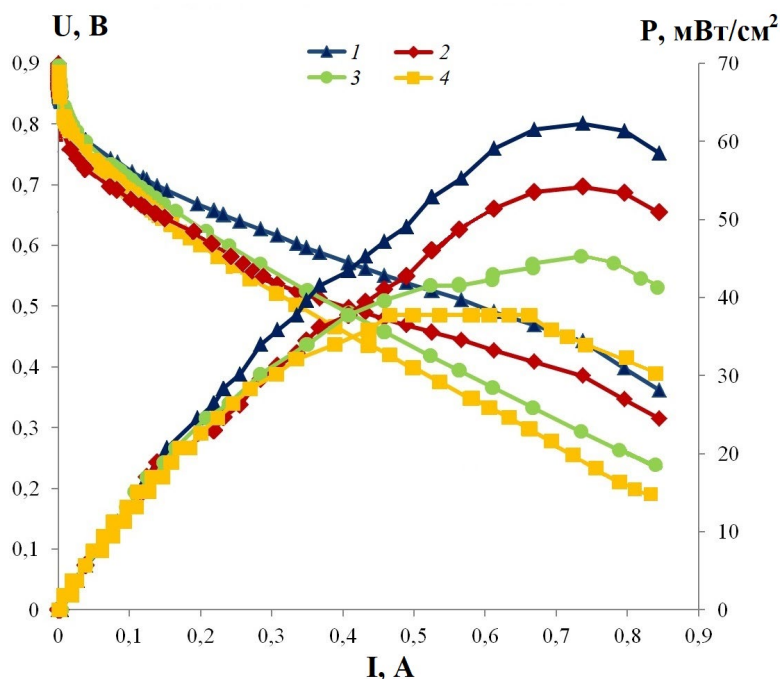


Рис. 4. Вольт- и ватт-амперные характеристики МЭБ: кривая 1 – ПН-Гр, кривая 2 – ПН-VXCR-72, кривая 3 – УТ-VXCR-72, кривая 4 – УТ-Гр.

Fig. 4. Volt- and watt-ampere characteristics of the MEB: curve 1 – PN-Gr, curve 2 – PN-VXCR-72, curve 3 – UT-VXCR-72, curve 4 – UT-Gr.

Как видно из рис. 4 максимальный ток составил 0,65-0,75 А в диапазоне рабочих напряжений 0,4-0,6 В. В результате проведенных испытаний модель №4 (кривая 4) показала наименьшие удельные характеристики (37,7 мВт/см²). Максимальное значение удельной мощности, которое составило 62,3 мВт/см², продемонстрировала ячейка, собранная с электродами на основе пористого никеля, модифицированного графеном (модель №2, кривая 1). Этот факт можно объяснить развитой системой пор структуры никеля. Кроме того, пористый никель, модифицированный техническим углеродом (кривая 2), превосходит по энергетическим параметрам аналогичные образцы на углеродной ткани (кривая 3). Модель 4, сформированная на основе электродов из углеродной ткани, модифицированных графеном, демонстрирует наихудшие энергетические характеристики (37,7

мВт/см²), по сравнению с аналогичными моделями №1, 2 (кривые 1 и 2) из-за деградации (отслоения) графеновой суспензии от поверхности матрицы-носителя. Методы модификации поверхностей носителей (пористого никеля и углеродной ткани) графеном и сажой были идентичными, однако в других образцах аналогичного эффекта не наблюдалось.

Разрядные характеристики макетов МЭБ ТЭ были исследованы в режиме постоянного тока (СС) при токе разряда 0,1 А в течение 30 минут (рис. 5). Образцы на ПН с графеном и углеродной сажой (кривые 1,2) продемонстрировали более высокие и стабильные параметры напряжения и тока. Для модели №4 (кривая 4) после 7 минут тестирования наблюдалось быстрое снижение напряжения в ячейке, что снова было вызвано быстрым разрушением электрода и отслоением частиц графена от

поверхности углеродного носителя. Из графиков видно, что образцы углеродной ткани, модифицированные углеродной сажей (кривая 3), более ста-

бильны, чем образцы, модифицированные графеном (кривая 4), благодаря лучшей адгезии VXCR-72 к поверхности носителя.

