

06

Исследование массотранспортных потерь структурно-модифицированных электродов воздушно-водородных топливных элементов методом вольт-амперной характеристики

© Н.В. Глебова, А.О. Краснова, А.А. Нечитайлов, А.А. Томасов, Н.К. Зеленина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: glebova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 августа 2020 г.

В окончательной редакции 13 ноября 2020 г.

Принято к публикации 14 ноября 2020 г.

Рассмотрены платино-углеродные электроды со смешанной проводимостью в составе мембранно-электродных блоков топливных элементов, содержащих структурно-модифицирующие добавки со структурными элементами различного типа: углеродные нанотрубки, имеющие вытянутые структурные элементы, и графеноподобные материалы с практически двумерными плоскостями. На основании данных о предельной плотности тока, полученной в потенциодинамическом и потенциостатическом режимах, исследованы массотранспортные потери переноса молекулярного кислорода в этих электродах. При использовании различных условий измерения построены барические зависимости плотности тока, выяснены лимитирующие факторы и механизмы переноса кислорода в исследованных структурах и роль вводимых модификаторов.

Ключевые слова: платино-углеродные электроды, массоперенос, мембранно-электродные блоки, Nafion.

DOI: 10.21883/JTF.2021.04.50626.241-20

Введение

Массоперенос играет существенную роль в функционировании электрохимического электрода топливного элемента, поскольку является одной из стадий электрохимического процесса, включающего подвод вещества к поверхности электрода, перенос вещества внутри пористого электрода к поверхности электрокатализатора, адсорбцию на поверхности электрокатализатора, реакцию разряда на поверхности и перенос зарядов. Каждый процесс связан с определенными энергетическими потерями и имеет свои кинетические характеристики, которые в свою очередь зависят от многих факторов. В конечном счете в соответствии с положениями электрохимической кинетики скорость общего многостадийного процесса лимитируется скоростью наиболее медленной его стадии. Таким образом, наиболее эффективно функционирующее устройство должно иметь близкие скорости отдельных процессов.

Сложность и многостадийность электрохимических процессов в мембранно-электродных блоках (МЭБ) обуславливает трудности в их раздельном изучении. В то же время, как хорошо известно, массотранспортные потери в пористых средах являются одними из существенных потерь, поэтому фундаментальные и прикладные исследования, направленные на их уменьшение — одно из актуальных направлений в области изучения топливных элементов.

Управление структурой пористой среды с целью снижения массотранспортных потерь — довольно распространенный прием в мировой практике [1–3]. Так,

в [1,2] посредством математического моделирования исследовано влияние структуры на транспортные свойства. В [1] исследовано диффузионное и электрическое сопротивление, механическая прочность, показано, что структура типа решетки характеризуется сочетанием высокой скорости переноса вещества при относительно низком электрическом сопротивлении, и при этом обладает механической устойчивостью и обеспечивает сплошность электропроводящей среды. В [2] предложена модель для характеристики нелинейной зависимости механического напряжения от деформации структуры углеродной бумаги, используемой в качестве газодиффузионного слоя, при сжимающей нагрузке. Показано, что модель может быть использована при моделировании структур, модифицированных добавками политетрафторэтилена. В экспериментальной работе [3] исследована возможность замены газодиффузионной среды из углеродного волокна на композит из углеродной сажи и политетрафторэтилена. Приведены исследования влияния пористой структуры на эффективность использования катализатора методом циклической вольтамперометрии. Показано, что монолитные слои с порами достигают на 27% большей плотности мощности по сравнению со стандартными.

Углеродные наноструктурированные материалы как модификаторы структуры электродов представляют особый интерес [4–6], поскольку обладают широким набором форм отдельных элементов (нанотрубки, графены, сажа и т.д.). Некоторые из них были успешно использованы нами для модифицирования пористой структуры [7]. В [4] использованы углеродные нано-

трубки (УНТ) в качестве добавки, увеличивающей пористость, и политетрафторэтилен для модулирования поверхности. Показано, что УНТ не только увеличивают пористость электрода, но и повышают эффективность использования платинового катализатора. В [5] обобщено использование УНТ в топливных элементах, показано, что благодаря УНТ можно снизить содержание благородных металлов в каталитическом слое и улучшить характеристики топливных элементов. В [6] представлен обзор использования наноструктур в технологии топливных элементов с особым акцентом на нанокатализаторы. Проанализирована роль наноструктур в снижении себестоимости топливных элементов. Отмечено негативное влияние некоторых наноматериалов на экологию.

Таким образом, исследование роли структурного фактора в эффективности топливных элементов является актуальным, и при этом анализ публикаций по этой тематике показывает недостаточную на данный момент разработанность этого научного направления.

Цель настоящей работы состоит в исследовании массотранспортных потерь переноса молекулярного кислорода в платино-углеродных электродах со смешанной проводимостью в составе МЭБ, содержащих структурно-модифицирующие добавки со структурными элементами различного типа: УНТ, имеющие вытянутые структурные элементы, и графеноподобные материалы с практически двумерными плоскостями.

