



ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ/PHYSICAL CHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2> EDN: GBRTBV

ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И НИКЕЛЯ ДЛЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

Научная статья

Лебедева М.В.^{1,*}, Копылова Н.А.², Головачева В.А.³, Яштулов Н.А.⁴¹ORCID : 0000-0003-0637-1745;³ORCID : 0009-0005-7871-5465;⁴ORCID : 0000-0002-7709-4186;^{1, 2, 3, 4}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (lebedevamv221087[at]mail.ru)

Предложена: 19.06.2026; Принята: 24.08.2026; Опубликовано: 27.08.2026

Аннотация

В данной работе сформированы мембранно-электродные блоки с электродами на основе титана и никеля, легированные графеном. Структурные характеристики материалов были изучены с помощью метода растровой электронной микроскопии. Исследование энергетических характеристик проводилось на автоматизированной электронной нагрузке АКИП-1375/1Е со встроенным программным обеспечением. Оценена эффективность вклада металлических и углеродных составляющих в работу топливных ячеек. В результате проведенных испытаний было установлено, что максимальную удельную мощность (30,4 мВт/см²) и плотность тока (73,6 мА/см²) демонстрируют элементы, в которых на катоде был использован пористый титан, модифицированный графеном.

Ключевые слова: композитные электроды, пористый титан, анодированный титан, пористый никель, вольтамперные характеристики.

TITANIUM AND NICKEL-BASED ELECTRODE MATERIALS FOR HYDROGEN-OXYGEN CHEMICAL CELLS

Research article

Lebedeva M.B.^{1,*}, Kopilova N.A.², Golovacheva V.A.³, Yashtulov N.A.⁴¹ORCID : 0000-0003-0637-1745;³ORCID : 0009-0005-7871-5465;⁴ORCID : 0000-0002-7709-4186;^{1, 2, 3, 4}MIREA — Russian technological university, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (lebedevamv221087[at]mail.ru)

Suggested: 19.06.2026; Accepted: 24.08.2026; Published: 27.08.2026

Abstract

In this work, membrane-electrode assemblies with graphene-doped titanium and nickel electrodes had been formed. The structural characteristics of the materials were studied using scanning electron microscopy method. The energy characteristics were investigated by means of an automated electronic load, AKIP-1375/1E, with built-in software. The efficiency of the contribution of metal and carbon components to the operation of fuel cells had been estimated. The tests revealed that the elements with porous titanium modified with graphene exhibited the highest specific power (30,4 mW/cm²) and current density (73,6 mA/cm²).

Keywords: composite electrodes, porous titanium, anodized titanium, porous nickel, volt-ampere characteristics.

Введение

Топливные элементы с протонообменной мембраной (ТЭПОМ) стали многообещающим и перспективным решением для глобального перехода к устойчивым энергетическим технологиям [1], [2], [3]. По сравнению с другими топливными элементами, ТЭПОМ обладают исключительным потенциалом для применения в мобильных энергетических установках благодаря уникальному сочетанию высокой эффективности преобразования энергии, возможности быстрого запуска при низких температурах, нулевому уровню выбросов углекислого газа при эксплуатации и практически бесшумной работе [4], [5].

Для достижения высокой удельной мощности топливные элементы с протонообменной мембраной (ТЭПОМ) должны работать стабильно с высоким выходным напряжением при повышенной плотности тока [6], [7], [9], [10], что может быть обеспечено за счет эффективного массопереноса в пористых электродах [11], [12], [13], [14]. Обычные электроды для ТЭПОМ, особенно катодные, имеют ограниченную площадь контакта с катализатором и характеризуются низкой скоростью массопереноса из-за хаотичной структуры пор и извилистых путей переноса. Систематическая оптимизация компонентов и структуры электродов считается эффективной стратегией решения проблем, связанных с массопереносом.

В связи с этим, помимо твердой полимерной мембраны, являющейся ключевым компонентом мембранно-электродного блока (МЭБ) ТЭ, немаловажное значение уделяется материалам анода и катода. Во многих научных разработках последних лет предлагаются электроды с развитой пористой поверхностью, что позволяет газообразным

водороду и кислороду свободно проходить к местам реакции, а продуктам реакции — отводиться от химической ячейки. Это необходимо для поддержания непрерывности процесса преобразования химической энергии в электрическую [15].

Цель данной работы состояла в разработке мембранно-электродных блоков водородно-кислородных топливных элементов на основе пористых титана и никеля как чистых, так и допированных суспензией графена, и в получении вольт- и ватт-амперных характеристик в режиме постоянного сопротивления и при динамической нагрузке топливной ячейки.