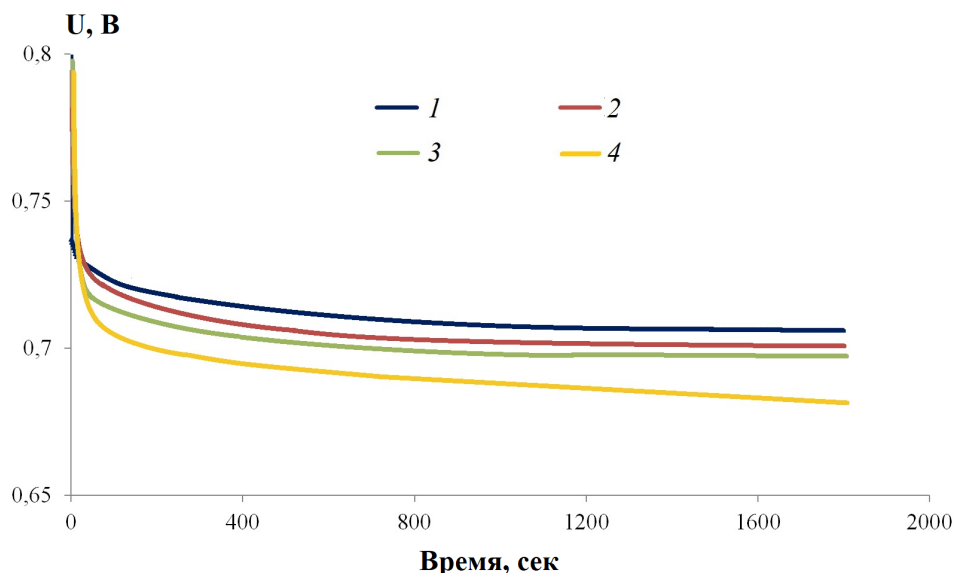


Рис. 5. Разрядные характеристики вариантов МЭБ (№ 1-№ 4): кривая 1 – ПН-Гр, кривая 2 – ПН-VXCR-72, кривая 3 – УТ-VXCR-72, кривая 4 – УТ-Гр.

Fig. 5. Discharge characteristics of the MEB variants (No. 1-No. 4): curve 1 – PN-Gr, curve 2 – PN-VXCR-72, curve 3 – UT-VXCR-72, curve 4 – UT-Gr.

Таким образом, в статье представлены новые экспериментальные данные по формированию электродных материалов для водородно-кислородных топливных элементов. Полученные экспериментальные данные находятся на достаточно высоком уровне по сравнению с предыдущими работами авторов [10,15]. Дальнейшая оптимизация технологии с использованием углеродных нанотрубок вместо углеродной сажи и наноразмерных платиновых катализаторов [16] позволит значительно повысить энергетические характеристики формируемых топливных элементов.

Выводы

В данной работе были созданы электродные материалы для водородно-кислородных топливных элементов на основе пористых никелевых и углеродно-тканевых подложек. Были сконструиро-

ваны четыре модели топливных ячеек и впервые изучены энергетические характеристики материалов на автоматизированной электронной нагрузке. Максимальные параметры удельной энергии ($62,3 \text{ мВт/см}^2$) и стабильности были зафиксированы для элементов, созданных на основе пористых никелевых электродов, модифицированных суспензией графена. Наименьшие энергетические характеристики ($37,7 \text{ мВт/см}^2$) наблюдались у образцов на углеродной ткани, модифицированной графеном. Таким образом, предложенный в работе метод исследования является быстрым и безопасным способом получения физико-химических параметров как топливных ячеек, так и электролизеров, а сформированные материалы могут стать основой для создания электродов с повышенными энергетическими характеристиками.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Государственного задания Российской Федерации №FSFZ-2023-0003