1. Эксперимент

В настоящей работе посредством регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ) и тока короткого замыкания в потенциодинамическом и потенциостатическом режимах соответственно исследована предельная плотность тока различных МЭБ. В данном случае предельная плотность тока может зависеть от степени затопления пор водой, но в то же время образец должен быть полностью увлажнен для обеспечения протонной проводимости. Для обеспечения по возможности близких условий и для минимизации изменения свойств МЭБ в процессе измерений после его активации использовали динамический режим регистрации ВАХ при скорости поляризации 10 мВ/с. В таком режиме (время измерения 100 с) обычно не происходило значимого изменения состояния пористого электрода в процессе регистрации ВАХ, что следует из воспроизводимости ВАХ (в пределах 10% относительных) при прямом и обратном направлении поляризации. Влияние тока заряжения двойного электрического слоя при такой скорости поляризации несущественно. Численные оценки показывают, что при массе электрода 1 мг и удельной площади поверхности материала 250 м²/г, поляризационной емкости 20 мкФ/см² при скорости поляризации 10 мВ/с плотность тока заряжения двойного электрического слоя (ДЭС) составит 0.5 мА.

Другие факторы, влияющие на экспериментальные данные, выявляли путем сопоставления результатов, полученных при использовании методов ВАХ и тока короткого замыкания. Ряд измерений проводили при различных давлениях газов.

1.1. Используемые материалы

При изготовлении МЭБ использовали композитные электродные материалы, содержащие платинированную углеродную сажу, модифицирующие структурные добавки: многостенные УНТ и графеноподобный материал, протонпроводящий полимер типа Nafion.

1.1.1. Платинированная углеродная сажа (Pt/C)

Использовали коммерческий продукт под маркой E-TEK, содержащий 40% платины на углеродной саже типа Vulcan XC-72 [8]. Удельная площадь поверхности составляет 200 [9]–250 м²/г [10–13].

1.1.2. УНТ

Использовали многостенные УНТ типа Таунит МД (производство ООО „НаноТехЦентр“, Тамбов) [14].

Характерными структурными свойствами этих нанотрубок является большое отношение длины к диаметру, составляющее 670–2500 (рис. 1), и высокая пористость за счет пор больше 100 нм [15]. УНТ были очищены от примесей катализаторов, используемых при их получении, посредством кислотной обработки, промывки дистиллированной водой и сушки. В качестве кислоты использовали азотную кислоту, разбавленную водой в объемном отношении 1 : 1. Обработку вели при температуре около 100°C в течение ~ 15 min. Была выбрана азотная кислота, так как она наиболее полно растворяет примеси (установлено опытным путем).

Характеристики используемых УНТ представлены в табл. 1. Наличие в материале значительного количества кислорода связано с его присоединением в процессе кислотной обработки в окислительной среде.

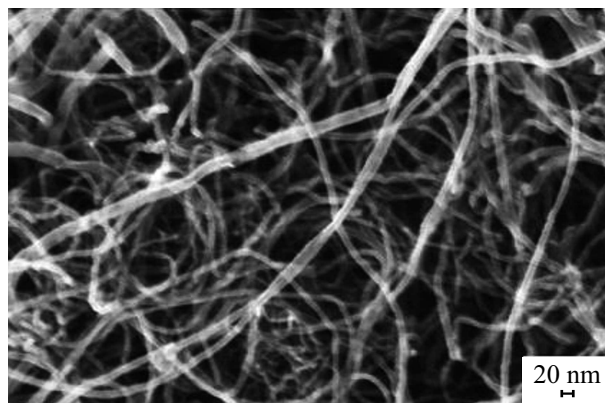
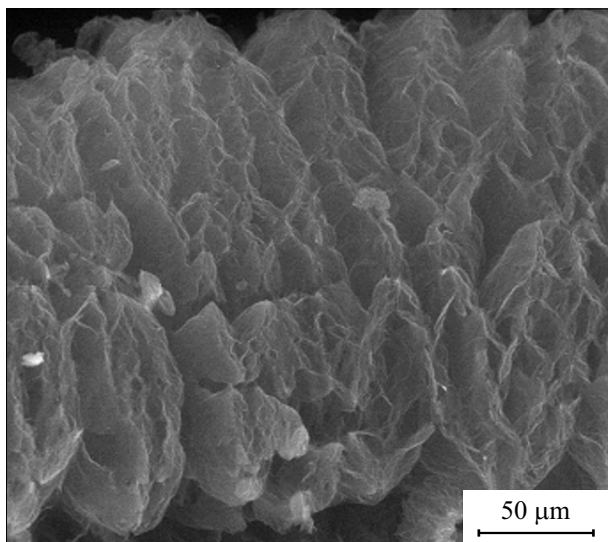


Рис. 1. СЭМ изображение многостенных УНТ типа Таунит МД.