Экспериментальная часть

Для формирования анода и катода ТЭ были использованы следующие варианты подложек: пористый титан (ПТ), анодированный титан (АТ), пористый никель (ПН) и углеродная бумага (УБ). Размер носителей составлял 25*25 мм.

Для получения электродов на основе анодированного титана была использована титановая фольга Gr2 (LTD Hangzhou King Titanium co., Китай) толщиной 0,1 мм. Предварительная подготовка поверхности включала в себя: шлифовку, обезжиривание образцов в ацетоне, химическое травление в 20% растворе азотной кислоты при комнатной температуре, промывку дистиллированной водой, сушку на воздухе при комнатной температуре и финальную очистку ацетоном. Травление осуществлялось в 0,3 М растворе серной кислоты в течение 30 минут при внешнем напряжении 70 В, для подачи которого использовался блок питания постоянного тока MP2002D (Maisheng, Китай). В качестве катода использовался титановый электрод площадью 19 см².

В качестве катодных материалов так же использовали пористый титан толщиной 0,6 мм (Hefei Titan Machinery Co., Ltd., Китай) и пористый никель толщиной 0,3 мм (ILS «Метох», РФ). Для модификации поверхности электродов был использован графеновый порошок (Гр) ("Особо чистые вещества", РФ) чистотой 99,6%. Для приготовления углеродных суспензий использовали водную дисперсию (10 мас. %) перфторированной мембраны Nafion® (Sigma Aldrich, США).

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). Вольт- и ватт-амперные характеристики (BAX) в статическом и динамическом режимах макетов водородно-кислородных ТЭ были получены на специализированной электронной нагрузке АКПИ-1375/1Е (Siglent-AKIP, РФ) с программным обеспечением EasySDL [6], [15].

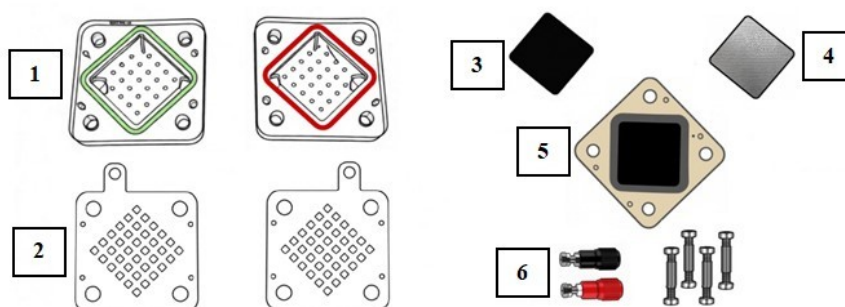


Рисунок 1 - Схематичные изображения составных частей МЭБ:

1 – прижимные пластины из прозрачного пластика с отверстиями; 2 – стальные биполярные пластины с выводами для подключения и вывода параметров напряжения и мощности и отверстиями, как и во внешних пластиковых пластинах; 3 – анод: углеродная ткань с нанесенной сажей VXC72R, которая является газодиффузионным слоем (ГДС); 4 – катод: металлический электрод на основе титана или никеля; 5 – полимерная мембрана на основе политетрафторэтилена (размеры 30*30 мм) с каталитическим слоем (КС) Pt(30%)/VXC72R, экранируемая тефлоновыми масками толщиной 0,4 мм каждая с отверстиями под винты; 6 – приборные клеммы и крепежные винты с внутренними шестигранниками и гайками

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.1>

С целью получения газообразных водорода и кислорода в работе использовался компактный электролизер с ТПЭ (Horizon, США), для работы которого использовался лабораторный источник питания (30 В) NPS3010W (Wanptek, Китай) с фиксированным напряжением во всех экспериментах 2,1 В. Общая схема установки для получения энергетических характеристик МЭБ представлена на рис. 2.