Список источников

1. Goel M., Sen G. Climate Action and Hydrogen Economy: Technologies Shaping the Energy Transition, Springer, Singapore, 2024. 309 p.
2. Kumar S., Agarwal A.K., Khandelwal B., Singh P. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition, Springer, Singapore, 2024. 392 p.
3. Xing Y. Modeling and Control Strategies for a Fuel Cell System, Springer Nature, Switzerland, 2023. 173 p.
4. Лебедева М.В., Антропов А.П., Рагуткин А.В., Зайцев Н.К., Яштулов Н.А. Разработка электродных наноматериалов для щелочного электролиза воды // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 5. С. 642 – 651.
5. Kumar S.S., Lim H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production // Energy Reports. V. 8. № 10. P. 13793 – 13813.
6. Park J. Kwon O., Oh H.-M., Jeong S., So Y., Park J., Jang H., Yang S., Baek J., Kim G., Park T. Optimizing design of catalyst layer structure with carbon-supported platinum weight ratio mixing method for proton exchange membrane fuel cells // Energy. 2024. Vol. 291. P. 130363.
7. Лебедева М.В., Крапивко А.Л., Дулина О.А., Ленский М.С., Яштулов Н.А. Энергоэффективные нанокомпозитные мембранно-электродные блоки для химических источников тока // Chemical Bulletin. 2023. Т. 6. № 2. С. 19 – 28.
8. Yashtulov N.A., Zaitcev N.K., Lebedeva M.V., Patrikeev L.N. New polymer-graphene nanocomposite electrodes with platinum-palladium nanoparticles for chemical power sources // Express Polymer Letters. 2019. Vol. 13. № 8. P. 739 – 748.
9. Лебедева М.В., Рагуткин А.В., Сидоров И.М., Яштулов Н.А. Снижение наводораживания материалов мембранно-электродных блоков генераторов водорода // Тонкие химические технологии. 2023. Т. 18. № 5. С. 461 – 470.
10. Лебедева М.В., Антропов А.П., Рагуткин А.В., Яштулов Н.А. Разработка прототипов мембранно-электродных блоков на основе нанокомпозитов с платиной для источников энергии // Computational Nanotechnology. 2019. Т. 6. № 4. С. 56 – 59.
11. Антропов А.П., Лебедева М.В., Рагуткин А.В., Зайцев Н.К., Яштулов Н.А. Энергоэффективность нанокомпозитных мембранно-электродных блоков генерации водорода // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. № 12. С. 73 – 78.
12. Krasnova A.O., Glebova N.V., Kastsova A.G., Pelageikina A.O., Redkov A.V., Tomkovich M.V., Nechitailov A.A. Stability of graphene/naion composite in pem fc electrodes // Nanomaterials. 2024. Vol. 14. № 11. P. 922.

13. Rey-Raap N., dos Santos-Gómez L., Arenillas A. Carbons for fuel cell energy generation // Carbon. 2024. V. 228. P. 11929.
14. Guterman V.E., Pustovaya L.E., Guterman A.V., Vysochina L.L. Borohydride synthesis of the Pt x -Ni/C electrocatalysts and investigation of their activity in the oxygen electroreduction reaction // Russian Journal of Electrochemistry. 2007. Vol. 43. № 9. P. 1091 – 1096.
15. Антропов А.П., Рагуткин А.В., Лебедева М.В., Яштулов Н.А. Нанокompозитные микро мощные альтернативные источники энергии для электронной техники // Теплоэнергетика. 2021. № 1. С. 21 – 29.
16. Lebedeva M.V., Antropov A.P., Golovacheva V.A., Erasov V.S., Yashtulov N.A. Metal-Polymer Functional Materials for Hydrogen-Oxygen Fuel Cells with Enhanced Performance // Applied Mechanics and Materials. 2023. Vol. 912. P. 101 – 106.