Таблица 1. Структурные характеристики (данные производителя [14]) и элементный состав [15] УНТ типа Таунит МД

Параметр	Значение	Элемент	Содержание, mass.
Внешний диаметр, nm	8–30	С	96.1
Внутренний диаметр, nm	5–15	О	3.86
Длина, μm	≥ 20	–	–
Насыпная плотность, g/cm^3	0.025–0.06	–	–
Удельная поверхность, m^2/g	≥ 270	–	–

**Рис. 2.** Микрофотография исходного порошка терморасширенного графита.

1.1.3. Графеноподобный материал на основе терморасширенного графита

Терморасширенный графит (ТРГ) использовали в форме порошка, структура которого показана на рис. 2. В качестве ТРГ использовали углеродный материал [16]. Как видно из рисунка, материал имеет структуру сросшихся пластин. Исходный материал аттестовали по структурным характеристикам и элементному составу. Данные исследования исходного ТРГ методами адсорбционной спектроскопии (низкотемпературная адсорбция азота) и рентгеновской электронной спектроскопией приведены в табл. 2.

Исходя из анализа типа изотермы адсорбции азота (II тип) и типа петли гистерезиса (H3), следует, что

материал имеет щелевидные поры, ограниченные плоскопараллельными структурными элементами. Наличие примесей галогенов и кислорода связано с технологией ТРГ. Интервал содержаний того или иного элемента связан с анализом различных областей поверхности образца. В процессе приготовления электродного материала (включает ультразвуковую обработку, см. ниже), и электрохимического воздействия (активирование, функционирование МЭБ) происходило расщепление ТРГ на пластины [17].

1.1.4. Протонпроводящий полимер типа Nafion

Для введения иономера в электродный материал использовали коммерческий продукт Ion Power Inc. DUPONT DE2020 — водно-пропанольный раствор Nafion концентрации 20%.

Мембранно-электродные блоки изготавливали на протонпроводящей мембране типа МФ4-СК производства ОАО „Пластполимер“.

1.2. Образцы

Для исследования изготавливали образцы МЭБ. Исходным электродным материалом для этих образцов служили дисперсии твердых компонентов в водно-спиртовой среде соответствующего компонентного состава.

1.3. Приготовление дисперсии

Технологические операции приготовления дисперсии электродного материала включали две стадии: механическое и ультразвуковое диспергирование смеси точных навесок компонентов в смеси и-пропанол–вода. Объемное соотношение жидких составляющих и-пропанол–вода находилось в диапазоне 1 : 1–1 : 5. Отношение

Таблица 2. Структурные характеристики и элементный состав терморасширенного графита

Параметр	Значение	Элемент	Содержание, mass.
Насыпная плотность, g/cm^3	0.002	С	91.1–92.8
Удельная площадь поверхности (по БЭТ), m^2/g	143	I	2.62–3.18
–	–	O	3.01–1.81
–	–	Br	0.23–0.48

твердой фазы к жидкой в конечной дисперсии при этом находилось в диапазоне 1 : 40–1 : 80. Формирование части электродов проводили способом, предусматривающим предварительное коагулирование Nafion из его раствора в жидкой фазе с последующим введением в структуру электрода [15,18]. Для этого коммерческий раствор Nafion в заданной концентрации перед добавлением в дисперсию разбавляли водой в объемном отношении 1 : 1.

Механическое диспергирование выполняли на магнитной мешалке типа Milaform MM-5M со скоростью вращения якоря ~ 400 оборотов в минуту с изолированным в пластиковый кожух якорем до визуальной однородности (без видимых комочков) массы (~ 0.5 h). Последующее ультразвуковое диспергирование проводили в ультразвуковой ванне типа Branson 3510 в течение 40–100 h до получения однородной, не расслаивающейся в течение минуты, дисперсии.

1.4. Изготовление МЭБ

МЭБ были изготовлены путем нанесения однородной дисперсии компонентов непосредственно на протонпроводящую мембрану через маску из нержавеющей стали. Перед нанесением электродного материала мембрану выдерживали в 0.5 М серной кислоте в течение 15 min при температуре 70–80°C с последующей пятикратной промывкой водой. Электроды изготавливали путем нанесения дисперсии компонентов в смеси изопропанол-вода на протонпроводящую мембрану типа Nafion (марка МФ4-СК) толщиной 50 μm. Мембрану термостатировали при 85°C на плитке типа Ика С-MAGHP 7 с терморегулятором. Количество нанесенного материала контролировали гравиметрически.

Перед проведением электрохимических измерений МЭБ с целью протонирования Nafion выдерживали в 0.5 М серной кислоте в течение 15 min при температуре 70–80°C с последующей пятикратной промывкой водой.

1.5. Методика измерений

МЭБ предварительно активировали методом, описанным в [19]. При проведении электрохимических измерений МЭБ помещали в стандартную двухэлектродную электрохимическую ячейку (FC-05-02) [20]. ВАХ и ток короткого замыкания (КЗ) регистрировали с использованием потенциостата типа Р-150 (производство ООО „Элинс“, Черноголовка) в среде влажных (насыщенных парами воды) газов O₂/H₂. Годографы электрохимического импеданса регистрировали на приборе импедансметр Z500P + AX500PL (производство ООО „Элинс“, Черноголовка). Схема измерения представлена на рис. 3.