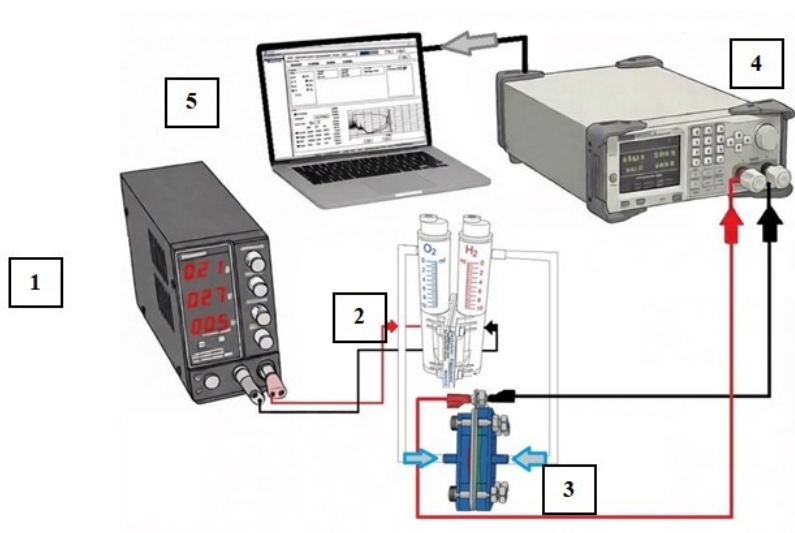


Рисунок 2 - Вид собранной экспериментальной установки для получения энергетических характеристик МЭБ:
1 – источник питания; 2 – электролизер; 3 – собранный макет МЭБ; 4 – электронную нагрузку; 5 – подключенную к ПК

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.2>

Результаты и обсуждение

Для оценки морфологии поверхности электродов было проведено исследование матриц и допирующих суспензий методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). На рис. 3 приведено РЭМ-изображение EDAX спектр титановой фольги, служившей исходным материалом для синтеза анодированных титановых пластин.

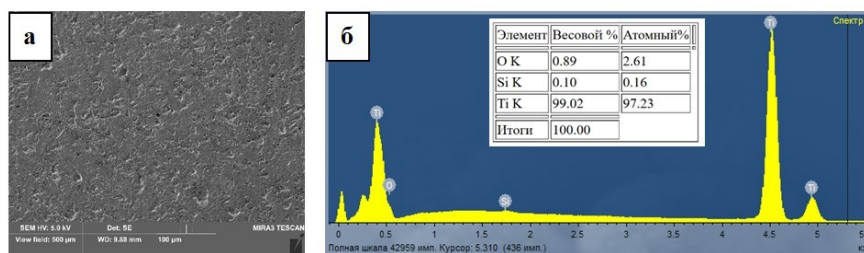
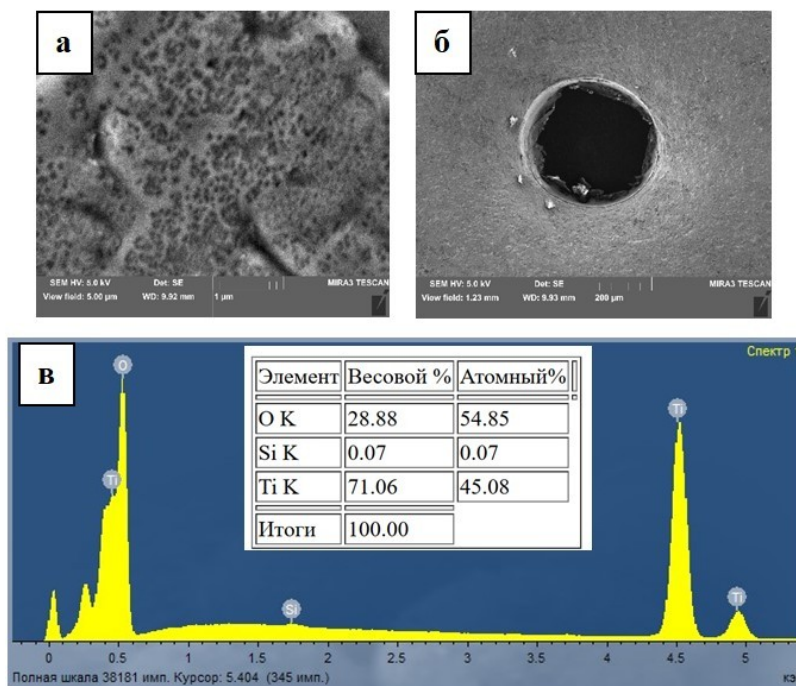


Рисунок 3 - РЭМ-изображение (а) и EDAX спектр Тi-фольги с таблицей распределения элементов (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.3>

После анодирования образцов (рис. 4а) на поверхности заметно образование нанотверсий размером 30–50 нм. Для прохождения газов через электрод в сплошной поверхности фольги механически были проделаны отверстия, повторяющие структуру отверстий в биполярных пластинах МЭБ ТЭ размером 400 мкм (рис. 4б). После процесса анодирования образцов Тi-фольги заметно уменьшение количества металлического титана по данным спектра EDAX и таблице распределения элементов (рис. 4в), что связано с особенностями как подготовки образцов — шлифовкой, травлением, так и процессом анодирования, который сопровождался растворением металла, изменением структуры поверхности и воздействием электролита и внешнего напряжения.