References

1. Goel M., Sen G. Climate Action and Hydrogen Economy: Technologies Shaping the Energy Transition, Springer, Singapore, 2024. 309 p.
2. Kumar S., Agarwal A.K., Khandelwal B., Singh P. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition, Springer, Singapore, 2024. 392 p.
3. Xing Y. Modeling and Control Strategies for a Fuel Cell System, Springer Nature, Switzerland, 2023. 173 p.
4. Lebedeva M.V., Antropov A.P., Ragutkin A.V., Zaitsev N.K., Yashtulov N.A. Development of electrode nanomaterials for alkaline electrolysis of water. Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2021. T. 55. No. 5. P. 642 – 651.
5. Kumar S.S., Lim H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy Reports. V. 8. No. 10. P. 13793 – 13813.
6. Park J. Kwon O., Oh H.-M., Jeong S., So Y., Park J., Jang H., Yang S., Baek J., Kim G., Park T. Optimizing design of catalyst layer structure with carbon-supported platinum weight ratio mixing method for proton exchange membrane fuel cells. Energy. 2024. Vol. 291. P. 130363.
7. Lebedeva M.V., Krapivko A.L., Dulina O.A., Lensky M.S., Yashtulov N.A. Energy-efficient nanocomposite membrane-electrode units for chemical power sources. Chemical Bulletin. 2023. Vol. 6. No. 2. P. 19 – 28.
8. Yashtulov N.A., Zaitcev N.K., Lebedeva M.V., Patrikeev L.N. New polymer-graphene nanocomposite electrodes with platinum-palladium nanoparticles for chemical power sources. Express Polymer Letters. 2019. Vol. 13. No. 8. P. 739 – 748.
9. Lebedeva M.V., Ragutkin A.V., Sidorov I.M., Yashtulov N.A. Reducing hydrogen absorption of membrane-electrode unit materials for hydrogen generators. Fine chemical technologies. 2023. Vol. 18. No. 5. P. 461 – 470.
10. Lebedeva M.V., Antropov A.P., Ragutkin A.V., Yashtulov N.A. Development of prototypes of membrane-electrode units based on platinum nanocomposites for energy sources. Computational Nanotechnology. 2019. Vol. 6. No. 4. P. 56 – 59.
11. Antropov A.P., Lebedeva M.V., Ragutkin A.V., Zaitsev N.K., Yashtulov N.A. Energy efficiency of nanocomposite membrane-electrode units for hydrogen generation. Bulletin of the Technological University. 2021. T. 24. No. 12. P. 73 – 78.

12. Krasnova A.O., Glebova N.V., Kastsova A.G., Pelageikina A.O., Redkov A.V., Tomkovich M.V., Nechitailov A.A. Stability of graphene/naфion composite in pem fc electrodes. Nanomaterials. 2024. Vol. 14. No. 11. P. 922.

13. Rey-Raap N., dos Santos-Gómez L., Arenillas A. Carbons for fuel cell energy generation. Carbon. 2024. V. 228. P. 11929. 14. Guterman V.E., Pustovaya L.E., Guterman A.V., Vysochina L.L. Borohydride synthesis of the Pt x -Ni/C electrocatalysts and investigation of their activity in the oxygen electroreduction reaction. Russian Journal of Electrochemistry. 2007. Vol. 43. No. 9. P. 1091 – 1096.

15. Antropov A.P., Ragutkin A.V., Lebedeva M.V., Yashtulov N.A. Nanocomposite micropower alternative energy sources for electronic equipment. Thermal Power Engineering. 2021. No. 1. P. 21 – 29.

16. Lebedeva M.V., Antropov A.P., Golovacheva V.A., Erasov V.S., Yashtulov N.A. Metal-Polymer Functional Materials for Hydrogen-Oxygen Fuel Cells with Enhanced Performance. Applied Mechanics and Materials. 2023. Vol. 912. P. 101 – 106.

Информация об авторах

Лебедева М.В. *, кандидат химических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, email: lebedevamv2030@yandex.ru

Головачева В.А., старший преподаватель, МИРЭА – Российский технологический университет, email: platina09@mail.ru

Копылова Н.А., ассистент, МИРЭА – Российский технологический университет, email: natasha-kopylova@mail.ru

Дулина О.А., кандидат химических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, email: doa1503991@yandex.ru

Бакеева И.В., кандидат химических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, email: bakeeva@mirea.ru

Яштулов Н.А., доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой, МИРЭА – Российский технологический университет, email: yashtulovna@mail.ru

Information about the authors

Lebedeva M.V. *, PhD in Chemistry, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, email: lebedevamv2030@yandex.ru

Golovacheva V.A., Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University, email: platina09@mail.ru

Kopylova N.A., Assistant, MIREA – Russian Technological University, email: natasha-kopylova@mail.ru

Dulina O.A., PhD in Chemistry, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, email: doa1503991@yandex.ru

Bakeeva I.V., PhD in Chemistry, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, email: bakeeva@mirea.ru

Yashtulov N.A., Doctor of Chemistry, Professor, Head of Department, MIREA – Russian Technological University, email: yashtulovna@mail.ru

© Лебедева М.В., Головачева В.А., Копылова Н.А., Дулина О.А., Бакеева И.В., Яштулов Н.А., 2024