На катодное и анодное пространство подавали соответствующие насыщенные водой реакционные газы (кислород и водород), приведенные к необходимым условиям — температуре, давлению, потоку. Насыщение

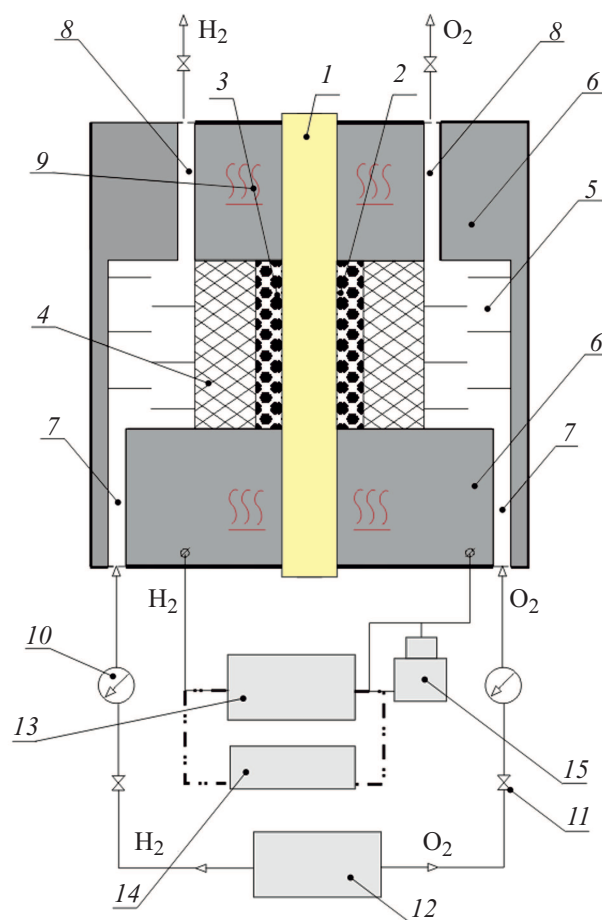


Рис. 3. Схема измерения электрохимических характеристик МЭБ: 1 — протонпроводящая мембрана, 2 — катод, 3 — анод, 4 — газодиффузионные слои, 5 — газоподводящие каналы, 6 — контактная (токосъемная) пластина, 7 — газоподводящие отверстия, 8 — газоотводящие отверстия, 9 — регулируемые нагреватели, 10 — газовые редукторы, 11 — газовые вентили, 12 — электролизер, 13 — потенциостат, 14 — импедансметр, 15 — управляющий компьютер.

водой проводили путем барботирования через дистиллированную воду при температуре эксперимента.

Измерения проводили в различных режимах:

- 1) регистрирование ВАХ в потенциодинамическом режиме;
- 2) регистрирование тока короткого замыкания в потенциостатическом режиме;
- 3) регистрирование годографа электрохимического импеданса при напряжениях, близких к напряжению разомкнутой цепи.

2. Вычисления

2.1. Вычисление пористости

Толщину электродов измеряли толщиномером с разрешением 0.5 μm в 10 точках слоя. За результирующее значение толщины принимали среднее арифметическое.

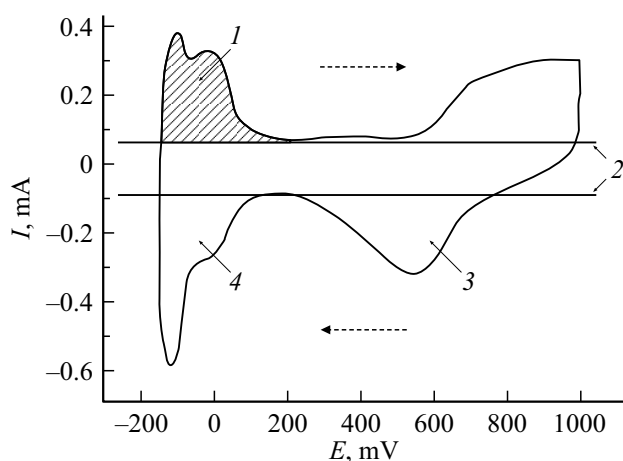


Рис. 4. Характерная циклическая вольтамперограмма: 1 — область десорбции водорода, 2 — горизонтальные линии, соответствующие току заряжения ДЭС, 3 — область десорбции кислорода, 4 — область адсорбции водорода. Пунктирными стрелками показано направление изменения потенциала.

Площадь электродов составляла 1 cm^2 . Пористость электродов вычисляли исходя из известного компонентного состава, толщины и площади по соотношению

$$P = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((\omega_i \cdot G) / d_i)}{V},$$

где P — пористость (объемная доля пор) электрода, V — объем электрода (в данном случае при длине и ширине электрода по 1 cm объем численно равен толщине), ω_i — массовая доля i -го компонента, G — масса электрода, d_i — плотность i -го компонента.