Рисунок 4 - РЭМ-изображения поверхности анодированного Тi (а), отверстия, сформированного механическим образом для прохождения газов (б) и EDAX спектр с таблицей распределения элементов (в)
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.4>



На рис. 5 представлены РЭМ-фотографии еще трех типов электродов, которые, помимо АТ, использовались при сборке МЭБ ТЭ — пористого титана (ПТ), пористого никеля (ПН) и углеродной бумаги (УБ).

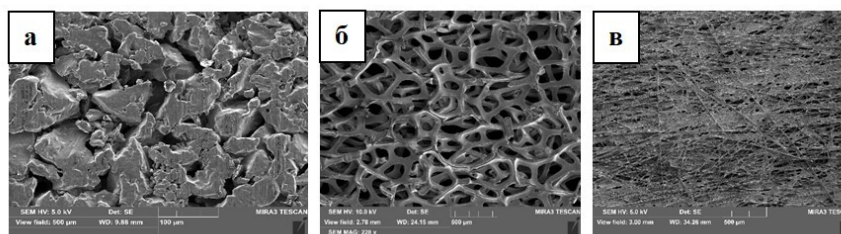


Рисунок 5 - РЭМ-изображения пористого титана (а), пористого никеля (б) и углеродной ткани (в)
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.5>

Поверхность пористого титана (рис. 5а) состоит из разной формы прессованных ячеек размером от 5 до 100 мкм. Пористый никель (рис. 5б) является функциональной металлической основой с развитой системой пор с широким распределением по размерам от 50 до 400 мкм. УБ представляет собой полотно из коротких рубленых углеродных волокон, хорошо проводящих газ на аноде.

На электроды на основе УБ была нанесена дисперсия сажи (рис. 6а), представляющая собой слой сферических и эллипсоидальных углеродных частиц размером от 30 до 100 мкм. Помимо исследований чистых металлических электродов на основе никеля и титана, с целью улучшения их свойств и повышения эффективности МЭБ металлические матрицы были пропитаны суспензией на основе графена со стороны, которая прилегает к мембране. В результате пропитки на поверхности образуются слоистые частицы размером от 3 до 40 мкм (рис. 6б).

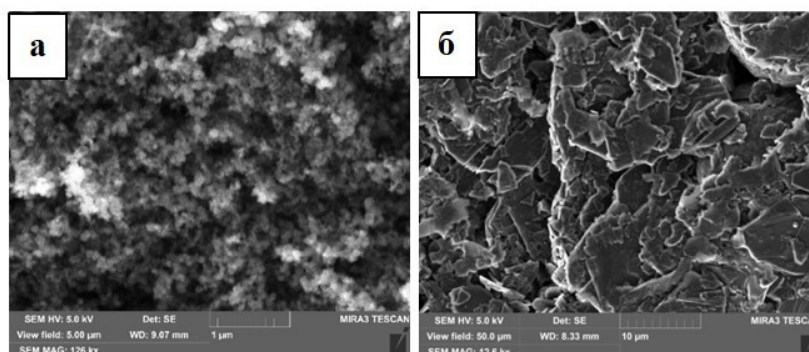


Рисунок 6 - РЭМ-изображения нанесенных покрытий:
а – суспензии сажи VXC72R; б – графена
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.6>

Для исследований ВАХ (рис. 7а) в режиме постоянного сопротивления (CR) МЭБ ТЭ было разработано 3 варианта моделей макетов:

1. Модель № 1: анод: УБ с сажей, катод: чистый пористый титан.
2. Модель № 2: анод: УБ с сажей, катод: чистый пористый никель.
3. Модель № 3: анод: УБ с сажей, катод: чистый анодированный титан.

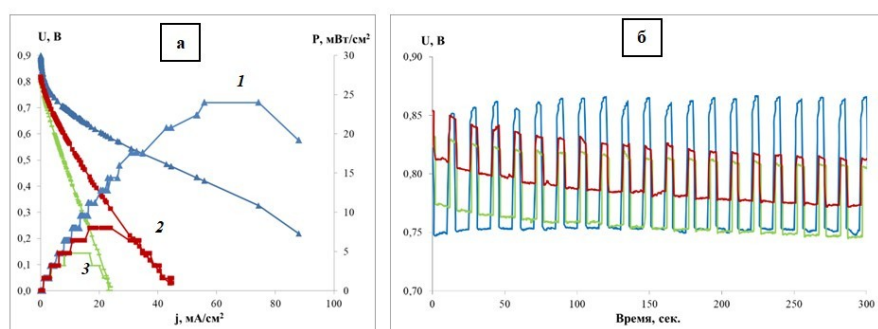


Рисунок 7 - Вольт- и ватт-амперные характеристики (а) и зависимости напряжения от времени (б) моделей МЭБ ТЭ:

1 – модель № 1; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.7>

Как видно из зависимостей (рис. 7а), электроды на основе чистого пористого титана демонстрируют высокие значения удельной мощности и плотности тока ($24,1 \text{ мВт/см}^2$ и $65,2 \text{ мА/см}^2$, соответственно). Электроды на пористом никеле (модель № 2) показали почти в 3 раза более низкие значения параметров — 8 мВт/см^2 и 22 мА/см^2 . Самые низкие характеристики проявила модель № 2 с анодированным титаном на катоде: удельная мощность $4,7 \text{ мВт/см}^2$ при плотности тока $12,8 \text{ мВт/см}^2$. В связи с тем, что нанотверстия в анодированном титане в результате процесса травления сформированы только на некоторой глубине — в среднем это $200\text{--}250 \text{ нм}$, поток газов через данный электрод осуществляется только за счет механически проделанных отверстий, чего, как следует по данным исследования, недостаточно для достижения высоких значений удельной энергии. Дальнейшая оптимизация процесса травления, возможно, позволит формировать сквозные нанотверстия и повысить эффективность данного типа электрода. В последующих испытаниях анодированный титан не использовался.

Все модели МЭБ были протестированы в динамическом непрерывном режиме нагрузки (рис. 7б). Динамический режим позволяет оценить стабильность напряжения (тока, сопротивления, мощности) и переходные процессы в МЭБ путём измерения их выходного напряжения при различных комбинациях значений сопротивления, продолжительности их протекания и скорости изменения во времени. Время измерения для всех образцов составило 5 минут. Верхний режим измерения сопротивления составил 9000 Ом , нижний — 100 Ом .

Несмотря на высокие параметры мощности и тока модель № 1 показывает довольно высокую просадку по напряжению при варьировании сопротивления — более $0,12 \text{ В}$, в отличие от пористого никеля, у которого данный параметр составляет $0,04 \text{ В}$ (рис. 7б), что, вероятно, связано с его более разветвленной пористой структурой, чем у титана. У анодированного титана изменение напряжения находится на втором месте и составляет $0,09 \text{ В}$.

Металлический катод в экспериментах был выбран в связи с тем, что на катоде протекает окислительно-восстановительная реакция с более замедленной и сложной кинетикой, чем реакция на аноде [12], [13], [14], [15]. Металлический катод позволяет преодолеть высокие кинетические барьеры, тогда как на аноде реакция проходит легко, в том числе на электроде из углеродной бумаги. Замена местами материала анода и катода может снизить параметры топливной ячейки почти в $1,5\text{--}2$ раза.

В следующих моделях МЭБ было решено полностью заменить материал анода (углеродную бумагу) чистым металлическим электродом того же состава, что и катод (рис. 8):

1. Модель № 4: пористый титан (анод и катод).

2. Модель № 5: пористый никель (анод и катод).

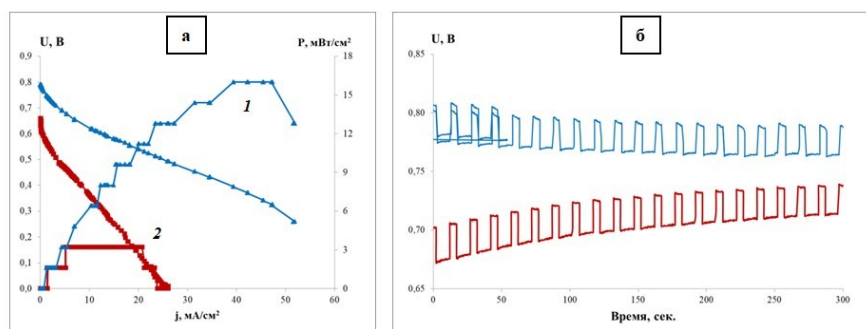


Рисунок 8 - Вольт- и ватт-амперные характеристики (а) и зависимости напряжения от времени (б) моделей МЭБ ТЭ:

1 – модель № 4; 2 – модель № 5

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.8>

Из рис. 8а видно, что в обеих моделях наблюдается сильное (почти в 1,5 раза) снижение энергетических характеристик по сравнению с моделями № 1 и № 3, что указывает на необходимость дальнейшего использования углеродного носителя на аноде вместо металлического. Однако, несмотря на вышесказанное, образцы демонстрируют хорошую стабильность при переменном сопротивлении (рис. 8б), что указывает на возможность длительного срока службы металлических электродов даже при пониженных значениях мощности и плотности тока.

Далее была разработана серия образцов, содержащая в своем составе углеродную бумагу с сажей на аноде, а на катод были помещены металлические матрицы на основе титана и никеля, допированные графеном. Содержание графена на металлических матрицах было одинаковым и составило 13 мг/см². Поскольку модель с анодированным титаном показала крайне низкие характеристики, в дальнейших опытах исследовали только матрицы на основе пористого титана и никеля:

1. Модель № 6; анод: УБ с сажей, катод: пористый титан с суспензией графена.
2. Модель № 7; анод: УБ с сажей, катод: пористый никель с суспензией графена.

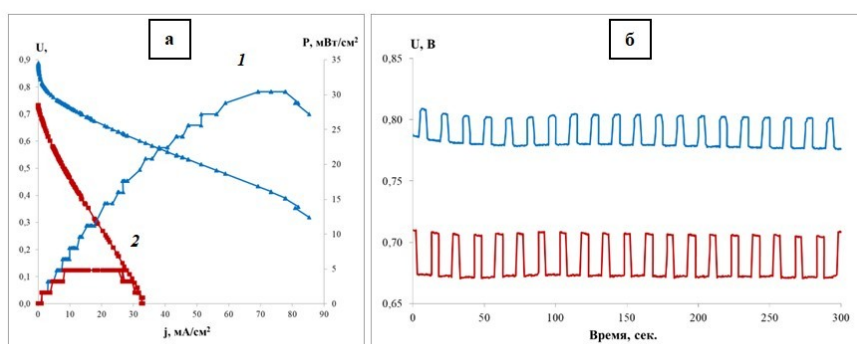


Рисунок 9 - Вольт- и ватт-амперные характеристики МЭБ ТЭ:

1 – модель № 6; 2 – модель № 7

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.9>

Образцы с пористым титаном показали значительное повышение удельной мощности и плотности тока (рис. 9а) по сравнению с чистым образцом (модель № 1). Электроды на пористом никеле так же улучшили свои энергопараметры по сравнению с немодифицированными аналогичными электродами (модель № 3) практически в 1,5 раза. Модели с пористым титаном показали лучшую стабильность по изменению напряжения ячейки (рис. 9б), что составило 0,03 В по сравнению с пористым никелем (0,04 В).

Нанесение суспензии графена позволило повысить эффективность моделей МЭБ по следующим причинам:

1) графен является материалом с очень высокой электропроводностью. Благодаря этому при нанесении его на электрод снижается сопротивление в МЭБ ТЭ, и ток в ячейке протекает быстрее, следовательно, повышается удельная мощность и эффективность;

2) графен обладает высокой площадью активной площади, что также повышает каталитические свойства электродного материала и повышает функциональные свойства МЭБ в целом.

Итоговые результаты по тестированию моделей МЭБ топливных ячеек приведены в таблице № 1. Данные по удельной мощности $P_{уд}$ и плотности тока j были получены по результатам вольт- и ватт-амперных характеристик, параметр изменения напряжения ΔU — из данных исследований динамического режима нагрузки по разнице между максимальным и минимальным напряжением ячейки при двух значениях сопротивлений (9000 и 100 Ом). В таблице также представлены данные по значению минимального напряжения (U_{min}). Этот параметр более полно описывает поведение модели, работающей в условиях снижения сопротивления (до 100 Ом).

Таблица 1 - Экспериментальные исследования образцов моделей МЭБ

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.2.10>

Серия опытов	№	Электроды	$P_{уд}$, мВт/см ²	j , mA/см ²	ΔU , В	U_{min} , В
I	1	УБ + сажа(А) / пор. Ti (К)	24,0	65,1	0,12	0,75
	2	УБ + сажа(А) / анодир. Ti (К)	4,8	12,8	0,09	0,74
	3	УБ + сажа(А) / пор. Ni (К)	8,0	21,9	0,04	0,77

Серия опытов	№	Электроды	$P_{уд}$, мВт/см ²	j , мА/см ²	ΔU , В	U_{min} , В
II	4	Пор. Ti (A) / пор. Ti (K)	16,0	45,6	0,05	0,76
	5	Пор. Ni (A) / пор. Ni (K)	3,2	11,76	0,07	0,67
III	6	УБ + сажа(A) / пор. Ti + Gr(K)	30,4	73,6	0,03	0,77
	7	УБ + сажа(A) / пор. Ni + Gr(K)	4,8	19,8	0,03	0,67

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что модификация поверхности материала катода такими наполнителями, как графен, позволяет повысить удельную мощность и плотность тока МЭБ ТЭ, а также улучшить стабильность в режиме динамической нагрузки. Электроды на основе пористого титана в ходе испытаний показали лучшие характеристики по сравнению с пористым никелем, что, возможно, связано с более плотной структурой первого. Дальнейшая оптимизация технологии позволит значительно повысить энергетические характеристики разрабатываемых топливных элементов.