2.2. Коррекция электродного потенциала

Для коррекции потенциала использовали электрическое сопротивление измерительной цепи R , полученное по высокочастотной отсечке годографа электрохимического импеданса на оси реальных сопротивлений. По полученным данным делали поправку (вычисляли $E_{\text{correction}}$ — потенциал с учетом поправки) E для каждого текущего значения тока I для экспериментальных полярограмм по соотношению:

$$E_{\text{correction}} = E + I \cdot R.$$

2.3. Вычисление электрохимически активной площади пористого электрода

Использовали известное положение: поляризационная емкость $C_p = 16\text{--}20 \mu\text{F/cm}^2$ [21,22]. В соответствии с этим площадь S вычисляли исходя из скорости поляризации v и тока заряжения ДЭС — I , по соотношению

$$S = I / (v \cdot C_p).$$

2.4. Вычисление электрохимически активной площади поверхности платины

Электрохимически активную площадь поверхности платины S_{Pt} вычисляли по заряду, соответствующему электрохимической десорбции водорода в водородной области циклической вольтамперограммы. Для этого путем численного интегрирования вычисляли заряд, пошедший на десорбцию водорода (см. схему на рис. 4). Интегрировали область токов $I(1)$ в интервале потенциалов $E_1\text{--}E_2$, соответствующем десорбции водорода, ограниченную сверху кривой циклической вольтамперометрии (ЦВА-кривой) и снизу — горизонтальной линией (для исключения заряда, соответствующего зарядке двойного электрического слоя). Заряд, потраченный на десорбцию водорода, делили на коэффициент, соответствующий заряду водорода, десорбированному с единицы площади поверхности платины ($210 \mu\text{C/cm}^2$) [23].

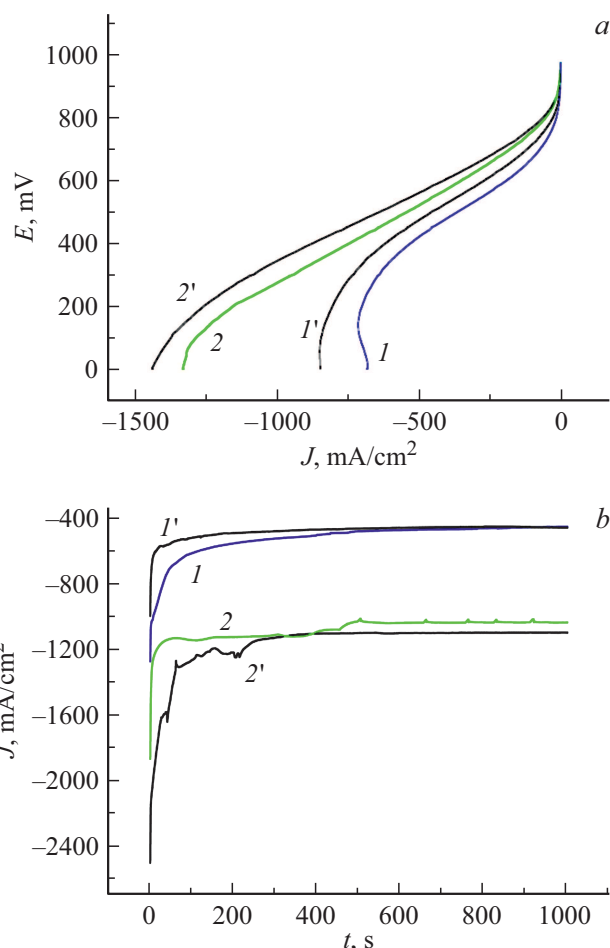


Рис. 5. Вольт-амперные (а), скорость поляризации 10 mV/s , и потенциостатические (б), режим КЗ, характеристики МЭБ образца Pt/C + УНТ Таунит МД + Nafion. I, I' — воздух/водород (водород/воздух); $2, 2'$ — кислород/водород (водород/кислород) соответственно, газы насыщены парами воды, температура $\sim 25^\circ\text{C}$.