Заключение

В данной работе были созданы электродные материалы для водородно-кислородных топливных элементов на основе титановых и никелевых матриц. Сконструировано и исследовано семь моделей топливных ячеек в режиме постоянного сопротивления и при динамической нагрузке. Максимальные параметры удельной энергии (30,4 мВт/см²) и стабильности были зафиксированы для элементов, созданных на основе пористых титановых электродов, модифицированных суспензией графена. Таким образом, полученные в работе данные могут стать основой для создания электродов с повышенными энергетическими характеристиками.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Lu H. Advances and challenges in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells with enhanced mass transport performance: from ordered structures to integrated structures / H. Lu, X. Wang, Z. Qu // *Energy Storage and Saving*. — 2026. — № 1. — P. 1–96.
2. Лебедева М.В. Автономные источники энергии: конструкции, материалы, физико-химические процессы / М.В. Лебедева, Н.А. Яштулов. — Москва: РУСАЙНС, 2025. — 100 с.
3. Krastev V.K. Optimal cathode design of a single high temperature PEM fuel cell: a computational study / V.K. Krastev, M. Baldelli, L. Bartolucci, F. Donato, M.K. Rouz, V. Mulone // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2025. — Vol. 142. — P. 80–89.
4. Sergi J.M. Quantification and characterization of water coverage in PEMFC gas channels using simultaneous anode and cathode visualization and image processing / J.M. Sergi, S.G. Kandlikar // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2011. — Vol. 36. — P. 12381–12392.
5. Hua Z. Advanced multi-recovery techniques for enhancing efficiency in hydrogen fuel cell-based energy systems: an empirical study / Z. Hua, J. Wu, J. Tang et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2025. — Vol. 341. — P. 120004.
6. Лебедева М.В. Разработка электродных материалов с наночастицами платиновых металлов - катализаторов для макетов химических ячеек / М.В. Лебедева, Н.А. Копылова, В.А. Головачева и др. // *Вестник Технологического университета*. — 2025. — № 8. — С. 10–13. — DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_10
7. Goel M. Climate Action and Hydrogen Economy: Technologies Shaping the Energy Transition / M. Goel, G. Sen. — Singapore: Springer, 2024. — 309 p.
8. Kumar S. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition / S. Kumar, A.K. Agarwal, B. Khandelwal et al. — Singapore: Springer, 2024. — 392 p.
9. Новацкий Г.П. Перспективы водородной энергетики. Топливные элементы / Г.П. Новацкий, Д.С. Уколов // *Наукосфера*. — 2024. — № 7. — С. 291–295.
10. Лебедева М.В. Энергоэффективные нанокompозитные мембранно-электродные блоки для химических источников тока / М.В. Лебедева, А.Л. Крапивко, О.А. Дулина и др. // *Химический бюллетень*. — 2023. — № 2. — С. 19–28.



11. Molaeimanesh G.R. Fuel cell modeling and simulation. From Microscale to Macroscale / G.R. Molaeimanesh, F. Torabi. — Amsterdam: Elsevier, 2023. — 502 p.
12. Wu W. Microstructure reconstruction and characterization of PEMFC electrodes / W. Wu, F. Jiang // International Journal of Hydrogen Energy. — 2014. — № 39. — P. 15894–15906. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.074
13. Yim S.-D. Fabrication of microstructure controlled cathode catalyst layers and their effect on water management in polymer electrolyte fuel cells / S.-D. Yim, Y.-J. Sohn, S.-H. Park et al. // Electrochimica Acta. — 2011. — № 56. — P. 9064–9073. — DOI: 10.1016/j.electacta.2011.05.123
14. Nabovati A. Effect of porosity heterogeneity on the permeability and tortuosity of gas diffusion layers in polymer electrolyte membrane fuel cells / A. Nabovati, J. Hinebaugh, A. Bazylak et al. // Journal of Power Sources. — 2014. — № 248. — P. 83–90. — DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.061
15. Лебедева М.В. Исследование химических источников тока на автоматизированной электронной нагрузке с контролируемыми параметрами / М.В. Лебедева, В.А. Головачева, Н.А. Копылова и др. // Химический бюллетень. — 2024. — № 4. — С. 25–36.
16. Yashtulov N.A. New polymer-graphene nanocomposite electrodes with platinum-palladium nanoparticles for chemical power sources / N.A. Yashtulov, N.K. Zaitcev, M.V. Lebedeva et al. // Express Polymer Letters. — 2019. — № 8. — P. 739–748. — DOI: 10.3144/expresspolymlett.2019.62