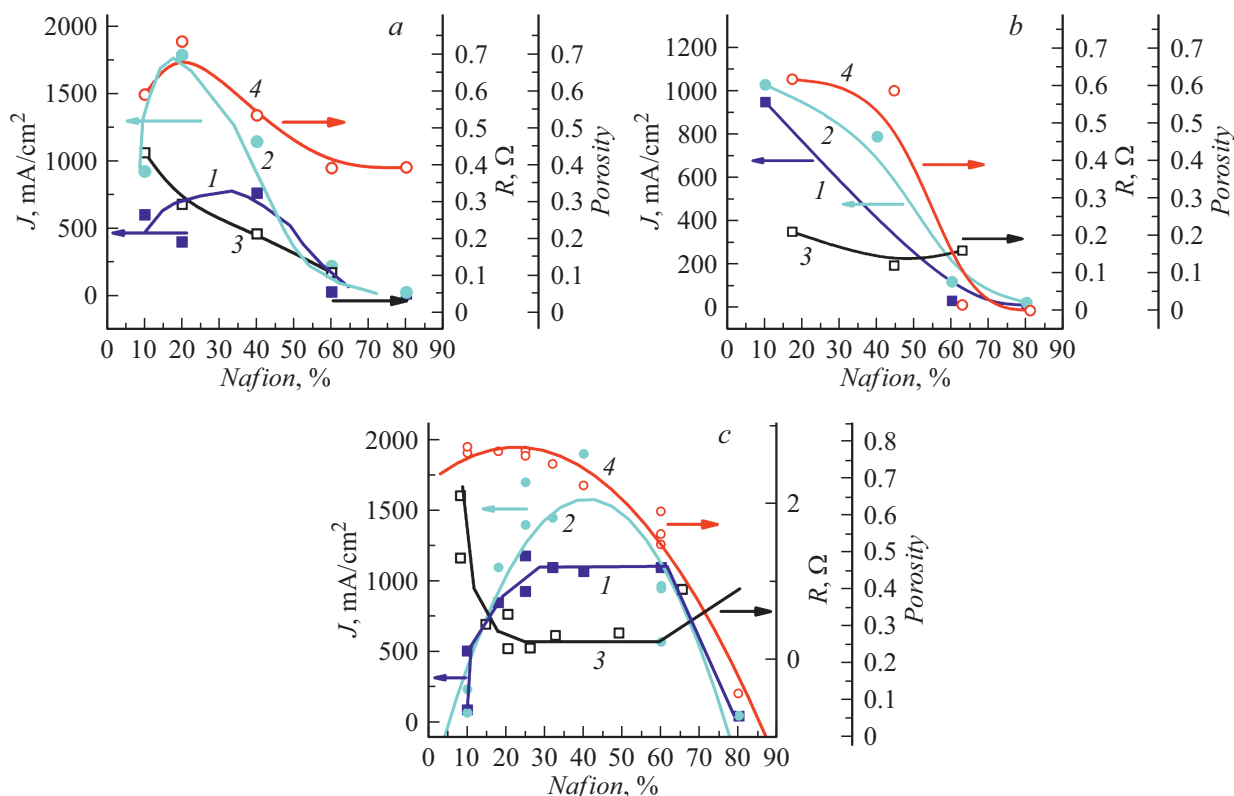


Рис. 6. Плотности предельных токов мембранно-электродных блоков в зависимости от содержания Nafion с электродами различного состава: *a* — E-TEK + Nafion; *b* — E-TEK + ТРГ + Nafion; *c* — E-TEK + Таунит МД + Nafion; 1 — $J_{shortcircuit}$ (потенциостатический режим), 2 — $J_{shortcircuit}$ (ВАХ), 3 — R_{ions} , катод, импеданс, 4 — пористость.

3. Результаты измерений

С целью выяснения влияния скорости поляризации на результаты измерения площади поверхности платины проводили измерения при различных скоростях поляризации в диапазоне 10–1000 мВ/с. При этом, по крайней мере при скорости от 30 до 100 мВ/с, измеряемая площадь поверхности имела постоянное значение в пределах 10% (относительных) для толщины слоя до $\sim 40 \mu\text{m}$.

На рис. 5 приведены характерные потенциодинамические (ВАХ) и потенциостатические характеристики МЭБ образца Pt/C+УНТ Таунит МД+Nafion.

Из рисунков видно, что величины предельных плотностей тока различаются как для различных газовых сред, так и для различных режимов регистрации этих зависимостей. В случае использования кислорода в качестве окислителя предельные плотности тока в 1.7 и 2.4 раза больше, чем в случае воздуха для режимов ВАХ и потенциостатического соответственно. Различие в предельных плотностях тока для кислорода и воздуха — хорошо известное явление, связанное с различной концентрацией кислорода. Различие предельных плотностей тока для различных режимов измерения можно объяснить тем, что в случае потенциостатического режима в большей степени происходит затопление пор водой.

Действительно, из рис. 5, *b* видно, что стационарное состояние устанавливается в первые десятки секунд. В дальнейшем происходит стабилизация плотности тока.

На рис. 6 представлены зависимости предельной плотности тока, ионного сопротивления катода и пористости от содержания Nafion для МЭБ с электродами различного состава. При этом приведены данные для предельной плотности тока, измеренной в режиме ВАХ в потенциостатическом режиме.

Общим для всех структур является то, что плотности тока, измеренные в потенциостатическом режиме, меньше соответствующих плотностей тока, измеренных в потенциодинамическом режиме для каждого образца. Это, как сказано выше, связано с различной степенью заполнения пор водой.

Из рисунков следует, что для образцов, не содержащих добавок (только E-TEK и Nafion), и для образцов, содержащих добавку ТРГ (рис. 6, *a, b*), кривые плотностей тока по существу симбатны кривым пористости и в меньшей степени коррелируют с кривыми сопротивления, тогда как для образцов с УНТ (рис. 6, *c*) хорошо прослеживается корреляция с сопротивлением. Последнее обстоятельство можно объяснить особенностями структуры электродов, содержащих УНТ [7].

В таких электродах Nafion пространственно сильно рассогласован с платиной. Это приводит к относительно

Таблица 3. Зависимость плотности тока короткого замыкания от давления

Состав	GPt, mg	SPt (на электродах), cm ²	Пористость электрода, %	J = A + B * P		Коэффициент корреляции R
				A, mA/cm ²	B, mA/(cm ² · atm)	
Pt/C + нескоагулированный 20% Nafion	0.1/0.09	45.3/47.9	50.5	988	49.2	0.46571
Pt/C + 10% Nafion	0.08/0.1	15.2/37.0	62.3	539	107	0.87425
Pt/C + 80% Nafion	0.1/0.1	31.6/22.6	39.0	12.4	4.11	0.97201
Pt/C + 45% ТРГ + 10% Nafion	0.1/0.06	33.0/37.4	61.7	991.2	195.9	0.99431
Pt/C + 20% ТРГ + 60% Nafion	0.19/0.1	16.6/11.0	10.4	110	26.8	0.86413
Pt/C + 34% УНТ Таунит МД + 32% Nafion	0.17/0.12	109/121	73.8	1470	33.8	0.5239

Примечание. Условия: влажные водород/кислород, $T = 22-25^{\circ}\text{C}$, скорость поляризации 10 мВ/с.