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lu H. Advances and challenges in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells with enhanced mass transport performance: from ordered structures to integrated structures / H. Lu, X. Wang, Z. Qu // Energy Storage and Saving. — 2026. — № 1. — P. 1–96.
2. Lebedeva M.V. Avtonomny'e istochniki e'nergii: konstrukcii, materialy', fiziko-ximicheskie processy' [Autonomous energy sources: structures, materials, physico-chemical processes] / M.V. Lebedeva, N.A. Yashtulov. — Moscow: RUSAJNS, 2025. — 100 p. [in Russian]
3. Krastev V.K. Optimal cathode design of a single high temperature PEM fuel cell: a computational study / V.K. Krastev, M. Baldelli, L. Bartolucci, F. Donato, M.K. Rouz, V. Mulone // International Journal of Hydrogen Energy. — 2025. — Vol. 142. — P. 80–89.
4. Sergi J.M. Quantification and characterization of water coverage in PEMFC gas channels using simultaneous anode and cathode visualization and image processing / J.M. Sergi, S.G. Kandlikar // International Journal of Hydrogen Energy. — 2011. — Vol. 36. — P. 12381–12392.
5. Hua Z. Advanced multi-recovery techniques for enhancing efficiency in hydrogen fuel cell-based energy systems: an empirical study / Z. Hua, J. Wu, J. Tang et al. // Energy Conversion and Management. — 2025. — Vol. 341. — P. 120004.
6. Lebedeva M.V. Razrabotka e'lektrodny'x materialov s nanochasticzami platinovy'x metallov - katalizatorov dlya maketov ximicheskix yacheek [Development of electrode materials with platinum metal nanoparticles, catalysts for chemical cell layouts] / M.V. Lebedeva, N.A. Kopy'lova, V.A. Golovacheva et al. // Bulletin of the Technological University. — 2025. — № 8. — P. 10–13. — DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_10 [in Russian]
7. Goel M. Climate Action and Hydrogen Economy: Technologies Shaping the Energy Transition / M. Goel, G. Sen. — Singapore: Springer, 2024. — 309 p.
8. Kumar S. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition / S. Kumar, A.K. Agarwal, B. Khandelwal et al. — Singapore: Springer, 2024. — 392 p.
9. Novaczkiy G.P. Perspektivy' vodorodnoj e'nergetiki. Toplivny'e e'lementy' [Prospects of hydrogen energy. Fuel cells] / G.P. Novaczkiy, D.S. Ukolov // Naukosfera. — 2024. — № 7. — P. 291–295. [in Russian]
10. Lebedeva M.V. E'nergoeffektivny'e nanokompozitny'e membranno-e'lektrodny'e bloki dlya ximicheskix istochnikov toka [Energy-efficient nanocomposite membrane-electrode blocks for chemical current sources] / M.V. Lebedeva, A.L. Krapivko, O.A. Dulina et al. // Chemical Bulletin. — 2023. — № 2. — P. 19–28. [in Russian]
11. Molaeimanesh G.R. Fuel cell modeling and simulation. From Microscale to Macroscale / G.R. Molaeimanesh, F. Torabi. — Amsterdam: Elsevier, 2023. — 502 p.
12. Wu W. Microstructure reconstruction and characterization of PEMFC electrodes / W. Wu, F. Jiang // International Journal of Hydrogen Energy. — 2014. — № 39. — P. 15894–15906. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.074
13. Yim S.-D. Fabrication of microstructure controlled cathode catalyst layers and their effect on water management in polymer electrolyte fuel cells / S.-D. Yim, Y.-J. Sohn, S.-H. Park et al. // Electrochimica Acta. — 2011. — № 56. — P. 9064–9073. — DOI: 10.1016/j.electacta.2011.05.123
14. Nabovati A. Effect of porosity heterogeneity on the permeability and tortuosity of gas diffusion layers in polymer electrolyte membrane fuel cells / A. Nabovati, J. Hinebaugh, A. Bazylak et al. // Journal of Power Sources. — 2014. — № 248. — P. 83–90. — DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.061
15. Lebedeva M.V. Issledovanie ximicheskix istochnikov toka na avtomatizirovannoj e'lektronnoj nagruzke s kontroliruemy'mi parametrami [Investigation of chemical current sources on an automated electronic load with controlled parameters] / M.V. Lebedeva, V.A. Golovacheva, N.A. Kopy'lova et al. // Chemical Bulletin. — 2024. — № 4. — P. 25–36. [in Russian]
16. Yashtulov N.A. New polymer-graphene nanocomposite electrodes with platinum-palladium nanoparticles for chemical power sources / N.A. Yashtulov, N.K. Zaitcev, M.V. Lebedeva et al. // Express Polymer Letters. — 2019. — № 8. — P. 739–748. — DOI: 10.3144/expresspolymlett.2019.62