более высокому сопротивлению переносу протонов и, наоборот, к уменьшению эффективного диффузионного сопротивления переносу молекулярного кислорода к поверхности платины. Таким образом, если в случае электродов без добавок и с добавкой ТРГ плотность тока лимитируется пористостью, то в случае электродов с УНТ лимитирующим фактором становится ионное сопротивление, имеющее относительно небольшую величину. Такая зависимость предпочтительна для рабочих режимов топливных элементов, так как в большинстве случаев их работоспособность ограничивает не протонное, а газотранспортное диффузионное сопротивление.

На рис. 7 показаны зависимости предельного тока, измеренного методом ВАХ, от давления для образцов различного состава.

Анализ экспериментальных зависимостей (рис. 7) показывает, что точки хорошо аппроксимируются прямыми с различным положительным наклоном. Это свидетельствует о протекании диффузии кислорода к поверхности платины не в свободномолекулярном режиме (см. выше). Поскольку плотность тока все же зависит от давления и увеличивается с его возрастанием в то время как ряд образцов имеет поры размером, превышающим длину свободного пробега молекулы кислорода в газе [7], можно утверждать, что в диффузию кислорода существенный вклад вносит диффузия через пленку Nafion. В табл. 3 приведены характеристики исследованных образцов и численные значения коэффициентов в выражениях прямых, описывающих зависимости плотности предельного тока от давления.

Наибольшие значения плотности тока, как следует из рис. 7 и табл. 3, характерны для образцов с УНТ, что согласуется с представлениями об особенностях структурообразования (см. выше). Для образцов с УНТ наблюдается наиболее широкий интервал содержаний Nafion (25–60%), в котором предельная плотность тока имеет высокое значение на уровне более 1000 мА/см² как для потенциодинамического, так и для потенциостатического режимов. Для образцов без добавок плотность предельного тока при потенциостатическом режиме не превышает 760 мА/см², а для потенциодинамического режима интервал, в котором образцы демонстриру-

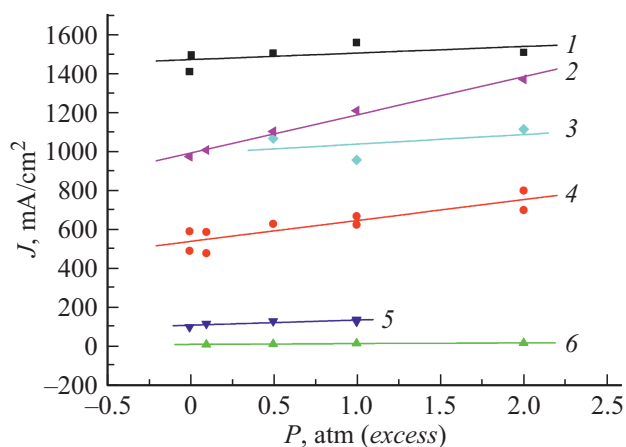


Рис. 7. Барические зависимости плотности тока КЗ МЭБ с электродами различного состава: 1 — Pt/C + 34% УНТ Таунит МД + 32% Nafion, 2 — Pt/C + 45% ТРГ + 10% Nafion, 3 — Pt/C + 20% Nafion, 4 — Pt/C + 10% Nafion, 5 — Pt/C + 20% ТРГ + 60% Nafion, 6 — Pt/C + 80% Nafion. Раствор Nafion во всех образцах, кроме № 3, предварительно скоагулирован.

ют плотность предельного тока выше 1000 мА/см², уже: 10–40% Nafion. Это свидетельствует о большей чувствительности электродов традиционного состава к затоплению водой. Образцы с ТРГ демонстрируют самые низкие значения плотностей предельного тока, не превышающие 1000 мА/см², на всем интервале составов. При этом плотности тока, измеренные в различных режимах, у них наиболее близкие.

4. Обсуждение результатов экспериментов

1. Для всех образцов предельная плотность тока в случае потенциостатического режима меньше, чем для потенциодинамического режима, при этом зависимости плотности тока от состава симбатны; это объясняется большим заполнением пор водой в последнем случае.

2. Зависимости предельной плотности тока от содержания Nafion для традиционных электродов и электро-

дов, модифицированных ТРГ, симбатны кривой пористости, в то время как для электродов, модифицированных УНТ, плотность предельного тока лимитирована ионным сопротивлением; это связано с особенностями структуры электродов с УНТ, где Nafion и платина рассогласованы в пространстве, в результате этого диффузионное сопротивление переносу молекулярного кислорода к поверхности платины перестает лимитировать общий электрохимический процесс, а ионное сопротивление увеличено.

3. Барические зависимости предельного тока для всех электродов имеют положительную производную, что свидетельствует о наличии лимитирующей стадии процесса переноса молекулярного кислорода к поверхности платины через пленку Nafion.

Выводы и рекомендации

МЭБ с электродами, модифицированными УНТ, обеспечивают самые высокие плотности предельных токов в широком интервале составов по сравнению с другими образцами.

Использование МЭБ такой структуры позволит обеспечить эффективную (высокий КПД, большая удельная мощность и пр.) работу топливных элементов в широком диапазоне условий их применения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Niblett, V. Niasar, S. Holmes. *J. Electrochem. Society*, **167** (1), 013520 (2020). DOI: 10.1149/2.0202001JES
- [2] Sh. Shi, X. Guo, B. Chen, Z. Sun. *J. Engineer. Fibers and Fabrics*, **14**, 1 (2019). DOI: 10.1177/1558925019896438
- [3] S. Kattamanchi, K. Palakurthi, P. Haridoss. *Energy Technol.*, **8**, 2000119 (2020). DOI: 10.1002/ente.202000119
- [4] B. Chi, Y.K. Ye, X.Y. Lu, S.J. Jiang, L. Du, J.H. Zeng, J.W. Ren, S.J. Liao. *J. Power Sources*, **443**, 227284 (2019). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227284
- [5] Ch. Luo, H. Xie, Q. Wang, G. Luo, Ch. Liu. *Nanostructured Carbon Mater.*, **2015**, 1(2015). DOI: 10.1155/2015/560392
- [6] R. Włodarczyk. *Mater. Sci. Applicat.*, **10**, 643 (2019). DOI: 10.4236/msa.2019.1010046
- [7] А.А. Нечитайлов, Н.В. Глебова, А.О. Краснова. *ЖСХ*, **60** (9), 1567 (2019). DOI: 10.26902/JSC_id46206 [А.А. Nechitailov, N.V. Glebova, A.O. Krasnova. *J. Structur. Chem.*, **60** (9), 1507 (2019). DOI: 10.1134/S0022476619090166]
- [8] Электронный ресурс. Режим доступа: URL: <https://www.fuelcellstore.com/spec-sheets/vulcan-xc72-spec-sheet.pdf>
- [9] Н.В. Глебова, А.А. Нечитайлов. Перспективные материалы, спец. выпуск „Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества“, **9**, 71 (2010).
- [10] M. Uchida, Y. Aoyama, M. Tanabe, N. Yanagihara, N. Eda, A. Ohta. *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 2572 (1995)
- [11] J. McBreen, H. Olender, S. Srinivasan, K. Kordesch. *J. Appl. Electrochem.*, **11**, 787 (1981)
- [12] D. Pantea, H. Darmstadt, S. Kaliaguine, L. Summchen, C. Roy. *Carbon*, **39**, 1147 (2001). DOI: 10.1016/S0008-6223(00)00239-6
- [13] E. Antolini. *Appl. Catalys. B: Environmental*, **88**, 1 (2009). DOI: 10.1016/j.apcatb.2008.09.030
- [14] Электронный ресурс. Режим доступа: URL: <http://www.nanotc.ru/productions/87-cnm-taunit>
- [15] А.О. Краснова, Н.В. Глебова, А.А. Нечитайлов. *ЖПХ*, **89** (6), 756 (2016). DOI: 10.1134/S1070427216060112 [А.О. Krasnova, N.V. Glebova, A.A. Nechitailov. *Rus. J. Appl. Chem.*, **89** (6), 916 (2016). DOI: 10.1134/S1070427216060112]
- [16] В.И. Мазин, Е.В. Мазин. *Способ получения пористого углеродного материала на основе высокорасщепленного графита*. Патент РФ № 2581382. Приоритет от 22.04.2014. Опубликовано 20.04.2016 в Бюл. № 11.
- [17] Н.В. Глебова, А.О. Краснова, А.А. Нечитайлов. *ЖПХ*, **91** (8), 1111 (2018). DOI: 10.1134/S1070427218080037 [N.V. Glebova, A.O. Krasnova, A.A. Nechitailov. *Rus. J. Appl. Chem.*, **91** (8), 1262 (2018). DOI: 10.1134/S1070427218080037]
- [18] S. Litster, G. McLean. *J. Power Sources*, **130**, 61 (2004). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2003.12.055
- [19] Д.А. Андроников, Н.К. Зеленина, Е.Е. Тарукова, А.А. Томасов. *Способ активации мембранно-электродного блока*. Патент РФ № 2487442. Приоритет от 28.02.2012. Опубликовано 10.07.2013 в Бюл. № 19.
- [20] Электронный ресурс. Режим доступа: URL: <http://fuelcell.com/product/fc-05-02/>
- [21] F. Beck, M. Dolata, E. Grivei, N. Probst. *J. Appl. Electrochem.*, **31**, 845 (2001).
- [22] В.Л. Хейфец, Д.К. Авдеев, Л.С. Рейшахрит. *Практикум по теоретической электрохимии*. (Изд-во Ленинградского ун-та, Л., 1954), с. 50.
- [23] J. Bett, K. Kinoshita, K. Routsis, P. Stonehart. *J. Catalys.*, **29** (1), 160 (1973). DOI: 10.1016/0021-9517(73)90214-5